



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MESTRADO NACIONAL
PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 20

NIVALDO BERTOLINI

UMA ABORDAGEM DA CURVATURA ESPAÇO-TEMPO
DA TEORIA DA RELATIVIDADE POR MEIO DE QUADRINHOS

Maringá - PR
Agosto, 2023

NIVALDO BERTOLINI

**UMA ABORDAGEM DA CURVATURA ESPAÇO-TEMPO
DA TEORIA DA RELATIVIDADE POR MEIO DE QUADRINHOS**

Dissertação apresentada ao Polo 20 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Estadual de Maringá como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física no Ensino Médio.

Orientador: Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira
Coorientadora: Profa. Dra. Hatsumi Mukai

Maringá
2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

B546a

Bertolini, Nivaldo

Uma abordagem da curvatura espaço-tempo da teoria da relatividade por meio de quadrinhos / Nivaldo Bertolini. -- Maringá, PR, 2024.
261 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira.

Coorientadora: Profa. Dra. Hatsumi Mukai.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Física, Programa em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), 2024.

1. Teoria da relatividade. 2. Deformação do espaço-tempo. 3. Quadrinhos e educação. 4. Aprendizagem significativa. 5. Sequência didática. I. Oliveira, Breno Ferraz de , orient. II. Mukai, Hatsumi, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Exatas. Departamento de Física. Programa em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF). IV. Título.

CDD 23.ed.

NIVALDO BERTOLINI

**UMA ABORDAGEM DA CURVATURA ESPAÇO-TEMPO
DA TEORIA DA RELATIVIDADE POR MEIO DE QUADRINHOS**

Dissertação apresentada ao Polo 20 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Estadual de Maringá como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física no Ensino Médio.

Defesa ocorrida em 31 de agosto de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira (Orientador)
DFI/UEM – Maringá - PR

Profa. Dra. Hatsumi Mukai (Coorientadora)
DFI/UEM - Maringá - PR

Prof. Dr. Rodolfo Teixeira de Souza (Membro externo)
UTFPR – Apucarana - PR

Prof. Dr. Miguel Jorge Barnabé Ferreira (Membro interno)
DMA/UEM - Maringá - PR

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe Nair, que mesmo doente nas limitações da idade e da doença encontrou forças para me animar e incentivar. A minha esposa Patrícia, companheira nos momentos de dificuldades e apertos, sempre acreditando e me fortalecendo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Breno Ferraz de Oliveira por aceitar participar deste trabalho contribuindo na orientação, nas palavras amigas e de ânimo, por compartilhar o conhecimento e as sugestões de ideias.

À coorientadora, professora Dra. Hatsumi Mukai por contribuir, não apenas nas aulas de Estágio, mas com conselhos, ideias, sugestões e por insistir em mim, incentivando-me e fazendo que eu acreditasse que seria possível, mesmo quando nem eu acreditava.

Aos professores Dr. Rodolfo Teixeira de Souza e Dr. Miguel Jorge Barnabé Ferreira, assim como os seus suplentes professores Dr. Oscar Rodrigues dos Santos e Dr. Paulo Ricardo Garcia Fernandes, que prontamente aceitaram ser participantes da banca.

A todos os professores do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF/Polo 20 UEM – que colaboraram direta e/ou indiretamente em minha formação acadêmica, mesmo com os desafios das aulas remotas durante o tempo da pandemia da Covid-19. Obrigado e parabéns pelo empenho e dedicação.

A Deus pelo dom da vida.

A todos meus familiares, em especial minha à esposa Patrícia e minha mãe Nair, pela força e apoio em meus estudos, não deixando que eu desanimasse quando as dificuldades surgiam.

Aos colegas de turma, pelo companheirismo, pelas trocas de ideias, pelas contribuições e pelos momentos de descontração, mesmo que virtuais.

À Sociedade Brasileira de Física (SBF), que oportunizou a oferta deste Mestrado na UEM – Universidade Estadual de Maringá (Polo 20).

À Universidade Estadual de Maringá, pela defesa da Universidade pública, gratuita e de qualidade para a sociedade, como este programa de mestrado.

Agradeço a toda equipe do Instituto Lins de Vasconcellos, por abrirem as portas da instituição para tornar possível a aplicação do Produto Educacional, apoiando em tudo que foi possível.

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

“Em vez de objetos de arte, pinturas, esculturas ou música, Einstein nos deixou ideias e conceitos científicos. Esses foram o legado que nos transmitiu e ignorá-los porque nos parecem complexos seria o mesmo que ignorar uma pintura de Michelangelo ou um concerto de Mozart”.

Richard Brennan.

RESUMO

UMA ABORDAGEM DA CURVATURA ESPAÇO-TEMPO DA TEORIA DA RELATIVIDADE POR MEIO DE QUADRINHOS

O presente trabalho consiste em uma pesquisa bibliográfica visando a produção de um Produto Educacional com proposta metodológica para o ensino de tópicos da Teoria da Relatividade Restrita e Geral de Albert Einstein com alunos do ensino médio, em especial, do 3º ano. A partir de uma história em quadrinhos, elaborou-se o roteiro de uma Sequência Didática, utilizando a Teoria da Aprendizagem Significativa, de David Ausubel, como referencial teórico da psicologia da aprendizagem. O Produto Educacional foi implementado em um instituto não governamental que atende crianças e adolescentes em contraturno escolar, na cidade de Maringá, Paraná. Levou-se em consideração a legislação nacional, em especial a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) de 2018, assim como o Referencial Curricular para o Ensino Médio do Paraná (2021), no âmbito estadual. Pensado em atender alunos da rede pública do estado, a Sequência Didática, estruturada conforme proposto por Antoni Zabala, foi organizada em 7 unidades didáticas, previstas para 7 aulas e mais uma aula para *feedback* aos alunos, em formato de oficina pedagógica. Considerou-se esse número de aulas para que, não se comprometa os demais conteúdos de física a serem tratados durante o ano letivo, ao mesmo tempo que possibilite ter um panorama geral dos tópicos da teoria da relatividade propostos. Inicialmente uma problematização foi apresentada aos alunos, a saber, o desvio da luz de estrelas no campo gravitacional do Sol, constatado durante um eclipse em 1919 e observado na cidade de Sobral, no estado do Ceará, que constituiu primeira prova experimental da teoria da relatividade de Einstein. A partir da problematização, os alunos percorrem um itinerário de estudos de tópicos da teoria da relatividade até a compreensão de como esse efeito é explicado. Durante todo o processo os alunos são convidados a uma interação ativa, visando demonstrar o entendimento do conteúdo. Isso ocorreu pela elaboração de um encarte de desenhos desenvolvidos por aula de forma sequencial e o desenvolvimento de atividades lúdicas como cruzadinhas e caça palavras. A partir dos resultados obtidos por meio das atividades propostas durante as aulas e do questionário avaliativo ao final, percebe-se que os alunos apresentaram indicadores de aprendizagem significativa, conforme previsto pela definição da teoria de Ausubel.

Palavras-chave: Teoria da relatividade; Deformação do espaço-tempo; Quadrinhos e educação; Aprendizagem significativa; Sequência didática.

ABSTRACT

AN APPROACH TO SPACE-TIME CURVATURE IN THE THEORY OF RELATIVITY VIA COMICS

This paper consists of bibliographical research aimed at producing an Educational Product with a methodological proposal for teaching Albert Einstein's Special and General Theory of Relativity to third-year students at high school. A comic book was the starting point for creating a didactic sequence based on David Ausubel's Theory of Meaningful Learning as a theoretical reference in the psychology of learning. The educational product was implemented in a non-governmental institute for children and adolescents during after-school hours, in the city of Maringá, Paraná. For that, the national legislation was considered, especially the National Common Curricular Base (BNCC) of 2018, as well as the Curricular Reference for High Schools in Paraná (2021) state. The didactic sequence was designed for public school students in the state, structured as proposed by Antoni Zabala, and it was organized into seven didactic units, planned for seven lessons, and one additional lesson for student feedback, in the format of a pedagogical workshop. The number of lessons was considered to ensure that it did not compromise other physics content to be covered during the academic year while providing a general overview of the proposed topics of the theory of relativity. Initially, a problem was presented to the students, the deviation of starlight in the Sun's gravitational field observed during an eclipse in 1919, in the city of Sobral, in Ceará. It constituted the first experimental proof of Einstein's theory of relativity. From this point, students went through a study sequence on the theory of relativity until they understood how this effect is explained. Throughout the process, students were invited to interact actively to demonstrate their understanding of the content. This occurred through the creation of a booklet of drawings developed by class in a sequential manner and the development of playful activities such as crosswords and word searches. Based on the results of the proposed activities in the lessons and the evaluative questionnaire at the end, it was possible to see that meaningful learning took place among students, as predicted by Ausubel's theory definition.

Keywords: Theory of relativity; Space-time deformation; Comics and education; Meaningful learning; Didactic sequence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema de interação para aprendizagem significativa.....	23
Figura 1.2 – Esquematização do processo da prática pedagógica.....	26
Figura 1.3 – Esquema da SD proposto por Dolz, Noverraz e Schneuwly (2004)	29
Figura 1.4 – Esquema do interferômetro de Michelson, 1881.....	40
Figura 1.5 – Ilustração representando o pensamento de Einstein sobre viajar junto a um feixe de luz com a mesma velocidade.....	42
Figura 1.6 – Representação do princípio da equivalência.....	44
Figura 1.7 – Representação da deflexão da luz ocasionada por uma grande massa.....	46
Figura 1.8 – Imagem fotográfica de Einstein durante uma palestra em 1934..	47
Figura 1.9 – Relação entre referenciais S e S'.....	50
Figura 1.10 – (a) Imagem do interferômetro de Michelson e Morley, 1887. (b) Esquema do interferômetro de Michelson e Morley, 1887.....	54
Figura 1.11 – Representação da trajetória da luz perpendicular ao movimento da Terra.....	56
Figura 1.12 – Representação da contração do espaço.....	63
Figura 1.13 – Ilustração do experimento mental da caixa em movimento, na perspectiva de observadores em diferentes referenciais.....	69
Figura 1.14 – Representação da deformação do espaço-tempo provocada pelo Sol.....	70
Figura 1.15 - Fotografia do eclipse de Sobral, em 1919.....	75
Figura 1.16 – Ilustração do fenômeno das lentes gravitacionais.....	75
Figura 1.17 – Fotografia de buracos negros: (a) M87*; (b) Sagitário A*, captado Telescópio Horizonte de Evento (<i>Event Horizon Telescope</i> - EHT).....	78
Figura 1.18 – Representação da estrutura de um buraco negro.....	78
Figura 2.1 – Apresentação dos <i>pets</i> : (a) Duque, (b) Bob, (c) Ben.....	89
Figura 2.2 – Cópia da fotografia dos participantes da expedição de Sobral....	91
Figura 2.3 – Primeira página da HQ – Aula 1: o eclipse de Sobral em 1919 (problematização).....	93
Figura 2.4 – (a) Foto do eclipse de Sobral em 1919. (b) Esquema do desvio sofrido pela luz nas proximidades do Sol.....	95
Figura 2.5 – Segunda página da HQ – Aula 2: eletromagnetismo x mecânica clássica.....	98
Figura 2.6 – Quadrinho extra sobre o impasse da calda do Ben ser amassada ou não, apresentado na HQ da Aula 2.....	100
Figura 2.7 – Terceira página da HQ – Aula 3: os postulados da Teoria da Relatividade Restrita.....	104
Figura 2.8 – Imagens do aplicativo <i>Physics at school</i> . (a) Ícone do aplicativo; (b) Seleção da simulação; (c) Imagem do simulador do interferômetro de Michelson e Morley.....	106

Figura 2.9 – Quarta página da HQ – Aula 4: dilatação do tempo e contração do espaço.....	110
Figura 2.10 – Resposta ao problema da calda do Ben na página da HQ da Aula 2.....	112
Figura 2.11 – <i>Print</i> de tela do <i>site</i> Walter Fendt.....	113
Figura 2.12 – Quinta página da HQ – Aula 5: o paradoxo dos gêmeos.....	116
Figura 2.13 – <i>Print</i> de tela da calculadora do <i>site</i> Walter Fendt.....	118
Figura 2.14 – Sexta página da HQ – Aula 6: o Princípio da Equivalência.....	124
Figura 2.15 – Sétima página da HQ – Aula 7: a curvatura do espaço-tempo..	129
Figura 3.1 – (a) <i>Print</i> da tela do simulador do experimento de Michelson e Morley, no <i>site Physics at School</i> . (b) Imagem de alunos analisando os resultados da simulação do experimento de Michelson e Morley.....	140
Figura 3.2 – <i>Print</i> da tela da simulação da dilatação temporal com o simulador Walter Fendt.....	141
Figura 3.3 – Desenhos realizados pelos alunos sobre a dilatação do tempo: (a) alunos 03, 09 e 16. (b) alunos 04 e 19. (c) aluno 18.....	142
Figura 3.4 – Desenho realizado pelos alunos 12 e 14 sobre a contração do espaço	143
Figura 3.5 – Atividades de palavras cruzadas e cruzadinhas realizadas pelos alunos sobre os conteúdos assimilados da teoria da relatividade: (a) alunos 03, 09 e 13. (b) alunos 10 e 12.....	144
Figura 3.6 – Atividades de palavras cruzadas e cruzadinhas realizadas pelos alunos sobre os conteúdos assimilados da teoria da relatividade: (a) alunos 04 e 08. (b) alunos 1, 14 e 17.....	145
Figura 3.7 – <i>Print</i> da tela de animação tridimensional da deformação do espaço-tempo.....	146
Figura 3.8 – Gráfico da frequência dos alunos nas aulas.....	148
Figura 3.9 – Gráfico das respostas ao questionário de avaliação da aplicação do Produto Educacional.....	161
Figura 3.10 – Foto dos <i>pets</i> ilustrados nos quadrinhos: (a) Duque; (b) Bob; (c) Ben; (d) os três <i>pets</i> juntos.....	165

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Equações de Maxwell na forma integral e diferencial.....	50
Quadro 2.1 – Cronograma de organização e encaminhamento da sequência didática.....	86
Quadro 3.1 – Desenvolvimento dos passos/etapas da Sequência Didática, detalhada no Quadro 2.1.....	136
Quadro 3.2 – Frequência e engajamento dos alunos nas atividades.....	147
Quadro 3.3 – Análise entre as respostas apresentadas no questionário diagnóstico e o questionário avaliativo final.....	151
Quadro 3.4 – Comparativo entre as respostas do Questionário diagnóstico formativo inicial e o Questionário Avaliativo final.....	151

LISTA DE ABREVIATURAS / SIGLAS E ACRÔNIMOS

BNCC – Base Nacional Comum Curricular

DCE-Física – Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Física

FMC – Física Moderna e Contemporânea

GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

HQ – História em Quadrinhos

LIGO – *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (Observatório de Ondas Gravitacionais com Interferômetro a Laser)

MNPEF – Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

PCN – Parâmetros Curriculares Nacionais

PE – Produto Educacional

PNLD – Programa Nacional do Livro Didático

SD – Sequência Didática

TRG – Teoria da Relatividade Geral

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	16
Capítulo 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
1.1 – TEORIA DE APRENDIZAGEM E METODOLOGIA.....	19
1.1.1 – Aprendizagem Significativa.....	20
1.1.2 – Sequência Didática.....	24
1.1.3 – Quadrinhos e Educação	29
1.2 – ASPECTOS HISTÓRICOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE.....	33
1.2.1 – Relativismo nas teorias do movimento.....	33
1.2.2 – O éter e a luz.....	36
1.2.3 – O éter e o eletromagnetismo.....	37
1.2.4 – O experimento de michelson e morley.....	39
1.2.5 – A teoria da relatividade.....	42
1.3 – TEORIA DA RELATIVIDADE: RESTRITA E GERAL.....	48
1.3.1 – Observação de um evento – Transformações de Galileu.....	48
1.3.2 – A invariância do eletromagnetismo de Maxwell.....	50
1.3.3 – O interferômetro de Michelson e Morley.....	53
1.3.4 – Transformadas de Lorentz.....	57
1.3.5 – Teoria da Relatividade Restrita.....	60
1.3.5.1 – Dilatação do tempo e contração do espaço.....	61
1.3.5.2 – Massa e energia.....	65
1.3.6 – Teoria da Relatividade Geral.....	67
1.3.6.1 – O princípio da equivalência.....	67
1.3.6.2 – Curvatura do espaço-tempo.....	69
1.3.6.3 – Equações de campo de Einstein.....	72
1.3.6.4 – Desvio da luz em um campo gravitacional.....	73
1.3.6.5 – Buraco negro.....	76
Capítulo 2 – PRODUTO EDUCACIONAL.....	80
2.1 – INTRODUÇÃO.....	80
2.2 – JUSTIFICATIVA.....	82
2.3 – OBJETIVOS.....	83
2.4 – METODOLOGIA.....	84
2.4.1 – Recursos.....	85
2.4.2 – Avaliação.....	85

2.5 – ORGANIZAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	86
2.6 – UNIDADES DIDÁTICAS.....	88
Unidade Didática 1.....	89
Unidade Didática 2.....	96
Unidade Didática 3.....	102
Unidade Didática 4.....	108
Unidade Didática 5.....	114
Unidade Didática 6.....	122
Unidade Didática 7.....	127
Unidade Didática 8.....	133
Capítulo 3 – APLICAÇÃO E RESULTADOS DO PRODUTO EDUCACIONAL....	135
3.1 – Aplicação do Produto Educacional.....	136
3.2 – Resultados alcançados com aplicação do Produto Educacional.....	149
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	163
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	166
ANEXO A - Declaração de Revisão Ortográfica	173
APÊNDICE A – Produto Educacional.....	174

INTRODUÇÃO

Preparar aulas com recursos e técnicas diversas, objetivando que os alunos adquiram os conhecimentos propostos consiste em parte do trabalho do professor. A escolha dos recursos e técnicas pode se transformar em um grande desafio, pois essas escolhas irão colaborar diretamente para que seu trabalho seja eficiente e verdadeiramente transformador, despertando o interesse, a participação ativa e a aprendizagem potencialmente significativa por parte dos alunos.

Dentre os conteúdos da Física sugeridos para estudantes do ensino médio, encontramos aqueles denominados de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC), que correspondem os estudos e descobertas ocorridos com a aurora do século XX. A teoria da relatividade de Albert Einstein (1879-1950) proposta em 1905 e 1915, está inserida entre esses tópicos.

Os tópicos de FMC, contemplando a teoria da relatividade estão previstos nas legislações federal e na do estado do Paraná. Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) de 2002 apontam sobre a inserção da Física Moderna em detrimento a outros tópicos como a Cinemática (Brasil, 2002, p. 60). Com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), os tópicos relacionados a FMC estão presentes nas três competências específicas sugeridas para o novo ensino médio, assim como, em suas respectivas habilidades (BRASIL, 2018, p. 553).

O estado do Paraná, por meio das Diretrizes Curriculares da Educação Básica - Física (DCE-Física), de 2008, destaca a “imutabilidade da velocidade da luz, como um dos princípios da relatividade” (PARANÁ, 2008, p. 61), assim como apresenta a Teoria da Relatividade Geral complementar aos limites do modelo newtoniano (PARANÁ, 2008, p. 94). No Referencial Curricular para o Ensino Médio do Paraná (2021) a unidade temática denominada Cosmologia, apresenta como sugestão de conteúdo a teoria da relatividade geral (Paraná, 2021, p. 419).

O desafio do professor da educação básica é fazer chegar aos estudantes o conhecimento pesquisados e desenvolvidos em ambiente acadêmico. Chama a atenção o fato de que “o que é ensinado na sala de aula está longe do conhecimento científico construído. Em outras palavras, a ciência ensinada na sala de aula não é a ciência elaborada pelos cientistas” (PINHO ALVES Pinheiro e PIETROCOLA 2005, p.77). Os autores fazem referência da distância entre a origem da produção científica até que se torne objeto de ensino, destacando a “existência de três estatutos,

patamares ou níveis: (a) saber sábio (*savoir savant*); (b) saber a ensinar (*savoir à enseigner*) e (c) saber ensinado (*savoir enseigné*)” (PINHO ALVES, PINHEIRO e PIETROCOLA, 2005, p.79). O saber sábio é aquele que corresponde à produção científica em sua origem, por intelectuais e cientistas sobre o entendimento de fenômenos a sua volta. O saber a ensinar, por sua vez, abrange um grupo maior, responsável por organizar, hierarquizar em grau de dificuldade por meio de livros textos e manuais de ensino o que foi produzido pelo saber sábio, para que o mesmo possa ser transmitido aos estudantes. O saber ensinado é aquele que chega aos alunos por meio dos professores, que utilizam os livros textos e manuais como base em suas aulas.

Destaca-se aqui, o papel do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), uma vez que um dos frutos oriundos do estudo e da vivência acadêmica dos mestrandos, é a produção de materiais (Produtos Educacionais) que são aplicados no ambiente escolar fazendo uma ponte entre os saberes sábio-ensinar-ensinado, visado aproximar o conhecimento acadêmico aos estudantes da educação básica.

O professor/mestrando estando próximos aos estudantes precisa entender suas capacidades e limitações, para que se apropriem do conhecimento e, além disso, tornem-se agentes na produção dele. Para Pinho Alves,

Ao professor cabe o papel de criar um “cenário” menos agressivo ao dogmatismo apresentado pelos livros texto [...] deve buscar a criação de um ambiente que favoreça o rompimento com a imagem neutra e empirista da Ciência, vinculada através dos manuais e livros didáticos. Também deve procurar nas práticas sociais de referência os elementos mais adequados aos seus objetivos (PINHO ALVES, 2004, p.51).

No presente trabalho, para a abordagem de tópicos relacionados a teoria da relatividade, desenvolveu-se um Produto Educacional (PE) utilizando como instrumento didático uma Sequência Didática (SD). A construção da SD foi elaborada em torno de uma história em quadrinhos (HQ) que, partindo de uma problematização inicial, passa a apresentar tópicos da teoria da relatividade. A problematização sugerida foi o desvio da luz de estrelas pelo campo gravitacional do Sol, observado durante o eclipse em Sobral, Ceará, em 1919. Para explicar o fenômeno observado, a cada aula, tópicos da Teoria da Relatividade Restrita e Geral surgem nos diálogos da HQ, até se chegar à curvatura do espaço-tempo na presença de uma grande massa.

O estudo de temas relacionados a teoria da relatividade já foi proposto por outros trabalhos no MNPEF. Podemos citar os trabalhos de Capelari (2016), Celestino (2020), Wolff (2005), que abordam a Teoria da Relatividade Restrita. O trabalho de Freire (2015) aborda tanto a Teoria da Relatividade Restrita como a Teoria da Relatividade Geral. Outros trabalhos utilizam o recurso de HQs como instrumento didático ao tratar o tema da teoria da relatividade, entre eles, Bendia Filho (2018), Januário (2020), Santos (2019). Tem-se o trabalho que Gonçalves (2016) que não trata da teoria da relatividade, mas, utiliza-se de HQs como recurso didático.

O presente trabalho tem como diferencial a proposta de apresentar de forma sucinta, um panorama geral da teoria da relatividade, iniciando pela Relatividade Restrita até a chegar a Relatividade Geral, abordando também aspectos históricos. A SD é construída de tal maneira que a cada página da HQ um dos tópicos da teoria da relatividade é motivado e desenvolvido, até que se chegue à resposta da problematização inicial.

Ao propor um material para se trabalhar com alunos é necessário considerar aspectos psicológicos relacionados a forma com que se constrói o conhecimento. O presente trabalho referenciou-se na teoria da aprendizagem significativa, teoria cognitiva proposta, em 1968, pelo médico psiquiatra estadunidense David Ausubel.

Capítulo 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que o processo de ensino e aprendizagem possa ocorrer de forma satisfatória é necessário que o professor esteja equipado do maior número possível de instrumentos e estratégias visando recuperar aquilo que o aluno já possui de conhecimentos, ao mesmo tempo que proporciona as relações necessárias com o novo conhecimento. É evidente que o professor deva conhecer as formas com que a construção do conhecimento se dá, estratégias metodológicas e principalmente o domínio do conteúdo a ser aprendido pelo aluno.

Neste capítulo será abordado primeiramente os aspectos referentes à psicologia da educação, sobre a construção do conhecimento. Uma reflexão sobre metodologia de ensino e, estratégia de uso de histórias em quadrinhos (HQs) na educação. Na sequência, uma abordagem histórica sobre a teoria da relatividade. Por fim, aspectos teóricos sobre as Teorias da Relatividade Restrita e Geral.

1.1 – TEORIA DE APRENDIZAGEM E METODOLOGIA

Mesmo sem nos darmos conta, a aprendizagem está presente em nossa vida desde o momento em que nascemos. Sucessivamente, vamos passando por processos de desenvolvimento dos sentidos, das relações com os demais indivíduos e com a natureza que nos cerca. O processo de aprender algo novo se soma aos conhecimentos já adquiridos acompanhando o ser humano por todas as etapas de sua vida (ZANELLA, 2007, p. 24). Aprender é evoluir enquanto indivíduo e sociedade. A escola é espaço privilegiado em que o conhecimento sistematizado é apropriado pelo estudante, sendo papel do professor definir qual a melhor estratégia metodológica e recursos necessários para que o processo ensino-aprendizagem seja eficiente, despertando o interesse, participação e compreensão por parte dos alunos, sendo verdadeiramente transformador e faça com que o aluno aprenda a aprender. Para Freire (2002, p. 52) cabe ao professor não apenas transmitir o conhecimento em si, mas, proporcionar aos estudantes as condições de construção do próprio conhecimento, deixando ser apenas receptores e tornando-os sujeitos do processo.

A Constituição Federal, no artigo 205, trata da educação com um direito de todos, sendo dever do estado e da família e contando com a colaboração de toda a

sociedade, com finalidade do “pleno desenvolvimento da pessoa, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho” (BRASIL, 1988).

Em 1996 um estudo da Unesco, coordenado por Jacques Delors, converge para um relatório sobre a educação para o século XXI, denominado: “Educação um tesouro a descobrir”. O relatório propõe que a educação

deve organizar-se em torno de quatro aprendizagens fundamentais que, ao longo de toda a vida, serão de algum modo para cada indivíduo, os pilares do conhecimento: aprender a conhecer, isto é adquirir os instrumentos da compreensão; aprender a fazer, para poder agir sobre o meio envolvente; aprender a viver juntos, a fim de participar e cooperar com os outros em todas as atividades humanas; finalmente aprender a ser, via essencial que integra as três precedentes (DELORS, 1996, p. 89).

Aprender a conhecer, a fazer, a viver juntos e a ser, são denominados quatro pilares da educação.

Para que o aluno consiga percorrer um itinerário que potencialize o processo de apropriação do conhecimento é fundamental ao professor o entendimento da maneira com que se aprende, de uma teoria de aprendizagem, “uma construção humana para interpretar sistematicamente a área de conhecimento que chamamos aprendizagem” (MOREIRA, 2014, p. 12). Da mesma forma, o método adotado pelo professor também será decisivo durante o processo, materializando a teoria de aprendizagem em atividades que dialoguem com a estrutura cognitiva do aluno.

1.1.1 – APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Uma vez que a aprendizagem é algo cotidiano ao ser humano relacionada com sua própria existência, torna-se importante o entendimento do termo. Zanella, por sua vez, conceitua:

“Muitas vezes o termo aprendizagem tem sido confundido com aquisição de conhecimentos. Na verdade, a aprendizagem tem um sentido mais amplo: nela, possivelmente, o aprendiz passou a conhecer mais e ampliou seu volume de conhecimentos, embora isso não se constitua tão somente em aprendizagem. Aprendizagem é mais, pois significa a própria mudança que vai se operando no sujeito através das experiências” (ZANELLA, 2007, p. 24).

O sujeito citado por Zanella, o aluno ou aprendiz, não deve apenas receber a informação, mas associá-la as demais que ele próprio já possui, sendo então conduzido a uma aprendizagem e não a mero acúmulo de informações. A aprendizagem pode ser apresentada como o fator principal a ser desenvolvido na

relação professor e aluno no ambiente escolar, fazendo com que estudiosos e pensadores busquem propostas e alternativas que visem a realização deste processo.

Apesar de existirem diferentes correntes da Psicologia que procuram compreender os processos de aprendizagem, Zabala cita alguns princípios convergentes:

As aprendizagens dependem das características singulares de cada um dos aprendizes; corresponde, em grande parte, às experiências que cada um viveu desde o nascimento; a forma como se aprende e o ritmo da aprendizagem variam segundo as capacidades, motivações e interesses de cada um dos meninos e meninas; enfim, a maneira e a forma como se produzem as aprendizagens são o resultado de processos que sempre são singulares e pessoais (ZABALA, 1998, p. 34).

Moreira (2014, p. 159) apresenta três tipos de aprendizagem: i) a aprendizagem cognitiva, que se dá pela forma organizada com que as informações são armazenadas na estrutura mental que é chamada de estrutura cognitiva; ii) a aprendizagem afetiva está relacionada com experiências internas, com nossos sentimentos, sendo inclusive “concomitante com a cognitiva” (MOREIRA, 2014, p. 160); iii) por fim, a aprendizagem psicomotora é fruto de estímulos que produzem respostas musculares.

David Ausubel (1918-2008), psicólogo da educação, nascido nos Estados Unidos, desenvolveu uma teoria cognitiva denominada aprendizagem significativa. Ela tem como base o fato de que a aprendizagem ocorre quando uma nova informação é ancorada naquilo que o aluno já sabe. Nas palavras do próprio Ausubel, “o fator singular mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe” (AUSUBEL, NOVAK, HANESIAN, 1980, p. 137). O conhecimento prévio já possuído pelo aprendiz e que servirá como âncora é nominado subsunçor, podendo ser uma imagem, um símbolo, um conceito, uma experiência, ou outro, e tende a ser potencializado por uma nova informação adquirida e assimilada. A nova informação quando organizada e integrada, não apenas influenciando, mas modificando a estrutura cognitiva do aprendiz, proporciona a aprendizagem (MOREIRA, 2014, p. 160). O fruto da combinação entre o novo conhecimento e o já possuído pelo aprendiz resulta num terceiro conhecimento modificado.

Ausubel dita a dinâmica com que se dá a natureza da aprendizagem significativa:

A aprendizagem significativa envolve a aquisição de novos significados e os novos significados, por sua vez, são produtos da aprendizagem significativa. Ou seja, a emergência de novos significados no aluno reflete o complemento de um processo de aprendizagem significativa (AUSUBEL, NOVAK, HANESIAN, 1980, p. 34)

Segundo Moreira e Masini, o conceito de aprendizagem significativa pode ser resumido como:

... um processo pelo qual uma nova informação se relaciona com um aspecto relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo. Ou seja, neste processo a nova informação interage com uma estrutura de conhecimento específica, qual Ausubel define como conceito subsunçor ou, simplesmente, subsunçor (subsumer), existente na estrutura cognitiva do indivíduo. A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação ancora-se em subsunçores relevantes preexistentes na estrutura cognitiva de quem aprende (MOREIRA e MASINI, 2001, p. 17).

O termo subsunçor corresponde aos conceitos presentes na estrutura cognitiva que funcionam para ancorar um novo conceito, uma “ponte cognitiva daquilo que já sabe com a nova informação” (RIBEIRO, SILVA, KOSCIANKI, 2012, p. 168). Considerando a frequência das interações, ou das aprendizagens significativas, um subsunçor pouco desenvolvido vai se tornando mais abrangente e desenvolvido, aumentando o grau de elaboração dos conceitos, tornando-os mais inclusivos. A aprendizagem significativa é um processo em que um novo conhecimento é assimilado (ou ancorado) a outro já existente e relevante na estrutura cognitiva, onde é organizado fazendo com que um conceito específico vá se tornando mais abrangente (MOREIRA, 2014, p. 161). Ocorre o crescimento e modificação conceitual do subsunçor.

É de fundamental importância que o professor consiga identificar os conhecimentos prévios dos alunos, a fim de que possam ser mais bem explorados para na sequência, criar-se o processo de assimilações, ou seja, quando um novo conceito ou proposição deixa de ser apenas uma informação, mas se relaciona e modifica o subsunçor já existente. O processo de assimilação “ocorre quando um conceito ou proposição **a**, potencialmente significativo, é assimilado sob uma ideia ou conceito mais inclusivo, já existente na estrutura cognitiva” (MOREIRA, 2014, p.166). O maior número de assimilações tende a propiciar uma aprendizagem potencialmente significativa também maior.

Caso não haja subsunçores devido à novidade do assunto ou se tenha perdido algum deles na estrutura cognitiva do estudante, é necessária a manipulação dessa estrutura a fim de “preencher o hiato entre aquilo que o aprendiz já conhece e o que precisa conhecer antes de poder aprender significativamente a tarefa com que se defronta” (AUSUBEL, NOVAK, HANESIAN, 1980, p. 144). Para isso, utiliza-se os

organizadores prévios, materiais apropriados que podem ser definidos da seguinte forma:

Na falta de subsunçores, sugere-se o uso de organizadores prévios, que são mecanismos pedagógicos auxiliares na ligação entre aquilo que o aprendiz já sabe e aquilo que irá adquirir. A justificativa para o uso dos organizadores prévios vem do fato de que as ideias existentes na estrutura cognitiva do aprendiz podem não ter a relevância e o conteúdo suficientes para estabelecerem ligações com as novas ideias introduzidas pelo material de instrução. Nesse caso, o organizador prévio faz o papel de mediador e também faz a alteração das ideias preexistentes, preparando-as para o estudo do material posterior (RIBEIRO, SILVA, KOSCIANSKI, 2012, p. 171).

O professor, utilizando-se de materiais apropriados vai introduzindo conceitos com alto nível de abstração, generalizados e amplamente inclusivos, para depois, desenvolver tais conceitos em subsunçores que proporcionem futuras aprendizagens. Prepara-se a estrutura cognitiva do aluno com informações que possam estabelecer ligações das novas ideias e conceitos apresentados. Esses materiais se tornam potencialmente significativos, uma vez que aprendidos, sejam relacionáveis e incorporados à estrutura cognitiva do aluno.

Além da preocupação do professor com a escolha de materiais potencialmente significativos, outro fator de extrema importância está na pressuposição de “que o aluno manifeste uma disposição para a aprendizagem significativa - ou seja, uma disposição para relacionar, de forma não arbitrária e substantiva, o novo material à sua estrutura cognitiva” (AUSUBEL, NOVAK, HANESIAN, 1980, p. 34). O esquema desta interação está representado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Esquema de interação para aprendizagem significativa.



Fonte: o autor.

Uma maneira de se propiciar a aprendizagem significativa é fazer com que os novos conceitos ao serem ancorados no subsunçor o modifique. O novo conceito deve ser apresentado partindo de elementos mais gerais e inclusivos, e gradativamente, progredir para aspectos mais específicos, num processo denominado por Ausubel de princípio da diferenciação progressiva (MOREIRA e MASINI, 2001, p. 29). A próxima etapa do processo é reconciliação integrativa, ou seja, deve haver claramente

relações entre os conceitos e reorganização da estrutura cognitiva, destacando diferenças e similaridades (MOREIRA e MASINI, 2001, p. 30).

Moreira e Masini apontam a utilização dos organizadores prévios

“de acordo com como o princípio da reconciliação integrativa, quando indicam, explicitamente, de que forma as ideias relacionadas, aprendidas previamente na estrutura cognitiva, são essencialmente similares e/ou diferentes das novas ideias e informações a aprender. Os organizadores devem mobilizar todos os conceitos válidos da estrutura cognitiva potencialmente relevantes desenvolverem papel de subsunção com relação ao material (MOREIRA e MASINI, 2001, p. 31).

Conclui-se, segundo a teoria da aprendizagem significativa, que o êxito do professor consiste em identificar os conhecimentos prévios dos alunos, considerando aquilo que é unificador, inclusivo, de maior explanação e integração, organizando tudo do mais geral para o específico. Identificar na estrutura cognitiva quais subsunções relevantes já se encontram instalados, mapeando aquilo que o aprendiz já sabe. Por fim, utilizando-se de recursos facilitadores, auxiliar na assimilação e organização dos conceitos na estrutura cognitiva, para que o aprendiz tenha clareza nos significados aos mesmos tempos que sejam estáveis e transferíveis (MOREIRA, 2014, p.170).

1.1.2 – SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A escolha da utilização de uma Sequência Didática (SD) é justificada por permitir “o estudo e a avaliação sob uma perspectiva processual, que inclua as fases de planejamento, aplicação e avaliação” (ZABALA, 1998, p. 18).

Zabala ainda nos dá uma definição do que se trata uma sequência didática:

... buscando os elementos que as compõem, nos daremos conta que são um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas para realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecidos tanto pelo professor como pelos alunos (ZABALA, 1998, p. 18).

Araújo complementa a definição sobre SD como “um modo de o professor organizar as atividades de ensino em função de núcleos temáticos e procedimentais” (ARAÚJO, 2013, p. 323).

A SD se apresenta como uma proposta metodológica em que atividades, ou seja, etapas da aula, são articuladas e ordenadas formando uma unidade didática que visa maximizar a aprendizagem do aluno, sempre atrelada ao conteúdo e visando aos objetivos propostos previamente num planejamento, ou seja, é necessário ter claro o

que se vai ensinar, como e para quem. Vale destacar a diferença entre um plano de aula e uma SD, onde o primeiro trata daquilo que será desenvolvido em apenas uma aula e a SD visa desenvolver por completo uma unidade didática, podendo assim, utilizar mais de uma aula para atingir seus objetivos.

Cada unidade didática deve articular as etapas de elaboração metodológica durante a aula, considerando uma maior ou menor participação dos estudantes. A metodologia adotada pelo professor contribui para uma postura mais ativa ou passiva por parte dos alunos. O número e a variedade das atividades vêm a favorecer a deslocamento do protagonismo do professor para o aluno.

Zabala (1998) propõe uma série de questões que auxiliam a validar e/ou reforçar atividades e até mesmo acrescentar novas:

- a) Que nos permitam determinar os *conhecimentos prévios* que cada aluno tem em relação aos novos conteúdos de aprendizagem?
- b) Cujos conteúdos são propostos de forma que sejam *significativos e funcionais* para os alunos?
- c) Que possamos inferir que são adequadas ao *nível de desenvolvimento* de cada aluno?
- d) Que representem um desafio alcançável para o aluno, quer dizer, que levam em conta suas competências atuais e as façam avançar com a ajuda necessária; portanto, que permitam criar *zonas de desenvolvimento proximal* e intervir?
- e) Que evoquem um *conflito cognitivo* e promovam a atividade mental do aluno, necessária para que estabeleça relações entre os novos conteúdos e os conhecimentos prévios?
- f) Que promovam uma atitude favorável, ou seja, que sejam motivadoras em relação à aprendizagem dos novos conteúdos?
- g) Que estimulem a auto-estima e o *autoconceito* em relação às aprendizagens que se propõem, isto é, que o aluno possa sentir que em certo grau aprendeu, que seu esforço valeu a pena?
- h) Que ajudem o aluno a adquirir habilidades relacionadas com o *aprender a aprender*, que lhe permitam ser cada vez mais autônomo em suas aprendizagens?

(ZABALA, 1998, p. 63)

No desenvolvimento de sua prática profissional, o professor tende a procurar desenvolver suas competências profissionais objetivando a melhoria do processo de ensino e aprendizagem. Segundo Zabala (1998, p. 13), essas competências são potencializadas abordando os vários aspectos do conhecimento e as experiências tanto do professor como dos alunos, contribuindo nas escolhas entre as mais bem avaliadas. Mesmo assim, é necessário discernimento para optar entre as melhores, ao mesmo tempo em que se atenta as que necessitam algum refinamento. Quanto mais se conhece e tem-se o controle das variáveis envolvidas, melhor será o a ação do profissional.

Por outro lado, as variáveis envolvidas na dinâmica ensino e aprendizagem não são simples, ao contrário, apresentam alta complexidade exigindo do professor a utilização de estratégia que o auxiliem o mais satisfatoriamente possível.

Entender a intervenção pedagógica exige situar-se num modelo em que a aula se configura como um microsistema definido por determinados espaços, uma organização social, certas relações interativas, uma forma de distribuir o tempo, um determinado uso dos recursos didáticos, etc, onde os processos educativos se explicam como elementos estreitamente integrados neste sistema (ZABALA, 1998, p. 16).

Na prática da sala de aula, o professor deve adotar uma estrutura metodológica considerando que o processo educacional é consequência de um planejamento e pode ser mensurado nos resultados obtidos em momentos de avaliação. A Figura 1.2 nos auxilia na compreensão do processo da prática pedagógica.

Figura 1.2 – Esquematização do processo da prática pedagógica.



Fonte: o autor.

Para que a proposta metodológica seja exitosa, faz-se necessário organizar e articular de tal maneira as atividades, seja os procedimentos ou etapas da aula, visando determinar a especificidade da proposta didática. Zabala afirma que o método é determinado pela organização das atividades, podendo ser classificado “entre métodos expositivos ou manipulativos, por recepção ou por descoberta, intuitivos ou dedutivos” (ZABALA, 1998, p. 53). A série ordenada e articulada de atividades é chamada de unidade didática.

A unidade didática contempla as etapas de elaboração metodológicas durante a aula, ao mesmo tempo que estipula a maior ou menor participação dos conteúdos. A própria participação do aluno, seja mais passiva ou ativa no processo, é recorrente da metodologia adotada pelo professor na elaboração da unidade didática.

Quanto aos conteúdos que serão contemplados na unidade didática, Zabala (1998, p. 39) propõem sua organização para além da classificação tradicional de componentes curriculares (Matemática, Geografia, Ciências, Língua...), considerando suas tipologias, assim classificados como conteúdos factuais, conteúdos conceituais, conteúdos procedimentais e conteúdos atitudinais.

- Conteúdos Factuais:

entende o conhecimento de fatos, acontecimentos, situações, dados e fenômenos concretos e singulares: a idade de uma pessoa, a conquista de um território, a localização ou a altura de uma montanha, os nomes, os códigos, os axiomas, um fato determinado num determinado momento (ZABALA, 1998, p. 41).

Percebe-se que todos os elementos de aprendizagem são concretos que podem ser problematizados por meio de um texto, vídeo, imagem, um quadrinho, que auxilie na memorização e futura repetição por parte do aluno. Expressar e reproduzir de forma mais exata possível é sinônimo de êxito na aprendizagem de um conteúdo factual, o que é possível por meio da exercícios de repetição.

- Conteúdos Conceituais e Princípios:

Os conceitos se referem ao conjunto de fatos, objetos ou símbolos que têm características comuns, e os princípios se referem às mudanças que se produzem num fato, objeto ou situação em relação a outros fatos, objetos ou situações e normalmente descrevem relações de causa-efeito ou de correlação (ZABALA, 1998, p. 42).

Ao contrário dos conteúdos factuais, os conceituais tratam de aspectos mais abstratos, uma vez que se faz necessário o entendimento de um significado. Como princípios os conteúdos não se encerram, os conhecimentos se relacionam e se completam permitindo a ampliação e aprofundamento. Os conteúdos se tornam mais significativos à medida que aumenta a compressão do estudante.

- Conteúdos Procedimentais:

inclui entre outras coisas as regras, as técnicas, os métodos, as destrezas ou habilidades, as estratégias, os procedimentos – é um conjunto de ações ordenadas e com um fim, quer dizer, dirigidas para a realização de um objetivo. São conteúdos procedimentais: ler, desenhar, observar, calcular, classificar, traduzir, recortar, saltar, inferir, espetar (ZABALA, 1998, p. 43).

Ao se colocar em prática os conhecimentos oriundos dos conteúdos conceituais, o aluno é direcionado a realização dos objetivos. Os conteúdos procedimentais consistem, então, nas ações ordenadas para que os objetivos se concretizem, por intermédio da prática repetitiva até se ter domínio dos processos e saiba fazer os problemas.

- Conteúdos Atitudinais:

engloba uma série de conteúdos que por sua vez podemos agrupar em valores, atitudes e normas. Cada uma destes grupos tem uma natureza suficientemente diferenciada que necessitará, em dado momento, de uma aproximação específica (ZABALA, 1998, p. 41).

As explicações teóricas cedem espaço às práticas de vivência de ajuda, de cooperação, de respeito. Envolvem a conduta do aluno diante do outro e à natureza, uma atitude de refletir quanto às decisões, discernimento, posicionamento, envolvimento afetivo, avaliação da própria conduta.

O professor deve levar em consideração as características de cada tipo de conteúdo ao procurar desenvolver uma sequência com estratégias de atividades que possam despertar o aluno ao conhecimento e não apenas a realização de avaliações ao término do processo com uma nota satisfatória.

Uma proposta estrutural de SD é apresentada por Dolz, Noverraz e Schneuwly (2004, p. 97) e discutida nos trabalhos de Araújo (2013, p. 323), Gonçalves e de Barros (2010, p. 47), Cabral (2017, p. 33), Miquelante et al. (2017, p. 265). A SD é apresentada em quatro etapas ou passos: apresentação da situação; produção inicial; módulos de atividades; produção final.

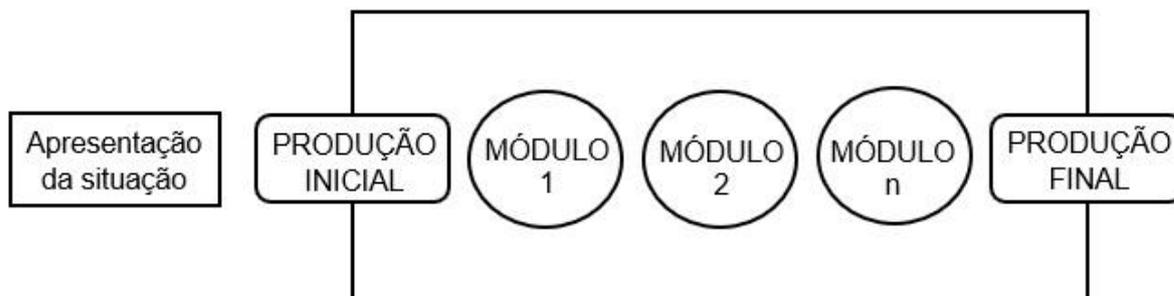
A apresentação da situação consiste no momento de o professor apresentar aos estudantes a situação a ser estudada da forma clara e detalhada, a problematização deve ser bem determinada para o melhor acompanhamento dos estudantes. Na sequência, os estudantes desenvolvem uma produção inicial diagnóstica com a qual o professor é capaz de avaliar o conhecimento prévio dos alunos e adequar as atividades da SD em conformidade com dificuldades e potencialidades dos alunos. O terceiro passo da SD, os módulos de atividades, consiste na sistematização das atividades de forma progressiva visando a apropriação dos temas por parte dos alunos. O número de módulos dependerá do assunto abordado, assim como o conhecimento prévio dos alunos quanto ao tema. No último passo, denominado produção final os estudantes apresentam o resultado de seu aprendizado ao professor que por sua vez, é capaz de avaliar se houve uma aprendizagem potencialmente significativa.

A Figura 1.3 apresenta o esquema de Dolz, Noverraz e Schneuwly quanto aos passos de uma SD.

No referente à avaliação, é apresentada por Zabala (1998) não apenas como um momento de quantificação dos conteúdos assimilados ou decorados pelos alunos. A avaliação é apresentada com um processo em que não só o aluno é avaliado, mas também o professor e sua metodologia, assim, “podemos distinguir claramente dois processos avaliáveis: como o aluno aprende e como o professor ou professora ensina”

(ZABALA, 1998, p. 196). Avaliação não se trata da conclusão de uma etapa, mas todo processo.

Figura 1.3 – Esquema da SD proposto por Dolz, Novarraz e Schneuwly (2004).



Fonte: Dolz, Novarraz e Schneuwly, 2004, p. 97.

1.1.3 – QUADRINHOS E EDUCAÇÃO

Desde os tempos mais remotos a humanidade utiliza-se de desenhos, representações de animais, plantas e outros elementos da natureza para se comunicar. Pode-se dizer, inclusive, que antigos desenhos em cavernas eram bem mais que rabiscos em paredes, mas sim, uma forma de transmissão e acumulação de conhecimentos. Nas crianças a primeira forma de expressão de sentimentos se dá por rabiscos de imagens que expressam a forma com que elas percebem e se comunicam com o mundo. Pode-se então dizer que “as histórias em quadrinhos vão ao encontro das necessidades do ser humano, na medida em que utilizam fartamente um elemento de comunicação que esteve presente na história da humanidade desde os primórdios: a imagem gráfica” (VERGUEIRO, 2020, p.8). Vergueiro complementa que as primeiras formas de escrita, hieróglifos e escrita japonesa, utilizavam imagens daquilo que se propunha a comunicar.

O advento da imprensa, os avanços da indústria tipográfica, o surgimento de grandes grupos jornalísticos impressos, são fatores que segundo Vergueiro (2020, p. 10), contribuem para que as Histórias em Quadrinhos (HQs) se tornem cada vez mais comuns à grande massa da população, com temáticas variando entre aventura, terror, suspense, entre outros. No Brasil, os periódicos de HQs recebem o nome de gibis.

Após a segunda guerra mundial as HQs passam a ser questionadas quanto os males que poderiam apresentar as crianças e adolescentes. Procurou-se provar por meio da psiquiatria que crianças poderiam apresentar comprometimento em seu comportamento por lerem HQs. No final da década de 1940 é criado o Código de Ética

dos Quadrinhos pelos editores norte-americanos. Segundo Vergueiro, para o pensamento da época, a leitura de quadrinhos

afastava as crianças de “objetivos mais nobres” – como o conhecimento do “mundo dos livros” e o estudo de “assuntos sérios” –, que causava prejuízos ao rendimento escolar e poderia, inclusive, gerar consequências ainda mais aterradoras, como o embotamento do raciocínio lógico, a dificuldade para apreensão de ideias abstratas e mergulho em um ambiente imaginativo prejudicial ao relacionamento social e afetivo de seus leitores (VERGUEIRO, 2020, p. 16).

Num primeiro momento as HQs não foram acolhidas por pensadores e intelectuais, o que limitava sua aceitação enquanto expressão de linguagem e impossibilitava sua utilização voltada à educação. Entre os fatores principais da rejeição destacam-se “sua característica de utilização da linguagem desenhada e por ser uma linguagem direcionada para as massas” (VERGUEIRO, 2017, p. 13). A simplicidade é normalmente deixada de lado, não é considerada ou levada a sério e as HQs possuem como uma de suas principais características a simplicidade.

O final do século XX traz consigo uma mudança na perspectiva não apenas da leitura de HQs como também de sua utilização em ambiente educacional. HQs passam a ser vistas mais amigavelmente “recebendo um pouco mais de atenção das elites intelectuais e passando a ser aceitas como um elemento de destaque global de comunicação e como uma forma de manifestação artística com características próprias”, conforme se observa em Vergueiro, 2020, p. 17. Ainda segundo o autor, a “percepção de que as histórias em quadrinhos podiam ser utilizadas de forma eficiente para a transmissão de conhecimentos específicos” (Vergueiro, 2020, p. 17). Postura já existente para outro grupo de entusiastas que entendiam e defendiam a forma de comunicação das HQs. Vergueiro diz que

a percepção de que as histórias em quadrinhos podiam ser utilizadas de forma eficiente para a transmissão de conhecimentos específicos, ou seja, desempenhando uma função utilitária e não apenas de entretenimento, já era corrente no meio “quadrinístico” desde muito antes de seu “descobrimto” pelos estudiosos da comunicação (VERGUEIRO, 2020, p. 17).

A recusa e negação das HQs aos poucos foram superadas e graças a insistência de seus autores, fazendo que adquirissem relevância no cenário educacional. Segundo Vergueiro, partindo da cultura europeia e logo após ao restante do mundo, as barreiras e acusações foram superadas à medida que se entendeu que a resistência “era desprovida de fundamento, sustentada muito mais por afirmações

preconceituosas em relação a um meio sobre o qual, na realidade, se tinha muito pouco conhecimento” (VERGUEIRO, 2010, p. 17).

A partir dos anos de 1990, no Brasil, passa-se a utilizar com mais frequência HQs vinculadas à educação, tornando-se comum encontrá-las nas páginas de livros didáticos e materiais paradidáticos.

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC),

documento de caráter normativo que define o conjunto orgânico e progressivo de aprendizagens essenciais que todos os alunos devem desenvolver ao longo das etapas e modalidades da Educação Básica, de modo a que tenham assegurados seus direitos de aprendizagem e desenvolvimento, em conformidade com o que preceitua o Plano Nacional de Educação (BRASIL, 2018, p. 7),

apresenta várias citações referentes à utilização de HQs, tirinhas e outros elementos de comunicação textual e gráfica como instrumentos para auxiliar o processo de aprendizagem, em especial a leitura. A facilidade de compreensão dos textos aliada a ilustrações que instigam a imaginação tende a despertar o interesse pela leitura e a busca de outras fontes literárias. Segundo a BNCC,

o grau de envolvimento com uma personagem ou um universo ficcional, em função da leitura de livros e HQs anteriores, da vivência com filmes e games relacionados, da participação em comunidades de fãs etc., pode ser tamanho que encoraje a leitura de trechos de maior extensão e complexidade lexical ou sintática dos que os em geral lidos (BRASIL, 2018, p. 76).

O envolvimento, o desenvolvimento e o gosto pela leitura podem encontrar nas HQs sua porta acesso. Graças aos elementos gráficos as HQs podem constituir uma ferramenta importante na alfabetização de crianças ao associarem as imagens e situações aos textos presentes nos balões de diálogos. Paralelo a isso, pedir para uma criança representar seus pensamentos e sentimentos por meio de um desenho é uma maneira de estimular sua imaginação. Santos converge para o mesmo pensamento ao afirmar que “a utilização de quadrinhos pode ser de grande valia para iniciar o jovem no caminho que leva à consolidação do hábito e do prazer de ler” (SANTOS, 2001, p. 47). Podemos ainda constatar que “o gibi é o primeiro livro de leitura de uma criança” (LOVETRO, 1995, p. 95).

As HQs não devem ser consideradas apenas como meio de entretenimento e não necessariamente, estarem atreladas a temáticas fictícias e fantasiosas. Podem apresentar roteiros históricos e autobiográficos e mesmo quando ficção, é possível a abordagem de temas sociais e culturais relevantes. Uma HQ, mesmo que não seja

“uma reconstituição dos fatos a qual se refere, tal como aconteceram, mas a sua recriação, do modo como são lembrados pelo autor; ou mesmo, como ele gostaria que ficasse registrados para a posteridade” (VILELA, 2020, p. 116). Dominar as técnicas de escritas é essencial para um roteirista de HQs, que necessita “ser bem informado sobre a história da humanidade, assim como sobre seus movimentos artísticos e fatos jornalísticos mais atualizados” (LOVETRO, 1995, p. 97).

Vários trabalhos buscam narrar fatos e reflexões históricas e dilemas contemporâneos, podemos citar como exemplo a obra de Will Eisner onde retrata a rotina no subúrbio de Nova York nas primeiras décadas do século XX (EINSNER, 2019). Outro trabalho em quadrinho, vencedor do prêmio Pulitzer de jornalismo norte-americano, foi a obra Maus de Art Spiegelman, que retrata a experiência vivida pelo pai do autor nos campos de concentração nazista durante a Segunda Guerra Mundial (SPIELGEMAN, 2009). A HQ denominada Persépolis, de Marjane Satrapi, retrata a experiência da autora que, quando menina, vivenciou o início processo estabeleceu o regime xiita no Irã (SATRAPI, 2007).

Artistas brasileiros também produzem histórias em quadrinhos que conseguem romper o limite unicamente do lazer. Uma das obras mais conhecidas são as aventuras da Turma da Mônica, de Maurício de Souza, que além das revistas em quadrinhos, são utilizadas como material paradidático de incentivo à leitura em várias escolas e ilustram várias tirinhas, inclusive em livros didáticos. Outro trabalho que pode ser considerado é de Marcelo d’Saete, o autor retrata em três obras a realidade dos povos afrodescendentes no período colonial e ainda hoje. Em Cumbe é retratada a luta e a resistência do povo negro escravizado no período colonial (d’Saete, 2018). Angola Janga trata do conhecido Quilombo dos Palmares (d’SALETE, 2017). Na obra Encruzilhada é retratada a discriminação e violência sofrida por jovens negros que vivem nas periferias das grandes cidades (d’SALETE, 2016).

Sobre a utilização de HQs em ambiente escolar, Vergueiro (2020, p. 21) apresenta vários motivos que justificam sua utilização como ferramenta de auxílio na aprendizagem. O primeiro ponto relevante é a popularidade deste tipo de leitura entre crianças e adolescentes, o que potencializa a motivação “aguçando sua curiosidade e desafiando seu senso crítico” (VERGUEIRO, 2020, p. 21). A combinação de imagens e textos contribuem para que se ampliem o nível da comunicação, o que melhora a aprendizagem. Como as HQs permitem a abordagem de temas que vão desde humor, temas históricos, ficção científica, entre outros, torna-se alto o nível de

informações possíveis de se trabalhar. O enriquecimento das possibilidades de comunicação presente nas HQs contribui para que o hábito da leitura se torne rotineiro entre os estudantes, ao mesmo tempo que enriquece seu vocabulário.

A diagramação com que as HQs são organizadas é outro fator importante, uma vez que o “quadrinho mostra uma sequência intercalada por espaços vazios, onde nossa imaginação cria imagens de ligação. Entre um quadrinho e outro, a ação tem continuidade na cabeça do leitor” (LOVETRO, 1995, p. 94). Este tempo de reflexão não é possível, por exemplo na TV e no cinema.

1.2 – ASPECTOS HISTÓRICOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE

O conhecimento científico não é algo que surge de hora para outra, pronto e finalizado. Ao contrário, é fruto do estudo e colaboração de várias pessoas no decorrer da história, cada qual com os desafios peculiares de sua própria época, assim como, o conhecimento já adquirido até dado momento.

Com a Teoria da Relatividade de Einstein não foi diferente. Um longo caminho foi percorrido e preparado para que ela pudesse ser determinada. Isso não significa o demérito de seu autor, muito pelo contrário, da mesma forma que muitos antecessores de Einstein colaboraram para seu trabalho, suas conclusões foram importantes para futuras evoluções do conhecimento científico.

No texto que se segue serão apresentados alguns elementos da história da Física que conduziram à Teoria da Relatividade como também alguns desdobramentos teóricos e tecnológicos ocasionados pela teoria. Ao mesmo tempo, ressalta a importância da abordagem histórica sobre a construção do conhecimento, rompendo como a ideia de que o conhecimento é fruto de poucas pessoas, consideradas como gênios, que descobrem tudo sozinhas.

1.2.1 – RELATIVISMO NAS TEORIAS DO MOVIMENTO

Desde os tempos mais remotos, a compreensão do movimento da Terra pelo espaço, ou o movimento dos demais astros ao seu redor, é motivo de reflexão. Encontram-se relatos históricos dando conta do modelo geocêntrico, onde os demais astros moviam-se ao redor da Terra estática, fato que era e é facilmente perceptível

para quem se encontra na superfície da Terra. Uma forma simples de demonstrar esse repouso foi proposta por Aristóteles (sec. IV a.C.), lançando verticalmente para cima algum objeto, percebe-se que ele retorna para a posição de lançamento, fato que não deveria acontecer caso a Terra estivesse em movimento. Como o objeto estaria livre a certa altura durante alguns segundos, deveria cair a vários metros de seu lançador. O pensamento de Aristóteles consistia num misto entre empirismo e indutivismo. Por outro lado, ainda no século III a.C. já havia também, a proposta de um sistema heliocêntrico, onde o Sol seria o astro central (Martins, 2015, p. 25).

Durante a Idade Média surge com Nicole Oresme (1320-1382) a ideia de que seria impossível determinar se a Terra está em repouso ou se movendo pelo espaço a partir de qualquer observação feita dela própria. Observando algum objeto como referência através de uma pequena janela de um veículo em movimento com velocidade constante, é praticamente impossível afirmar quem está em movimento, o veículo ou o objeto de referência. Martins (2015) nos relata vários argumentos favoráveis e contrários ao pensamento aristotélico durante a Idade Média. Podemos inclusive, vislumbrar uma ideia embrionária do princípio da inércia, pois “a Terra poderia estar em movimento, mas como estamos em movimento com ela temos a sensação de que ela está parada e que os céus estão em movimento em torno de nós” (MARTINS, 2015, p. 29).

No início do século XVII, Galileu Galilei, apoiado pela teoria heliocêntrica de Copérnico, apresenta uma proposta para responder as indagações sobre o assunto que viria a se tornar o princípio da relatividade de Galileu. Uma vez que o movimento da Terra é comum à tudo que está sobre ela, não seria possível percebê-lo, pois participamos do movimento. O princípio da relatividade de Galileu nos diz ser “impossível detectar um movimento retilíneo uniforme de um referencial em relação a outro por qualquer efeito sobre as leis da dinâmica” (NUSSENZVEIG, 2014, p. 148). A única forma de se perceber um movimento seria ele deixar de ser uniforme.

Inspirado por Giordano Bruno, Galileu sugere um experimento imaginário onde,

duas pessoas entrariam na cabine de um navio e fariam vários experimentos lá dentro, tanto com o navio parado quanto em movimento. Afirmou então, que todos os experimentos dariam exatamente o mesmo resultado, tanto no caso em que o navio estivesse parado quanto no caso em que ele estivesse se movendo rapidamente. Portanto, nenhum experimento realizado dentro da cabine do navio permite determinar se ele está se movendo (MARTINS, 2015, p. 33).

As reflexões de Galileu sobre a percepção do movimento terrestre ilustrado por situações cotidianas, acaba por provocar uma mudança de paradigmas da visão aristotélica e em muito influenciou Isaac Newton na concepção de suas leis para o movimento.

Martins (2015) apresenta também as reflexões de René Descartes, contemporâneo de Galileu. Para Descartes o movimento nada mais seria que a mudança da posição em relação a algo que serviria como referência. O movimento seria algo relativo uma vez que alterando o ponto de referência teríamos movimentos diferentes. Sobre o movimento dos planetas, acreditava que “eram transportados por uma espécie de matéria invisível que girava em torno do Sol” (MARTINS, 2015, p. 34).

Como já mencionado, Isaac Newton (1642-1727) sofreu influências de Galileu e dos trabalhos de Descartes, Copérnico e Kepler. Newton aceitava a ideia dos movimentos de rotação e translação da Terra e defendia diferença nos efeitos de ambos. Enquanto o movimento de rotação apresentava efeitos detectáveis mediante experimentação – como o giroscópio e o pêndulo de Foucault (NUSSENZVEIG, 2013, p. 350).

O movimento de translação não modifica um evento interno nem poderia ser percebido por experimentações em laboratório, uma vez que a Terra e tudo que há nela, seja em repouso ou movimento, possui mesma velocidade relativa ao que Newton denominou de espaço absoluto. A existência de referenciais inerciais são a garantia para êxito das três leis do movimento de Newton, o conceito de espaço absoluto independente da matéria torna-se assim, elemento fundamental da interação mecânica entre partículas.

A teoria do espaço absoluto, permitia a adoção de vários referenciais, sempre inerciais, para descrever um movimento, “a velocidade de translação de um objeto depende do sistema de referência a partir do qual se mede e não existe referencial inercial privilegiado” (MENEZES, 2005, p. 117). Ainda conforme citado por Menezes, a mudança de referencial não pode alterar o fato físico em si, apenas a maneira que cada observador descreve o mesmo fato.

Apesar da teoria newtoniana se mostrar coerente, previsível e universal, o conceito de espaço absoluto recebe críticas de seus contemporâneos Leibniz, Berkeley e já no século XIX, por Ernest Mach, cujas ideias iriam influenciar Albert Einstein (PORTO e PORTO, 2008; MARTINS, 2015, p. 37).

1.2.2 – O ÉTER E A LUZ

Com a consolidação da teoria do movimento de Newton, houve uma tendência natural de se aplicar as ideias do movimento relativo também para a luz, uma vez que o próprio Newton, assim como a maioria dos cientistas de seu tempo, considerava a luz como partícula, consideração que prevaleceu até o século XVIII.

A partir do início do século XIX, houve rápida mudança para uma hipótese ondulatória da luz, influenciada principalmente, pelos trabalhos de Thomas Young (1773-1829) e Augustin Jean Fresnel (1788-1827). A luz a passa ser tratada como uma onda, seria necessário então, a existência de um meio de propagação como para as ondas mecânicas, a exemplo do som.

Fresnel defendia a teoria da existência de uma substância estacionária, preenchendo todo o espaço, o éter. Segundo ele, os objetos – a Terra por exemplo – se moviam pelo éter assim como o éter poderia se mover através dos objetos. Uma parte do éter também poderia ser carregado pelas substâncias transparentes e quando esses objetos transparentes estivessem em movimento o éter nele contido se moveria juntamente, ocasionando assim, uma modificação na velocidade da luz que o atravessasse. Em 1851, Fizeau consegue demonstrar experimentalmente, resultados satisfatórios quanto a teoria de arrastamento do éter de Fresnel, com “impressionante confirmação quantitativa” (MARTINS, 2015, p. 56)

Nas primeiras décadas do século XIX tem-se praticamente consenso entre a comunidade científica de que a luz seria uma onda do éter e que, a velocidade da luz não dependeria do movimento da fonte, mas das propriedades do éter, da mesma forma que acontecia com o som. Costa (1995) relata que o “movimento relativo da matéria e do éter foi uma das grandes preocupações dos físicos no século passado” (COSTA, 1995, p. 5). A julgar pela data do texto de Costa, entenda-se “século passado” como sendo o século XIX. Nessa perspectiva, seria possível utilizar a luz para medir a velocidade relativa da Terra no éter e não mais pelo espaço absoluto como previa Newton.

Os resultados insatisfatórios quanto o movimento da Terra em relação ao éter, contrariando a teoria de Fresnel, levaram George Stokes, em 1845, a propor a teoria do éter viscoso que seria arrastado pela superfície da Terra, ou seja, próximo da superfície da Terra a velocidade relativa ao éter seria nula. Assim, “embora a Terra se mova através do éter e a luz seja transmitida pelo éter, os fenômenos da óptica

(reflexão, refração e propagação retilínea) não permitem detectar esse movimento” (MARTINS, 2015, p. 53).

1.2.3 – O ÉTER E O ELETROMAGNETISMO

Se na primeira metade do século XIX havia uma preocupação em estudar as características do éter como meio de propagação da luz e velocidade relativa da Terra pelo éter, a partir da segunda metade do século ocorreram avanços importantes no estudo do eletromagnetismo.

Inspirado pelas descobertas de Hans Christian Oersted, de que a corrente elétrica por um fio condutor é capaz de interagir, desviando a agulha imantada de uma bússola, Michael Faraday (1791-1867) conseguiu demonstrar o efeito oposto. Com um ímã permanente cilíndrico e um solenoide, Faraday demonstrou que uma força magnética é capaz de induzir uma corrente elétrica quando realizado um “movimento relativo entre o ímã e a bobina, resultando numa variação do campo magnético que a atravessava” (NUSSENZVEIG, 2016, p. 156). Essa descoberta unificaria os fenômenos elétricos e magnéticos.

Até o início do século XIX predominava entre os físicos o modelo newtoniano de ação à distância para as interações entre corpos. Faraday defendia a ideia de que as interações elétricas e conseqüentemente as magnéticas, ocorreriam por meio de linhas reais que transferiam as forças elétricas e magnéticas (BRENNAN, 2003, p. 65; MARTINS, 2015, p. 87).

O estudo dos trabalhos de Faraday desperta o interesse pelos fenômenos elétricos e magnético em James Clerk Maxwell (1831-1879). Maxwell percebe aspectos comuns nas leis da eletricidade, do magnetismo e da óptica, desenvolvendo um conjunto de equações matemáticas capaz de unificar essas leis. Ele ainda surpreende a comunidade científica com a teoria, também matemática, da existência de ondas eletromagnéticas assim como a luz, pelo espaço vazio. Entenda-se espaço vazio como ausência de meio material e preenchido pelo éter. A luz é apresentada como um caso particular das ondas eletromagnética. Por sua vez, toda onda eletromagnética apresenta a velocidade da luz no éter.

O éter é apresentado com um meio necessário para os fenômenos eletromagnéticos, contrariando a ideia de interação a distância entre as cargas

elétrica, predominante até então. Sobre a relevância do éter, na teoria de Maxwell, Martins (2015) nos diz:

a energia eletrostática estaria armazenada sob a forma de tensões no éter, sendo portanto um tipo de energia potencial elétrica. A energia magnética, por sua vez, seria uma forma de energia cinética (de rotação dos elementos que constituem o éter). O éter seria capaz não apenas de produzir forças e armazenar energia, mas também teria, em certas circunstâncias, uma quantidade de movimento (momentum). Podia, assim, ser pensado como uma realidade física, um ente dotado de propriedades mecânicas (MARTINS, 2015, p. 89).

A proposta da existência e das propriedades das ondas eletromagnéticas não foi de pronto aceita pelos físicos.

Apesar da unificação teórica das equações de Maxwell, elas apresentavam resultados apenas quando aplicadas à “fenômenos do ponto vista de um referencial parado em relação ao éter” (MARTINS, 2015, p. 90). Quando analisadas para um sistema de coordenadas em movimento em relação a um observador, mesmo que inercialmente (velocidade constante), as equações eram incompatíveis com as transformações de Galileu para mecânica clássica.

A teoria eletromagnética de Maxwell indicava a existência de algo ainda mais estranho e surpreendente, uma nova grandeza absoluta para qualquer observador, sua velocidade (PORTO e PORTO, 2008).

Menezes (2005) faz uma boa exemplificação para explicar a inconsistência das equações de Maxwell para referenciais em movimento:

Uma pessoa que caminhe com um capacitor em suas mãos, em direção paralela as suas placas, está parada relativamente a elas e só percebe o campo elétrico atrativo, resultante da atração recíproca entre as cargas opostas distribuídas em cada uma das placas. Outra pessoa, parada relativamente à primeira, verá o capacitor se movendo. Para este, cada superfície em movimento, coberta de cargas, corresponde a uma corrente que produz um campo magnético, e que, como cargas em movimento, também sente a ação do campo magnético produzido pela outra placa. Assim, além do campo elétrico atrativo notado pela outra, essa pessoa perceberia uma repulsão magnética agindo sobre as placas. [...] Dessa forma, em diferentes referenciais inerciais, estariam sendo observadas forças diferentes nas mesmas circunstâncias físicas, o que violaria o princípio da relatividade (MENEZES, 2005, p. 120).

O ano da morte de Maxwell, 1879, coincide com o ano do nascimento de Einstein, na cidade de Ulm, na Alemanha.

A demonstração experimental da existência das ondas eletromagnéticas foi realizada por Heinrich Hertz (1857-1894). Em 1887 Hertz realizou vários experimentos que reproduziram na prática, aquilo que Maxwell conseguira teoricamente, sobre as

ondas eletromagnéticas. Estas ondas seriam transversais e com velocidade de propagação igual ao da luz no vácuo, ou seja, no éter. As ondas tinham também, “as mesmas propriedades de reflexão, refração e polarização que as ondas da luz e que podiam ser modificadas ou focalizadas” (BRENNAN, 2003, p. 67).

No ano dos experimentos de Hertz, 1887, o pequeno Einstein chegava aos 8 anos de idade.

1.2.4 – O EXPERIMENTO DE MICHELSON E MORLEY

Como já mencionado, a medida da velocidade relativa da Terra pelo éter ocupou lugar de destaque entre os físicos do século XIX. O próprio Maxwell também se preocupou em determinar esse resultado, uma vez que sua teoria para as ondas eletromagnéticas sugeriria a existência de um meio de propagação, o éter.

Maxwell acreditava que o movimento da Terra pelo éter estacionário provocaria o efeito de vento do éter, contrário ao movimento da Terra. O vento do éter influenciaria a velocidade da luz assim como o vento atmosférico influencia as ondas sonoras. No entanto as tentativas de Maxwell não atingiram resultados satisfatórios.

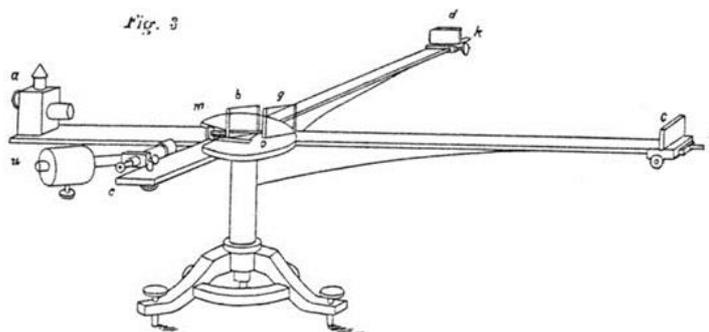
Sem dúvidas o experimento de maior relevância para determinar a velocidade relativa da Terra ao éter foi o chamado interferômetro de Michelson e Morley (BRENNAN, 2003, p.68; MARTINS, 2015, p. 79; MENEZES, 2005, p. 122; NUSSENZVEIG, 2014, p. 149), realizado em 1887, ano da morte de Maxwell. Albert Abraham Michelson (1852-1931) havia conseguido os melhores valores para a velocidade da luz e por isso, foi incentivado a tentar determinar a velocidade relativa da Terra através do éter (Martins, 2015, p. 73). Michelson considerou que o melhor método para isso seria por interferometria e em 1881, realizou pela primeira vez o experimento do interferômetro.

O experimento consiste em um feixe de luz dividido em outros dois que percorrem direções perpendiculares. Uma das direções seria coincidente ao movimento de translação da Terra, a outra direção como já dito, perpendicular a esse movimento. Após percorrerem distâncias iguais (os braços do interferômetro), os feixes separados incidiam em espelhos, refletindo e se recombinando novamente. O feixe na mesma direção do movimento da Terra sofreria o efeito contrário do vento do éter, reduzindo sua velocidade. A menor velocidade provocaria uma diferença do

tempo de propagação desse feixe em relação ao outro, que por sua vez seria percebida pelo interferômetro (Figura 1.4).

Nessa primeira tentativa do experimento, Michelson não encontrou resultados satisfatórios, ou seja, não houve diferença considerável entre os tempos de propagação dos raios de luz, levando-o a questionar a ideia de éter estacionário de Fresnel e simpatizar pela proposta de éter viscoso de Stokes.

Figura 1.4 – Esquema do interferômetro de Michelson, 1881.



Fonte: <https://terrara.com.br/fisica-teorica/pesquisas-e-estudos/por-que-descobrir-nada-na-ciencia-pode-ser-tao-incrivelmente-importante/>. Acesso em 13/09/2021.

Com a colaboração de Edward Williams Morley (1838-1923) no ano de 1887, Michelson melhorou a precisão do interferômetro. Após a realização de várias medidas não conseguiram observar nenhum resultado da influência do éter na determinação da velocidade relativa da Terra. Mais uma vez o tempo de propagação dos raios de luz mostraram-se iguais.

A nova tentativa reforçou a ideia que a teoria de Stokes parecia mais adequada para explicar o éter, o que os levou a repetir o experimento a certa altitude, onde a viscosidade do éter deveria ser menor. Novamente os resultados foram nulos.

Apesar da relevância do experimento de Michelson e Morley, ele não constituiu a motivação principal e provavelmente Einstein nem teria tido contato com seus resultados em 1905 quando propôs a Teoria da Relatividade Restrita (BRENNAN, 2003, p. 67; NUSSENZVEIG, 2014, p. 152; THUILLIER, 1994, p. 240; TIPLER, 2006, p. 12)

Uma possível explicação para efeito nulo do experimento foi apresentada em 1892 por Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). A pressão provocada pelo vento do éter sobre as moléculas do braço do interferômetro que se move na direção paralela à Terra, causaria uma estranha contração em seu comprimento. A diferença provocada pela contração faria o tempo de ida e volta da luz por esse braço igual ao tempo do braço perpendicular. De forma independente, George Francis Fitzgerald

(1851-1901) também apresenta a proposta de contração para justificar os resultados apresentados no experimento e Michelson e Morley (COSTA, 1995, p. 5; MARTINS, 2015, p. 80; ROSA, 2012, p. 175). A solução sugerida por Lorentz será mais bem apresentada na seção 1.3.4.

Em 1895, um ano antes de Einstein iniciar os estudos no Instituto Politécnico de Zurique, Lorentz viria a demonstrar a possibilidade da aplicação das equações de Maxwell para qualquer referencial, desde que realizadas algumas transformações de coordenadas. Mais tarde, em 1904 (um ano antes da publicação do artigo sobre a Teoria da Relatividade Restrita), Lorentz apresenta de forma definitiva as transformações de coordenadas e tempo, necessárias para uma teoria do eletromagnetismo para corpos em movimento (Martins, 2015, p. 126). Além do estranho fenômeno da contração dos comprimentos, Lorentz sugere também a existência de um tempo local para cada observador.

Martins (2015) relata que ainda em 1895, Jules Henri Poincaré (1854-1912), defende a impossibilidade de se medir a velocidade absoluta de qualquer matéria em relação ao éter. Seria possível medir a velocidade de uma matéria apenas por outra matéria.

Poincaré propunha melhorias na teoria de Fitzgerald e Lorentz (contração longitudinal da matéria em movimento), para explicar os resultados negativos no experimento do interferômetro de Michelson e Morley. Seria necessária uma lei da relatividade e não apenas um arranjo matemático que justificava um caso particular.

Em 1900, para explicar o conceito de tempo local de Lorentz, Poincaré propõe a invariância da velocidade da luz e sua independência ao éter como referencial, uma vez que seu valor também independeria do movimento da fonte.

Tanto Martins (2015, p. 105) como Nunes (2019) apresentam a influência do pensamento de Poincaré na teoria da relatividade de Einstein, em especial o livro *Ciência e hipótese* de 1902, que Einstein estudaria e debateria com colegas no ano de 1903. Na dissertação de seu mestrado, Nunes faz um resumo de tudo que Poincaré havia proposto sobre temas que viriam a tratar a teoria da relatividade de Einstein:

entre 1900 e 1904, Poincaré já havia deduzido: a relação massa-energia, a rejeição do espaço e tempo absoluto, a relatividade da simultaneidade, o efeito de contração do espaço e dilatação do tempo e apresentado uma formulação exata do princípio da relatividade (NUNES, 2019, p. 27).

Nesse mesmo período já se tinham alguns resultados referentes a dinâmica relativística, a saber: a influência da velocidade na variação da massa do elétron; relação entre fluxo de energia e densidade de momento; e indícios da relação entre massa e energia (MARTINS, 2015, p. 225).

1.2.5 – A TEORIA DA RELATIVIDADE

Einstein inicia sua formação acadêmica em 1896 no Instituto Politécnico de Zurique, concluindo a licenciatura em Matemática e Física no ano 1900. Após formado, não conseguiu o cargo de professor assistente na universidade, trabalhando como professor temporário e mesmo assim, não em período integral. Em 1902 começa a desempenhar a função de perito técnico do Departamento de Patentes da Suíça, em Berna (BRENNAN, 2003, p. 62; MARTINS, 2015, p.184). Ainda, de acordo com Brennan, o trabalho era agradável a Einstein e lhe proporcionava condições para refletir sobre Física e sobre um pensamento que tinha desde os 16 anos (Figura 1.5), “ele perguntava a si mesmo o que veria se corresse atrás de um feixe de luz na velocidade da luz” (BRENNAN, 2003, p. 71).

Figura 1.5 – Ilustração representando o pensamento de Einstein sobre viajar junto a um feixe de luz com a mesma velocidade.



Fonte: o autor.

Em 1905, o chamado “ano miraculoso” (ROSA, 2012, p. 173), Einstein consegue publicar 5 artigos diversos na revista alemã *Annalen der Physik*. Um desses trabalhos, sobre dimensões moleculares, rendera-lhe o título de doutor em 1906. Outro artigo que tratava do efeito fotoelétrico faria com que Einstein viesse a conquistar o prêmio Nobel em 1921. O artigo sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento daria início ao que chamamos de Teoria da Relatividade Restrita¹ (BRENNAN, 2003, p. 70; MARTINS, 2015, p. 190; ROSA, 2012, p. 175).

¹ Optou-se no presente trabalho a utilização do nome Teoria da Relatividade Restrita, porém ela também é conhecida por Teoria da Relatividade Especial.

No artigo sobre a Teoria da Relatividade Restrita, de 1905, Einstein propõem dois postulados para as leis dos movimentos. Einstein e Infeld (2008²) define os postulados para sistemas coordenados (SC) inerciais da seguinte forma:

- 1) A velocidade da luz *in vacuo* é a mesma em todos os SC que se movem uniformemente uns em relação aos outros.
 - 2) Todas as leis da natureza são as mesmas em todos os se que se movem uniformemente uns em relação aos outros.
- (EINSTEIN, INFELD, 2008, p. 150).

Os dois postulados apresentam como consequência alguns efeitos que tendem a contrariar o senso comum. Como a luz apresenta sempre a mesma velocidade para todo sistema de referenciais inerciais, ou seja, é absoluta, observadores distintos não concordam com a simultaneidade de um evento. Da mesma forma, o tempo tende a passar de maneira mais lenta para observadores em movimento com velocidade próxima a velocidade da luz, efeito denominado dilatação do tempo. O comprimento de um objeto também deveria ser afetado na direção de seu movimento quanto próximo a velocidade da luz, sofrendo uma contração de sua medida. A massa do objeto tenderia ao aumento de seu valor, tornando-se infinita para velocidade igual a da luz. Por fim, a teoria de Einstein prevê que certa quantidade de massa, mesmo que pequena, teria um potencial energético muito alto (BRENNAN, 2003, p. 72; ROSA, 2014, p. 176).

Martins (2015) apresenta três novidades de Einstein quanto a teoria da relatividade:

- “a estrutura da teoria da relatividade de forma mais simples do que nos trabalhos de Lorentz e Poincaré” (MARTINS, 2015, p. 226).
- “propôs a equação $E = mc^2$ como uma relação geral da sua teoria” (MARTINS, 2015, p. 226).
- Uma mudança epistemológica e não física: “negou a validade da ideia do éter... a física deveria lidar com aquilo que pode ser observado e medido” (MARTINS, 2015, p. 227).

Por mais que Einstein aguardasse a repercussão de seu trabalho revolucionário sobre a teoria da relatividade, suas ideias não foram de pronto aceitas ou mesmo compreendidas, uma vez que sua matemática conduzia para outro caminho diferente dos princípios básicos da mecânica newtoniana e do eletromagnetismo proposto por

² Reedição da tradução do original *The Evolution of Physics*, de 1938.

Maxwell (BRENNAN, 2003, p. 71). Ainda, segundo Brennan, apenas Max Planck demonstrou interesse por algumas de suas ideias.

A Teoria da Relatividade Restrita tem como uma de suas principais características o fato de se aplicar a sistemas de referenciais inerciais, ou seja, sistemas que apresentem velocidades relativas constantes, sem a presença de aceleração. Einstein tinha consciência de que se tratava de um caso particular de movimento e para que realmente prevalecesse a premissa de que as leis da física fossem as mesmas para todo referencial, tais leis deveriam valer também para sistemas acelerados. Um artigo publicado em 1907 vai tratar da teoria da relatividade para sistemas não inerciais. Nele Einstein propõem o princípio da equivalência, segundo o qual não deveria haver diferenças entre os efeitos da gravidade e da aceleração. Futuramente Einstein viria a relatar que esta teria sido a melhor ideia de sua vida (FREIRE Jr, 2002, p. 292; ROSA, 2014, p. 178; TIPLER, 2006, p. 64).

Para explicar o princípio da equivalência, Einstein se utiliza do exemplo hipotético de um observador confinado em uma caixa distante o suficiente de qualquer massa capaz de produzir campo gravitacional relevante e que, por sua vez é colocada em movimento por uma força constante:

A aceleração da caixa se comunica a ele por meio do fundo desta. Portanto ele deve sentir essa pressão nas pernas, senão acabaria estendido no chão. Em pé na caixa, ele se sente exatamente como uma pessoa em pé num quarto de uma casa na nossa Terra. Se ele largar um objeto que antes estava preso na sua mão, a aceleração da caixa não se comunicará ao objeto, o qual passará a se aproximar do chão da caixa, em movimento uniformemente acelerado relativo a esta. Além disso, o observador constatará que a aceleração do corpo em direção ao chão é sempre a mesma, seja qual for o corpo largado nesse experimento (EINSTEIN, 2019³, p. 81).

A situação descrita por Einstein é o ilustrado na Figura 1.6.

Figura 1.6 – Representação do princípio da equivalência.



Fonte: o autor.

³ Reedição da tradução do original *Über die spezielle und die Allgemeine Relativitäts theorie*, de 1916.

Para o caso de a caixa não estar sendo atraída por nenhuma força, seria impossível o observador distinguir diferença entre estar flutuando no espaço ou a caixa estar em queda livre no campo gravitacional da Terra.

Einstein continua trabalhando no Departamento de Patentes da Suíça até o ano de 1909, quando aceita o convite para o cargo de professor de física na Universidade de Zurique, de onde, logo é transferido para a Universidade de Praga, e retorna em 1912 para Zurique.

Em 1911, Einstein publica um novo artigo tratando o como a propagação da luz é influenciada pela gravidade. Propõem então, abandonar o modelo plano euclidiano para o espaço quadridimensional para adotar um modelo de espaço curvo (ROSA, 2014, p. 178)

O número 49 da revista *Annalen der Physik* traz a publicação do artigo intitulado: Os fundamentos da teoria geral da relatividade (BRENNAN, 2003, p. 83; ROSA, 2014, p. 178). Nele Einstein amplia os conceitos da teoria restrita da relatividade e descreve que “todas as leis da Física são invariantes em relação a qualquer mudança das variáveis espaciais e temporais” (ROSA, 2014, p. 178). A partir dos conceitos apresentados, torna-se possível uma teoria unindo a Teoria da Relatividade Restrita com a gravidade.

O modelo newtoniano para explicar a gravidade é confrontado pela Teoria da Relatividade Geral. No primeiro, a força gravitacional seria uma ação instantânea entre massas separadas por certa distância. A força gravitacional sofreria variação inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as massas. Para Einstein, uma vez que a maior velocidade possível é a da luz qualquer informação, a mudança da massa de um corpo por exemplo, necessita de certo tempo para produzir algum efeito à distância. É proposto então, que a gravidade não se trata de uma força entre as massas, mas sim, o efeito ocasionado pela deformação do espaço-tempo provocada na presença de uma massa muito grande a exemplo de uma estrela.

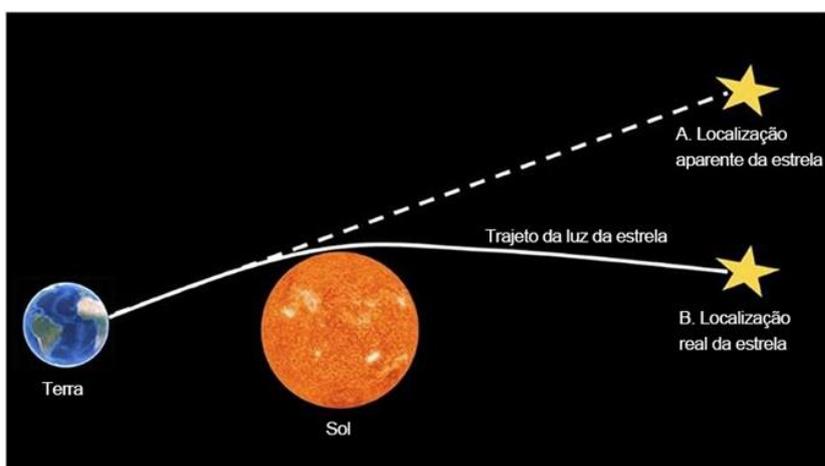
Einstein consegue explicar quantitativamente por meio de sua teoria geral da relatividade um problema clássico da teoria newtoniana: a precessão em 43 segundos de arco por século do periélio de Mercúrio (PIATTELLA, 2020, p 37; ROSA, 2014, p. 179; TIPLER, 2006, p. 65). Neste caso, a teoria de Einstein consegue resolver um conflito existente entre o valor observado e o previsto teoricamente: o valor obtido por meio da teoria newtoniana é de 532,9 segundos de arco por século, e o observado é

de 575 segundos de arco por século, portanto uma diferença de 43 segundos de arco por século (DUARTE MIRANDA, 2019, p. 15).

Outras previsões sugeridas pela teoria da relatividade deveriam ser confirmadas posteriormente de forma empírica:

- A luz mesmo não possuindo massa sofreria deflexão em um campo gravitacional devido a curvatura do espaço-tempo provocada pela presença de uma grande massa, conforme ilustrado na Figura 1.7. Na verdade, a teoria clássica previa certo desvio sutil, no entanto a teoria de Einstein dobra o valor previsto para a deflexão (PIATTELLA, 2020, p 36; TIPLER, 2006, p. 65).

Figura 1.7 – Representação da deflexão da luz ocasionada por uma grande massa.



Fonte: <https://parajovens.unesp.br/o-eclipse-solar-que-validou-a-teoria-da-relatividade-de-einstein/>. Acesso em 20/04/2023.

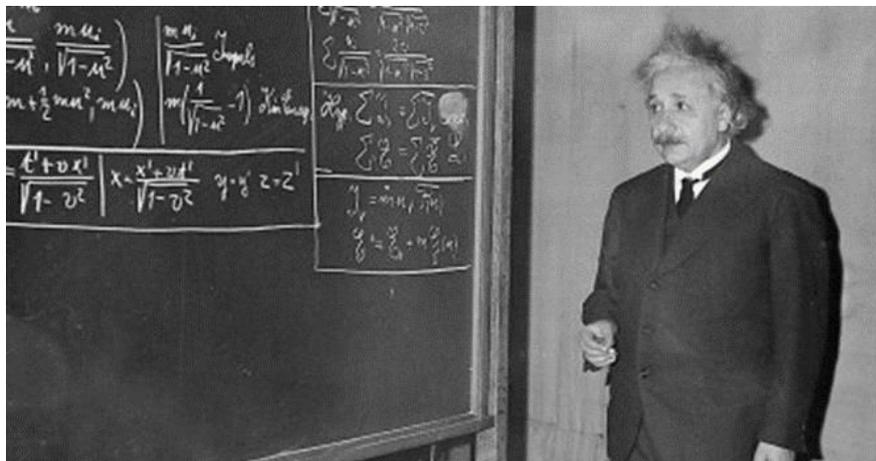
- A luz também deveria sofrer, ao afastar-se de um campo gravitacional muito intenso, a exemplo de uma estrela de nêutrons, um desvio para o vermelho (chamado de *red shift*). Durante o afastamento a luz perderia energia, ou seja, sofreria um aumento em seu comprimento de onda, diminuindo sua frequência. Em outras palavras a luz, que é uma onda eletromagnética, estaria sendo esticada pela gravidade ao tentar se afastar. Tal desvio veio a ser comprovado experimentalmente em 1960 por Robert Vivian Pound e Glen Rebka, por meio do experimento que ficou conhecido como Pound-Rebka, realizado na torre do Laboratório Jefferson da Universidade de Harvard, com apenas 22,5m de altura (PIATTELLA, 2020, p 38; TIPLER, 2006, p. 68; ACEVEDO, MORAIS e PIMENTEL, 2019, p. 12).

- Outros efeitos sugeridos e comprovados pela Teoria da Relatividade Geral são a existência de buracos negros e ondas gravitacionais (TIPLER, 2006, p. 72), assim como a teoria do *Big Bang* (BRENNAN, 2003, p. 94).

Especificamente o efeito da deflexão da luz é verificado experimentalmente em maio de 1919, quando duas expedições de cientistas ingleses se deslocaram, uma para a cidade de Sobral no Brasil, outra para a Ilha do Príncipe, na África, para a realização de observações de um eclipse que permitiria visualizar estrelas durante os minutos em que o Sol estivesse encoberto. A expedição que estava na África não obteve êxito devido ao mal tempo. A equipe que esteve presente em Sobral, no dia 29 de maio, conseguiu fotografar o eclipse e conseqüentemente várias estrelas em torno do Sol. Análises posteriores mostraram que as posições das estrelas nas fotos apresentavam desvios de suas reais posições. Os cálculos do desvio sofrido na trajetória da luz estavam de acordo (conforme apresentado na seção 1.3.6.4) com as estimativas da Teoria da Relatividade Geral de Einstein (BRENNAN, 2003, p. 91; PIATTELLA, 2020, p 37). Pode-se concluir que a luz sempre tende a seguir uma trajetória retilínea acompanhando a deformação do espaço-tempo. Os resultados obtidos em Sobral colaboraram para a primeira comprovação experimental da Teoria da Relatividade Geral, o que fez de Einstein uma celebridade no meio científico

Por conseqüência da chegada de Hitler ao poder, Einstein é forçado a deixar a Alemanha em 1933, indo para os Estados Unidos onde começa a lecionar no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, New Jersey. Na Figura 1.8, apresenta-se uma foto de Einstein em uma palestra no ano de 1934. Futuramente, viria a escrever ao presidente Roosevelt sobre o desenvolvimento de uma bomba atômica, mesmo que após, fizesse “campanha pelo desarmamento nuclear e se opôs às investigações do Congresso, no início dos anos de 1950, sobre as atividades antiamericanas” (ROSA, 2014, p. 173).

Figura 1.8 – Imagem fotográfica de Einstein durante uma palestra em 1934.



Fonte: <https://jornal.usp.br/atualidades/albert-einstein-o-genio-do-seculo-20/>. Acesso em 15/04/2023.

Einstein faleceu no Hospital de Princeton em 18 de abril de 1955, aos seus 76 anos.

A cosmologia moderna é marcada com a Teoria da Relatividade Geral.

1.3 – TEORIA DA RELATIVIDADE: RESTRITA E GERAL

Desde os primórdios o ser humano foi tomado pelo desejo do conhecimento quanto a tudo aquilo que está a sua volta, bem como conhecer as regras que definem a forma com que os eventos da natureza são provocados e se desenvolvem.

As leis de Newton, no século XVII, foram capazes de explicar a dinâmica envolvida nos movimentos, desde uma simples pedra em queda a alguns metros de altura como também, o movimento de corpos celestes, graças a análise da variação das posições temporais de cada um desses corpos, descrevendo assim as leis dos movimentos. Einstein nos diz que essa análise completa do movimento “só terá lugar se especificarmos como o corpo muda de posição como o tempo, isto é, para cada ponto da trajetória deve-se especificar a que tempo o corpo lá se encontra” (EINSTEIN, 2019, p.22).

A questão é que, para determinar estas posições se faz necessário determinar em relação a que se faz a medida, ou seja, escolher um referencial. O evento físico observado deve manter uma coerência para referenciais diferentes. Não podemos mudar o evento físico em si apenas pelo fato de o analisarmos por outro referencial.

A mecânica newtoniana tem se mostrado eficiente com o passar do tempo em explicar de forma satisfatória os movimentos, entretanto, no final do século XIX, com o advento das leis do eletromagnetismo de Maxwell, algumas inconsistências começam a surgir. Para dar conta das novas situações que surgem se faz necessário um repensar sobre os conceitos que descrevem os movimentos.

Nesse cenário de reformulação dos conceitos teóricos sobre o movimento envolvendo o eletromagnetismo, surge a teoria da relatividade de Einstein que prevê uma revolução na forma com que entendemos as leis do movimento.

1.3.1 – OBSERVAÇÃO DE UM EVENTO – TRANSFORMAÇÕES DE GALILEU

Podemos considerar como um evento físico, qualquer acontecimento que seja possível atribuir coordenadas espaciais e temporal por um ou mais observadores.

Cada observador pode atribuir coordenadas diferentes ao mesmo evento, desde que, garanta a invariância dele. Esta invariância é garantida pelas leis da mecânica clássica (de Galileu e de Newton) em referenciais inerciais. É possível que cada observador encontre valores diferentes para medidas realizadas em referenciais diferentes, mas nunca, leis físicas distintas para cada um dos referenciais (HALLIDAY, 1995, p. 126; TIPLER, 2006, p. 13).

Na física newtoniana, a relação entre as observações realizadas em diferentes referenciais é dada pelas transformações de Galileu. Considerando um sistema referencial S' em movimento com velocidade constante, em relação a outro sistema referencial S , em repouso, podemos definir que para $t = t' = 0$, a origem dos dois referenciais seja igual e que o movimento ocorra no sentido positivo da orientação do eixo x . Temos então:

$$\begin{aligned}x' &= x - v \cdot t & (1.1) \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t.\end{aligned}$$

As relações apresentadas tornam-se simples quando os referenciais adotados são inerciais. Temos um referencial inercial quando “nele vale a lei da inércia, ou seja, se uma partícula não sujeita a forças permanece em repouso ou em movimento retilíneo uniforme” (NUSSENZVEIG, 2014, p. 147).

Da mesma forma, é possível analisar a relação entre os valores das velocidades relativas para observadores em ambos os referenciais:

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v} \quad (1.2a)$$

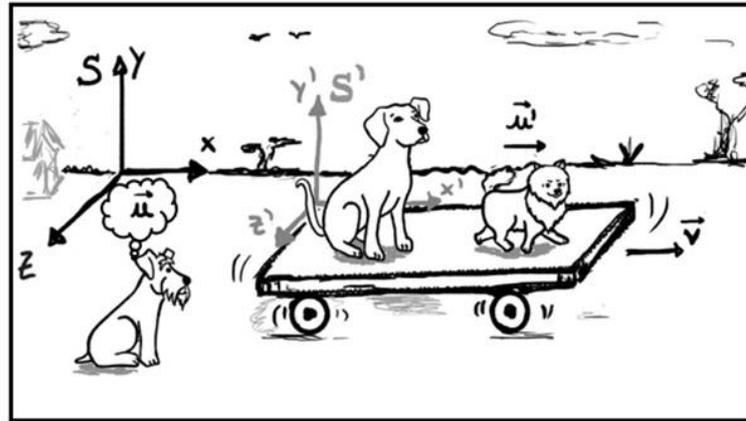
ou,

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}. \quad (1.2b)$$

Nesse caso, consideramos \vec{u} como a velocidade de um evento no referencial S' , porém, analisado por um observador no referencial S , conforme representado na Figura 1.9. A teoria clássica permite a soma de velocidade quando há movimento relativo entre dois referenciais.

É importante ressaltar que o tempo medido por um relógio no referencial S será sempre igual ao tempo medido por outro relógio, sincronizado com o primeiro, no referencial S' , conforme apresentado nas equações (1.1).

Figura 1.9 – Relação entre referenciais S e S'.



Fonte: o autor.

1.3.2 – A INVARIÂNCIA DO ELETROMAGNETISMO DE MAXWELL

Uma das virtudes da física newtoniana era garantir a invariância dos fenômenos físicos, independente do referencial inercial adotado, uma vez utilizadas as transformações de Galileu. O evento físico se mantinha invariante, mesmo que quantificado de formas distintas para diferentes referenciais inerciais.

Um dos grandes feitos teóricos da física foi sem dúvida alguma a unificação dos fenômenos elétricos, magnéticos e luminosos realizado por James Clerk Maxwell (1831-1879), em um conjunto único de equações, chamadas equações de Maxwell. O presente trabalho não tem como objeto discutir ou demonstrar os detalhes matemático de cada uma delas, no entanto, estão apresentadas no Quadro 1.1.

Quadro 1.1 – Equações de Maxwell na forma integral e diferencial.

Lei	Forma Integral	Forma Diferencial	
Gauss para o Campo Elétrico.	$\oint \vec{E} \cdot \hat{n} dA = \iiint_V \frac{\rho}{\epsilon_0} dV$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	(1.3)
Gauss Magnética.	$\oint \vec{B} \cdot \hat{n} dA = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	(1.4)
Faraday.	$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_s \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{A}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{-\partial \vec{B}}{\partial t}$	(1.5)
Ampère-Maxwell.	$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \iint_s \left(\mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{A}$	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	(1.6)
Campos: $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t)$ e $\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t)$			

Fonte: Nussenzveig, 2018, p.247; Prof. Paulo Ricardo Garcia Fernandes, notas de Aula de Eletromagnetismo – UEM/DFI, 2020.

No conjunto de equações apresentado no Quadro 1.1, o termo \vec{E} corresponde ao campo elétrico, \vec{B} ao campo magnético. São apresentadas também, as quantidades densidade de carga (ρ) e densidade de corrente elétrica (\vec{j}).

A teoria eletromagnética de Maxwell propunha ainda a existência de ondas eletromagnéticas. Para tanto, consideram-se a densidade de carga e a densidade de corrente nulas ($\rho = 0$ e $\vec{j} = 0$). Assim, as equações (1.5) e (1.6) em sua forma diferencial, tornam-se:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\end{aligned}\quad (1.7)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (1.8)$$

É perceptível a relação (acoplamento) entre os termos do campo elétrico e magnético (1.7) e 1.8). Todas as equações são parciais de primeira ordem. Omitindo-se a demonstração matemáticas para focarmos apenas no resultado, aplica-se a operação do rotacional em (1.7) e 1.8) para desacoplar \vec{E} e \vec{B} , obtendo-se:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.9)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.10)$$

que são respectivamente, as equações de onda para o campo elétrico \vec{E} e o campo magnético \vec{B} . A velocidade de propagação da onda eletromagnética seria mesma que a velocidade da luz, dada por,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \quad (1.11)$$

em que c corresponde a velocidade da luz (constante); μ_0 ($1,26 \times 10^{-6} H/m$) é a permeabilidade magnética e ε_0 ($8,85 \times 10^{-12} F/m$) é a permissividade elétrica, ambas para o vácuo.

O valor da constante $c \cong 3 \times 10^8 m/s$, passaria a ser uma referência da natureza aos demais valores de velocidades. Surgiria, no entanto, um problema, toda velocidade é medida a partir de um sistema de referencial, podendo apresentar valores distintos para referenciais inerciais em movimento relativo. Qual seria o

referencial privilegiado para o valor constante da velocidade de uma onda eletromagnética, ou seja, da luz?

Após Heinrich Hertz (1887) comprovar experimentalmente a existência das ondas eletromagnéticas (MARTINS, 2015, p. 89; BRENNAN, 2003, p. 66), a comunidade científica passa a aceitar sua existência, ao mesmo tempo que era sabido por todos que ondas necessitavam de um meio de propagação. Na ocasião se conhecia muito bem as propriedades de uma onda mecânica. O próprio Maxwell aceitava a existência de uma substância, o éter, com características especiais, “de ser extremamente rígida (para suportar as altas tensões mecânicas causadas pela propagação das ondas eletromagnéticas) e ao mesmo tempo não oferecer nenhuma resistência observável ao movimento dos planetas” (TIPLER, 2006, p. 6).

A teoria eletromagnética de Maxwell apresentava variâncias em relação a relatividade newtoniana e as transformações de Galileu, apresentando eventos distintos quando analisados entre referenciais com movimento relativo.

Para exemplificar, retomamos o contido na citação direta da subseção 1.2.3, em que Menezes propõe a seguinte situação: duas placas paralelas, uma com carga positiva e outra com carga negativa, encontram-se em repouso num referencial S' . Um observador neste referencial perceberia uma força elétrica atrativa entre as placas. No entanto, se as placas estivessem paralelas ao eixo x' do sistema de referencial S' que se encontra em movimento com velocidade constante no sentido positivo do eixo x de outro sistema referencial S , um observador em repouso para S , observaria as placas em movimento, por consequência além da força elétrica atrativa entre elas, teríamos para este segundo observador outra força, magnética de efeito repulsivo entre as placas (MENEZES, 2005, p. 120). Para referenciais diferentes, forças resultantes e consequentemente, eventos com efeitos diferentes, resultado inconcebível na teoria newtoniana.

Também Einstein em seu artigo intitulado Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento, de 1905, descreve a interação entre um ímã e um condutor observada em referenciais distintos:

... estando o ímã em movimento e o condutor em repouso, produz-se no entorno do ímã um campo elétrico com um certo valor de energia, que, nas regiões onde se encontram partes do condutor, dá origem a uma corrente elétrica. Porém, estando o ímã em repouso e movimentando-se o condutor, não gera-se então nos arredores do ímã nenhum campo elétrico, mas gera-se, por outro lado, no condutor uma força eletromotriz, à qual não corresponde uma energia, mas que - pressuposta a igualdade do movimento

relativo para os dois casos considerados – dá origem a correntes elétricas do mesmo tamanho e com a mesma direção, como as produzidas no primeiro caso pelas forças elétricas (EINSTEIN, 1905, p. 1).

Percebe-se que ao mudar o referencial de observação, mesmo que a consequência seja uma corrente elétrica no condutor, observa-se fenômenos distintos, um campo elétrico com certa energia ou a ausência de campo elétrico e a existência de uma força eletromotriz.

Aceitando-se a existência do éter com referencial privilegiado, poder-se-ia com o auxílio da teoria clássica, determinar a velocidade relativa da luz c' em relação a um referencial em movimento com velocidade constante v , em relação ao éter. A operação escalar seria:

$$c' = c - v. \quad (1.12)$$

Assim, a velocidade da luz apresentaria valores distintos para referenciais em movimento relativo, ou seja, $c' \neq c$, o que teria como consequência a necessidade das equações de Maxwell para o eletromagnetismo serem diferentes para referenciais em repouso ou em movimento em relação ao éter para garantir o valor de

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

Por lado, assumir o éter como um referencial privilegiado, permitiria a verificação experimental de sua existência uma vez conhecida a velocidade da luz e a velocidade de um referencial em movimento com uma fonte de luz no éter. No final do século XIX, vários experimentos foram realizados com objetivo de demonstrar o movimento relativo da Terra em relação ao éter, entre eles o realizado por Michelson e Morley, citado na subseção 1.2.4.

1.3.3 – O INTERFERÔMETRO DE MICHELSON E MORLEY

A existência do éter como referência privilegiado para validar as leis do eletromagnetismo de Maxwell, fez com que vários experimentos fossem realizados ao final do século XIX, procurando provar sua existência. Uma vez que a existência fosse comprovada seria possível também, analisar o movimento retilíneo e uniforme de um objeto, como a Terra, pelo éter. A velocidade da luz no referencial em movimento apresentaria valores diferentes para direções também diferentes e como já

mencionado, o éter seria o referencial privilegiado onde a velocidade da luz corresponderia a c (equação (2.3)).

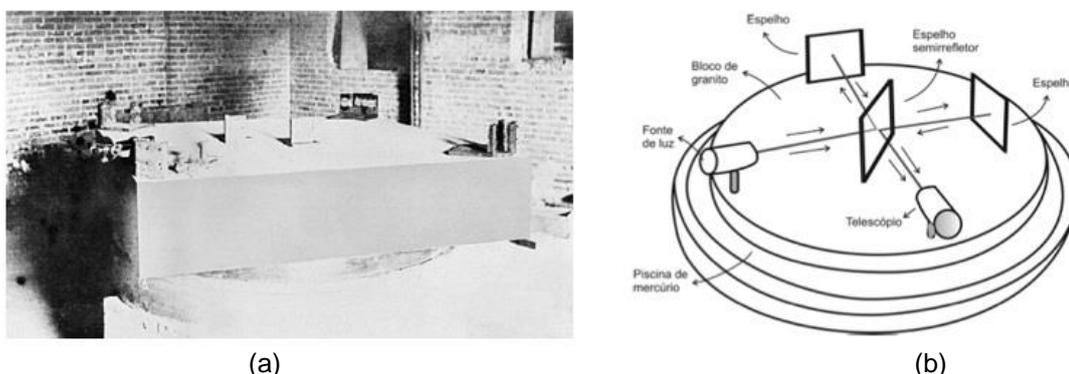
Era sabido que a velocidade de translação da Terra seria em torno de $v = 30 \text{ km/s}$. Já a velocidade da luz no referencial privilegiado do éter seria $c = 300.000 \text{ km/s}$.

Para perceber a diferença da velocidade da luz, muito grande, em diversas direções do referencial da Terra, seria necessário um aparelho com extrema sensibilidade para precisão necessária, o que levou Albert Abranham Michelson a “medir a relação v^2/c^2 por processo indireto, usando a interferência de ondas luminosas” (TIPLER, 2006, p. 8).

A primeira tentativa de Michelson aconteceu em 1881 cujo resultado indesejado foi atribuído a limitações na montagem do aparelho. Em 1887, com a colaboração de Edward Williams Morley o interferômetro foi aprimorado no referente a sua precisão (FEYNMAN, 2019, p. 15-3; MARTINS, 2015, p. 79; NUSSENZVEIG, 2014, p. 149; TIPLER, 2006, p. 8).

A lógica de funcionamento do interferômetro é que um feixe de luz após incidir em um espelho semitransparente é dividido para dois caminhos óticos, os braços de interferômetro, perpendiculares entre si. Nas extremidades de cada braço havia outros espelhos que refletiriam novamente a luz para o espelho semitransparente, que por fim eram desviados a um anteparo para observação (Figura 1.10).

Figura 1.10 – (a) Imagem do interferômetro de Michelson e Morley, 1887. (b) Esquema do interferômetro de Michelson e Morley, 1887.



Fonte: (a) <https://cienciadelux.com/2015/11/02/el-experimento-de-michelson-morley/>; (b) <http://www.vestiprovas.com.br/questao.php?questao=ufba-2013-1-36-fisica-geral-22938>. Acesso em 13/09/2021.

Um dos braços do interferômetro deveria permanecer na direção do movimento de translação da Terra e o outro, perpendicular ao movimento. Os caminhos diferentes dos feixes de luz nos braços do aparelho, causaria diferença de percursos da luz,

gerando um padrão de interferência quando os dois raios se encontrassem novamente do espelho semitransparente.

Para cada braço do interferômetro seria possível determinar o tempo que cada feixe de luz, após dividido no espelho semitransparente, gastaria para retornar após refletidos nos espelhos da extremidade de cada braço.

Braço paralelo ao movimento de translação da Terra:

Chamaremos de t_1 o tempo de ida e volta do feixe de luz no braço paralelo ao movimento da Terra. Ele ficaria sobre o efeito de um vento do éter.

Quando o movimento do feixe de luz estivesse favorável, ou seja, no mesmo sentido do movimento de translação da Terra, o vento do éter seria oposto,

$$c_{\text{favorável}} = c - v. \quad (1.13)$$

Por outro lado, ao retornar do espelho da extremidade do braço do interferômetro para o espelho semitransparente, ou seja, contrário ao sentido do movimento de translação da Terra, o efeito do vento do éter seria adicionado,

$$c_{\text{contrária}} = c + v. \quad (1.14)$$

Assim,

$$t_1 = \frac{L}{c - v} + \frac{L}{c + v}$$

expressão que pode ser reescrita como:

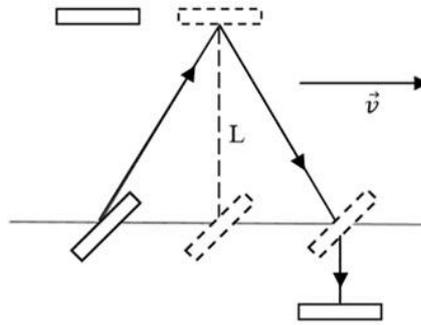
$$t_1 \cong \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) \quad (1.15)$$

em que L corresponde ao comprimento dos braços do interferômetro, que devido a várias reflexões, atingia em torno de 11 m.

Braço perpendicular ao movimento de translação da Terra:

No braço perpendicular do interferômetro, o caminho descrito pela luz no referencial da Terra é dado pela Figura 1.11 e possui características triangulares.

Figura 1.11 – Representação da trajetória da luz perpendicular ao movimento da Terra.



Fonte: o autor.

Chamaremos de t_2 o tempo necessário para a luz, após desviada no espelho semitransparente refletir no espelho da extremidade do braço do interferômetro e retornar novamente ao espelho semitransparente. Assim:

$$t_2 = t_{ida} + t_{volta}$$

$$t_2 = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}} + \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

expandindo até primeira ordem em $x = \left(\frac{v}{c}\right)^2$, pois esse termo é muito pequeno:

$$t_2 \cong \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right). \quad (1.16)$$

A diferença entre os tempos das duas trajetórias da luz é dada por (TIPLER, 2006, p. 9):

$$\Delta t = t_1 - t_2.$$

$$\Delta t = \frac{L v^2}{c^3}. \quad (1.17)$$

Comparando as equações (1.15) e (1.16), é possível perceber que $t_1 > t_2$, o que conseqüentemente produzia uma figura como franjas de interferência⁴.

Michelson e Morley previam que “uma rotação de 90° no interferômetro multiplicaria por dois a diferença de tempo e mudaria a fase, fazendo com que a figura de interferência se deslocasse de uma distância ΔN ” (TIPLER, 2006, p. 9), em que:

$$\Delta N = \frac{2L v^2}{\lambda c^2}. \quad (1.18)$$

⁴ Franjas de interferências são figuras formadas quando a luz interage com um obstáculo e após, é projetada em uma superfície. Exemplo: a luz de uma ponteira *laser* interagindo com um fio de cabelo e após, projetada em uma parede, conforme atividade experimental proposta por Oliveira (2016) em seu trabalho para conclusão do Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), neste mesmo polo.

Sendo que λ corresponde ao comprimento da onda luminosa. Michelson e Morley utilizaram uma lâmpada de sódio, no qual $\lambda = 590nm$.

Com os valores respectivos de c , v , e L , a previsão para o valor do deslocamento deveria ser de 0,4, porém encontraram algo 0,01 (NUSSENZVEIG, 2014, p. 151), que se confunde com a margem de desvio do próprio equipamento. Conclusão, não perceberam nenhum deslocamento.

O experimento foi repetido em estações diferentes do ano, uma vez que a velocidade vetorial de translação da Terra tem sentidos opostos entre o verão e inverno, por exemplo. Para todos os casos o resultado nulo se repetiu.

A incompatibilidade entre as equações de Maxwell para o eletromagnetismo e a mecânica newtoniana assombrava a comunidade científica no final do século XIX. Conforme citado por Nussenzveig (2014), apenas uma das seguintes possibilidades deveria prevalecer:

- (i) A mecânica newtoniana e as equações de Maxwell são válidas, mas o princípio de relatividade não se aplica a todas as leis físicas: existe um referencial absoluto (o éter), onde a velocidade da luz é c em todas as direções, e deve ser possível, por meio de experimentos eletromagnéticos, detectar um movimento retilíneo e uniforme em relação ao referencial absoluto do éter.
 - (ii) O princípio da relatividade aplica-se a todas as leis físicas e a mecânica newtoniana é correta. Nesse caso, as equações de Maxwell teriam de ser modificadas, e deveria ser possível observar desvios das leis eletrodinâmica clássica.
 - (iii) O princípio da relatividade aplica-se a todas as leis físicas, e as equações de Maxwell são corretas. Nesse caso, a mecânica newtoniana e a transformação de Galileu não podem ser corretas: deve ser possível observar desvios das leis da mecânica newtoniana.
- (NUSSENZVEIG, 2014, p. 149).

1.3.4 – TRANSFORMADAS DE LORENTZ

Diante dos resultados negativos atingidos por Michelson e Morley, Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) apresenta um conjunto de transformações de coordenadas que não anulam as antigas de Galileu, mas sim, as complementarizam para casos com velocidades próximas a da luz. Como consequência, o novo conjunto de transformações supunha “que o movimento de um objeto material através do éter pode alterar as forças entre suas partículas, e assim, mudar seu tamanho” (Martins, 2015, p. 80). Lorentz não defendia nenhum motivo físico para a contração dos objetos, apenas apresentou um arranjo matemático que justificasse os resultados encontrados experimentalmente, que será apresentado conforme segue.

Consideremos um sistema referencial S' em movimento com velocidade constante v em relação a um sistema ordenado S . Para facilitar a análise, vamos assumir as origens iguais em ambos os referenciais para $t = t' = 0$ e que o movimento de S' ocorra apenas no sentido positivo do eixo x . Para $v \ll c$, teremos as transformações clássicas apresentadas na equação (1.1).

No entanto, se a luz se move no eixo x' , positivo, com velocidade c , temos:

$$u'_x = c ,$$

e não

$$u'_x = c - v.$$

Lorentz percebeu a necessidade de um fator que fosse comum e que garantisse a constância da velocidade da luz para ambos os referenciais. O fator Lorentz, representado por γ , não poderia depender das posições, mas sim, de v e c , ao mesmo tempo que garantisse as transformações clássicas toda vez que $\gamma = 1$, ocorrido para $v \ll c$. Assim:

$$x' = \gamma(x - v.t) \quad (1.19a)$$

$$x = \gamma(x' - v.t'). \quad (1.19b)$$

Para o caso considerado, y' e z' não sofrem influência do fator γ , pois $y' = y$ e $z' = z$. No entanto, $t' \neq t$.

O objetivo é combinar as equações (1.19a) e (1.19b) e tentar uma função γ dependente apenas de v e c . Antes de realizarmos a manipulação matemática iremos propor um evento auxiliar, em que um fóton, com velocidade c é emitido quando as origens sejam $S = S' = 0$, e $t = t' = 0$.

Considerando-se o movimento do fóton apenas na orientação positiva do eixo x , tem-se:

- para S :

$$x = c.t \quad (1.20)$$

- para S' :

$$\begin{aligned} x' &= c.t' \\ t' &= \frac{x'}{c}. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Substituindo (1.19b) na equação (1.21):

$$t' = \frac{\gamma}{c}(x - vt). \quad (1.22)$$

O próximo passo é a substituição de x' da equação (1.19b), por (1.19a).

$$\begin{aligned}x &= \gamma[\gamma(x - vt) + vt'] \\x &= \gamma^2(x - vt) + \gamma vt'.\end{aligned}\tag{1.23}$$

Para eliminarmos o termo t' , a expressão de (1.22) em (1.23).

$$\begin{aligned}x &= \gamma^2 x - \gamma^2 vt + \gamma v \left[\frac{\gamma}{c} (x - vt) \right] \\x &= \gamma^2 x - \gamma^2 vt + \gamma^2 \frac{v}{c} x - \gamma^2 \frac{v}{c} vt.\end{aligned}\tag{1.24}$$

Finalmente, para eliminarmos o termo x de (1.24), basta fazer a substituição pela equação (1.20).

$$ct = \gamma^2 ct - \gamma^2 vt + \gamma^2 \frac{vct}{c} - \gamma^2 \frac{v^2}{c} t.\tag{1.25}$$

Observando-se com atenção a equação (1.25), percebe-se que vários termos se cancelam, obtemos assim uma expressão mais simplificada.

$$\begin{aligned}c &= \gamma^2 c - \gamma^2 \frac{v^2}{c} \left(\frac{1}{c} \right) \\1 &= \gamma^2 - \gamma^2 \frac{v^2}{c^2} \\1 &= \gamma^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \\\gamma^2 &= \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}\end{aligned}$$

e conclui-se:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\tag{1.26}$$

em que γ corresponde ao fator de Lorentz.

A equação (1.26) demonstra que o fator de Lorentz está em função unicamente do v e c . Assim, é comum chamarmos

$$\frac{v}{c} = \beta\tag{1.27}$$

em que β é temos valor adimensional, resultante da razão entre a velocidade v do referencial S' e a velocidade de luz c . O fator de Lorentz pode então ser reescrito em função de β .

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}.\tag{1.28}$$

Uma vez determinado o fator de Lorentz (γ), foi possível obter um conjunto transformações que aplicadas às equações de Maxwell não provocaria mudanças em suas formas. Tem-se assim em (1.29) as chamadas transformações de Lorentz.

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt) \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right).\end{aligned}\tag{1.29}$$

É possível perceber que para valores muito inferiores à velocidade da luz, o fator de Lorentz γ apresentado em (1.26) tende a 1. Nesse caso, as transformações de Lorentz recaem nas equações (1.1), satisfazendo as leis da mecânica clássica.

1.3.5 – TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Nos primeiros anos do século XX, Poincaré já havia proposto vários apontamentos sobre a teoria da relatividade, que viriam a influenciar Albert Einstein (NUNES, 2019, p. 27). Dos vários resultados já destacados até então, a contribuição de Einstein foi de apresentar “os mesmos resultados que já haviam sido obtidos por outros autores, porém utilizando uma forma diferente de deduzi-los (mais simples)” (MARTINS, 2015, p.161), além da utilização de “uma concepção epistemológica diferente” (ibidem, p. 225) ao abandonar a ideia do éter.

A Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Einstein tem como base dois postulados, segundo ele mesmo incompatíveis:

“(1º) não somente na mecânica mas também na eletrodinâmica, mas que, ainda mais, para todos os sistemas de coordenadas para os quais as equações da Mecânica valem, também as mesmas leis da eletrodinâmica e da ótica são válidas, como isso já tem sido provado para quantidades de primeira ordem. Queremos elevar esta hipótese (cujo conteúdo será chamado doravante “princípio de relatividade”) para postulado e além disto incluir o postulado, aparentemente incompatível com o primeiro, (2º) que a luz propaga no espaço vazio sempre com uma determinada velocidade V , independente do estado de movimento do corpo que a emite (Einstein, 1905, p. 1 – negritos do autor).

Vale ressaltar que no artigo “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, Einstein não utiliza a letra c , mas sim V , para descrever a velocidade da luz no vácuo, ou como ele denominava: espaço vazio.

Normalmente os dois postulados são apresentados da seguinte forma:

Primeiro postulado: sendo dois referenciais distintos, um inercial e outro em movimento com velocidade constante em relação ao primeiro, o segundo também é considerado inercial e para eles as leis da física devem ser as mesmas, não existindo referencial privilegiado.

Segundo postulado: para referenciais inerciais, a velocidade da luz tem sempre o mesmo valor c em todas as direções.

As transformações de Galileu, presentes na teoria newtoniana do movimento, não são capazes de descrever os eventos físicos que ocorrem a altíssimas velocidades, próximas a velocidade de propagação da onda eletromagnética – luz, o que provocaria mudança na forma das equações de Maxwell. Para satisfazer o primeiro postulado, Einstein sugere que “as leis gerais da natureza são covariantes às transformações de Lorentz” (EINSTEIN, 2019, p.57).

1.3.5.1 – DILATAÇÃO DO TEMPO E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Uma das maiores consequências dos postulados está no fato de que o tempo não é medido da mesma forma para dois referenciais inerciais, quando existir movimento relativo entre eles. Einstein propõem que o conceito de simultaneidade é relativo ao sistema de referencial adotado, cada um “tem sua própria noção de tempo; especificar um valor de tempo só faz sentido quando se especifica o referencial ao qual ele se refere” (EINSTEIN, 2019, p.39).

Para exemplificar a relatividade da simultaneidade, Einstein utiliza como exemplo de uma sala em movimento com velocidade constante e uma fonte exatamente no centro da sala emitindo um sinal luminoso em direção a cada parede. Analisando o dado fenômeno temos dois observadores, um interno a sala e outro externo. Para o que está no interior da sala o sinal atinge as paredes (frente e oposta) da sala simultaneamente, uma vez que são equidistantes e a velocidade da luz é igual para ambos os sentidos. Para o observador externo o sinal não atinge as paredes simultaneamente. Novamente, como a velocidade da luz independe da velocidade da fonte, o segundo observador irá visualizar

um sinal luminoso caminhando com uma velocidade-padrão, idêntica em todas as direções. Uma das paredes está tentando fugir do sinal luminoso e a parede oposta está tentando aproximar-se dele. Portanto, a parede que se afasta será atingida pelo sinal um pouco mais tarde do que a que se aproxima. Embora a diferença seja diminuta se a velocidade da sala for pequena em comparação com a da luz, o sinal luminoso não atingirá simultaneamente as

duas paredes opostas, que são perpendiculares à direção do movimento (EINSTEIN, INFELD, 2008, p. 151).

Como consequência do que descrito, caso houvesse um relógio em cada uma das paredes, ambos marcariam o mesmo tempo para o observador interno, porém, o mesmo não aconteceria para o observador externo. Assim, os “relógios que estão sincronizados em um referencial não estão sincronizados em nenhum outro referencial inercial que esteja em movimento em relação ao primeiro” (TIPLER, 2006, p. 14).

Outras duas consequências da Teoria da Relatividade Restrita são a dilatação do tempo e a contração do espaço. Ambas são, entre outros aspectos, os que mais desafiam nosso senso comum quando tratamos da teoria da relatividade. Halliday (1995) ao iniciar a abordagem do tema da teoria da relatividade, sugere que a maior dificuldade para o entendimento da teoria da relatividade não está necessariamente nas operações matemáticas, mas “no fato de a relatividade nos obrigar a reexaminar, criticamente, as nossas ideias de espaço e tempo” (HALLIDAY, 1995, p. 123).

A velocidade é a grandeza física que relaciona o tempo necessário para que um objeto saia de uma posição e chegue a outra. Na mecânica clássica de Newton é possível que observadores em referenciais inerciais distintos verifiquem valores diferentes para a velocidade do objeto em movimento. A relação dentre os valores encontrados se dá por meio das transformações de Galileu (equações (1.1)).

O segundo postulado da teoria da relatividade propõe que a velocidade da luz é sempre igual para qualquer referencial inercial, ou seja, seu valor é absoluto e para que isso se torne possível, o espaço e o tempo devem ser relativos. Tem-se assim, os efeitos da dilatação do tempo e a contração do espaço. Um relógio se movendo próximo a velocidade da luz marcaria o tempo lentamente quando comparado a outro em repouso. Já uma régua teria suas dimensões comprimidas na mesma situação.

Considerando dois observadores, O_1 em um referencial R em repouso e outro, O_2 em repouso num referencial R' , um trem por exemplo, com velocidade constante v próxima a velocidade da luz. Cada observador medirá o tempo de um relógio de forma diferente em seu referencial, sendo que o observador em movimento “o relógio em movimento anda mais devagar” (Einstein, 2019, p. 51). A diferença entre os tempos medidos em cada relógio será dada pela expressão:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'. \quad (1.30)$$

Imaginando que no trem haja uma régua em repouso e com seu comprimento na direção do movimento do trem. Cada observador perceberá a régua com comprimento diferente, sendo que “a régua em movimento é portanto mais curta que a mesma régua em repouso, e, quanto mais rápido o movimento, mais curta se torna” (EINSTEIN, 2019, p. 50). A Figura 1.12 demonstra como seria a percepção entre os comprimentos de observadores em dois referenciais distintos, estando um deles em movimento e outro em repouso. A relação entre os diferentes comprimentos é dada pela expressão:

$$L = \frac{L'}{\gamma}. \quad (1.31)$$

O comprimento L' é chamado de comprimento próprio e consiste no tamanho percebido pelo observador em repouso relativo à barra, ou seja, o observador O_2 .

Figura 1.12 – Representação da contração do espaço.



Fonte: <http://boomeria.org/physicslectures/secondsemester/relativity/tompkins.html>. Acesso em 11/06/2023.

Percebe-se por meio das equações (1.30) e (1.31) que a velocidade da luz c desempenha o papel de velocidade limite para qualquer outra velocidade na natureza, não podendo, portanto, ser ultrapassada. A dificuldade que temos em perceber os efeitos da teoria da relatividade em movimentos do cotidiano é na grande maioria eles apresentam velocidades muito baixas quando comparadas com a velocidade da luz.

Os Múons

Um das provas de que a dilatação do tempo é algo real pode ser obtida analisando o tempo de vida de uma partícula formada pelas colisões de raios cósmicos que penetram a atmosfera da Terra, colidindo com as moléculas de ar, essas partículas são os Múons (símbolo μ). O tempo de vida de um Múon é de aproximadamente $2,2\mu s$. Tempo esse medido em seu referencial, ou seja, com o Múon em um laboratório, possuindo baixa velocidade.

Grande parte dos múons são criados a uma altitude de aproximadamente 15 km possuindo uma velocidade da ordem de $0,9998c$. Esta alta velocidade faz com que o seu tempo de vida no sistema de referencial do laboratório seja dilatado permitindo que a maioria alcance a superfície da Terra.

Se calculado o deslocamento do Múon com seu tempo de vida próprio, $2,2\mu s$, ele conseguiria percorrer uma distância de aproximadamente 660 m, insuficientes para atingir a superfície da Terra. No entanto, o tempo ($\Delta t'$) de vida do Múon dilata-se em relação ao referencial do laboratório que está em Terra. Podemos calcular essa dilatação aplicando a equação (1.30), encontrando um novo valor de tempo $\Delta t = 110\mu s$, resultado que faz com que o Múon relativístico leve mais tempo para decair. Calculando novamente o deslocamento para o novo intervalo de tempo, obtém-se $\Delta s = 33.000m$, resultando uma distância suficiente para ser detectado ao chegar próximo da superfície da Terra (PEREIRA, 2019).

Brennan (2003) descreve um experimento realizado em 1971, quando dois relógios de césio comparados inicialmente com outro que permanecera como referencial no solo. Os dois primeiros após colocados em diferentes jatos, deram a volta ao mundo em sentidos opostos.

No término do experimento, os relógios não coincidiram mais quanto à hora do dia. O relógio enviado para o leste perdera uma média de 59 nanossegundos (bilionésimo de segundos) em relação ao relógio de referência, e o enviado para o oeste ganhara 273 nanossegundos. Esses resultados se aproximaram muito dos números previstos pelo cientista que conduziu o experimento (BRENNAN, 2003, p. 79).

Dois exemplos que ilustram o sucesso da Teoria da Relatividade Restrita aos testes que sucessivamente é submetida, comprovando que as ideias de Einstein estavam corretas.

1.3.5.2 – MASSA E ENERGIA

Considerando a teoria clássica newtoniana, massa pode entendida como aquilo que constitui a matéria, que por sua vez, ocupa lugar no espaço. A energia é compreendida como algo capaz de realizar trabalho e não ocupa lugar no espaço. A relação entre massa e energia é que a segunda interage com a primeira, transformando-a. Einstein apresenta um novo entendimento entre massa e energia, onde há uma equivalência entre ambas e até mesmo que a energia possui inércia (NUSSENZVEIG, 2014, p. 179).

Massa

Fato de difícil compreensão, mas a Teoria da Relatividade Restrita prevê que a massa de um corpo tem sua medida aumentada quando sua velocidade está próxima da velocidade da luz. A medida da massa tornar-se-ia infinita para velocidade igual a c .

O fator de Lorentz também é utilizado nesse caso para determinar o novo valor da massa em movimento:

$$m(v) = \gamma m_0, \quad (1.32)$$

sendo m_0 o valor da massa da partícula estando em repouso.

Kittel, Knigh e Rudeman (1970) corroboram com este fato dizendo que para “altas velocidades, v^2 não é proporcional à energia cinética, podemos esperar que a massa inercial varie com a velocidade” (KITTEL, KNINGH e RUDEMAN, 1970, p. 323).

A teoria da relatividade também prevê a impossibilidade de qualquer objeto com massa, possa ser acelerado até a velocidade da luz. Com o aumento da velocidade, conseqüentemente da massa, cada vez mais se fará necessário uma grande quantidade de energia, o que torna o processo impossível na prática. Segundo Einstein, “quanto mais próxima da velocidade da luz estiver uma velocidade, tanto mais difícil será aumentá-la” (EINSTEIN, INFELD, 2008, p. 164).

A teoria clássica newtoniana afirma que um objeto em repouso apresenta uma resistência ao movimento quando submetido a uma força externa, a inércia do objeto. Relaciona-se a inércia do objeto a sua massa, de tal forma que quanto maior a massa, maior será a resistência. A teoria da relatividade apresenta a velocidade do objeto,

quando próxima da velocidade da luz, como fator de resistência a uma força (EINSTEIN, INFELD, 2008, p. 164).

O aumento da massa com a velocidade é percebido em experimentos de aceleradores de partículas. “À medida que as partículas se movem mais rapidamente, sua massa aumenta” (BRENNAN, 2003, p. 81).

Para valores muito abaixo da velocidade luz, as de nosso cotidiano, os efeitos da variação da massa são desprezíveis, prevalecendo as leis newtonianas.

Energia

Conforme a teoria de Einstein, uma energia potencial enorme estaria contida em uma quantidade de massa pequena. Segundo Kittel, Knight e Rudernan,

A possibilidade da permuta entre massa de repouso e energia (e a relação quantitativa entre elas) foi considerada por Einstein como a contribuição mais significativa da teoria da relatividade. Enquanto as partículas não adquirem velocidades significativas relativamente à da luz, podemos usar a definição relativística da energia cinética, da qual concluímos que, em qualquer colisão entre partículas (mesmo quando os números das partículas incidentes e que saem forem diferentes), qualquer perda ou ganho líquido da massa de repouso vezes c^2 é igual ao ganho ou perda líquida da energia cinética (KITTEL, KNINGH e RUDEMAN, 1970, p. 372).

Substituindo-se a equação (1.32) na equação do momento linear da teoria clássica, obtém-se para uma partícula em repouso m_0 ,

$$\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v}. \quad (1.35)$$

A expressão da força relativística, agora com massa m (massa relativística) tomando como referência a segunda lei da Newton, torna-se,

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(\gamma m_0 \vec{v})}{dt}. \quad (1.36)$$

Omitindo-se o desenvolvimento matemático⁵, para uma partícula acelerada do repouso até a velocidade v , o trabalho realizado pela força será igual a energia cinética. Realizando devidamente a integral da equação (1.36) com limites de integração entre 0 (zero) e v , obtém-se uma expressão para a energia cinética relativística:

$$E_{cin} = \gamma m_0 c^2 - m_0 c^2, \quad (1.37)$$

⁵ O desenvolvimento matemático é deduzido por Tipler (2006), p. 49, em que ele considera a energia de repouso como sendo m .

Sendo que, o primeiro termo é a energia relativística da partícula livre e é dependente da velocidade v , pois $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ (equação 1.28), e tende ao valor clássico quando $v \ll c$, que pode ser visto ao expandir em série binomial o termo $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots$, e ao substituir na equação (1.7) dois termos se cancelam e na energia cinética restará somente o termo $\frac{1}{2} m_0 v^2$, e o segundo termo, correspondente a energia de repouso. A equação (1.37) pode ser escrita como: $E = E_{cin} + E_0$, ou seja, mesmo a partícula estando em repouso ela vai ter uma energia, sendo essa “provavelmente a mais famosa de todas as equações da física” (TIPLER, 2006, p. 50),

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (1.38)$$

A equação (1.38) é válida para qualquer massa relativística, e torna-se revolucionária, pois implica que um corpo aumenta sua massa ao adquirir energia, e diminui a massa quando a energia é perdida. A equação também descreve a forma com que o Sol emite energia ao fundir núcleos de hidrogênio em hélio.

1.3.6 – TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL

Reconhecido que nenhum tipo de movimento, de objetos ou sinais, pode ocorrer com velocidade maior que a velocidade da luz c , as equações de Maxwell para o campo eletromagnético tendem a satisfazer a essa condição. Não é possível dizer o mesmo quando analisado a interação de um campo gravitacional newtoniano. A gravidade na teoria de Newton é uma força entre objetos massivos agindo instantaneamente à determinada distância, em uma posição e tempo fixos. A gravidade apenas age no espaço e tempo.

Após a publicação do artigo sobre a Teoria da Relatividade Restrita, Einstein continua a refletir sobre uma forma de generalização da teoria para referenciais não inerciais, ao mesmo tempo que reflete sobre um novo modelo para a gravidade.

1.3.6.1 – O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA

Na subseção 1.2.5 são apresentados aspectos históricos sobre o princípio da equivalência e como foi introduzido por Einstein. Nesta subseção, o tema será apresentado para além dos aspectos históricos, destacando algumas consequências da teoria e alguns aspectos matemáticos.

Considere inicialmente, duas formas de determinar a massa de um corpo. Denominamos a massa inercial m_i do corpo quando sujeito a uma força \vec{F} , ele sofre o efeito de uma aceleração \vec{a} ,

$$m_i = \frac{F}{a}. \quad (1.39)$$

A outra forma é a denominada massa gravitacional m_g , resultada da força gravitacional ocasionada pela proximidade com outro corpo, a Terra M_T por exemplo,

$$m_g = \frac{Fd^2}{GM_T}. \quad (1.40)$$

Para uma região nas proximidades da superfície da Terra

a massa inercial de todos os corpos seja, dentro da precisão experimental, proporcional à massa gravitacional. (Por meio de uma escolha conveniente de G , a massa inercial pode ser tornada igual à massa gravitacional). A experiência mais simples para verificar isto consiste em ver se todos os corpos caem com a mesma aceleração (KITTEL, KNINGH e RUDEMAN, 1970, p. 407).

Menezes (2005) define e reforça que “a massa gravitacional, a carga da força peso, é exatamente igual à massa inercial, que é a resistência da matéria a um esforço para acelerá-la” (MENEZES, 2005, p. 134).

Na perspectiva de uma pessoa em queda livre e desprezando a resistência do ar, qualquer outro objeto abandonado por ela, seria experimentado como se estivesse em repouso em relação a pessoa. Considerando que tudo estivesse ocorrendo no interior de uma grande caixa em que a pessoa estivesse isolada visualmente do exterior, ela deixaria de sentir a sua massa, como se estivesse flutuando juntamente com o objeto. Esse “experimento de queda livre imaginado por Einstein tornou-se realidade corriqueira para astronautas em órbita, conforme foi possível visualizar em inúmeros vídeos” (NUSSENZVEIG, 2014, p. 185).

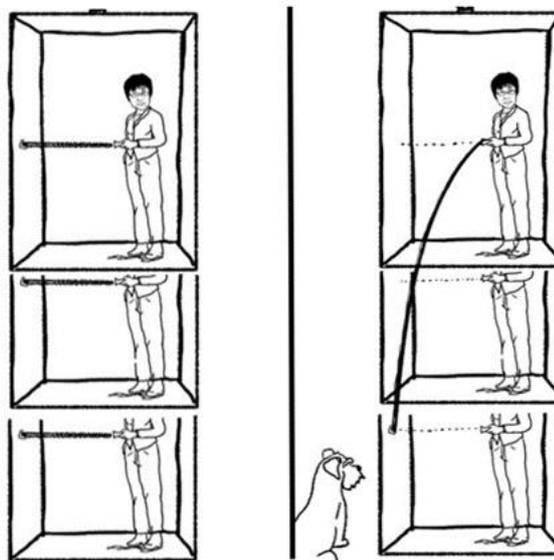
Se ao contrário, a caixa estivesse no espaço, suficientemente distante da ação de algum campo gravitacional e sendo atraída por alguma força externa com aceleração de $9,8 \text{ m/s}^2$, a pessoa sentiria uma pressão nos pés como se estivesse na superfície da Terra. Conforme já ilustrado na Figura 1.6, o objeto abandonado por ela, cairia da mesma forma que no campo gravitacional de nosso planeta. Segundo Tipler (2006), de acordo com a proposta de Einstein

não existe nenhum experimento capaz de distinguir o movimento uniformemente acelerado da presença de um campo gravitacional. Uma consequência direta do princípio de equivalência é o fato de que a igualdade

$m_i = m_g$ deixa de ser uma simples coincidência para se tornar uma necessidade (TIPLER, 2006, p. 65).

No experimento sugerido da caixa, ao invés abandonar um objeto qualquer, a pessoa poderia segurar uma fonte de luz com o feixe apontado para uma das paredes laterais da caixa (Figura 1.13). Se pensarmos na trajetória de um raio de luz entre dois pontos, intuitivamente afirmaremos ser uma reta. Einstein passou a defender que a luz deveria curvar-se na presença de um campo gravitacional. Mas como isso seria possível?

Figura 1.13 – Ilustração do experimento mental da caixa em movimento, na perspectiva de observadores em diferentes referenciais.



Fonte: o autor. O uso da imagem para ilustração foi autorizado para este trabalho.

1.3.6.2 – CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

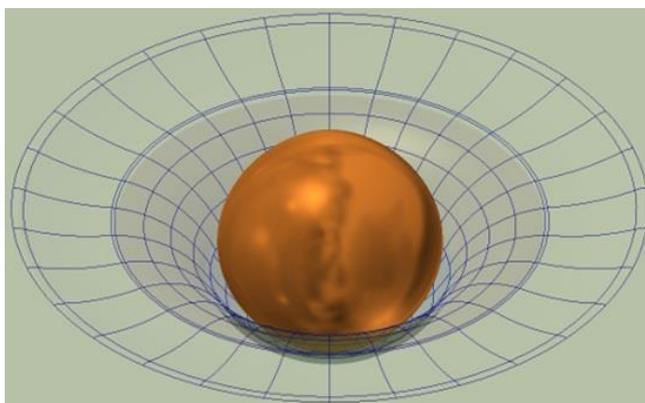
Para um movimento entre dois pontos na superfície da Terra, o caminho mais curto não é uma reta, mas sim, uma linha que acompanha sua superfície curva, chamada geodésica. Poderia então a gravidade tornar o espaço curvo? Como? Com a colaboração de Marcel Grossmann, Einstein abandona a ideia de espaço plano euclidiano e passa a adotar a geometria de espaço curvo de Georg Riemann (ROSA, 2012, p. 178) em seus estudos.

No entanto, a deformação do espaço-tempo deveria ser ocasionada por algum agente. Chegamos então a surpreendente conclusão de Einstein: o espaço-tempo é deformado na presença de uma massa, e quanto maior a massa, maior será o efeito da deformação. Pode-se concluir que a gravidade não se trata de uma interação de

corpos massivos, mas sim, da deformação provocada por corpos massivos na estrutura do espaço-tempo.

A Figura 1.14 demonstra a representação artística bidimensional da deformação ocasionada pelo Sol no espaço tempo realizada por um computador. Gomes, Heusy, Zanon e Rocha (2022), apresentam uma proposta de construção de um aparato experimental para demonstração da deformação do espaço-tempo, utilizando materiais alternativos e de baixo custo.

Figura 1.14 – Representação da deformação do espaço-tempo provocada pelo Sol.



Fonte: <https://comciencia.br/comciencia/handler.php?section=8&edicao=125&id=1517>. Acesso em 14/06/2023.

Temos, por consequência, uma nova explicação para as órbitas planetárias, elas não são resultado de uma força entre o Sol e determinado planeta, mas sim, pela deformação do espaço-tempo ocasionado pelo Sol. Por conta disso, a discrepância entre os valores teóricos e os observados da precessão do periélio da órbita do planeta Mercúrio é devidamente corrigida quando aplicada a teoria de Einstein, conforme foi citado na subseção 1.2.5.

Uma vez que a teoria da relatividade prevê a curvatura do espaço-tempo nas proximidades de um objeto massivo, para garantir a constância da velocidade da luz em um movimento perpendicular a superfície do objeto (o escape do campo gravitacional), o tempo tende a dilatar na presença de um campo gravitacional muito intenso. Fazendo uma comparação simplista, seria como se a gravidade estivesse esticando o comprimento da onda eletromagnética na tentativa de impedir que escape. Tal efeito diminui sua frequência (energia), por isso esse fenômeno é denominado *red shift* (desvio para o vermelho no espectro eletromagnético). Com a diminuição a energia, espera-se que a velocidade também diminua, fato que contraria um dos postulados da Teoria da Relatividade Restrita. A dilatação temporal garante a

constância da velocidade da luz. Conclui-se que o tempo sofre maior efeito de dilatação quanto maior a intensidade do campo gravitacional.

Uma aplicação tecnológica da dilatação do tempo está presente todas as vezes em que se utiliza o sistema de GPS (*Global Positioning System*⁶) em um celular ou veículo. Para que o sistema funcione são necessários quatro satélites, para triangulação da posição do receptor e correção na imprecisão do tempo entre o relógio atômico de satélite e o relógio menos preciso que utilizamos no cotidiano. Cada satélite está em uma órbita em média de 20.000 km da superfície da Terra, com uma velocidade em torno de 14.000 km/h. Mesmo que a velocidade do satélite esteja muito abaixo (10^5 m/s menor) da velocidade da luz, já é possível experimentar um pequeno atraso em relação a superfície. Por outro lado, a ação da gravidade a esta altura faz com que o relógio do satélite adiante em relação à superfície do planeta. Por fim, o relógio de cada satélite sofrerá um adiantamento em seu horário quando comparado ao relógio do dispositivo, ocasionado pela dilatação do tempo da relatividade restrita e “pela diferença de potencial gravitacional entre a altitude do satélite e a superfície da Terra” (NUSSENZVEIG, 2014, p. 190), consequência da Relatividade Geral. A correção da discrepância entre os relógios é feita aplicando-se a teoria da relatividade, caso contrário, o dispositivo de GPS marcaria a localização de forma errônea.

Uma outra reflexão é necessária, se um objeto massivo é capaz de produzir uma deformação na estrutura do espaço-tempo, pode-se indagar que o movimento do mesmo objeto venha a produzir ondulações na estrutura do espaço-tempo, algo semelhante a um corpo movendo-se em um lago. São as chamadas ondas gravitacionais. Tipler (2006) diz que

Implícitas na teoria da relatividade geral está a possibilidade de que uma massa acelerada emita ondas gravitacionais, da mesma forma como uma carga elétrica acelerada emita ondas eletromagnéticas. Assim, a informação de que uma aceleração ocorreu seria transmitida, não instantaneamente, mas à velocidade da luz (TIPLER, 2006, p. 71).

Todo corpo seria capaz de produzir ondas gravitacionais, porém o efeito seria considerado apenas para grandes objetos a exemplos de estrelas gigantes e buracos negros.

A confirmação da existência das ondas gravitacionais foi publicada no início de 2016, cem anos após Einstein ter publicado seu trabalho sobre a Teoria da

⁶ Sistema de Posicionamento Global.

Relatividade Geral. No entanto a sua comprovação ocorreu em 2015 por meio do LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*⁷), em Washington e na Lousiana, que detectou os resultados da colisão de buracos negros. Por conta da descoberta, Rainer Weiss, Barry C. Barrish e Kip S. Thorne receberam, em nome da colaboração nas pesquisas e detecção das ondas gravitacionais no LIGO, o Prêmio Nobel de física em 2017 (NASCIMENTO, CUZINATTO. 2022, p. 2).

1.3.6.3 – EQUAÇÕES DE CAMPO DE EINSTEIN

A teoria da gravitação de Newton apresenta resultados muito satisfatórios para casos de velocidades muito pequenas quando comparadas à velocidade da luz e para campo gravitacionais pouco intensos.

Einstein procurou desenvolver um conjunto de equações para a Teoria da Relatividade Geral que considerasse a geometria do espaço-tempo, assim como, a energia e o momento. Para tal, “Einstein utiliza o formalismo tensorial para expressar as suas equações de campo, assim, a TRG é uma teoria tensorial” (SOARES, 2013, p.1), pois agora somente com os vetores não é possível a sua representação, há uma dimensão a mais a ser considerada, o tempo, pois agora estão acopladas as coordenadas espaciais e a temporal.

Um tensor é definido por Soares (2013) como:

uma entidade matemática que possui em cada ponto do espaço n^m componentes, onde n é o número de dimensões do espaço e m é a ordem do tensor. Desta forma, podemos dizer que o escalar é um tensor de ordem 0 – portanto, tem 1 componente – e o vetor é um tensor de ordem 1 – tem n componentes. Os tensores utilizados na TRG são tensores de ordem $m = 0, 1, 2$ e o “espaço” é o espaço-tempo de $n = 4$ dimensões (três coordenadas espaciais e uma coordenada temporal). Assim, os tensores de segunda ordem da TRG têm, a princípio, $4^2 = 16$ componentes (SOARES, 2013, p. 1).

As equações de campo de Einstein serão apresentadas de forma qualitativa, tomando como referência o trabalho de Soares (2013). A preocupação será apenas descrever a contribuição de cada termo, assumindo-se a complexidade das operações tensoriais. Essa é representada como:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu} \quad (1.41)$$

⁷ Observatório de ondas gravitacionais com interferômetro a laser.

A primeira consideração a se fazer é que na equação (1.41) a geometria do espaço-tempo é descrita pelo lado esquerdo da igualdade. O lado direito corresponde a energia e momento. Os índices μ e ν podem assumir os valores de 0, 1, 2 e 3, sendo a primeira, 0, a temporal e as demais, 1, 2, 3, as espaciais (uma para cada sistema de coordenada cartesiana).

Analisando primeiramente os termos do lado esquerdo da igualdade, referentes a curvatura do espaço-tempo, $R_{\mu\nu}$ é denominado tensor de Ricci que parte de um outro tensor de curvatura de Riemann mais geral $R_{\mu\nu\alpha\beta}$, descrevendo a curvatura do espaço em n dimensões e o tensor métrico $g^{\alpha\beta}$. O tensor da métrica do espaço é representado por $g_{\mu\nu}$, realizando o papel de campo nas equações de Einstein, ele faz com que a interação da Teoria da Relatividade Geral, diferente da interação à distância da teoria newtoniana, seja entre um corpo de prova e a perturbação da geometria provocada pela fonte. O termo R está associado ao tensor de Ricci e ao tensor de métrica ($R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$), é denominado curvatura escalar. Por fim, temos uma constante cosmológica representada por Λ .

Para o lado direito da igualdade temos a constante $\frac{8\pi G}{c^2}$, podendo ser representada apenas por k , sendo denominada constante gravitacional de Einstein. O termo $T_{\mu\nu}$, denominado tensor de energia-momento descreve, como sugere o nome, a matéria e energia nas equações.

A beleza das equações de campo de Einstein pode ser resumida na afirmação de Taylor e Wheeler (1992): “o espaço-tempo diz à matéria como se mover e a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar” (*apud* SOARES, 2013, p. 1). Vale destacar a equivalência entre matéria e energia da Teoria da Relatividade Restrita (equação (1.38) escrita para qualquer massa relativística).

1.3.6.4 – DESVIO DA LUZ EM UM CAMPO GRAVITACIONAL

Analisando por meio da teoria clássica newtoniana, por não possuir massa o fóton não sofreria influência de um campo gravitacional. A Teoria da Relatividade Geral prevê o contrário, a luz também estaria sujeita a influência de um campo gravitacional sofrendo deflexão de sua trajetória, ou seja, o raio luz sofre efeito de curvatura “em um campo gravitacional exatamente como o faria um corpo caso

lançado horizontalmente com velocidade igual à da luz” (EINSTEIN, INFELD, 2008, p. 185).

Einstein e Infeld (2008) apresentam o exemplo de um elevador subindo acelerado (análogo ao apresentado na Figura 1.13(b)), quando um raio de luz penetra por uma de suas paredes, perpendicularmente ao movimento do elevador, no sentido da parede oposta. Para um observador externo

o elevador se move para cima e, durante o tempo em que a luz caminha para a parede, muda de posição. Portanto, o raio atingirá um ponto exatamente oposto ao de sua entrada, mas um pouco abaixo. A diferença será muito pequena, mas, não obstante, existe, e o raio de luz não caminha em linha reta, mas em linha ligeiramente curva, relativamente ao elevador (EINSTEIN, INFELD, 2008, p. 184).

Devido ao princípio da equivalência, um observador no interior do elevador experimentaria o mesmo efeito.

A deflexão ocasionada no exemplo sugerido é quase que imperceptível por conta das dimensões do elevador comparada à velocidade da luz, combinada ao valor da gravidade nas proximidades da superfície da Terra. Em contrapartida, a deflexão “chega ao valor de 1,7 segundo de arco no caso de raios que passam pelo Sol de raspão” (EINSTEIN, 2019, p. 89).

A teoria da gravitação newtoniana não consegue explicar o desvio da luz em um campo gravitacional, uma vez que o fóton não apresentaria massa de repouso, devendo assim, mover-se em linha reta. A Teoria da Relatividade Geral vai dizer que a luz realmente tende a seguir a uma trajetória retilínea, porém, acompanhando a curvatura do espaço-tempo.

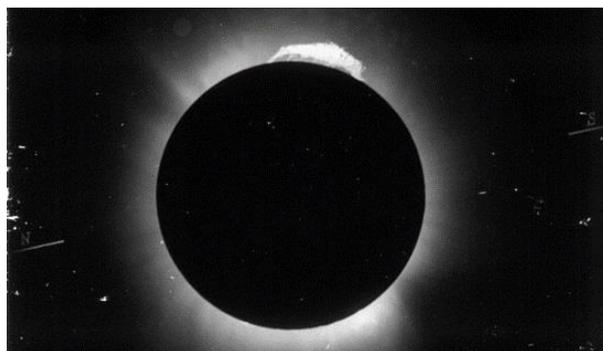
Einstein (2019) indica uma maneira prática de verificar se o desvio de 1,7 segundo de arco da teoria estaria correta, observando

“estrelas fixas visíveis na vizinhança do Sol por ocasião de um eclipse solar total se mostrariam deslocadas em relação à posição que normalmente lhe atribuímos no céu quando o Sol está em outra parte do céu, aparentando um afastamento do Sol dessa magnitude” (EINSTEIN, 2019, p. 89).

A confirmação da teoria de Einstein se deu em maio de 1919, quando duas expedições organizadas pelo inglês Arthur S. Eddington, fotografaram o eclipse solar total, em Sobral (Ceará, Brasil) e na Ilha do Príncipe (África continental). Os resultados obtidos foram de $\alpha = 1,98$ (Sobral) e $\alpha = 1,61$ (Ilha do Príncipe), valores coerentes com o proposto pela teoria, respeitando o devido desvio previsto (TIPLER, 2006, p. 66). Como já mencionado na subseção 1.2.6, o céu na Ilha do Príncipe estava

nublado, mesmo assim, foi possível a obtenção de duas chapas fotográficas. Como as chapas fotográficas obtidas em Sobral eram de maior qualidade (Figura 1.15), o valor do desvio encontrado foi considerado, mesmo que, o obtido na Ilha do Príncipe possuísse melhor precisão em relação ao valor teórico (SEARA DA CIÊNCIA, 2019).

Figura 1.15 - Fotografia do eclipse de Sobral, em 1919

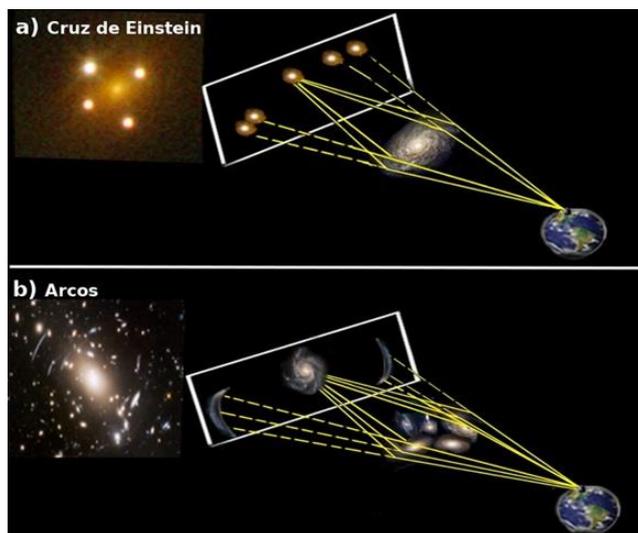


Fonte: <https://agencia.ufc.br/o-dia-em-que-o-ceu-de-sobral-mudou-o-rumo-da-ciencia/>. Acesso em 13/07/2022.

Vale ressaltar que as observações de Sobral e Ilha do Príncipe constituem a primeira prova experimental da Teoria da Relatividade Geral.

O evento da deflexão da luz nas proximidades de campos gravitacionais intensos, está sendo utilizada na astronomia por meio do fenômeno chamado de lentes gravitacionais (Figura 1.16). A luz de estrelas ou galáxias distantes é desviada por uma galáxia ou conjunto de galáxias. O efeito é similar a refração sofrida quando a luz passa por um lente comum (TIPLER, 2006, p. 68).

Figura 1.16 – Ilustração do fenômeno das lentes gravitacionais.



Fonte: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/WVDnLgwXzwZM5gDKXBqHKDR/?lang=pt#>. Acesso em 07/03/2023.

1.3.6.5 – BURACO NEGRO

É muito fácil entender e calcular, aplicando-se a mecânica newtoniana, que ao se lançar um objeto verticalmente para cima, quanto maior a velocidade de lançamento, maior será a altura por ele atingida. Conseqüentemente, o tempo que o objeto leva para atingir a altura máxima, para depois retornar, também tende a aumentar. Pode-se, inclusive, calcular a velocidade de escape v_e (equação (1.42)), valor necessário ao objeto para que consiga, como o próprio nome propõem, escapar do campo gravitacional.

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}. \quad (1.42)$$

Sendo G a constante gravitacional ($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2 \text{ kg}$), M a massa r o raio do planeta em análise.

Os valores de altura, tempo de subida do objeto e velocidade de escape, são relativos para cada planeta ou corpo celeste analisado. Para o caso particular da Terra, a velocidade de escape é da ordem de 11,2 km/s.

Pode-se cogitar em substituir v_e pela velocidade da luz c em (1.42). Tal procedimento indicaria a relação $\frac{M}{r}$ necessária para impedir o escape da luz.

O raciocínio esbarraria no fato de o fóton não possuir massa, e conseqüentemente, não sofrer os efeitos gravitacionais previstos na mecânica newtoniana.

De acordo com a Teoria da Relatividade Geral, o tempo sofre dilatação na presença de um campo gravitacional intenso. Para um corpo muito denso, a dilatação do tempo tenderia a um valor infinito, ocasionando o efeito de parada do tempo quando comparado a um observador externo, distante. Assim, toda onda eletromagnética (luz) oriunda do corpo denso nunca conseguiria escapar de seu campo gravitacional e ser percebida pelo observador externo. Pode-se dizer, então, que tal corpo, por possuir campo gravitacional de elevada intensidade, impediria o escape de qualquer coisa, inclusive da luz.

Segundo Tipler (2006), a Teoria da Relatividade Geral produziria o seguinte:

se a densidade de um corpo for suficientemente elevada, a atração gravitacional se tornará tão forte que nada poderá escapar, nem mesmo a luz e outras formas de radiação eletromagnética. Uma propriedade notável de um objeto deste tipo é que nada do que acontece no interior pode ser comunicado ao resto do universo. Isso ocorre quando o potencial gravitacional na superfície da massa M se torna tão grande que o desvio

gravitacional para o vermelho faz com que a frequência da radiação emitida pela superfície se anule (TIPLER, 2006, p. 71).

De posse do trabalho de Einstein em 1915, o astrofísico Karl Schwarzschild consegue encontrar um resultado para suas equações de campo, especificamente para o caso de simetria esférica. Partindo da formulação de Newton, a aceleração da gravidade ocasionada por uma massa M é facilmente determinada para certo raio R de distância. Schwarzschild apresenta uma correção na formulação newtoniana, que pode ser percebida para raios pequenos. Já para raios pequenos ao extremo

o termo de correção pode ter um denominador nulo! Em outras palavras, surge uma singularidade. Para uma dada massa, isso ocorre a um raio chamado de Raio de Schwarzschild. Se uma estrela tivesse um raio menor do que esse valor, não poderíamos vê-la. Os raios de luz por ela emitidos seriam “refletidos” pela aceleração infinita. Para um observador externo, o objeto não pareceria uma estrela, mas um “buraco negro” no espaço (STEINER, 2010, p. 726).

O denominado raio de Schwarzschild é determinado pela equação

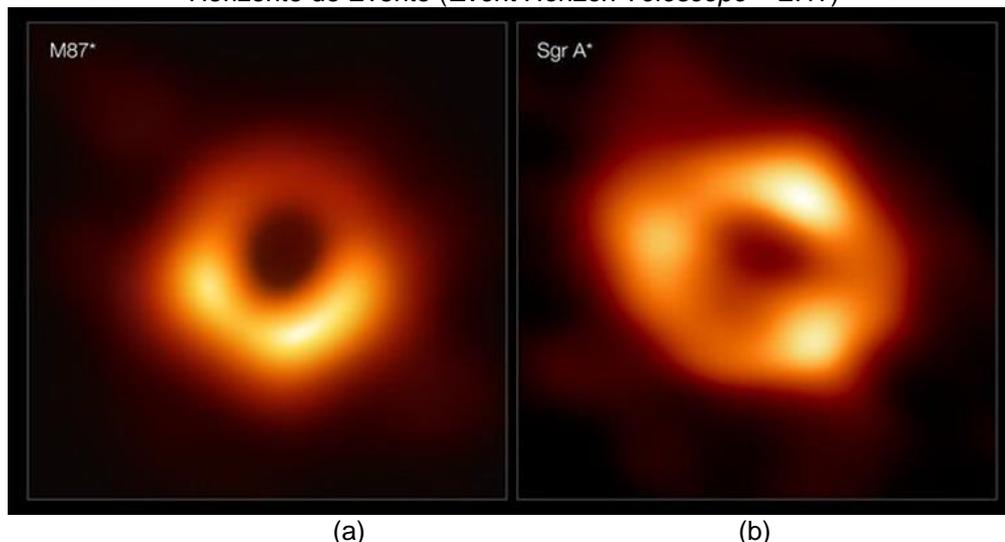
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}. \quad (1.43)$$

Steiner apresenta os valores de (1.43) para o Sol e a Terra. “Para que o Sol fosse um buraco negro, seu raio de Schwarzschild seria de 2,9 quilômetros. A Terra só poderia ser um buraco negro se sua massa fosse contida numa esfera com raio de 8,8 milímetros” (STEINER, 2010, p. 727).

Quanto à origem dos buracos negros, Steiner apresenta duas possibilidades, de acordo com os dois tipos já observados: “buracos negros estelares, fruto da evolução das estrelas de grande massa, e os buracos negros supermassivos, residentes nos núcleos das galáxias” (STEINER, 2010, p. 738). No primeiro caso, seriam frutos de uma supernova, ou seja, a explosão de uma estrela gigante azul. Já no segundo, os buracos negros teriam surgidos e evoluídos juntamente com a galáxia.

A Figura 1.17 apresenta as duas fotos já registradas de buracos negros. Para (a) tem-se o buraco negro M87*, cuja foto foi divulgada em 13 de abril de 2019. Já a foto (b) é do buraco negro Sagitário A*, que ocupa o centro da Via Láctea, divulgada em 12 de maio de 2022. Tratam de dois registros revolucionários na história da ciência moderna.

Figura 1.17 – Fotografia de buracos negros: (a) M87*; (b) Sagitário A*, captado pelo Telescópio Horizonte de Evento (*Event Horizon Telescope – EHT*)

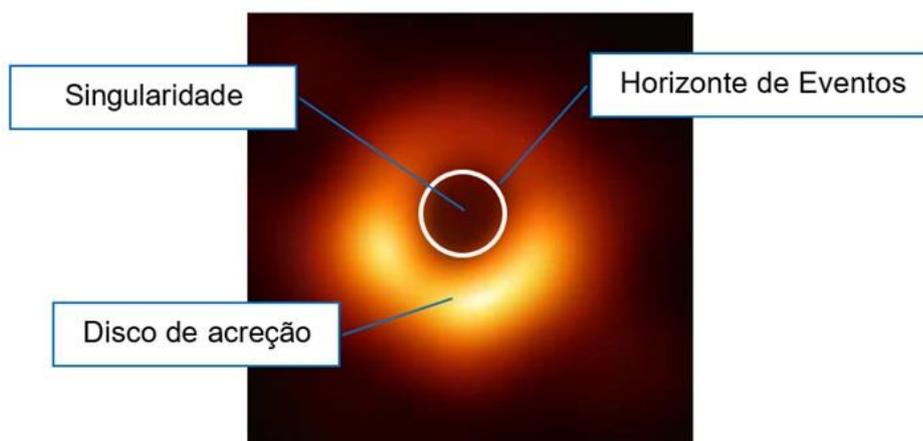


Fonte: <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2022/05/13/sagitario-a-tudo-o-que-sabemos-sobre-o-buraco-negro-no-meio-da-via-lactea.htm>. Acesso em 13/07/2022.

Uma dúvida pode surgir. Se o nome da estrela é buraco negro, justamente por nada escapar de sua gravidade, nem mesmo a luz, como é possível identificá-lo e mesmo, fotografá-lo?

Para responder à pergunta, é necessário que se entenda ao menos a estrutura conhecida de um buraco negro, conforme apresentado na Figura 1.18.

Figura 1.18 – Representação da estrutura de um buraco negro.



Fonte: <https://www.science.org/content/article/images-black-hole-reveal-how-cosmic-beasts-change-over-time>. Acesso em 13/07/2022. Anotações do autor.

A singularidade é o núcleo do buraco negro, onde está concentrada toda sua massa, é extremamente denso e com campo gravitacional extremo onde não prevalece nosso conceito de espaço e tempo. O horizonte de eventos é o limite da ação do campo gravitacional do buraco negro, no interior de seu limite, a luz não é mais capaz de escapar e é determinado pelo raio de Schwarzschild. O disco de

acrecção é formado por gases sugados pelo campo gravitacional que formam um disco giratório em altíssimas velocidade e temperatura, por consequência, há a emissão de raio-x, que podem ser captados.

Na verdade, não é o buraco negro que é percebido diretamente, mas indiretamente pelo efeito que ele produz.

Por tudo que foi abordado até aqui, e por tantos outros aspectos, efeitos e considerações que a Teoria da Relatividade Geral apresenta, ela é considerada o berço da cosmologia moderna, que tanto encanta e desafia os cientistas.

CAPÍTULO 2 – PRODUTO EDUCACIONAL

Neste capítulo, apresentam-se o Produto Educacional desenvolvido (PE), utilizando-se a proposta de etapas de uma Sequência Didática (SD) e, também, as justificativas, os objetivos, a teoria educacional utilizada, assim como os encaminhamentos metodológicos e avaliativos.

2.1 – INTRODUÇÃO

A Física é uma ciência dinâmica e em constante transformação à medida que novas tecnologias vão se desenvolvendo e novas necessidades são criadas na sociedade.

Nesse sentido, a partir do início do século XX, as descobertas científicas aconteceram de forma tão rápida que o sistema de ensino, muitas vezes inerte por falta de recursos dos mais diversos, não conseguiu dar conta de atender a todas essas novas descobertas.

Analisando alguns livros didáticos do ensino médio, disponibilizados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) e utilizados até o ano de 2011 pelas escolas públicas, pôde-se perceber que a Física ensinada era predominantemente baseada nas descobertas dos séculos XVII até o XIX. Toda revolução ou evolução surgidas desde o início do século XX ficavam limitadas a poucos capítulos ao final do volume reservado ao terceiro ano do ensino médio ou eram apresentadas como textos complementares no decorrer dos volumes utilizados durante todo o ensino médio⁸.

A partir de 2022, as escolas públicas receberam novos livros didáticos, já adequados à proposta do Novo Ensino Médio⁹. Entretanto, a abordagem do tema apresentou-se com aspecto apenas de divulgação, sem muito aprofundamento, mesmo que algumas das obras expusessem equações matemáticas e citassem fenômenos como buracos negros, ondas gravitacionais, lentes gravitacionais e a aplicação tecnológica em aparelhos de GPS. Uma das obras nem apresentava o conteúdo sobre teoria da relatividade.

⁸ Foram pré-analisadas as obras de várias Editores que fornecem materiais para o Programa Nacional do Livro Didático: Ática (duas obras), Brasil, FDT, Moderna, Saraiva, Scipione e SM.

⁹ Os livros didáticos analisados para o Novo Ensino Médio foram das seguintes editoras: FTD, Moderna, Scipione e SM.

Surgiu, então, a necessidade da abordagem de temas chamados tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) com os alunos na educação básica, abrindo os horizontes da ciência para eles, atualizando o currículo escolar como também a produção de ferramentas metodológicas para auxiliar os professores.

Nesse contexto, um assunto pouco abordado é a Teoria da Relatividade de Einstein, que surge como resposta para explicar a incompatibilidade entre o eletromagnetismo de Maxwell e a teoria clássica newtoniana da Física, quanto ao problema em responder para qual referencial o valor da velocidade da luz (onda eletromagnética) deveria ser analisado. Realizaram-se vários experimentos em busca desse referencial privilegiado, o éter, porém ele não foi detectado. A necessidade de mudança na forma de como se entende o mundo e os eventos recorrentes a noção de tempo e espaço é um dos principais fatores que dificultam a assimilação dos conceitos da teoria da relatividade. Outra linha de pesquisa afirma que o problema da compreensão e até mesmo do aceite da teoria da relatividade não estão necessariamente na complexidade das equações matemáticas, mas, “no fato de a relatividade nos obrigar a reexaminar, criticamente, as nossas ideias de espaço e tempo” (HALLIDAY, 1995, p. 123). O espanto inicial diante da proposta é justificado pelo fato de todos os eventos que se podem observar no cotidiano acontecerem com velocidades muito pequenas quando comparadas à velocidade da luz.

O presente PE visa apresentar uma proposta de sequência didática, estruturada segundo as diretrizes de Antoni Zabala (ZABALA, 1998), utilizando história em quadrinhos para o desenvolvimento da teoria da relatividade de Einstein, com alunos de 2.º e 3.º anos do ensino médio.

Partindo-se de um evento real, o eclipse observado na cidade cearense de Sobral, em 1919, foi determinante para esta pesquisa, a qual tem como objetivo levar esses alunos a conhecer a proposta da teoria da relatividade e as suas aplicações tecnológicas, como o *Global Positioning System*¹⁰ (GPS) e a ferramenta para estudos cosmológicos.

Fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, a escolha de história em quadrinhos como ferramenta de aprendizagem não só contribui para a liberdade de imaginação dos(as) estudantes, necessária para tratar a temática da relatividade, como também possibilita a utilização de uma metodologia dinâmica

¹⁰ Sistema de Posicionamento Global.

que leve o aluno à leitura, à interação com o texto, à produção de novos quadrinhos e ao desenvolvimento de atividades lúdicas, visando à apropriação do conhecimento.

2.2 – JUSTIFICATIVA

A atualização dos conteúdos abordados nas aulas de física se faz necessária para que os alunos possam ter contato com as novas teorias propostas pela ciência e, conseqüentemente, entender melhor o mundo que os cerca, rompendo a ideia de fragmentação do conhecimento físico – clássico e moderno desvinculados – e conduzindo-os a um processo de transformação histórico e contextualizado, na busca de respostas às questões e necessidades que surgem na sociedade. Uma vez que se abordam temas de FMC em sala de aula, dá-se a oportunidade para que o aluno entenda melhor vários aparatos tecnológicos de seu cotidiano.

Além disso, nacionalmente, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) já levantam o questionamento da inserção da Física Moderna em detrimento a outros tópicos como a Cinemática (BRASIL, 2002, p. 60). Com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), os tópicos sobre teoria da relatividade estão contemplados na segunda competência específica de Ciências da Natureza e suas Tecnologias para o ensino médio, conforme se observa em Brasil (2018):

Analisar 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 (BRASIL, 2018, p. 553).

Para a referida competência, são apresentadas algumas habilidades a seguir, por meio das quais fundamenta-se o estudo da teoria da relatividade:

(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, 2018, p. 557).

Ainda nesse contexto, a abordagem da teoria da relatividade também é proposta em documentos norteadores da educação no estado do Paraná. As Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Física (DCE – Física), de 2008 – organizam os

conhecimentos da Física em conteúdos estruturantes, a saber: movimento, termodinâmica e eletromagnetismo. A teoria da relatividade é citada no tópico sobre o eletromagnetismo sobre a importância da abordagem da Física Moderna, destacando a “imutabilidade da velocidade da luz, como um dos princípios da relatividade” (PARANÁ, 2008, p. 61). O mesmo documento ainda propõe, ao se estudar o conteúdo básico de gravitação (contemplado no conteúdo estruturante de movimento), que o aluno “compreenda o contexto e os limites do modelo newtoniano, tendo em vista a Teoria da Relatividade Geral” (PARANÁ, 2008, p. 94).

Recentemente, o Referencial Curricular para o Ensino Médio do Paraná (2021) organizou o conhecimento da Física em cinco unidades temáticas, cada uma subdividida em objetos de conhecimento nas quais são, finalmente, apresentadas as sugestões de conteúdo. A unidade temática cinco, denominada Cosmologia, nomeia o objeto de conhecimento também com a mesma nomenclatura e apresenta como sugestão de conteúdo a teoria da relatividade geral (PARANÁ, 2021, p. 419), contemplando as habilidades EM13CNT201 e EM13CNT204 da BNCC (BRASIL, 2018).

Percebe-se ainda, a importância de se pensar e produzir materiais com as propostas metodológicas adequadas para a abordagem de tópicos da teoria da relatividade, partindo-se de uma problematização, contextualizando-se os conteúdos conceituais, os aspectos históricos e as suas aplicações tecnológicas.

2.3 – OBJETIVOS

Nesta seção apresenta-se os objetivos geral e os específicos para nortear o que queremos atingir no final da aplicação do PE, estruturada considerando aspectos metodológicos didáticos-pedagógicos, e embasada e analisada considerando a teoria da aprendizagem significativa.

Objetivo geral

Abordar o efeito da curvatura do espaço-tempo da teoria da relatividade, com os alunos do 2.º e do 3.º ano do ensino médio, por meio de uma sequência didática,

utilizando-se a história em quadrinhos como instrumento didático facilitador para a assimilação por parte dos alunos.

Objetivos específicos

Trazer a discussão e a contextualização da Teoria da Relatividade de Einstein junto aos alunos do 2.º e do 3.º ano do ensino médio, como uma resposta a problemas enfrentados pela Física clássica na virada para o século XX.

Apresentar como se transformam os paradigmas da ciência, estimulando a criatividade dos alunos e a superação do senso comum.

Produzir material de apoio a professores e alunos, com entendimento acessível, abordando a teoria da relatividade.

Utilizar a mídia de História em Quadrinhos (HQ) ou gibi, forma comumente chamada, como ferramenta pedagógica e estimuladora da imaginação dos alunos, levando a uma reflexão sobre a curvatura espaço-tempo na Teoria da Relatividade.

2.4 – METODOLOGIA

Para que o(a) aluno(a) consiga percorrer um itinerário que leve a um verdadeiro processo de apropriação do conhecimento, é necessário a utilização de atividades orientadas que envolvam técnicas e estratégias visando a sua concretização. O método adotado pelo(a) professor(a) será decisivo para que o(a) aluno(a), ao percorrer o itinerário da aprendizagem, passe de ouvinte passivo a alguém que consiga aprender com certa autonomia, preparando-o(a) não apenas para as eventuais avaliações ao término de cada etapa de estudos, mas sim, para continuar aprendendo a partir dos novos conhecimentos adquiridos.

Assim, no presente trabalho, adotou-se como referência de psicologia educacional a Teoria da Aprendizagem Significativa, proposta por David Ausubel e, como recurso metodológico, a organização de um Sequência Didática, proposta por Antoni Zabala, conforme descritos nas subseções 1.1.1 e 1.1.2, respectivamente. Os aspectos da utilização de histórias em quadrinhos como ferramenta educacional, estão referenciados na subseção 1.1.3.

2.4.1 – RECURSOS

Para a problematização e início do debate sobre o fenômeno da curvatura espaço-tempo, será apresentado um recorte de matéria de jornal referente à observação do eclipse solar na cidade de Sobral, no Ceará, em 29 de maio de 1919, primeira comprovação experimental das teorias de Einstein quanto à deformação do espaço-tempo.

A proposta é que a apresentação seja feita aos alunos por meio de um roteiro de uma história em quadrinhos (HQ), abordando desde o impasse entre a mecânica newtoniana e as leis do eletromagnetismo, passando pela proposta de Einstein para solucionar o problema, levando como consequência, à ideia de curvatura do espaço-tempo.

Aproveitando o fato de que as salas de aula dos colégios estaduais do Paraná contam, em sua maioria, com TV Multimídia e alguns projetores na escola, serão selecionados alguns pequenos vídeos, visando contribuir para a melhor assimilação dos conceitos apresentados.

Outra proposta é a utilização de simuladores *online*, de uso livre, para experimentação virtual sobre a contração do espaço e a dilatação do tempo. Será utilizado no *site* Walter Fendt um simulador¹¹ e uma calculadora¹² para analisar e calcular a dilatação do tempo. Serão utilizadas outras propostas em aparelhos de *Smartphones* (*Physics at school* e T.E. Relatividade – aplicativos disponíveis gratuitamente na *Play Store*).

A ideia é despertar a sadia confusão na mentalidade dos alunos sobre a realidade da dilatação do tempo e a contração do espaço e, também, esclarecê-la.

Com o auxílio de vídeos selecionados no canal do YouTube^{BR}, pode-se fazer o resgate dos organizadores prévios necessários aos alunos, quando detectado que não apresentem subsunçores, como também reforçar conceitos e quantificar algumas grandezas abordadas durante as aulas.

2.4.2 – AVALIAÇÃO

¹¹ <https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm>

¹² <https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm>

Zabala (1998) apresenta a avaliação não apenas como um momento de quantificação (denominada de somativa) dos conteúdos assimilados ou decorados pelos alunos. A avaliação é apresentada como um processo em que não só o aluno é avaliado, mas também o professor e sua metodologia. Assim, “podemos distinguir claramente dois processos avaliáveis: como o aluno aprende e como o professor ou professora ensina” (ZABALA, 1998, p. 196).

Dessa forma, a avaliação será desenvolvida de forma processual, a cada aula, por meio de questões preestabelecidas pelo professor, sejam questões de pesquisa ou aquelas que já foram aplicadas em exames vestibulares, como também atividades desenvolvidas pelos(as) próprios alunos(as), com as quais serão incentivadas atividades de caráter lúdico, como palavras cruzadas e desenhos. Durante as atividades, serão analisadas a relação do(a) aluno(a) em relação aos conceitos, procedimentos e atitudes.

Por fim, haverá a aplicação do questionário avaliativo proposto pelo professor, visando observar a apropriação dos conhecimentos pelos alunos.

2.5 – ORGANIZAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A SD terá as unidades organizadas e articuladas, conforme apresentado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Cronograma de organização e encaminhamento da sequência didática.

ENCONTROS	UNIDADES DIDÁTICAS	CONTEÚDOS	OBJETIVOS	RECURSOS
1 (100 min)	01 (50 min)	-Aplicação do questionário para abordagem de conhecimentos prévios; apresentação do tema - problematização (eclipse de Sobral).	-Aplicar questionário para avaliação formativa inicial. -Introduzir e problematizar o tema sobre a teoria da relatividade.	-Folha de questionário e primeira parte da história em quadrinhos (HQ).
	02 (50 min)	-Eletromagnetismo x Mecânica clássica.	-Desenvolver com os estudantes a ideia de mudança de referencial na mecânica clássica. -Discutir o problema da mudança de referencial para	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; texto de apoio.

			eventos eletromagnéticos. -Definir o significado de relativo, absoluto e referencial.	
2 (100 min)	03 (50 min)	-Postulados da teoria da relatividade.	-Definir o que é um postulado. -Tornar conhecidos os postulados da teoria da relatividade restrita. -Discutir as implicações dos postulados.	-HQ; projeção de imagens ilustrativas; vídeo ilustrativo; texto de apoio. -Exercício quantitativo.
	04 (50 min)	-Dilatação do tempo e contração do espaço – física e tecnologia: GPS.	-Discutir com os alunos os fenômenos da dilatação temporal e contração espacial, assim como podemos verificar sua veracidade. -Entender como se aplica a dilatação temporal no funcionamento de um GPS.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; texto de apoio; -Simulador.
3 (100 min)	05 (50 min)	-Paradoxo dos gêmeos – resolução de exercícios.	-Apresentar o problema do paradoxo dos gêmeos como um exercício mental da teoria da relatividade restrita. -Aplicar a dilatação temporal como uma forma de entender as partículas múons que atingem a superfície da Terra.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; texto de apoio. -Lista de exercícios de vestibulares.
	06 (50 min)	-Teoria da relatividade geral – Princípio da equivalência.	-Debater com os alunos a relação entre aceleração e campo gravitacional. -Desenvolver a autonomia dos alunos quanto aos conhecimentos adquiridos.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; vídeo; texto de apoio. -Elaboração de exercícios de fixação pelos alunos.

4 (100 min)	07 (50 min)	-Teoria da relatividade geral – Curvatura do espaço-tempo. -Questionário avaliativo.	- Definir a curvatura do espaço-tempo como uma consequência da do princípio da equivalência. - Entender como a trajetória da luz acompanha a deformação do espaço-tempo.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; folha de questionário avaliativo.
	08 (50 min)	-Análise dos resultados obtidos no questionário e avaliação da sequência didática.	-Realizar análise das respostas apresentadas pelos alunos. -Avaliação da sequência didática.	-Questionário avaliativo.

Fonte: o autor.

2.6 – UNIDADES DIDÁTICAS

Olá, querido(a) estudante! Iremos realizar pelas próximas páginas um pequeno passeio buscando conhecer um pouco sobre a teoria da relatividade proposta por Albert Einstein. Para isso, teremos a companhia de três cachorrinhos com personalidades bem diferentes, que irão auxiliar em nossa aventura pelo conhecimento.



Duque: um Vira-lata grandão e simpático, amigo e muito curioso, que apesar de não conhecer muito de ciências, adora aprender coisas novas.

Ben: um Spitz Alemão (Lulu da Pomerânia) implicante, ranheta e que adora questionar tudo. Apesar do gênio forte é um grande amigo e está sempre presente.



Bob: um Schnauzer muito carinhoso, amigo e que adora observar e aprender. Sempre partilha seus conhecimentos com os amigos e deseja que todos aprendam mais.

Os cachorrinhos são baseados em *pets* reais (Figura 2.1), e foram selecionados de acordo como o comportamento deles. Dos três, atualmente somente o Ben está entre nós.

A utilização das caricaturas das pessoas foram autorizadas por elas.

Qualquer semelhança de nomes e situações foi mera coincidência.

Aproveitem o passeio pelo mundo fascinante da teoria da relatividade, divirtam-se e que ao final, espero que consigam compreender as bases desta desafiadora teoria.

Figura 2.1 – Apresentação dos *pets*: (a) Duque, (b) Bob, (c) Ben.



Fonte: arquivos do autor.

UNIDADE DIDÁTICA 1

QUESTIONÁRIO DIAGNÓSTICO E APRESENTAÇÃO DO TEMA

Papel do professor

Com a realização do questionário diagnóstico, coletar informações sobre o conhecimento prévio dos alunos a respeito da teoria da relatividade e no que ela se difere da teoria clássica de Newton, ao mesmo tempo, o questionário tende a instigar a curiosidade dos alunos à medida que respondem as questões propostas.

O que se espera

Que ao preencher o questionário o aluno já inicie o processo de reflexão sobre os elementos que diferenciam a teoria da relatividade e a teoria clássica.

Que partindo de um fato histórico, o eclipse ocorrido na cidade cearense de Sobral em 1919, os alunos já comecem a assimilar a teoria da relatividade a eventos da natureza.

Encaminhamento: materiais e estratégias

Atividade 1 – Apresenta-se aos alunos o questionário diagnóstico ao mesmo tempo que são motivados a responder de forma mais sincera e objetiva possível, sem a preocupação com erro ou acerto. Lembrando que o questionário não possui caráter avaliativo, e sim, contribui como ferramenta visando resgatar o conhecimento que os alunos já possuam sobre o assunto, ou seja, os subsunçores.

Atividade 2 – Realiza-se a leitura individual da primeira parte da HQ, em que é apresentada a cópia de um artigo original de jornal referente ao evento de Sobral, o eclipse de 1919.

Atividade 3 – São propostas algumas questões para reflexão sobre a HQ.

Atividade 4 – Realiza-se a leitura coletiva do texto de apoio e apresenta-se a foto e ilustrações que representam o evento observado.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 1.

Atividade 1 – Questionário para diagnóstico formativa inicial (20 min.)

O questionário contendo oito questões dissertativas, que apresentamos a seguir, com as respostas esperadas.

1 – Desprezando a resistência do ar e considerando que uma bola de boliche e uma maçã são abandonadas da mesma altura, quem chega ao chão primeiro?

Ambas chegam ao mesmo tempo.

2 – O que você compreende quando se diz que algo é “relativo” ou “absoluto”?

Relativo: quando alguma coisa depende de outra. Necessita de condições e/ou informações iniciais.

Absoluta: quando alguma coisa não depende ou não está relacionada a outra, tem autonomia. Não necessita de condições iniciais.

3 – O que você conhece a respeito da teoria da relatividade de Einstein?

- Relatividade Restrita: mudança no entendimento dos movimentos. A velocidade da luz é considerada absoluta enquanto o espaço e o tempo são considerados relativos para observadores em referenciais inerciais diferentes.

- *Relatividade Geral: considera a gravidade não como uma força de interação à distância, mas sim, uma deformação do tecido espaço-tempo na presença de corpo com grande massa. Considere a efeitos da aceleração e de um campo gravitacional com equivalentes.*

4 – Qual a diferença entre a física clássica de Newton e a teoria da relatividade de Einstein?

- *Newton: trata do movimento de objetos com velocidades pequenas quando comparadas com a velocidade da luz. Valores de velocidades na ordem de grandeza que conseguimos medir e observar. A velocidade é uma grandeza relativa enquanto o tempo e espaço são absolutos.*

- *Einstein: trata de movimentos próximos da velocidade da luz. A velocidade da luz é considerada uma grandeza absoluta e o espaço e tempo são considerados como grandezas relativas. Dá um novo entendimento a gravidade.*

5 – Você já ouviu falar sobre a dilatação do tempo e contração do espaço, ou do paradoxo dos gêmeos? Se sim para algo, o que?

- *Dilatação do tempo: a tempo passa mais lentamente para referenciais em movimento em relação a outro referencial em repouso.*

- *Contração do espaço: as dimensões de um corpo em um referencial em movimento apresentam medias menores para um observador em outro referencial em repouso.*

- *Paradoxo dos gêmeos: experimento mental que aborda a dilatação do tempo.*

6 – Qual a trajetória mais provável para o movimento de um feixe de luz.

Linha reta.

7 – O que você sabe sobre Buraco Negro?

É uma deformação muito grande do espaço-tempo causada por um objeto muito denso, que nem mesmo a luz consegue escapar de sua interação gravitacional.

8 – Você é capaz de citar alguma aplicação cotidiana da teoria da relatividade?

Aparelho ou aplicativo de GPS.

Os resultados serão compilados logo após a aula e servirão como base para os devidos encaminhamentos das atividades e quando necessário, auxiliará o professor na revisão das estratégias em estabelecer organizadores prévios junto aos alunos.

A seguir, trabalhar com a primeira página da HQ, conforme apresentada na Figura 2.3. Nessa página está colocada a problematização pelo Duque por meio de um recorte de jornal que encontrou nas “coisas dos humanos” (uma inversão de papeis para tornar mais lúdica e semelhante às HQs tipo gibis). Ele é muito curioso. E trás para discutir o assunto com o Bob, que é o sabichão. No meio da conversa chega o Ben (Benjamin) que é ranzinza e duvida de tudo.

Nesse recorte (cópia do original) trata do eclipse ocorrido em Sobral no ano de 1919, cuja comitiva (Figura 2.2) liderada pelos ingleses Andrew Crommelin e Charles Davidson, comprovaram pela primeira vez a teoria do famoso físico Albert Einstein. Normalmente os alunos conhecem a fama de Einstein por ser um grande físico, mas, não compreendem realmente a sua contribuição com a ciência e o que isso tema ver com os dias de hoje.

O recorte foi transcrito na parte inferior da página, pois a cópia não está tão nítida. A grafia era a da época.

Figura 2.2 – Cópia da fotografia dos participantes da expedição de Sobral.



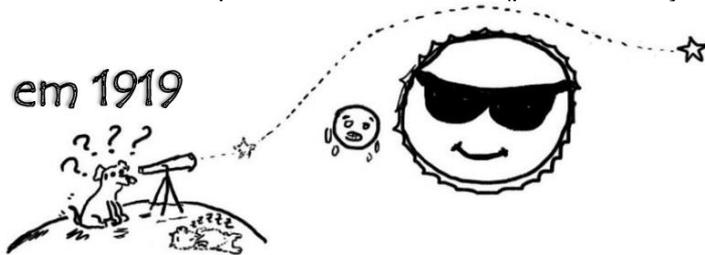
Fonte: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/10/historia-do-eclipse-de-sobral-ce-que-comprovou-teoria-da-relatividade.html>. Acesso em 17/04/22.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 1 (Figura 2.3)

Figura 2.3 – Primeira página da HQ – Aula 1: o eclipse de Sobral em 1919 (problematização).

Aula 1

O eclipse de Sobral em 1919



Fonte: o autor.

O ECLYPSE SOLAR DE MAIO E OS SCIENTISTAS – Londres, 8 (H.)

Os resultados obtidos pela missão que foi ao Ceará e a Ilha do Príncipe observar o eclipse solar de Maio último estão causando o mais vivo interesse nos círculos científicos, porque esses resultados vêm confirmar uma lei de deflexão do professor suíço Einstein, cujas novas theorias sobre o universo não admittem as leis de Newton¹³.

¹³ Reportagem “Há 100 anos, eclipse em sobral pôs Einstein e Teoria da Relatividade na História” de 25/05/2019 – Jornal Estadão. Disponível em: <https://img.estadao.com.br/thumbs/640/resources/jpg/2/7/1559067116972.jpg>. Acesso em 13/04/2022. A tradução possui a ortografia da época.

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 1

Após a leitura da HQ, questionar os alunos sobre os seguintes aspectos:

- a) Qual foi o seu entendimento geral?
- b) Ficou claro o texto do jornal apresentado pelo Duque e qual foi a dúvida que lhe surgiu?
- c) Quais outros pontos que não tenham ficado claros durante a leitura da HQ?

Atividade 4 – Leitura do Material de apoio: O eclipse de Sobral

Texto para os alunos: O eclipse de Sobral

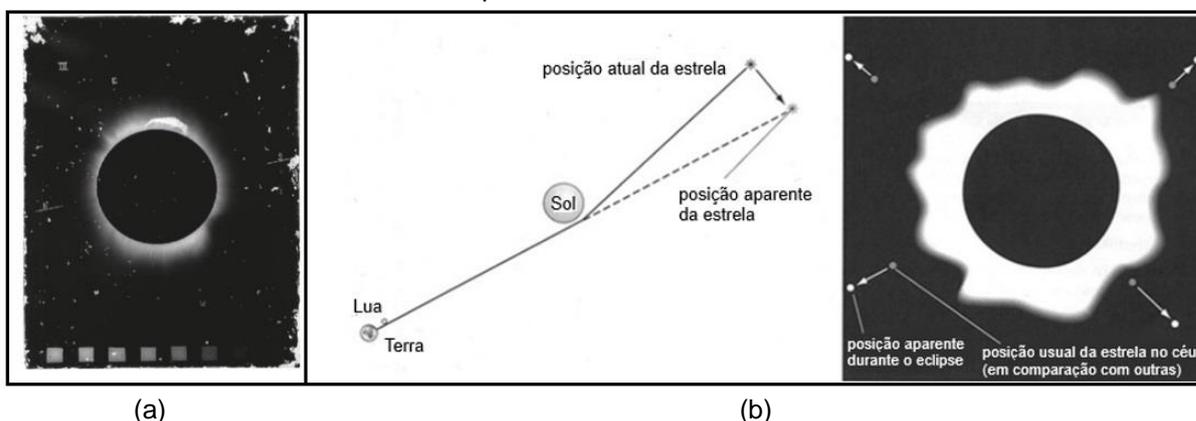
Nos anos de 1905 e 1915, Albert Einstein publicou dois artigos que tratavam, respectivamente, da teoria da relatividade restrita e da teoria da relatividade geral. Suas ideias não foram de pronto entendidas e aceitas pela comunidade científica. Muitas dúvidas cercavam a nova teoria que contrariava o que já era conhecido e aceito pela física newtoniana a respeito do espaço, tempo e gravidade. Além disso, um dos fatores que não colaboravam com sua aceitação estava na dificuldade de realizar demonstrações experimentais.

A teoria da relatividade geral apresentava uma nova compreensão para os efeitos da gravidade. Enquanto a teoria clássica de Newton atribuía à gravidade uma interação inversa ao quadrado da distância entre massas, Einstein propunha que a gravidade seria o efeito da deformação do espaço-tempo na presença de uma grande massa (o Sol, por exemplo). A luz, do ponto de vista clássico, por ser composta por partículas (fótons), que não possuem massa, percorreria sempre uma trajetória retilínea, não sendo influenciada pela ação da gravidade e no contexto da teoria da relatividade, a trajetória da luz acompanharia a deformação do espaço-tempo provocado pela presença de um astro massivo.

Em maio de 1919, duas expedições de cientistas ingleses se deslocaram, uma para a cidade de Sobral no Brasil, outra para a Ilha do Príncipe, na África Continental, para a realização de observações de um eclipse que permitiria visualizar estrelas durante os minutos que o Sol estivesse encoberto. O resultado obtido pela expedição que estava na África foi comprometido devido ao céu estar nublado. A equipe que esteve presente em Sobral, no dia 29 de maio, conseguiu fotografar o eclipse e,

consequentemente, várias estrelas em torno do Sol (Figura 2.4). Análises posteriores mostraram que as posições das estrelas nas fotos apresentavam desvios de suas reais posições. Os cálculos do desvio sofrido na trajetória da luz estavam de acordo com as estimativas da teoria da relatividade geral de Einstein.

Figura 2.4 – (a) Foto do eclipse de Sobral em 1919. (b) Esquema do desvio sofrido pela luz nas proximidades do Sol.



(a) Fonte: (a) <https://www.scielo.br/j/hcsm/a/3cQFXzYr5Fs8V7yKMTzgzGq/?lang=pt#ModalFig04>
(b) <https://www.scielo.br/j/rbef/a/7xnCndqccq78pSNZzpbkvfRr/?lang=pt#ModalFig1> (créditos: Arthur Eddington). Tradução do autor. Acesso em 07/04/2022.

Atividades de fechamento da aula

Para a primeira aula não será apresentada nenhuma atividade, pois os alunos já preencheram o questionário para avaliação formativa inicial. Sugere-se que todos assistam ao vídeo 1 da lista de materiais complementares.

Materiais complementares

Os materiais complementares, disponíveis em cada unidade didática, têm por objetivo ser uma fonte de pesquisas complementar para professores e alunos. São textos e vídeos referentes a cada assunto abordado durante as aulas. O fato das várias indicações se justificam por apresentar mais de uma forma de se tratar os temas, como também, uma garantia caso algum *link* não esteja mais disponível para acesso.

- VÍDEO 1 – “Eclipse de Sobral: O dia em que o Brasil ajudou a confirmar a teoria da relatividade de Einstein” - YouTube. Duração: 9min26s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>>. Acesso em: 31/05/2022.

- VÍDEO 2 – “5 Coisas sobre a Teoria da Relatividade - 100 anos de Sobral” - YouTube. Duração: 15min39s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>>. Acesso em: 02/06/2022.

- TEXTO 1 – “O eclipse de Sobral: como a Teoria da Relatividade foi comprovada no Ceará” – Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/o-eclipse-de-sobral-como-a-teoria-da-relatividade-foi-comprovada-no-ceara/>>. Acesso em 01/06/2022.

- TEXTO 2 – “O episódio histórico do centenário do eclipse de Sobral e suas implicações para o Ensino de Física por meio da divulgação científica” – Disponível em: <<https://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/educarmais/article/view/1800/1477>>. Acesso em 02/06/2022.

Referências

BRENNAN, Richard P. **Gigantes da Física**: uma história moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed.: 2003.

PIATTELLA, Oliver. F. Introdução à relatividade geral. **Cadernos de Astronomia**, Vitória, v. 1, n. 1, p. 30–39, 2020. DOI: 10.47083/Cad.Astro.v1n1.30827. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrofisica/article/view/30827>. Acesso em: 2 maio de 2023.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 2

ELETROMAGNETISMO X MECÂNICA CLÁSSICA

Papel do professor

Instigar a reflexão dos alunos aos conceitos de repouso, movimento e movimento relativo, segundo a teoria da mecânica clássica.

Apresentar o problema gerado pela teoria eletromagnética em relação à teoria da mecânica clássica no final do século XIX, de acordo com as referências de Menezes (2005).

O que se espera

Após a aula, que os alunos tenham clareza em relação aos conceitos sobre referencial, movimento, velocidade e que entendam de forma satisfatória o conceito de absoluto e relativo em um movimento e realizem operações matemáticas envolvendo as transformações de Galileu.

Encaminhamento: materiais e estratégias

Atividade 1 – Realiza-se um breve resgate da primeira aula e na sequência é apresentado o tema da segunda aula.

Atividade 2 – Leitura individual da HQ referente a segunda aula.

Atividade 3 – Questionamento e discussão sobre o que os alunos entenderam, o que foi novidade e o que ainda é dúvida após a leitura.

Atividade 4 – Leitura coletiva do texto de apoio para os alunos seguido de comentários.

Atividade 5 – Pesquisa na *internet* por meio do *smartphone* sobre o significado das palavras relativo, absoluto e referencial.

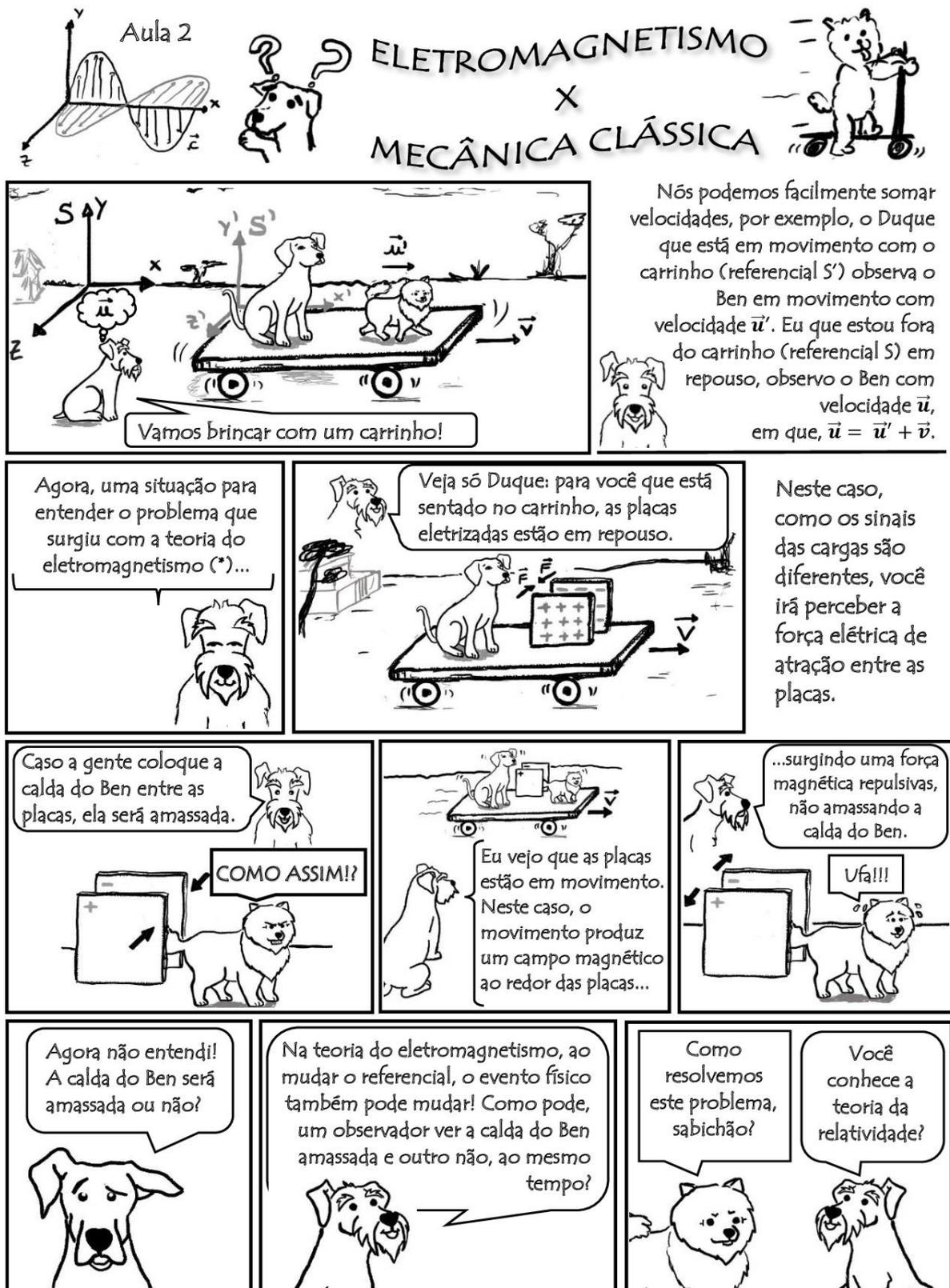
Atividade 6 – Resolução de exercícios envolvendo as transformações de Galileu.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 2.

Após revisar o conteúdo como proposto na Atividade 1, passa-se na sequência a leitura individual da segunda página da HQ (Figura 2.5). O seu conteúdo é importante, pois nele apresenta-se os aspectos físicos da teoria que previa a velocidade relativa e repouso entre corpos na mecânica newtoniana e o que ocorre com o advento do eletromagnetismo. Essa análise é importante para introduzir a relatividade restrita.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 2 (Figura 2.5)

Figura 2.5 – Segunda página da HQ – Aula 2: eletromagnetismo x mecânica clássica.



Fonte: o autor.

(*) Adaptação do autor, da exemplificação feita por Luis Carlos de Menezes em forma de texto, no livro "A matéria, uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento física" (Editora Livraria da Física, 2005, p. 120).

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 2

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após leitura.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: Referencial e movimento

Texto para os alunos: Referencial e movimento

Um evento físico é algo que pode ser analisado e mensurado por suas informações de espaço e tempo. A análise pode ser realizada por observadores que se encontram em referenciais distintos, ou seja, possuem pontos de vista diferentes, sem, entretanto, mudar o evento.

Por referenciais inerciais definimos os sistemas de coordenadas que estão em repouso ou em movimento em linha reta com velocidade constante, um em relação ao outro.

A mecânica newtoniana utiliza um conjunto de equações denominadas transformações de Galileu para encontrar os valores das grandezas físicas em referenciais inerciais distintos. Considerando dois referenciais espaciais cartesianos (x, y e z) e a temporal (t), um S em repouso e outro S' com velocidade constante em relação ao primeiro, o movimento apenas na coordenada x pode ser descrito da seguinte maneira:

$$x' = x - v \cdot t; \quad (2.1a)$$

$$y' = y; \quad (2.1b)$$

$$z' = z; \quad (2.1c)$$

$$t' = t, \quad (2.1d)$$

como ilustrado no primeiro quadro da página da HQ da Aula 2.

Da mesma forma, é possível uma transformação entre os valores das velocidades relativas para observadores em ambos os referenciais:

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v} \quad (2.2a)$$

ou,

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}. \quad (2.2b)$$

Todo evento físico é analisado e entendido a partir de referenciais que se adotam para mensurar suas variáveis. Ao estudar o movimento dos corpos deve-se ter em

mente as noções de espaço, tempo e a massa do objeto que se move. Da mesma forma, o evento físico observado deve manter uma coerência para referenciais diferentes. Não se pode mudar o evento físico em si, apenas pelo fato de ser analisado por outro referencial.

A teoria do eletromagnetismo de Maxwell, aliada aos resultados experimentais de Michelson e Morley, mostrava que a velocidade da luz não seguia a regras da física newtoniana. O valor da velocidade da luz se mantém constante para todos os observadores, em todos os referenciais, independentemente do movimento da fonte, podendo acontecer que um evento físico seja percebido de formas diferentes em referenciais também diferentes.

Assim, a teoria da relatividade proposta por Einstein apresenta uma solução para os conflitos entre a teoria newtoniana e o eletromagnetismo. O impasse entre a calda do Ben ser ou não amassada, é retomado na Figura 2.6, um quadrinho extra.

Figura 2.6 – Quadrinho extra sobre o impasse da calda do Ben ser amassada ou não, apresentado na HQ da Aula 2.



Fonte: o autor. (*) Na unidade didática 4, aguarde as cenas dos próximos capítulos.

Atividade 5 – Fechamento da aula: pesquisa a ser realizada por meio de *smartphone* e resoluções de questões

Chegou o momento de realizarmos algumas atividades para testarmos os conhecimentos adquiridos.

1) Realize uma pesquisa *online* sobre o significado das seguintes palavras:

- **Absoluto:** Que subsiste por si próprio; independente, autônomo; que não tem limites ou que não sofre restrição; ilimitado, irrestrito; que não se submete a condição; incondicional¹⁴.

- **Relativo:** Que depende de certas condições; que depende de outro; que não pode ser afirmado sem reserva; que não é absoluto.

- **Referencial:** que contém referência; que constitui ou é utilizado como referência; (fis.): Diz-se de ou sistema de coordenadas espaciais e temporais, pelo qual é possível realizar a observação de fenômenos físicos, assim como sua descrição e a formulação de suas leis.

2) A velocidade de um objeto em movimento pode apresentar valores distintos para observadores diferentes. O que determina essa diferença de velocidade para os vários observadores?

A utilização de referenciais diferentes.

3) No primeiro quadro da historinha de hoje, considere a velocidade do Ben observada pelo Bob com o módulo de 4 m/s, ao mesmo tempo em que o Duque observa o Ben com velocidade 2,5 m/s. Qual será a velocidade do carrinho?

u' = velocidade do Ben, observada pelo Duque = 2,5 m/s

u = velocidade do Bem, observada no referencial do Bob = 4 m/s

v = velocidade do carrinho = ?

Utilizando-se da equação 2.2b, temos:

$$\begin{aligned}u &= u' + v \\v &= u - u' \\v &= 4 - 2,5 \\v &= 1,5 \frac{m}{s}\end{aligned}$$

Materiais complementares

- TEXTO 1 – “O Conflito com a Mecânica Clássica” (livro digital) – Disponível em: <<https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504254>>. Acesso em: 19/07/2022.

- TEXTO 2 – “Introdução a Teoria da Relatividade” - Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4394955/mod_resource/content/0/Intro-Relatividade_SRM__EFC-2015_v3.pdf>. Acesso em: 19/07/2022.

Referências

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Ótica e Física Moderna**. v. 4, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995.

¹⁴ Escritos em azul, o significado encontrado na versão online do dicionário Michaelis, disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/>

MENEZES, Luiz Carlos de. **A Matéria uma aventura do espírito**: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. 1 ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4**: ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 3

OS POSTULADOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Papel do professor

Apresentar e discutir com os alunos os postulados da teoria da relatividade restrita como uma solução para as observações quanto a constância da velocidade da luz, independentemente do referencial do observador.

Estimular a imaginação dos alunos para mudança de paradigma quando ao que é absoluto e relativo no estudo de movimentos.

O que se espera

Que o aluno compreenda que a velocidade da luz é apresentada na teoria da relatividade como uma grandeza constante, ou seja, absoluta na natureza e que não é possível realizar adição ou subtração de seu valor, como apresentado na equação 2.2a e 2.2b.

Encaminhamento: materiais e estratégias

Atividade 1 – Realizar um breve resgate do assunto tratado durante a Aula 2.

Atividade 2 – Abordar junto aos alunos os esforços dos cientistas no final do século XIX em descobrir o referencial privilegiado para o qual a velocidade da luz (onda eletromagnética) tivesse o valor proposto na teoria do eletromagnetismo de Maxwell. A não confirmação experimental da existência do éter vai culminar nos postulados da relatividade restrita.

Atividade 3 – Leitura individual da HQ referente a Aula 3, apresentada na Figura 2.7.

Atividade 4 – Breve partilha com os alunos sobre os aspectos que mais chamaram a atenção ou não foram bem compreendidos. Se necessário, retomar os conhecimentos prévios para fixação dos termos velocidade relativa, absoluta e constante.

Atividade 5 – Realizar a leitura conjunta e comentários do texto de apoio para os alunos.

Atividade 6 – Realizar pesquisa *online* (utilizando *smartphone*) do significado da palavra postulado e uso do simulador *Physics at School*, sobre o experimento de Michelson e Morley.

Atividade 7 – Assistir o vídeo proposto, resumindo a teoria da relatividade restrita.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 3.

Após a realização da Atividade 1 (relembrar o assunto da aula anterior), é abordado forma expositiva e dialogal pelo professor (Atividade 2) os esforços em provar experimentalmente a existência do éter, referencial no qual o valor da velocidade da luz é válido.

Para essa abordagem, frisar que, utilizando métodos experimentais distintos, os esforços de cientistas como Fizeau (1859), Babinet (1862), Ångström (1864), Mascart (1872), e com maior repercussão, Michelson e Morley (1887) (MARTINS, 2015), tentaram detectar o movimento da Terra através do éter, observando variações na velocidade da luz. Como nenhuma das tentativas detectou variações na velocidade da luz, algo não esperado, surgem tentativas de explicações, o que nos levam aos postulados da Teoria da Relatividade Restrita. E sem dúvida frisar sobre a participação de Maxwell com a sua teoria do eletromagnetismo nesta aventura científica, o que levou Einstein a propor tais postulados é o que trata a próxima HQ.

Atividade 3 – Leitura da HQ – Aula 3 (Figura 2.7)

Figura 2.7 – Terceira página da HQ – Aula 3: os postulados da Teoria da Relatividade Restrita.



Fonte: o autor.

Atividade 4 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 3

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após leitura.

Atividade 5 – Leitura do material de apoio: A velocidade da luz

Texto para os alunos: A velocidade da luz

A grande maioria dos cientistas, no final do século XIX, acreditavam ser necessária a existência do éter no espaço, como o referencial privilegiado em que a luz teria seu valor $c = 300.000.000 \text{ m/s}$, conforme o previsto na teoria eletromagnética proposta por Maxwell. Acreditava-se também, na possibilidade de medir a velocidade da Terra em relação ao éter, somando velocidades, conforme a física clássica/transformações de Galileu, equações (2.1a) e (2.1b).

O segundo quadrinho central da HQ menciona que várias tentativas de se provar a existência do éter foram realizadas. A mais famosa consiste no experimento de Michelson e Morley, em 1887, por meio de um aparato experimental denominado interferômetro. O experimento consiste em um feixe de luz dividido em outros dois que percorrem direções perpendiculares. Uma das direções seria coincidente ao movimento de translação da Terra; a outra direção, como já dito, perpendicular a esse movimento. Após percorrerem distâncias iguais (os braços do interferômetro), os feixes separados incidem em espelhos, refletindo e se recombinando novamente. O feixe que está na mesma direção do movimento da Terra sofreria o efeito contrário do vento do éter, reduzindo sua velocidade. A menor velocidade provocaria uma diferença do tempo de propagação desse feixe em relação ao outro, que por sua vez seria percebida pelo interferômetro.

Apesar da precisão do aparelho, não foram encontradas evidências da existência do éter. Outra informação importante realizada foi a constância da velocidade da luz, independentemente da orientação do aparelho durante a realização das medidas.

Com base nos resultados negativos encontrados quanto ao éter, Einstein rompe definitivamente com a ideia de sua existência, ao mesmo tempo que propõem os dois postulados da teoria da relatividade restrita.

1.º postulado: para todos os referenciais inerciais, as leis da Física serão sempre as mesmas.

2.º postulado: a velocidade da luz é constante para qualquer referencial inercial.

O segundo postulado apresenta a luz com uma velocidade limite c , e, ao mesmo tempo, como uma constante da natureza. Independentemente de quem estiver

observando a fonte de luz em repouso, em seu referencial ou em movimento em um referencial, com velocidade constante, o valor de $c = 300.000.000 \text{ m/s}$, ela permanecerá inalterada, fato ilustrado no primeiro quadrinho central da HQ.

Atividade 6 – Fechamento da aula: pesquisa a ser realizada por meio de *smartphone* e utilização do simulador *Physics at school* para o experimento de Michelson e Morley

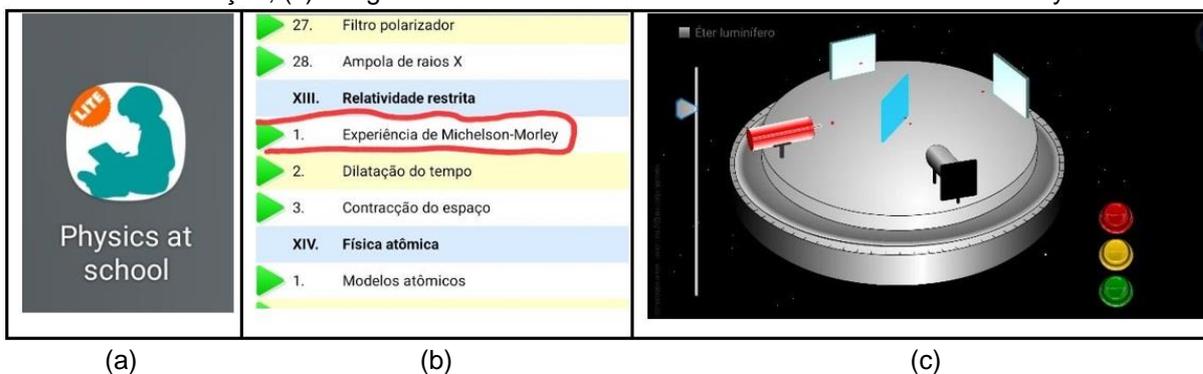
Para o fechamento da aula, foram propostas as seguintes questões:

1) Primeiramente, pesquise o significado da palavra **Postulado**.

Proposição não demonstrada e não evidente, que é considerada ponto de partida de um sistema teórico; princípio admitido.

2) Utilizaremos o aplicativo de *Physics at school* instalado no *smartphone*, para analisar os resultados do experimento de Michelson e Morley (Figura 2.8).

Figura 2.8 – Imagens do aplicativo *Physics at school*. (a) Ícone do aplicativo; (b) Seleção da simulação; (c) Imagem do simulador do interferômetro de Michelson e Morley.



Fonte: <https://www.vascak.cz/?id=1&language=pt#kapitola12>. Acesso em 15/07/2022.

Na Figura 2.8c visualizam-se três botões de comando (vermelho = parar, amarelo = pausar e verde = iniciar). É possível visualizar uma barra para rotação do aparato experimental em relação a direção do movimento e por fim, uma opção de realização da simulação com ou sem o éter luminífero. A finalidade da simulação é verificar se há variações na figura de interferência com a mudança do meio e da orientação do interferômetro.

Um modelo de interferômetro foi utilizado para demonstrar experimentalmente a existência de ondas gravitacionais. Como um objeto massivo é capaz de produzir

deformação na estrutura espaço-tempo, também poderia produzir ondulações quando em movimento. A confirmação da existência das ondas gravitacionais foi publicada no início de 2016; No entanto a sua comprovação ocorreu em 2015 por meio do LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*¹⁵), em Washington e na Lousiana, que detectou os resultados da colisão de buracos negros. (NASCIMENTO, CUZINATTO. 2022, p. 2).

Atividade 7 – Assistir um vídeo sobre o assunto da terceira página da HQ

Para conclusão da aula, os alunos devem assistir ao vídeo que trata da novidade da teoria da relatividade em considerar o espaço-tempo como grandeza relativa, enquanto a velocidade da luz se mostra como grandeza absoluta. Após o vídeo, faz-se um momento de comentários com a turma.

VÍDEO: *O Espaço-Tempo Explicado*.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kJ5xNaSleTI>>.

Duração: 11min58s.

Algumas informações do vídeo serão destacadas e tratadas na próxima aula: a contração do espaço e a dilatação do tempo.

Caso não haja compreensão dos(as) alunos(as) sobre as franjas de interferência, é possível a realização de um experimento simples, utilizando um fio de cabelo e uma ponteira *laser*. O trabalho de Oliveira¹⁶ (2016), para a conclusão do Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), neste mesmo polo, apresenta com detalhes o experimento com o fio de cabelo e a ponteira *laser*, mesmo que para outro fim, diferente do descrito no presente trabalho.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – *“Introdução experiência de Michelson-Morley - A relatividade especial - Física - Khan Academy”* - YouTube. Duração: 8min36s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bv2ataBdQ78>>. Acesso em: 07/07/2022.

¹⁵ Observatório de ondas gravitacionais com interferômetro a laser.

¹⁶ Disponível em: <http://www.dfi.uem.br/dissertacao/mnpef/uem.php>.

- TEXTO 1 – “O Experimento de Michelson-Morley” – Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/o-experimento-de-michelson-morley/>>. Acesso em: 05/06/2022.

Referências

BRENNAN, Richard P. **Gigantes da Física**: uma história moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed.: 2003.

MARTINS, Roberto de Andrade. **A origem histórica da relatividade especial**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

NASCIMENTO, Nicolas. L. N. S.; CUZINATTO, Rodrigo. R.. Ondas gravitacionais de buracos negros coalescentes: um estudo quantitativo a partir de física básica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p. e20220004, 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0004>>. Acesso em 16/04/2023.

MENEZES, Luis Carlos de. **A matéria uma aventura do espírito**: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005).

UNIDADE DIDÁTICA 4

DILATAÇÃO DO TEMPO E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Papel do professor

A partir da mudança entre as grandezas físicas consideradas relativas e absolutas a partir dos postulados de Einstein, despertar o interesse e o questionamento dos alunos sobre o comportamento do espaço-tempo na teoria da relatividade restrita.

Mostrar para os alunos que o conceito de dilatação temporal está presente no funcionamento do aparelho de GPS.

O que se espera

O aluno deverá terminar a aula entendendo a dilatação temporal e a contração do espaço como uma realidade da natureza, mesmo contrariando nosso senso comum.

Entenda que o aparelho/aplicativo de GPS só pode indicar a posição com ótima precisão caso aplique as correções previstas na teoria da relatividade.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – Inicia-se a aula com uma breve revisão sobre os postulados da teoria da relatividade restrita.

Atividade 2 – Indaga-se os alunos sobre a seguinte questão:

Uma vez que a teoria da relatividade restrita prevê que a velocidade da luz tenha sempre o mesmo valor para todo observador, em referenciais inerciais distintos, o que você espera que aconteça com os valores do tempo e do espaço?

Estimular para que as repostas não se limitem em “sofram mudança” ou “sejam relativas”.

Atividade 3 – Leitura individual da HQ (Figura 2.9) proposta para a aula.

Atividade 4 – Reserva-se um momento para ouvir os alunos sobre que chamou a atenção durante a leitura, as descobertas e dúvidas.

Atividade 5 – Realiza-se a leitura coletiva do texto para o aluno (Dilatação do tempo e contração do espaço), reservando um tempo ao final da leitura para conversa com os alunos. Fazer a leitura com calma procurando esclarecer todos os aspectos.

Atividade 6 – Assistir, na sequência, o vídeo “GPS, como funciona?”, objetivando uma aplicação cotidiana da teoria da relatividade, especificamente de um aparelho/aplicativo de GPS.

Atividade 7 – Utilização de simulador *online* sobre a dilatação do tempo, assim como uma calculadora, também *online*, para obtenção do resultado da dilatação temporal.

Atividade 8 – Desafia-se os alunos a realizarem um desenho, mesmo que simples, representando os efeitos da dilatação temporal e da contração do espaço. Pode ser proposto como atividade domiciliar.

Após ter realizado as Atividades 1 e 2, inicia-se a Atividade 3 que consiste na leitura da quarta página da HQ. O seu conteúdo levará a compreender o que ocorrerá com a calda do Ben, se ela será prensada pelas placas ou não. Além disso, levará os alunos a compreender como funciona um GPS, sendo essa uma das aplicações da teoria da relatividade que está presente no cotidiano do público em geral.

Atividade 3 – Leitura da HQ – Aula 4 (Figura 2.9)

Figura 2.9 – Quarta página da HQ – Aula 4: dilatação do tempo e contração do espaço.

Aula 4
DILATAÇÃO DO TEMPO E
CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Bob, o que muda com os postulados de Einstein?

Vamos começar pela física clássica.

A ideia mais simples que podemos ter sobre velocidade é a divisão entre um deslocamento e o tempo que foi gasto.

$v = \frac{d}{t}$

Duas pessoas podem medir valores diferentes de velocidades em referenciais diferentes. Igual na brincadeira com o carrinho que fizemos. Neste caso, a velocidade é relativa.

Para mim você está enrolando, já sabemos de tudo isso.

Calma... Outra coisa importante: independente do observador, 1 metro e 1 segundo é sempre igual para todos, ou seja, são absolutos.

Temos então o problema: para a velocidade da luz ser constante, ou seja, absoluta, em todos os referenciais inerciais, o espaço e o tempo devem ser relativos.

Não estou acreditando no que estou ouvindo!

Para velocidades próximas a da luz temos fenômenos que vão contra nosso senso comum e são chamados de dilatação do tempo e contração do espaço.

É sério o que você está falando? O tempo demora mais para passar e o tamanho das coisas diminuem?

Tudo papo furado. Nem tem como provar isso.

Tem sim. Inclusive nós utilizamos a relatividade com frequência no aparelho de GPS.

Fonte: o autor.

Atividade 4 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 4

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após leitura.

Atividade 5 – Leitura do material de apoio: dilatação do tempo e contração do espaço

Texto para os alunos: Dilatação do tempo e contração do espaço

A velocidade é uma grandeza física que relaciona o tempo necessário para que um objeto saia de uma posição e chegue a outra, realizando um deslocamento. Na mecânica clássica de Newton, é possível que observadores em referenciais inerciais distintos verifiquem valores diferentes para a velocidade do objeto em movimento. A relação dentre os valores encontrados se dá por meio das transformações de Galileu (equações 2.1a – 2.1b).

O segundo postulado da teoria da relatividade propõe que a velocidade da luz é sempre igual para qualquer referencial inercial, ou seja, seu valor é absoluto e, para que isso se torne possível, o espaço e o tempo devem ser relativos. Tem-se assim, os efeitos da dilatação do tempo e a contração do espaço. Um relógio se movendo próximo a velocidade da luz marcaria o tempo lentamente quando comparado a outro em repouso. Já uma régua teria suas dimensões comprimidas na mesma situação.

A dilatação do tempo e a contração do espaço são os aspectos que mais desafiam o senso comum quando se trata da teoria da relatividade.

Consideram-se dois observadores, O_1 em um referencial R em repouso e outro, O_2 em repouso num referencial R' , um trem por exemplo (Einstein utilizava muitos trens como exemplos), com velocidade constante v muito grande, próxima a velocidade da luz (v aproximadamente igual a c). Cada observador medirá o tempo de forma diferente em seu referencial quando comparados, sendo que o observador em movimento relativo observará o tempo passando mais devagar. A diferença entre os tempos medidos será dada pela expressão:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' \quad (2.3)$$

em que γ (letra grega gama) é chamado fator de Lorentz, dado por:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.4)$$

Vamos considerar, agora, que no trem haja uma barra em repouso e com seu comprimento na direção do movimento do trem. Cada observador perceberá a barra com um comprimento diferente, sendo menor para o observador em repouso. A relação entre os diferentes comprimentos é dada pela expressão:

$$L = \frac{L'}{\gamma} \quad (2.5)$$

O comprimento L' é chamado de comprimento próprio e consiste no tamanho percebido pelo observador em repouso relativo à barra.

Mesmo contrariando o senso comum, o efeito da dilatação do tempo é utilizado para que o aparelho/aplicativo de GPS (*Global Positioning System*) funcione adequadamente.

Atividade 6 – Apresentação do vídeo sobre o funcionamento do GPS

Sobre a aplicação da teoria da relatividade, mais especificamente sobre a dilatação do tempo, no funcionamento de GPS, assistir ao vídeo:

VÍDEO: *GPS, como funciona?*

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=qzOA41vA8Qw&t=6s>>.

Duração: 7min36s.

Visto a questão da dilatação temporal e contração espacial, é possível solucionar a dúvida sobre a calda do Ben, apresentada na página da HQ da Aula 2 e na Figura 2.6. A explicação está apresentada na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Resposta ao problema da calda do Ben na página da HQ da Aula 2.



Fonte: o autor.

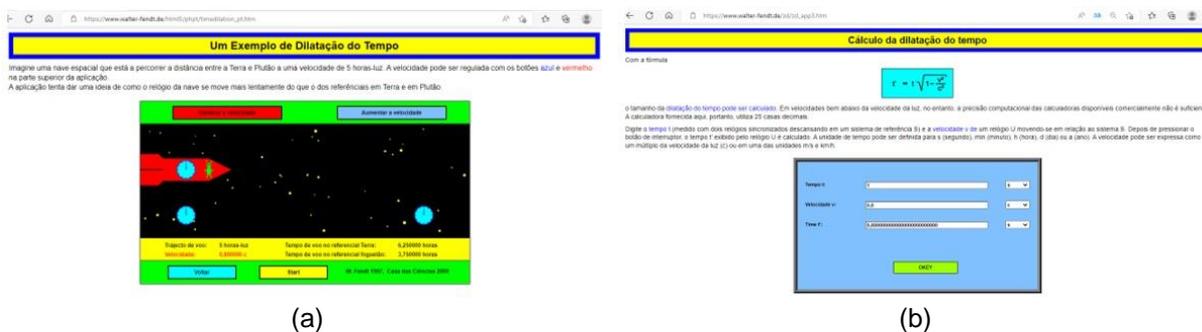
Atividade 7 – Utilização de simulador *online*

Observar valores da dilatação do tempo por meio da equação 2.3, conferindo os valores com o simulador e a calculadora *online* da página Walter Fendt na *internet*.

- Simulador: <https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm>.
- Calculadora: <https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm>.

Na Figura 2.11a, percebe-se relógios em referenciais diferentes, em repouso e em movimento no interior da nave. Ao variar a velocidade da nave, verifica-se que o efeito da dilatação do tempo por meio das marcações dos relógios a medida que a velocidade se aproxima da velocidade da luz. A Figura 2.11b por sua vez, apresenta a calculadora do *site*, onde é possível determinar os valores da dilatação do tempo para referenciais diferentes.

Figura 2.11 – Print de tela do *site* Walter Fendt.



Fontes: (a) = https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm
 (b) = https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm. Acesso em 15/07/2022.

Atividade 8 – Desafio aos alunos – atividade lúdica sobre o tema da aula

Desafio para os alunos: desenharem, mesmo que desenhos simples, algo representando a dilatação do tempo e a contração do espaço.

Materiais complementares

- TEXTO 1 – “Uma proposta de inserção da teoria da relatividade restrita no Ensino Médio via estudo do GPS”. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/ZR35rghCQxRq6rp9t7MsDvs/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 17/07/2022.

- VIDEO 1 – “Contração do espaço, dilatação do tempo e paradoxo dos gêmeos”. YouTube. Duração: 12min38s. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ody2-_oNDuA>. Acesso em 20/07/2022.

- FILME – “Contato” – Plataformas de Streaming – Duração: 2h29min. 1997.

Referências

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade:** sobre a teoria da relatividade especial e geral (para leigos). Porto Alegre: L&PM, 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4:** ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna.** 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 5

O PARADOXO DOS GÊMEOS

Papel do professor

O professor deve apresentar e debater com os alunos sobre o experimento mental do paradoxo dos gêmeos. Se ele seria possível acontecer realmente e os resultados encontrados.

Por outro lado, na natureza, as partículas múons são uma forma de demonstrar que o efeito da dilatação do tempo é real, sendo considerada a explicação para a diferença entre o tempo de vida desta partícula em laboratório e ao entrarem na órbita da Terra.

O que se espera

Espera-se que os alunos entendam minimamente o paradoxo dos gêmeos, problema muito comum de se encontrar em livros ou referências sobre a teoria da relatividade.

Que além do GPS, fique claro aos alunos o comportamento das partículas denominadas múons, comprovando-se, na natureza, que a dilatação do tempo é real.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – Breve revisão da última aula e apresentação dos desenhos realizados na atividade domiciliar.

Atividade 2 – Leitura individual da HQ referente à Aula 5, abordando o paradoxo dos gêmeos, um dos experimentos mentais¹⁷ mais conhecidos sobre a teoria da relatividade, abordando sua validade e suas possibilidades, uma vez que um dos referenciais está sob efeito de uma aceleração.

Atividade 3 – Ouvir os alunos sobre as informações que mais chamaram a atenção ou deixaram alguma dúvida.

Atividade 4 – Fazer a leitura coletiva do texto de apoio aos alunos em que é abordada a aplicação da dilatação do tempo para o entendimento do tempo de meia vida das partículas múons.

Atividade 5 – Essa aula será reservada para a resolução de alguns exercícios de vestibular sobre teoria da relatividade.

Após a revisão do conteúdo visto até o momento (Atividade 1), passa-se a Atividade 2 que é uma continuação sobre o assunto da dilatação temporal e contração espacial com um exemplo comumente citado da teoria da relatividade, denominado Paradoxo dos Gêmeos. Esta página da HQ ainda trata sobre a detecção de uma das partículas elementares, o múon. Mais uma comprovação experimental da validação da teoria da relatividade.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 5 (Figura 2.12)

¹⁷ Experimento mental (*Gedanken* de Einstein): trata-se de um experimento não realizável na prática, porém, e idealizado mentalmente e constituído racionalmente. Os resultados são explorados pela imaginação, utilizando conceitos físicos e matemáticos.

Figura 2.12 – Quinta página da HQ – Aula 5: o paradoxo dos gêmeos.

Aula 5

O PARADOXO DOS GÊMEOS



Estou com dificuldade de entender essa história de contração do espaço e dilatação do tempo.

Tem uma situação que é utilizada para ajudar na compreensão da dilatação do tempo: o Paradoxo dos Gêmeos.

Vamos imaginar que o Ben tivesse um irmão gêmeo que fosse participar de uma missão espacial muito longe da Terra.

Sabia que iria sobrar pra mim.

A nave viaja com 90 % da velocidade da luz e demora 4 anos para concluir a viagem e retornar!

Utilizando a equação da dilatação temporal teremos que para o Ben, que ficou na Terra, passaram-se aproximadamente 9 anos.

Quer dizer que meu irmão estará 5 anos mais novo?

Nossa! Mas isso não acontece realmente?

Acontece sim. Inclusive é por meio da dilatação do tempo que os cientistas explicam como as partículas "múons" conseguem atingir a superfície da Terra, mesmo não apresentando tempo de vida média suficiente para isso.

O que é isso de múons

A física de partículas estuda as menores parcelas de matéria que formam tudo que conhecemos. As partículas que mais ouvimos falar são os prótons, nêutrons e elétrons. Os múons são outros exemplos assim como os fótons que são partículas de luz.

Pra variar, só enrolação... E o tal de "desvio da luz" das estrelas?

Fonte: o autor.

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 5

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e o professor, para apontarem os destaques, as descobertas e as dúvidas após a leitura.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: os múons

Texto para os alunos: Os múons¹⁸

Um problema bastante comum em relatividade restrita é o que envolve o caso das partículas de altas energias, também chamados raios cósmicos. Na verdade, estamos interessados no que ocorre numa partícula que é um produto da interação dos raios cósmicos com a atmosfera da Terra. Os múons (cujo símbolo é a letra grega μ) são classificados em física de partículas como léptons, do grego leve. Temos como exemplo o elétron, o tau e os neutrinos.

Os raios cósmicos que geralmente são constituídos de prótons altamente energéticos, penetram na atmosfera da Terra e chocam-se com as moléculas de ar. Desse choque entre prótons energéticos e as moléculas da atmosfera, outras partículas se formam, como exemplos os píons e os káons. Múons que são partículas elementares e geralmente decaem em um elétron, um neutrino do múon (ν_μ) e num antineutrino do elétron (ν_{e^-}).

O tempo de vida de um múon é de aproximadamente $2,2 \mu s$ ¹⁹. Tempo esse medido em seu referencial, ou seja, com o múon em um laboratório por exemplo, possuindo baixa velocidade.

Grande parte dos múons são criados a uma altitude de aproximadamente 15 km possuindo uma velocidade da ordem de $0,9998c$ (c = velocidade da luz no vácuo = $3 \cdot 10^8$ m/s). Esta alta velocidade faz com que o seu tempo de vida no sistema de referencial do laboratório seja dilatado permitindo que a maioria alcance a superfície da Terra.

¹⁸ Texto adaptado do original: “Múon Relativístico” – Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em: 05/06/2022.

¹⁹ A letra grega μ (lê-se mú ou mi) também é utilizada para representar a notação científica 10^{-6} (micro), como nesse caso.

Pensando em um movimento com velocidade próxima à velocidade da luz para os múons, e calculando a distância percorrida ao entrarem na atmosfera usando a equação da velocidade $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, para $v = c$, isolando o deslocamento Δs :

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$

$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \cdot (2,2 \cdot 10^{-6}) \Delta s = 660m$$

Como é possível, então, que múons percorram apenas 660 m atmosfera adentro, e, ainda assim, sejam detectados próximos da superfície da Terra, que fica a aproximadamente 10.000 m mais distante do que o múon pode percorrer?

O tempo de vida do múon dilata-se em relação ao referencial do laboratório que está em Terra. Pode-se calcular essa dilatação aplicando as equações 2.3 e 2.4,

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

em que $\Delta t' = 2,2 \cdot 10^{-6} s$ (tempo próprio do múon) e $v = 0,9998c$. Assim:

$$\Delta t = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{0,9998^2 c^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = 110 \mu s.$$

Um resultado que faz com que o múon relativístico leve mais tempo para decair.

Uma sugestão é conferir o resultado utilizando a calculadora da página Walter Fendt (https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm), ilustrada na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Print de tela da calculadora do site Walter Fendt.

A imagem mostra uma interface de usuário de uma calculadora online com um fundo azul. Há três linhas de entrada de dados, cada uma com um campo de texto e uma seta para baixo para selecionar unidades. O primeiro campo é rotulado 'Tempo t:' e contém o valor '110' com a unidade 's'. O segundo campo é rotulado 'Velocidade v:' e contém '0,9998' com a unidade 'c'. O terceiro campo é rotulado 'Tempo t\'' e contém o valor decimal longo '2,1998899972498624914056484' com a unidade 's'. Abaixo dos campos, há um botão retangular verde com o texto 'OKEY' em preto.

Fonte: https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm. Acesso em: 15/01/2023.

Utilizando esse valor de vida e aplicando novamente,

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$

$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \cdot 110 \cdot 10^{-6}$$

$$\Delta s = 33.000m.$$

O que dá como resultado uma distância suficiente para ser detectada ao chegar próximo da superfície da Terra. Mostrando assim, que há uma dilatação do tempo em $107,8 \mu s$, possibilitando um deslocamento 50 vezes maior que o esperado em laboratório, comprovando, assim, o previsto pela teoria da relatividade.

Atividade 5 – Fechamento da aula: resolução de quatro questões de vestibulares

1 - (UEL PR) A Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, mas em perfeito acordo com os resultados experimentais. Ela é aplicada, entretanto, somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade, válida não só para referenciais inerciais, mas também para referencial não-inerciais.

Sobre os referenciais inerciais, consideram as seguintes afirmativas:

- I. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade constante.
- II. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade variável.
- III. Observadores em referenciais inerciais diferentes medem a mesma aceleração para o movimento de uma partícula.

Assinale a alternativa correta

- A) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
- B) Apenas a afirmativa II é verdadeira.
- C) As afirmativas I e II são verdadeiras.
- D) As afirmativas II e III são verdadeiras.
- E) As afirmativas I e III são verdadeiras. **(X)**

2 - (CFT-CE) Em 2005, Ano Mundial da Física, comemora-se o centenário da Teoria da Relatividade de Albert Einstein. Entre outras consequências esta teoria poria fim à ideia do éter, meio material necessário, semelhantemente ao som, através do qual a luz se propagava. O jargão popular “tudo é relativo” certamente não se deve a ele,

pois seus postulados estão fundamentados em algo absoluto: a velocidade da luz no vácuo – 300.000 km/s. Hoje sabe-se que:

- I. O som propaga-se no vácuo.
- II. A luz propaga-se no vácuo.
- III. A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite do universo.

É (são) verdadeira(s):

- A) todas
- B) nenhuma
- C) somente II
- D) II e III **(X)**
- E) somente III

3 - (UFRGS) De acordo com a Teoria da Relatividade quando objetos se movem através do espaço-tempo com velocidades da ordem da velocidade da luz, as medidas de espaço e tempo sofrem alterações. A expressão da contração espacial é dada por $L = L_0(1 - v^2/c^2)^{1/2}$, onde v é a velocidade relativa entre o objeto observado e o observador, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, L é o comprimento medido para o objeto em movimento, e L_0 é o comprimento medido para o objeto em repouso.

A distância Sol-Terra para um observador fixo na Terra é $L_0 = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. Para um nêutron com velocidade $v = 0,6 c$, essa distância é

- A) $1,2 \cdot 10^{10}$ m
- B) $7,5 \cdot 10^{10}$ m
- C) $1,0 \cdot 10^{11}$ m
- D) $1,2 \cdot 10^{11}$ m **(X)**
- E) $1,5 \cdot 10^{11}$ m

Utilizando as equações 2.4 e 2.5, tem-se:

$$L = \frac{L_0}{\gamma} \quad \text{ou} \quad L = L_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,6^2 \cdot c^2}{c^2}}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{1 - 0,36}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{0,64}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 0,8$$

$$L = \mathbf{1,2 \cdot 10^{11} m}$$

4 - (UFPE) – Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante $0,8c$, em que c é a velocidade da luz no vácuo. No referencial da espaçonave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da Terra, em meses?

Utilizando as equações 2.3 e 2.4, tem-se:

$$\Delta t = \Delta t' \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou} \quad \Delta t = 12 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0,8^2 c^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = 12 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 0,64}}$$

$$\Delta t = \frac{12}{\sqrt{0,36}} \quad \Delta t = \mathbf{20 \text{ meses.}}$$

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “O Paradoxo dos Gêmeos Explicado” – YouTube. Duração 11min05s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=98OvQpOkOIU>>. Acesso em: 17/05/2022.

- VÍDEO 2 – “Raios Cósmicos, múon, Dilatação do Tempo e Contração do Espaço” – YouTube. Duração 9min53s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=QnLxDDyIEsM>>. Acesso em 17/07/2022.

- TEXTO 1 – “A vida do múon” – Disponível em: <<https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/2RelatividadeEspecial/2Avidadomuon/Avidadomuon.html>>. Acesso em: 12/06/2022.

- TEXTO 2 – “Medida da vida média do múon” – Disponível em: <<https://progp.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/wp-content/uploads/2018/04/Medida-da-vida-m%C3%A9dia-do-m%C3%BAon.pdf>>. Acesso em: 21/07/2022.

- TEXTO 3 – “Partículas elementares” – Disponível em: <<https://felipe9aes.wixsite.com/particulas/inicio>>. Acesso em: 21/07/2022.

Referências

BRAZ Júnior, Dulcídio. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

PEREIRA, Ricardo Vieira. **Múon relativístico**. Produto educacional do programa de Mestrado Nacional em Ensino de Física (MNPEF) da Sociedade Brasileira de Física (SBF) do polo da Universidade Federal do ABC (UFABC), 2019. Disponível em: <<https://progp.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em: 12/06/2022.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 6

O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA

Papel do professor

Espera-se que o professor possa envolver os estudantes no processo de ensino-aprendizagem, desenvolvendo junto a eles a segurança e a autonomia para exporem os conhecimentos adquiridos.

Que ele possa conduzir os alunos a vislumbrar a possibilidade de alcançar o conhecimento e conseguir reproduzi-lo.

Incentive o debate entre os alunos.

O que se espera

Ao término da aula, espera-se que os alunos sejam capazes de compreender a relação entre o efeito de um campo gravitacional e da aceleração, ou seja, o princípio da equivalência.

Que os alunos tenham argumentos para abordar aspectos relevantes da teoria da relatividade restrita e geral, conseguindo expressar por meio de exercícios de fixação. E sejam capazes de colaborar mutuamente, compartilhando os conhecimentos adquiridos.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – Inicia-se com um breve resumo da Aula 5 e, caso seja necessário, retomar os exercícios propostos.

Atividade 2 – Uma motivação para o tema dessa aula, seguida pela leitura individual da HQ.

Atividade 3 – Abre-se o debate como os estudantes com a finalidade de conferir o entendimento deles assim como suas dúvidas e questionamentos. Caso os alunos não interajam com questionamentos, cabe ao professor conduzir as questões aos alunos induzindo-os a reflexão.

Atividade 4 – Aprofunda-se o tema com a leitura do texto para os alunos sobre o princípio da equivalência. Novamente, cria-se um momento de partilha sobre as impressões dos alunos.

Atividade 5 – Assistir ao vídeo proposto com o tema da relatividade geral. Seguido pela realização da atividade proposta.

Atividade 6 – A última atividade dessa sexta aula visa incentivar os estudantes a expressarem os conhecimentos adquiridos até o momento por meio da elaboração de palavra cruzada ou cruzadinha, assim como uma autoanálise referente à maneira de como expressaram os conhecimentos adquiridos.

Após os alunos realizarem a Atividade 1, passa-se à Atividade 2, ou seja, explicar a motivação do conteúdo da sexta página da HQ (Figura 2.14), em que se introduz a Teoria da Relatividade Geral. Para essa abordagem, analisar o que diz o chamado Princípio da Equivalência, pois esse princípio é o que conduzirá a compreensão do motivo da luz se curvar e em quais condições.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 6 (Figura 2.14)

Figura 2.14 – Sexta página da HQ – Aula 6: o Princípio da Equivalência.

Aula 6

O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA

Para entendermos a curvatura da luz próximo do Sol, vamos antes falar sobre a teoria da relatividade geral.

Não é tudo a mesma coisa?

Claro que não!

A física clássica descreve o movimento de um corpo conhecendo as forças que atuam sobre ele.

A gravidade é uma força, não é?

Para a física clássica sim.

Aí que entra o Einstein. Ele defendia que a gravidade não era uma força entre duas massas a certa distância, como previa a teoria clássica.

Mas qualquer objeto "cai" porque está sofrendo a ação da força da gravidade e fica acelerado.

Sim. E aí está a grande questão de Einstein: como relacionar a gravidade ao movimento com aceleração, sem falar de força.

Vamos usar a imaginação: caso o Ben esteja em uma nave espacial sem visão para fora da nave e bem afastada do planeta, sem a influência da gravidade.

Você estaria flutuando dentro da nave.

Se a nave começar a se mover cada vez mais rápida, ou seja, acelerada, o Ben sentirá uma força nas patinhas, chamada força inercial, semelhante a ação gravidade.

Sempre eu!!!

Parece legal..

Inclusive, se o Ben "deixar cair" algo, será semelhante ao que observa próximo da Terra.

Quer dizer que o efeito da aceleração é igual ao da gravidade e vice e versa?

Exatamente!!! E este é o *princípio da equivalência*.

Fonte: o autor.

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 6

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após a leitura.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: princípio da equivalência

Texto para os alunos: Princípio da equivalência²⁰

Se um observador está em pé sobre uma balança dentro de um elevador fechado, ao perceber que o ponteiro da balança começa a indicar um valor diferente para sua massa, duas explicações são possíveis.

- 1 – o elevador está em movimento com velocidade variável em módulo, ou
- 2 – o campo gravitacional local mudou.

Algo semelhante é sugerido no primeiro quadrinho da última tirinha da HQ.

Se o cabo do elevador arrebentou e ele entra em queda livre, a balança vai indicar zero, situação que chamamos de imponderabilidade²¹. O observador e todos os objetos dentro do elevador parecem flutuar. Na HQ da sexta aula tal situação é ilustrada de forma semelhante no segundo quadrinho da terceira tirinha. Esse efeito de flutuação sugere gravidade zero, mas na verdade pode ser conseguido de duas formas:

- 1 – pela anulação do campo gravitacional, ou
- 2 – por um movimento do elevador com aceleração igual à gravidade em módulo.

De dentro do elevador, sem observar o que acontece lá fora, não há como saber o que de fato está acontecendo. A impossibilidade de decidir entre as duas explicações aceitáveis acima constitui basicamente o princípio da equivalência, que diz: Se um observador está dentro de um recinto fechado, sem ter como olhar para fora, não há como saber se o recinto está sob a ação de um campo gravitacional uniforme ou se está acelerado. Ou seja, a imponderabilidade.

²⁰ Texto extraído de: Braz Júnior, 2002, p. 29. Com modificações do autor.

²¹ Imponderabilidade é o estado em que não se pode discernir se está sob a ação de um campo gravitacional ou em queda livre. Também é descrita como a sensação de ausência de compressão de apoio, resultante da ausência de força normal. (Wikipedia).

A dupla possibilidade entre a ação de um campo gravitacional ou de uma aceleração é denominado princípio da equivalência.

Atividade 5 – Compartilhar o vídeo “A relatividade geral explicada”, disponível no site: Ciência todo dia

Como forma de complementar os conhecimentos expostos até o momento, assistir ao vídeo indicado, seguido de momento de reflexão.

VÍDEO: *A relatividade geral explicada.*

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jYlr3G9yB8s>>.

Duração: 10min47s.

Atividades 6 – Fechamento da aula: elaboração de caça-palavras ou cruzadinha

A atividade dessa aula será desenvolvida pelos próprios alunos, organizados em pequenos grupos com 3 ou 4 alunos. Cada grupo desenvolve um caça-palavras ou uma cruzadinha, abordando o entendimento referente aos tópicos sobre relatividade estudados até agora.

Um grupo apresenta sua atividade para que o outro possa resolver. Ao término da atividade, os grupos trocam entre si opiniões sobre o que foi desenvolvido pelo outro grupo. Avaliação entre os pares, no caso, entre os grupos.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “*RG05 - Princípio de equivalência*” – YouTube – Duração: 20min44s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kSG4MqrWpFI>>. Acesso em: 17/07/2022.

- TEXTO 1 – “*Teoria da relatividade geral*” – Disponível em <<https://brasilescola.uol.com.br/fisica/teoria-relatividade-geral.htm>>. Acesso em 23/07/2022.

- TEXTO 2 – “*Princípio da equivalência*” – Disponível em <<https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RG/node4PE.html#:~:text=na%20forma%20seguinte%3A-,Princ%3%ADpio%20da%20Equival%3%AAncia%20%5BEinstein%>>

5D%20...,duas%20situa%C3%A7%C3%B5es%20por%20qualquer%20experi%C3%Aancia%22%20.>. Acesso em 11/07/2022.

Referências

BRAZ Júnior, Dulcídio. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade: sobre a teoria da relatividade especial e geral** (para leigos). Porto Alegre: L&PM, 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

UNIDADE DIDÁTICA 7 A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

Papel do professor

Cabe ao professor, no decorrer da aula, apresentar o efeito da curvatura do espaço-tempo na presença de um corpo altamente massivo.

Estimular a imaginação dos alunos para que compreendam como se dá a deformação do espaço-tempo na presença de um corpo com muita massa, a exemplo das estrelas. Para melhor entendimento sobre o que significa um corpo ter muita massa, normalmente ela é expressa em termos da massa do Sol, que é de aproximadamente $1,99 \cdot 10^{30}$ kg.

Discutir com os alunos a trajetória da luz no espaço-tempo curvo como uma explicação para as observações realizadas na cidade de Sobral em 1919.

Incentivar para que os alunos respondam o questionário final com tranquilidade e satisfação pelo caminho percorrido até aqui na aprendizagem de aspectos da teoria da relatividade.

O que se espera

Que os alunos sejam capazes de compreender como o princípio da equivalência conduz ao entendimento da curvatura do espaço-tempo, fazendo a relação entre o

que foi apresentado durante a aula e a explicação da observação realizada durante o eclipse na cidade de Sobral – CE, em 1919.

Com base na abordagem dos temas referentes à teoria da relatividade, apresentados durante as aulas, que os alunos sejam capazes de responder o questionário avaliativo final, com tranquilidade e convicção.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – O primeiro passo é que se retome o tema da aula anterior sobre o princípio da equivalência conduzindo a abordagem para o efeito da curvatura do espaço-tempo.

Atividade 2 – Após, realiza-se a leitura individual da HQ da Aula 7.

Atividade 3 – Comenta-se sobre o que se entendeu ou gerou dúvidas por parte dos alunos.

Atividade 4 – Numa próxima etapa da aula, é realizada a leitura coletiva e a discussão do texto para o aluno.

Atividade 5: Sugere-se assistir ao vídeo 1 (Como a gravidade deforma o tempo? Relatividade Geral), indicado nos materiais complementares.

Atividade 6 – Realizadas as devidas considerações sobre o tema da curvatura do espaço-tempo, retoma-se a problematização inicial, apresentado na primeira aula: a observação da luz de estrelas durante o eclipse observado em Sobral, em 1919.

Atividade 7 – Responde-se o questionário final para observar e quantificar a aprendizagem dos alunos.

Chegamos ao fim de nossa jornada na HQ envolvendo a teoria da relatividade e usa primeira comprovação experimental, ainda mais envolvendo uma expedição ao Brasil para essa comprovação. Esse fato ocorreu há 104 anos e a teoria da relatividade continua sendo atual, como a sua aplicação no GPS, na detecção das ondas gravitacionais, já comentados anteriormente. Após trabalhar com os alunos a Atividade 1, a proposta da Atividade 2 é ler a última página da HQ (Figura 2.15).

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 7 (Figura 2.15)

Figura 2.15 – Sétima página da HQ – Aula 7: a curvatura do espaço-tempo.

Aula 7

A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

Dentro da nave, sem ter visão de fora, não é possível definir se a nave está sobre a ação da gravidade ou acelerada.

Isso mesmo. Por isso o nome "princípio da equivalência".

Agora podemos falar sobre a curvatura da luz.

Ops! O "bicho vai peçar"!

Pensa comigo Ben: se uma pessoa está num elevador em queda livre com uma lanterna na mão. Como ela vê a trajetória da luz?

Vê, em linha reta! Batendo o tempo todo no mesmo lugar.

Exatamente. A pessoa e a lanterna estão no mesmo referencial.

E se o observador estivesse em um referencial externo ao elevador?

Vê! Neste caso, como o elevador está em queda acelerado e a luz bate o tempo todo no mesmo ponto do elevador. Quem está fora iria observar a luz numa trajetória curva.

Não estou entendendo nada!

Pelo princípio da equivalência, o mesmo efeito seria possível pela ação do campo gravitacional.

Deixar-me ver se acerto: Einstein concluiu que a gravidade poderia curvar a trajetória da luz!?

Isso mesmo!

Mas como seria possível curvar a trajetória da luz?

Einstein propôs que uma massa muito grande, causa deformação no espaço-tempo, da mesma forma que uma bola "pesada" deforma a superfície e um lençol esticado.

Na verdade, a luz estaria apenas acompanhando o espaço-tempo deformado.

Foi isto que os cientistas observaram no eclipse de Sobral?

Exatamente

FIM

Fonte: o autor.

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 7

Momento de discussão e partilha entre os alunos e professor sobre o conteúdo da última página da HQ, relacionada inicialmente como o conteúdo no recorte do jornal de Londres, apresentado na primeira página da HQ (Figura 2.3). Comenta-se sobre o que se entendeu ou gerou dúvidas por parte dos alunos.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: curvatura do espaço-tempo

Texto para os alunos: Curvatura do espaço-tempo²²

O princípio da equivalência torna-se contundente quando aplicado à luz. Imagine, por exemplo, um observador segurando uma lanterna dentro de um elevador. Supondo-se que o elevador despenque em queda livre e num certo momento da queda a lanterna é ligada. O Observador (O_2) dentro do elevador, cai com a lanterna e vê um raio de luz que segue em linha reta, cruza o elevador e bate na parede da frente, conforme ilustrado na parte central da HQ dessa aula, na figura a esquerda. Até aí, nada de mais.

Mas se outro observador externo (O_1), parado em relação ao chão, pudesse enxergar através das paredes do elevador, o que veria? Na figura central da HQ à direita, temos a visão desse observador.

Nota-se que para O_1 o raio de luz literalmente encurva! Neste caso, sabemos que a causa dessa curvatura é o movimento acelerado do elevador. Mas, pelo princípio da equivalência, o mesmo efeito poderia ser conseguido a partir de um campo gravitacional externo. Einstein concluiu, a partir desse raciocínio, que a gravidade deveria forçar a luz a fazer curva!

É a partir daí que surge a interpretação geométrica para os efeitos da gravidade. Podemos considerar que corpos com grande massa provocam uma curvatura no espaço-tempo ao seu redor. Dessa forma, mesmo a luz, caminhando supostamente em uma linha reta, deveria acompanhar a curvatura do espaço-tempo, como que sofrendo a ação atrativa da gravidade.

²² Continuação do texto extraído de: Braz Júnior, 2002, p. 29. Com modificações do autor.

Segundo Einstein, corpos com grande massa, como estrelas, por exemplo, poderiam tirar a luz de sua suposta e previsível trajetória retilínea.

Mais uma vez surge a importante pergunta: como testar a teoria? Como vamos conseguir um corpo de massa estelar aqui na Terra? Impossível!

Novamente entra em cena a criatividade dos cientistas. Uma oportunidade importante para testar a teoria é um eclipse solar total. A ideia é fotografar as estrelas visualmente próximas ao Sol e que só aparecem quando o disco solar é encoberto pela Lua, no curto período em que o dia vira noite, na totalidade do eclipse. Numa outra época do ano, quando essa mesma constelação estiver visível à noite, sem a presença do Sol, uma segunda exposição fotográfica pode ser feita.

Nessa segunda foto, as posições das estrelas devem ser ligeiramente diferentes daquelas obtidas durante o eclipse, pois desta vez, sem o Sol, a luz chega até a máquina fotográfica em linha reta. Se conseguirmos medir essas mínimas diferenças nas posições das estrelas, então fica provado que na presença do Sol desvia, de fato, a luz! Genial, não?

Atividade 5 – Apresentar o vídeo sobre o princípio da equivalência e curvatura da luz

Sugere-se assistir ao vídeo 1, cujo *link* está disponível nos materiais complementares. O vídeo faz um resumo sobre o princípio da equivalência e a curvatura da luz.

Atividade 6 – Questionário avaliativo para os alunos responder e entregar

Os alunos responderão o questionário avaliativo final do Produto Educacional. As respostas esperadas estão em azul após cada questão.

1 – Desprezando a resistência do ar e considerando que uma bola de boliche e uma maçã são abandonadas da mesma altura, quem chega no chão primeiro?

Ambas chegam ao mesmo tempo.

2 – De acordo com a teoria da relatividade o que ocorre com o tamanho de um objeto, caso ele esteja em movimento com velocidade próxima a da luz?

Tem seu tamanho diminuído, contraído, para o observador em repouso.

3 – De acordo com a teoria da relatividade o que ocorre com a marcação do tempo de um objeto quando estiver em movimento com velocidade próxima a da luz?

O tempo é marcado lentamente, passa devagar, ou seja dilata, para o observador em repouso.

4 – O que define o limite entra a física clássica de Newton e a teoria da relatividade?

O objeto estar em movimento com velocidade muito alta, próxima a velocidade da luz.

5 – Qual a trajetória mais provável para o movimento de um feixe de luz.

Em linha reta, porém, acompanhando a curvatura do espaço-tempo.

6 – O que você sabe sobre Buraco Negro?

O efeito de deformação do espaço-tempo nas proximidades de um objeto com muita densidade de massa, produzindo um campo gravitacional de tamanha intensidade onde a velocidade de escape seja maior do que a velocidade da luz. Dessa forma, nem a luz consegue escapar da ação do campo gravitacional (daí o nome buraco negro).

7 – Qual o motivo de não percebermos os efeitos da teoria da relatividade em nosso cotidiano?

As velocidades que presenciamos são infinitamente menores que a velocidade da luz.

8 – Você é capaz de citar uma aplicação cotidiana da teoria da relatividade?

Aparelho/aplicativo de GPS.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “Como a gravidade deforma o tempo? Relatividade Geral” – YouTube – Duração: 17min37s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=56TJuxnWC-c&t=3s>>. Acesso em: 23/05/2022.

- VÍDEO 2 – “Relatividade Geral Explicada em 7 Níveis de Dificuldade” – YouTube. Duração: 6min53s. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=As-dDpwEnqU>>. Acesso em 25/03/2022.

- VÍDEO 3 – “Para finalmente entender a Teoria da Relatividade de Albert Einstein” – YouTube – Duração: 3min43s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=fwzzgJOLZkM&t=121s>>. Acesso em : 18/07/2022.

- VÍDEO 4 – “Relatividade geral: O ESPAÇO-TEMPO CURVO” – YouTube – Duração: 7min15s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=A7BiPY9vuQI>>. Acesso em: 19/07/2022.

- TEXTO 1 – “Porquê espaços-tempo curvos? Gravidade como curvatura do espaço-tempo”. Disponível em: <<https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RG/node8EspCurvos.html>>. Acesso em: 23/07/2022.

Referências

BRAZ Júnior, Dulcideo. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade: sobre a teoria da relatividade especial e geral** (para leigos). Porto Alegre: L&PM, 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

UNIDADE DIDÁTICA 8

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO QUESTIONÁRIO E AVALIAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Atividade 1 – O principal objetivo desta aula é realizar com os estudantes a devolutiva, quanto ao rendimento que obtiveram no questionário avaliativo final, realizado na aula anterior. Discutir sobre as possíveis respostas equivocadas e retomar tópicos importantes quando necessário.

Atividade 2 – Outra finalidade da aula é realizar uma avaliação da proposta apresentada para a abordagem do tema sobre tópicos da teoria da relatividade. Os alunos são convidados e motivados a responder as seguintes questões, de maneira livre e informal, para que as respostas correspondam à realidade da mudança no conhecimento individual de cada um.

1 – O professor demonstrou domínio do conteúdo e as explicações foram claras.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

2 – Os objetivos das aulas foram bem definidos, ficando bem claros aos alunos.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

3 – Os recursos metodológicos (quadrinhos, imagens, vídeos, simulações) ajudaram para uma melhor aprendizagem.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

4 – Por meios das aulas, os alunos conseguiram entender os aspectos básicos sobre a teoria da relatividade.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

5 – A abordagem do conteúdo sobre teoria da relatividade é importante para os alunos da educação básica, em especial, no ensino médio.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

CAPÍTULO 3 – APLICAÇÃO E RESULTADOS DO PRODUTO EDUCACIONAL

Neste capítulo, serão apresentados os detalhes sobre a aplicação do Produto Educacional, doravante denominado como (PE), constituído pela Sequência Didática (SD), abordando aspectos da teoria da relatividade de Albert Einstein. As aulas foram elaboradas de tal forma, que atendessem à proposta estrutural de uma SD, conforme apresentado no Quadro 2.1, na qual constam quatro passos ou etapas: apresentação da situação; produção inicial; módulos de atividades; produção final (ARAÚJO, 2013 p. 323).

A construção do PE foi se desenvolvendo em várias etapas:

- a) Seleção dos tópicos sobre a teoria da relatividade a serem trabalhados: durante os créditos do mestrado.
- b) Pesquisa e estudo da base teórica da educação: aulas de Fundamentos Teóricos em Ensino e Aprendizagem.
- c) Definição e elaboração da Sequência Didática: terceiro semestre do curso.
- d) Elaboração do roteiro e desenhos da história em quadrinhos (HQ): durante as aulas de Estágio Supervisionado, sob a responsabilidade da professora Doutora Hatsumi Mukai.
- e) Desenvolvimento do Produto Educacional: durante as aulas de Estágio Supervisionado.
- f) Aplicação do Produto Educacional: entre 05/09/2022 e 26/09/2022, sob a supervisão do professor Breno.
- g) Avaliação do Produto Educacional realizada pelos alunos: 10/10/2022.

Ainda neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos junto aos alunos, a partir das observações da evolução comportamental e reflexiva diante do tema abordado e por meio dos instrumentos avaliativos propostos.

É importante ressaltar que o desenvolvimento do presente PE se iniciou em plena a pandemia causada pelo SARS-CoV-2, no ano de 2020, em que a população estava passando pelo período de isolamento social, quando se foi decidido o tema a ser trabalhado junto ao orientador, no início do mestrado. Com a contaminação pelo vírus, o autor do presente trabalho, após sua recuperação, enfrentou as sequelas da doença, dentre as quais: falta de concentração e esquecimentos constantes,

deixando-o desmotivado, juntamente à toda a adaptação e o enfrentamento ocorrido na área educacional no período da pandemia e pós-pandemia, junto à instituição onde atua, causando um atraso no desenvolvimento do PE. Normalmente, essa fase é feita paralelamente às disciplinas do mestrado, nos três primeiros semestres, e a aplicação ocorre no 4º semestre. Fazendo uso da portaria da CAPES, que permitia a defesa após o prazo regular de 30 meses (contando com a prorrogação), conseguiu-se terminar a sua elaboração e a aplicação do PE ocorreu para os alunos afetados no período da pandemia de forma presencial.

3.1 – APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

A aplicação do PE ocorreu nas dependências do Instituto Lins de Vasconcelos, entidade sem fins lucrativos que atende, em contraturno escolar, crianças e adolescentes da rede pública e que se encontram em situação de vulnerabilidade social. Localizado no município de Maringá, Paraná, o Instituto está geograficamente localizado na área de abrangência do Núcleo Regional de Educação de Maringá, no entanto, não possui vínculo com o Governo do Estado do Paraná.

O público-alvo atendido pelo trabalho compõe-se de alunos do ensino médio, preferencialmente do 2º e do 3º ano. Participaram também, alunos do 1º ano do ensino médio e alguns do 9º ano do ensino fundamental. As aulas foram realizadas na modalidade presencial, com período de aplicação entre 05 de setembro e 10 de outubro de 2022.

O conteúdo proposto abordou tópicos sobre a teoria da relatividade, especificamente: a) Relatividade Restrita: conceito de relativo e absoluto, experimento de Michelson e Morley, dilatação do tempo e contração do espaço; b) Relatividade Geral: princípio da equivalência, curvatura do espaço-tempo.

Referente aos passos da SD, estes foram desenvolvidos, conforme apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Desenvolvimento dos passos/etapas da Sequência Didática, detalhada no Quadro 2.1.

Passos/etapas	Unidade didática
i) Apresentação da situação	1
ii) Produção inicial	1
iii) Módulos de atividades	2, 3, 4, 5 e 6
iv) Produção final	7

Fonte: o autor.

Além dos dias utilizados para o desenvolvimento das unidades didáticas apresentadas no Quadro 3.1, houve um último encontro com os alunos, tendo como objetivo apresentar os resultados alcançados durante os trabalhos e aproveitou-se para uma avaliação da metodologia utilizada no PE.

Cada unidade didática foi organizada em diversas atividades com a finalidade de abordar as tipologias de conteúdos classificadas por Zabala (1998) como conteúdos factuais, conceituais, procedimentais e atitudinais (ZABALA, 1998, p. 41), conforme citadas no Capítulo 1.

A aplicação do PE estava previsto, inicialmente, para acontecer em quatro encontros, cada um com duração de 100 minutos – equivalente a duas horas/aula, somando-se ao final 400 minutos (6,67 h) de curso, conforme especificado no quadro 2.1. No entanto, a dinâmica dos horários do Instituto Lins de Vasconcellos fez com que cada encontro tivesse um tempo útil reduzido que, somada à diversidade do grupo, tornassem necessários seis encontros com média de 80 minutos e o sétimo encontro para a avaliação do PE e o *feedback* com 30 minutos, totalizando, assim, 510 minutos (8,5 h) de curso.

A seguir, apresentam-se a descrição e a análise da aplicação de cada uma das unidades didáticas, seguindo a proposta apresentada no Capítulo 2.

Unidade didática 1

Primeiramente, foi realizada uma breve introdução, expondo aos alunos a motivação e a finalidade da proposta do trabalho, apresentando-se o cronograma de desenvolvimento das atividades assim como os critérios avaliativos. Na sequência, os alunos responderam o questionário diagnóstico (conteúdo procedimental), permitindo ao professor/mestrando uma visão do conhecimento prévio dos alunos, fator considerado fundamental por Ausubel (1980, p. 137), um dos mais importantes influenciadores em teorias de aprendizagem.

O passo seguinte foi a leitura da primeira parte da história em quadrinhos (conteúdo procedimental) seguida por uma reflexão coletiva quanto às compreensões, dúvidas ou descobertas a partir da situação proposta (conteúdo atitudinal).

Seguiu-se a leitura de um texto para contextualizar o evento do eclipse de 1919, observado em Sobral, Ceará, que contribuiu como primeira prova experimental para a confirmação da teoria da relatividade (conteúdo factual).

A leitura do texto proporcionou algumas reflexões sobre até que ponto as leis de Newton são suficientes para explicar os movimentos de corpos. Os alunos demonstraram estupor quanto ao fato da luz se curvar, o que gerou uma problematização de como a luz sofreria efeitos gravitacionais sem possuir massa (conteúdo conceituais).

O professor/mestrando aproveitou o momento da aula para apresentar aos alunos a diferença existente, na área da ciência, entre hipótese, teoria e leis, visando criar organizadores prévios previstos na teoria da aprendizagem significativa (MOREIRA, 2014, p. 163).

Unidade didática 2

A aula iniciou-se com o professor/mestrando provocando os alunos em construírem juntos um entendimento sobre a teoria da relatividade, uma vez que a proposta inicial seria compreender, a partir do evento em Sobral, o fenômeno da curvatura o espaço-tempo (conteúdo factual).

Os alunos realizaram a leitura da segunda parte da história em quadrinhos tratando da problemática entre a teoria do eletromagnetismo com a teoria clássica newtoniana (conteúdo procedimental). Um dos alunos questionou sobre a utilização de flechas desenhadas sobre algumas letras nos textos dos quadrinhos. Aproveitou-se o questionamento para uma breve revisão sobre a diferença entre grandezas vetoriais e escalares (conteúdo conceitual).

Após a leitura, os alunos foram provocados a alguns problemas envolvendo mudança de referenciais e as implicações dessas mudanças para fenômenos eletromagnéticos.

Realizou-se a leitura coletiva do texto de apoio sobre referencial e movimento (conteúdo procedimental). A partir da leitura do texto, apresentaram-se as transformações de Galileu para a velocidade e a invariância da velocidade da luz, contrariando essas transformações (conteúdo conceitual)

Na sequência, os alunos realizaram uma pesquisa *online* sobre o significado das expressões: absoluto, relativo e referencial. Por fim, foi resolvido um problema sobre transformações de Galileu (conteúdo procedimental).

Unidade didática 3

Iniciou-se com uma breve revisão sobre as transformações de Galileu e o conflito entre a teoria clássica newtoniana e o eletromagnetismo, e da tentativa de demonstrar a existência do éter (conteúdo factual). Foi necessário desenvolver um novo organizador prévio trabalhando a compreensão de características de um movimento ondulatório, sendo o éter, no entendimento da época, o meio necessário para a propagação da onda eletromagnética (conteúdo conceitual).

Realizou-se a leitura da terceira parte da história em quadrinhos, seguida por uma breve conversa sobre o que se entendeu, as novidades e dúvidas durante a leitura (conteúdo procedimental).

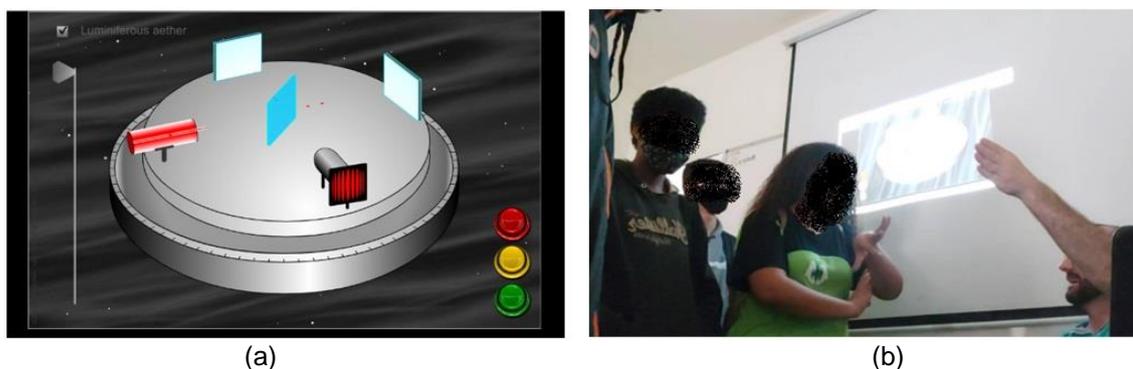
A atividade seguinte foi a leitura coletiva do texto de apoio sobre os dois postulados de Einstein para a teoria da relatividade (conteúdo procedimental). A leitura do texto conduziu a uma reflexão sobre a invariância da velocidade da luz e a variância do espaço e tempo, algo que contrária o senso comum em que, um minuto para um observador seria igual a um minuto para outro observador em um referencial em movimento (conteúdo conceitual). A reflexão levou uma das alunas a utilizar a expressão “tô ficando louca”.

Os alunos realizaram uma pesquisa *online* sobre o significado do termo postulado e compartilharam os resultados (conteúdo procedimental).

Para tratar do experimento de Michelson e Morley, utilizou-se uma simulação virtual do *site Physics at School*. A Figura 3.1 apresenta (a) um *print* do simulador e (b) alguns alunos analisando os resultados juntamente com o professor/mestrando. Apesar da simulação, percebeu-se a dificuldade dos alunos em compreenderem o que seria uma figura de interferência. Por sugestão do orientador deste trabalho, o Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira, foi realizado uma demonstração experimental utilizando uma ponteira *laser* e um fio de cabelo, procurando estabelecer um organizador prévio para ao conteúdo abordado. Ao realizarem o experimento a surpresa e a compreensão ficou evidente, valendo destacar a expressão de um dos estudantes: “que da hora”! (conteúdo procedimental). O trabalho de Oliveira (2016), para a conclusão do Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), neste mesmo polo, apresenta com detalhes o experimento com o fio de cabelo e a ponteira *laser*, mesmo que para outro fim, diferente do descrito no presente trabalho.

Finalizando a aula, assistiu-se um vídeo tratando do relativismo do espaço e tempo diante da velocidade da luz absoluta (conteúdo conceitual).

Figura 3.1 – (a) *Print* da tela do simulador do experimento de Michelson e Morley, no *site Physics at School*. (b) Imagem de alunos analisando os resultados da simulação do experimento de Michelson e Morley.



Fonte: (a) https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=str_michelson&l=en; (b) arquivos do autor.

Durante a aula um aluno questionou sobre o que seria ano-luz, ao que lhe foi explicado se tratar de uma medida de distância e não de tempo, para medidas astronômicas.

Unidades didáticas 4 e 5

Nessas unidades conservou-se a dinâmica das anteriores: breve retomada dos temas abordados anteriormente; alguns questionamentos iniciais; leitura e comentários da história em quadrinhos; leitura coletiva do texto de apoio; debate sobre o texto de apoio. Procurando a abordagem dos conteúdos de acordo com sua tipologia.

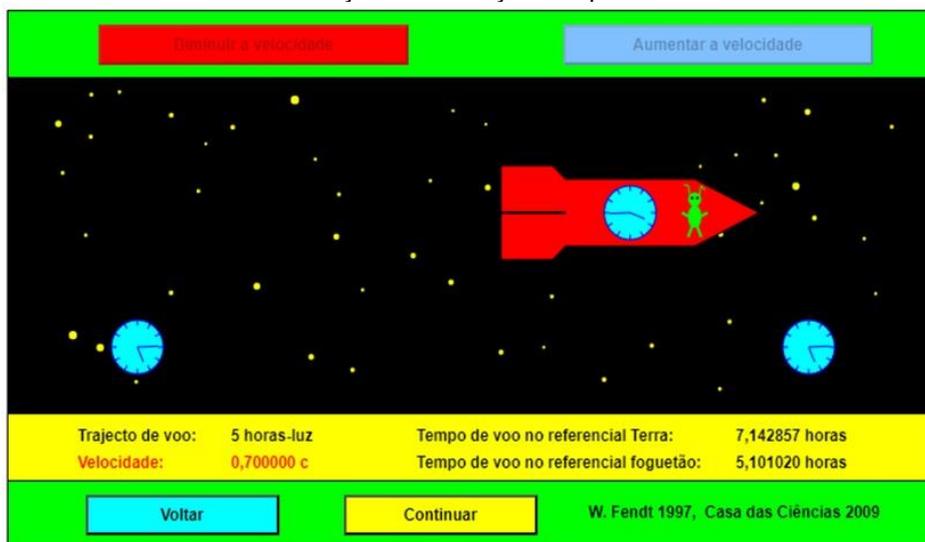
Na Unidade didática 4 apresentou-se, como consequência dos postulados da Teoria da Relatividade Restrita, os fenômenos da dilatação do tempo e contração do espaço, assim como o fator de Lorentz e as equações de dilatação temporal e contração espacial. Um aluno indagou se a velocidade da Terra produziria efeitos de dilatação temporal? Foi respondido que apesar da Terra apresentar velocidade de translação que consideramos grande, ainda assim, os efeitos são imperceptíveis para nosso cotidiano.

Como aplicação tecnológica da dilatação do tempo, utilizou-se como exemplo o funcionamento de um GPS. A abordagem foi realizada por meio de um vídeo, seguido por uma reflexão coletiva (conteúdos conceitual e procedimental).

Objetivando uma melhor compreensão do efeito a dilatação temporal, utilizou-se um simulador *online* da página Walter Fendt na *internet*, conforme ilustrado na Figura 3.2 (conteúdo procedimental). Foi possível perceber a diferença entre as marcações

de tempo dos relógios estacionários em relação o relógio em movimento na nave, assim como perceber que a medida que a nave aumenta a velocidade, aproximando-se da velocidade da luz, o tempo em seu relógio se torna mais lento.

Figura 3.2 – *Print* da tela da simulação da dilatação temporal com o simulador Walter Fendt.



Fonte: https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm. Acesso em 15/07/2022.

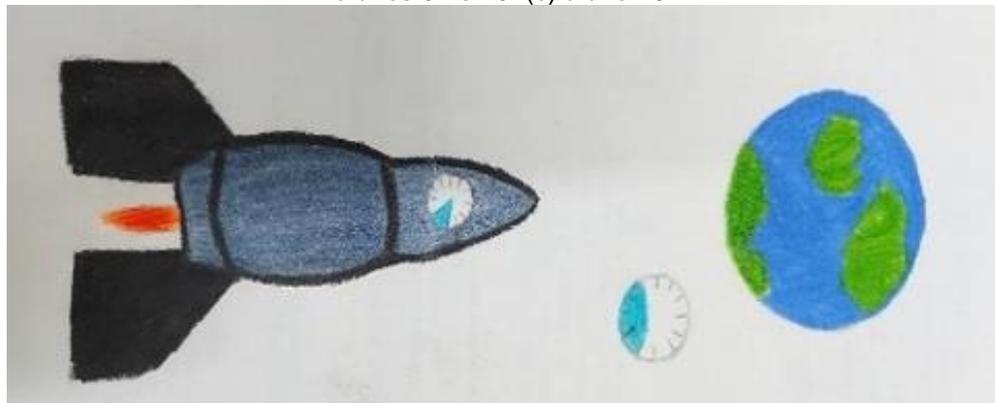
Logo após, os alunos foram desafiados a representarem por meio de um desenho os efeitos da dilatação do tempo e contração do espaço (conteúdo procedimental). A atividade foi realizada de forma colaborativa, em duplas ou trios (conteúdo atitudinal). O resultado da atividade é apresentado na Figura 3.3 e Figura 3.4.

Na Figura 3.3 tem-se três desenhos (a, b e c) representando a dilatação do tempo, em todos é comparado um relógio no referencial da Terra e outro em uma nave hipotética, com velocidade próxima à da luz. Nota-se que apesar da simplicidade e a não preocupação com a precisão matemática, todos sugerem o tempo mais lento no referencial das naves quando comparado ao referencial da Terra. Na Figura 3.4 o desenho corresponde a contração espacial percebida em uma nave hipotética próxima da velocidade da luz, quando observada no referencial da Terra, novamente não houve a preocupação com a precisão matemática, apenas descrever o efeito físico. As figuras indicando um nível satisfatório de aprendizagem, principalmente pelo fato de os alunos conseguirem expressar o que foi aprendido.

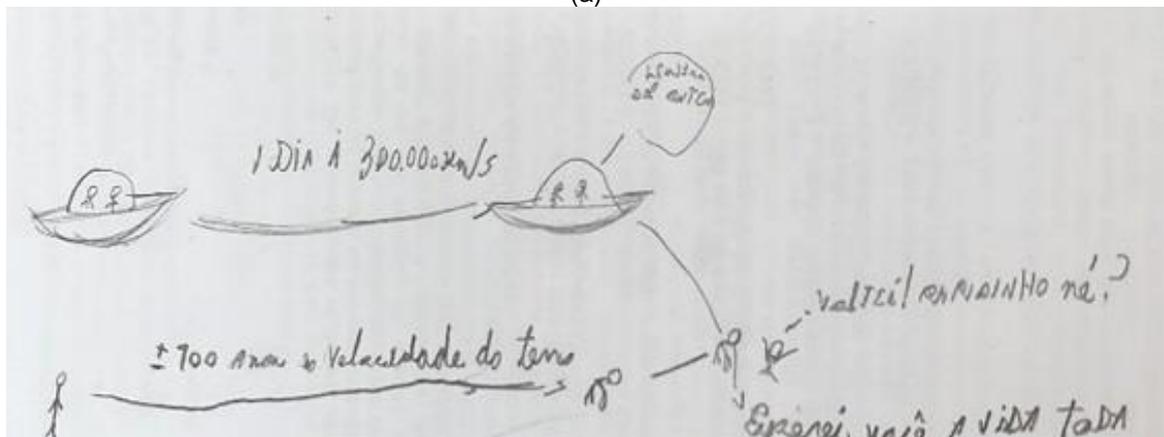
Já na unidade temática 5 foi abordado o paradoxo dos gêmeos, um dos experimentos mentais mais conhecidos da teoria da relatividade. Coletivamente foram realizados os cálculos da transformação de Lorentz para as personagens da história

em quadrinhos (conteúdo procedimental), encontrando-se a diferença entre as idades dos cachorrinhos²³.

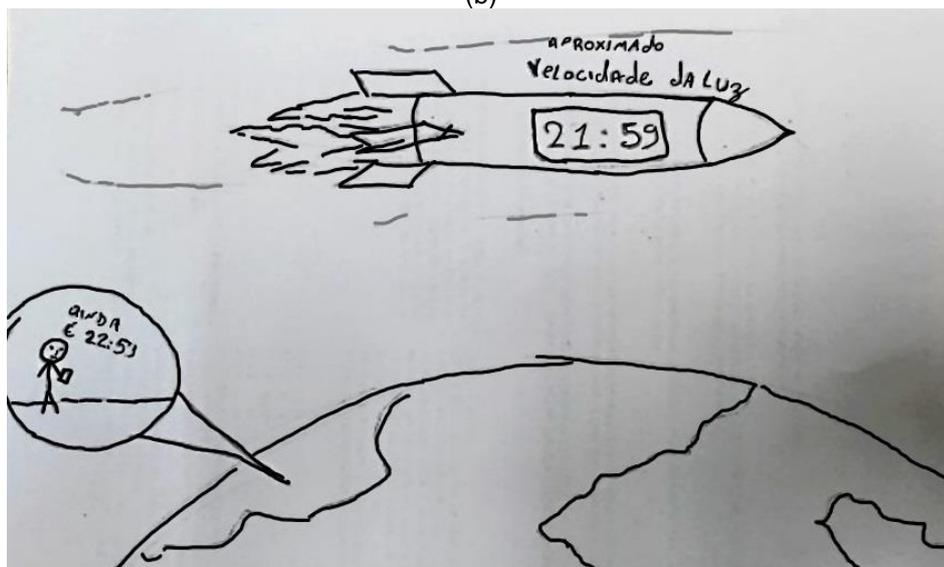
Figura 3.3 – Desenhos realizados pelos alunos sobre a dilatação do tempo: (a) alunos 03, 09 e 16. (b) alunos 04 e 19. (c) aluno 18.



(a)



(b)



(c)

Fonte: arquivos do autor.

²³ Para esses cálculos foi feito uma adaptação para obter a idade “real” dos *pets*, pois normalmente é apresentada para humanos.

Figura 3.4 – Desenho realizado pelos alunos 12 e 14 sobre a contração do espaço.



Fonte: arquivos do autor.

O texto de apoio aos alunos apresentou sobre a partícula múons. Mais uma aplicação real da teoria da relatividade. Efetuou-se os cálculos do tempo de vida dos múons em repouso num laboratório e ao entrarem na atmosfera da Terra com velocidade muito próxima à da luz (conteúdos factual e conceitual). Foi necessário a apresentação da ideia geral do modelo padrão da física de partícula, visando desenvolver um organizador prévio do conteúdo.

Para encerrar os tópicos pertinentes a Teoria da Relatividade Restrita, os alunos realizaram algumas questões de vestibulares (conteúdo procedimental).

Unidades didáticas 6 e 7

Nas duas últimas unidades didáticas, tratou-se do princípio da equivalência e da curvatura do espaço tempo, tópicos da Teoria da Relatividade Geral. Novamente, as aulas seguiram o mesmo esquema estrutural das anteriores.

A unidade didática 6 retomou a problematização da primeira aula, a mudança a posição aparente de algumas estrelas durante um eclipse total do Sol, ou ainda, a curvatura da luz emitida pelas estrelas nas proximidades do campo gravitacional do Sol (conteúdo factual).

Focou-se na compreensão daquilo que deveria ser equivalente na teoria de Einstein, a não distinção entre os efeitos produzidos por uma aceleração e os produzidos na presença de um campo gravitacional (conteúdo conceitual).

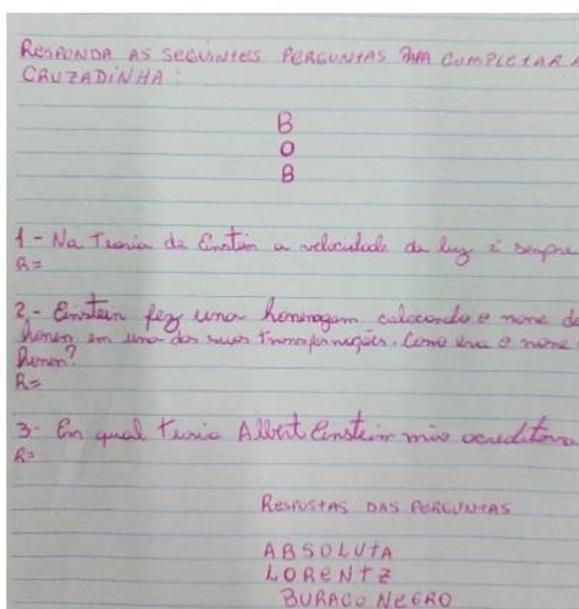
Visando reforçar o subsunçor, considerou-se mais proveitoso a abordagem dos conceitos de aceleração e gravidade como organizadores prévios, para na sequência, reforçando a ancoragem entre os dois conceitos.

Utilizou-se um vídeo apresentando o essencial sobre a Teoria Relatividade Geral. Além de abordagem diferente na explicação, soma-se os elementos de imagens e animações para auxiliar na compreensão (conteúdo conceitual).

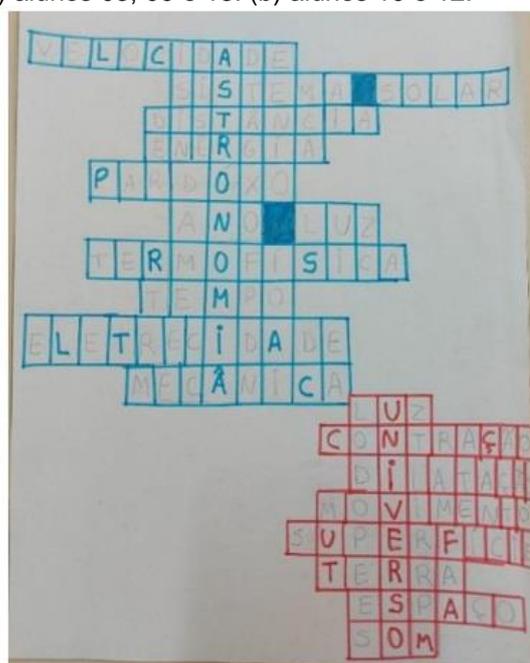
Foi proposto ainda que os alunos desenvolvessem uma atividade em forma de palavras cruzadas ou cruzadinhas (conteúdo procedimental). A atividade foi realizada em grupos de forma colaborativa (conteúdo atitudinal) e os resultados estão disponíveis na Figura 3.5 e Figura 3.6.

Por se tratar de uma atividade livre à criatividade dos alunos, percebe-se que conseguiram, mesmo que de forma lúdica, apresentar conceitos e expressões que foram desenvolvidos durante as aulas. Outro fator relevante observado foi a nível de envolvimento e contentamento estudantes ao realizarem a atividade, ficando evidente que a proposta agradou e criou o comprometimento dos alunos, atingindo o objetivo.

Figura 3.5 – Atividades de palavras cruzadas e cruzadinhas realizadas pelos alunos sobre os conteúdos assimilada da teoria da relatividade: (a) alunos 03, 09 e 13. (b) alunos 10 e 12.



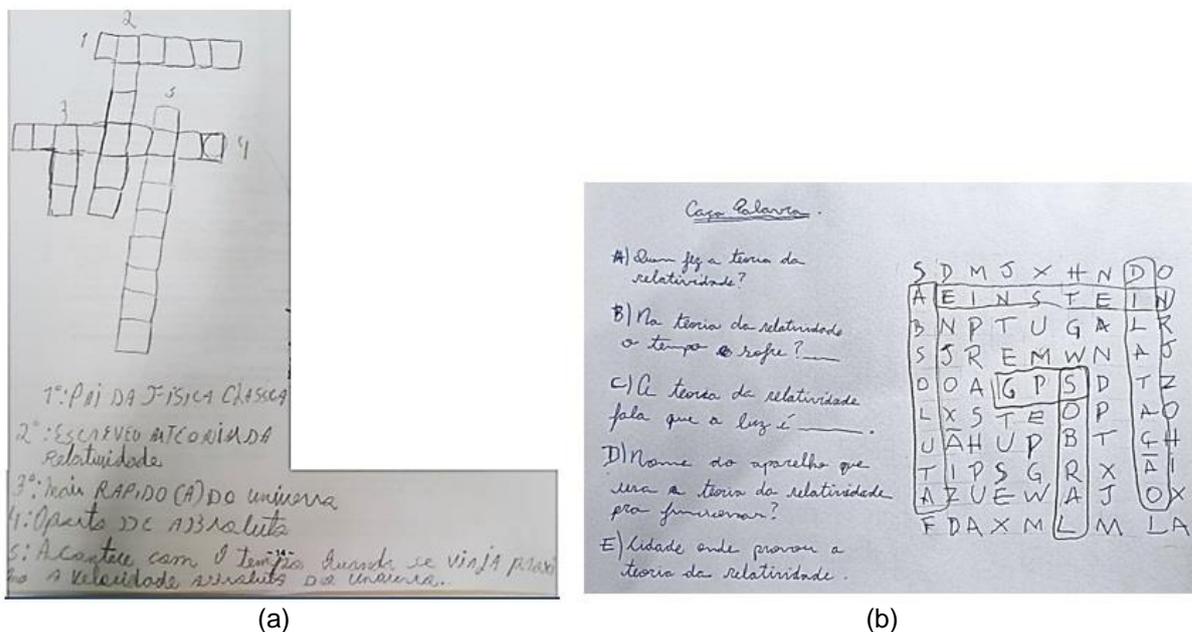
(a)



(b)

Fonte: arquivos do autor.

Figura 3.6 – Atividades de palavras cruzadas e cruzadinhas realizadas pelos alunos sobre os conteúdos assimilada da teoria da relatividade: (a) alunos 04 e 08. (b) alunos 1, 14 e 17.



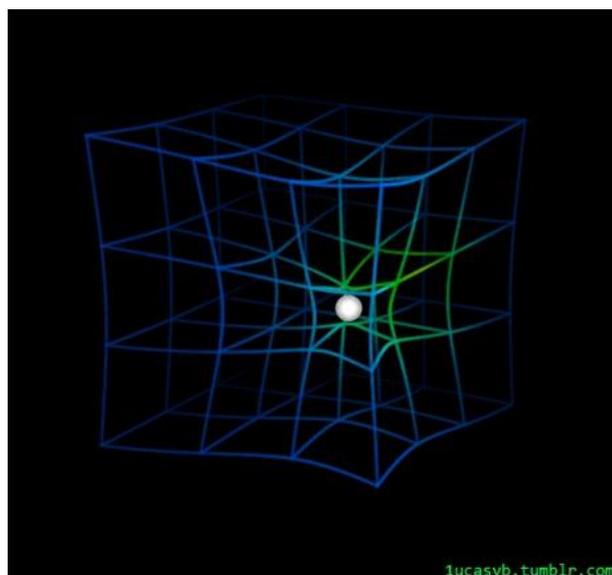
Fonte: arquivos do autor.

Os alunos 03, 09, 10, 12 e 13 (Figura 3.5) utilizaram termos correspondente ao trabalhados durante as aulas, no entanto a atividade ficou incompleta. No entanto, os alunos 01, 04, 08, 14 e 17, conseguiram realizar a atividade de forma mais adequada ao proposto.

Na unidade didática 7, desenvolveu-se a temática da curvatura do espaço-tempo na presença de objetos com grande massa, como uma nova explicação para os fenômenos gravitacionais, contrariando a teoria clássica de Newton (conteúdo factual).

O conteúdo conceitual foi abordado junto aos alunos de forma dialogal e interpelativa por parte do professor/mestrando. Exemplificou-se a curvatura do espaço-tempo utilizando-se o experimento mental de uma cama onde seriam colocadas, sucessivamente, esferas (bolas) com valores de massas diferentes. Quanto maior a massa da esfera, maior seria a deformação ocasionada na cama. Mesmo sendo uma idealização bidimensional, o experimento mental colaborou na compreensão do fenômeno. Um aluno declarou já ter ouvido essa exemplificação; outro comentou que uma de suas professoras já havia passado um vídeo sobre esse experimento. Foi apresentada uma animação computadorizada (Figura 3.7) tridimensional que contribuiu ainda mais para a compreensão (conteúdo conceitual).

Figura 3.7 – *Print* da tela de animação tridimensional da deformação do espaço-tempo.



Fonte: <https://1lucasvb.tumblr.com/post/142549026838/figured-id-add-a-mass-in-there-see-also>.
Acesso em 13/07/2022.

Durante a leitura da história em quadrinhos, um dos alunos ficou em dúvida sobre a ideia de alguém no interior, nas palavras dele, de um foguete (nave), não perceber o que ocorre do lado de fora. O aluno foi questionado sobre nossa percepção dos movimentos da Terra, o porquê não os percebermos. Nós e tudo mais, que estão sobre a Terra, acompanhamos seus movimentos igualmente, motivo pelo qual não os percebemos.

Os alunos foram questionados sobre a possibilidade de a luz desenvolver uma trajetória curva. Eles concluíram que a luz sempre iria se propagar em trajetória retilínea. Então, como seria possível a luz das estrelas, mesmo posicionadas detrás do Sol, serem fotografadas durante o eclipse em 1919? A conclusão a que os alunos chegaram foi de que a luz acompanharia a curvatura do espaço-tempo ocasionada pela massa do Sol (conteúdo conceitual).

Finalizando os trabalhos, foi apresentada uma das consequências teóricas da Teoria da Relatividade Geral, a existência de buracos negros. Fez-se uma breve abordagem sobre o que são esses corpos, a saber, objetos com uma densidade muito grande, capaz de ocasionar uma deformação tão intensa que seria necessária uma velocidade maior que a velocidade da luz para escapar de sua ação gravitacional (conteúdo conceitual). Foram apresentadas uma simulação cinematográfica de um buraco negro e as fotos reais dos buracos negros M87* e Sagitário A* (Figura 1.17), divulgadas em 2019 e 2022, respectivamente (conteúdos factuais).

Ao término da aula, os alunos responderam o questionário avaliativo final.

Encontro de *feedback*

Os alunos foram reunidos pela última vez para um momento de *feedback*. Tomaram ciência do resultado das avaliações e da evolução da aprendizagem, além de avaliarem a proposta apresentada na SD, a metodologia, os instrumentos utilizados e o desempenho do professor/mestrando durante as aulas.

Instrumentos avaliativos

A avaliação foi desenvolvida de forma processual, a cada aula, por meio da participação dos alunos nos exercícios preestabelecidos pelo professor/mestrando, tanto de pesquisas ou alguns aplicados em exames vestibulares, como também atividades desenvolvidas pelos próprios alunos, com caráter lúdico, por meio de palavras cruzadas e desenhos. Durante as atividades, foram analisadas a relação do aluno em relação aos conceitos, procedimentos e atitudes. Por fim, houve a aplicação do questionário avaliativo proposto pelo professor/mestrando.

O Quadro 3.2 apresenta a frequência e o engajamento dos alunos nas diversas atividades propostas e que foram utilizadas como critérios para mensurar a aprendizagem.

Quadro 3.2 – Frequência e engajamento dos alunos nas atividades.

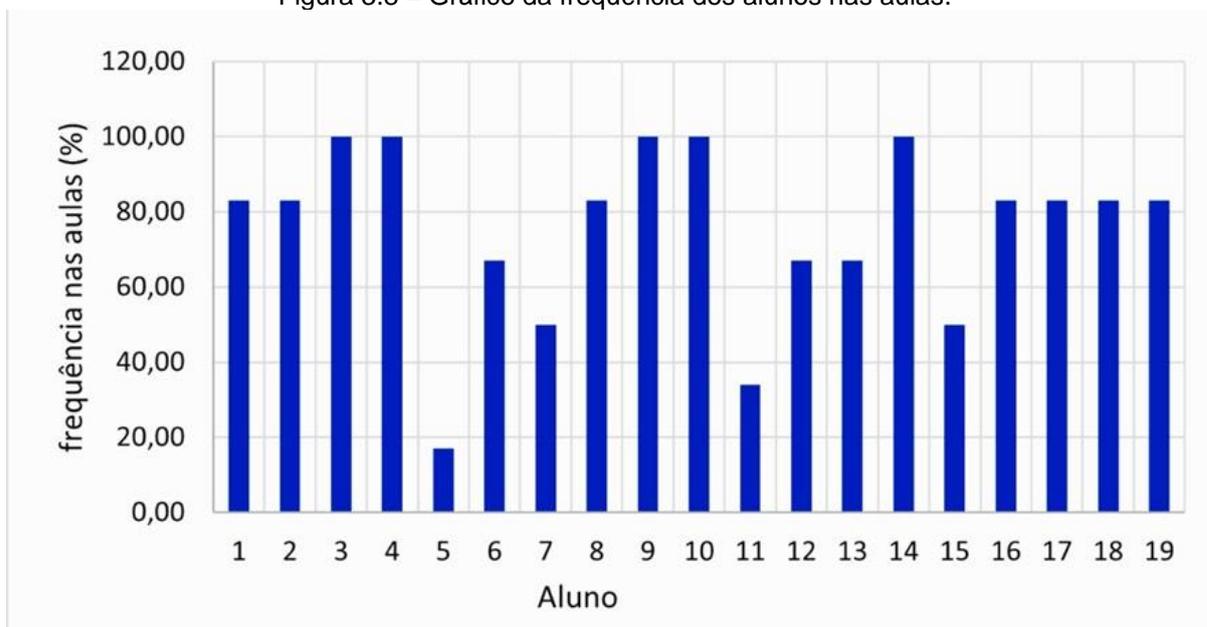
Alunos	Questionário diagnóstico	Desenho	Cruzadinha	Questionário final	Frequência
01	X	-	X	X	83%
02	X	-	-	X	83%
03	X	X	X	X	100%
04	X	X	X	X	100%
05	X	-	-	-	17%
06	X	-	-	-	67%
07	X	-	-	-	50%
08	X	-	X	X	83%
09	X	X		X	100%
10	X	-	X	X	100%
11	X	-	-	-	34%
12	X	X	X	-	67%
13	X	-	-	-	67%
14	X	X	X	X	100%
15	X	-	-	-	50%
16	X	X	-	-	83%

17	X	-	X	X	83%
18	X	X	-	X	83%
19	X	X	-	-	83%

Fonte: o autor.

A Figura 3.8 apresenta um gráfico da frequência dos estudantes nas aulas.

Figura 3.8 – Gráfico da frequência dos alunos nas aulas.



Fonte: o autor.

Aprender é uma necessidade do ser humano, para sua evolução e melhoria da qualidade de vida. Mesmo sendo a escola um espaço privilegiado para tal tarefa, nem sempre o estudante está focado na busca de conhecimentos. Assim, cabe ao professor pensar em estratégias e metodologias para garantir ao máximo a atenção de seus alunos. É utópico pensar em aproveitamento total no processo de aprendizagem; no entanto, conhecendo ao máximo as particularidades dos alunos, torna-se possível maximizar os resultados. O lúdico é uma das alternativas para chamar e reter a atenção durante as atividades, fato percebido durante a aplicação do PE. As HQs, utilizadas pelo professor e desenvolvidas pelos alunos, somando-se às palavras cruzadas e cruzadinhas desenvolvidas pelos estudantes, cumpriram de forma satisfatória o objetivo proposto, tornando mais receptível a abordagem de temas complexos e que divergem do senso comum, presentes na teoria da relatividade.

3.2 – RESULTADOS ALCANÇADOS COM APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

A assimilação dos conceitos básicos que explicassem a deformação do espaço-tempo na teoria da relatividade de Albert Einstein foi o objetivo esperado na aplicação do PE. Para que isso ocorresse de forma satisfatória, foram utilizados recursos que levassem os alunos a uma construção dos conhecimentos necessários. As várias ferramentas utilizadas contribuíram de forma significativa para que a assimilação dos conteúdos acontecesse.

A apropriação dos conteúdos não se dá de forma homogênea, em especial num grupo de alunos em anos escolares distintos. Quanto à persistência do grupo, iniciou-se com 19 estudantes e concluindo-se com 12, adotando-se o critério de participação maior que 70% nas aulas. Dois alunos desistiram a partir do segundo encontro e os 7 restantes continuaram participando, porém com faltas em excesso. Vale ressaltar que o Instituto em que as aulas foram ministradas oferece algumas atividades rotineiras aos alunos e, mesmo não sendo o ideal, alguns optaram ou necessitaram participar de outra atividade paralela. O questionário avaliativo final foi respondido por 10 alunos presentes na aula do dia, destacando que estava muito chuvoso.

Um fator importante que procurou-se observar no decorrer das aulas foram as expressões e reações dos alunos à medida que os conteúdos eram apresentados. Salvo alguns, o grupo de alunos demonstrou interesse, envolvimento e mesmo satisfação durante as aulas. A receptividade foi positiva e satisfatória.

Quanto à apropriação do conteúdo proposto, pode-se dividir entre as duas abordagens da teoria da relatividade, a Restrita e a Geral.

Durante a abordagem da Teoria da Relatividade Restrita, não houve dificuldades com relação à mudança de paradigma dos conceitos de relativo e absoluto entre a teoria newtoniana e a teoria da relatividade. Apesar da contrariedade ao senso comum, os alunos conseguiram assimilar qualitativamente os fenômenos da dilatação do tempo e contração do espaço. A conclusão é possível a partir das respostas apresentadas no questionário diagnóstico inicial quando comparado ao avaliativo final (Quadro 3.3). Observou-se, no entanto, maior dificuldade nos aspectos quantitativos, perceptível nas questões que envolviam abordagem matemática. Mesmo sendo um

aspecto importante, a abordagem matemática não consistia no objetivo final desse PE.

O tema da Teoria da Relatividade Geral foi abordado apenas qualitativamente. Durante as aulas, os alunos demonstraram expressões e intervenções demonstrando compreensão do assunto. Ao contrário do esperado, a apresentação do tema sobre buracos negros não causou impressão, surpresa ou envolvimento excessivo nos alunos. Mesmo assim, as respostas apresentadas, ao final da aplicação, foram satisfatórias, demonstrando compreensão básica do fenômeno. A ideia de deformação espacial por um astro massivo foi bem recebida pelos alunos.

Analisando as respostas apresentadas no questionário diagnóstico e o avaliativo, fica evidente o indicativo de aprendizagem significativa. Foi perguntando inicialmente o que os alunos conheciam sobre teoria da relatividade de Einstein e apenas 15% dos alunos responderam algo coerente. Por fim, aproximadamente 70% dos alunos apresentaram resposta satisfatória sobre a dilatação do tempo. Sobre a contração do espaço, 40% responderam de forma satisfatória e 20% de forma intermediária.

Sobre a trajetória de um feixe de luz, inicialmente 10% responderam que seria uma reta, o restante respondeu algo incoerente ou não responderam. No questionário final, 50% conseguiram associar, de alguma forma relacional, a trajetória da luz acompanhando a deformação espacial. Ao serem questionados sobre buracos negros, inicialmente 5% das respostas foram satisfatórias e próximo de 40% foram consideradas intermediárias. Ao final, 70% das respostas foram apropriadas e 10% intermediárias, relacionando fenômeno a um objeto massivo e denso e a impossibilidade de a luz escapar da ação gravitacional.

Ao serem indagados sobre os efeitos da teoria da relatividade não serem perceptíveis em nosso cotidiano, cerca de 50% das respostas finais dos alunos atribuíram o fato de ocorrerem a baixas velocidades quando comparadas com a velocidade da luz.

Por fim, sobre aplicações da teoria da relatividade em tecnologias, todos os alunos não tinham resposta inicialmente. Ao final, 60% citaram o funcionamento do GPS. Como não é algo cotidiano, nenhum aluno relacionou o tempo de vida das partículas múons nas respostas.

O Quadro 3.3 apresenta uma análise entre as respostas apresentadas no questionário diagnóstico e o questionário avaliativo final. É possível perceber uma evolução considerável no entendimento dos temas abordados.

Quadro 3.3 - Análise entre as respostas apresentadas no questionário diagnóstico e o questionário avaliativo final.

QUESTÕES	RESPOSTAS INICIAIS	RESPOSTAS FINAIS
1) Conhecimento sobre a Teoria da Relatividade de Einstein.	- 15% = coerentes.	Dilatação do tempo: - 70% = satisfatório. Contração do espaço: - 40% = satisfatório. - 20% = intermediário.
2) Trajetória da luz.	- 10% = reta. - 90% = sem resposta.	- 50% = acompanha a deformação do espaço.
3) Buracos Negros	- 5% = satisfatório. - 40% = intermediário.	- 70% = apropriado. - 10% = intermediário.
4) Percepção dos efeitos da Teoria da Relatividade no cotidiano.		- 50% = velocidades baixas quando comparadas com a velocidade da luz.
5) Aplicação da Teoria da Relatividade em tecnologias.	Nenhuma resposta.	- 60% - funcionamento do GPS.

Fonte: o autor.

O Quadro 3.4 apresenta um comparativo entre as respostas apresentadas no questionário diagnóstico, no início das aulas, e o questionário avaliativo final. As questões não são necessariamente as mesmas em ambos os questionários, mas estão correlacionadas.

Quadro 3.4 – Comparativo entre as respostas do Questionário diagnóstico formativo inicial e o Questionário Avaliativo final.

As questões e respostas em itálico correspondem ao questionário avaliativo final.	
Questionário diagnóstico formativo inicial	Questionário avaliativo final
1 – Desprezando a resistência do ar e considerando que uma bola de boliche e uma maçã são abandonadas da mesma altura, quem chega no chão primeiro?	1 – Desprezando a resistência do ar e considerando que uma bola de boliche e uma maçã são abandonadas da mesma altura, quem chega no chão primeiro?
1 – Os dois chegará ao mesmo tempo no chão.	01: cai ao mesmo tempo
2 – O tempo de queda, desprezada a resistência do ar, de uma bola de boliche e uma maçã são o mesmo, pois a massa não tem relação com a velocidade e aceleração da gravidade.	02: pois a massa não tem relação com a velocidade e aceleração da gravidade.
3 – Independe do peso os dois irão cair ao mesmo tempo.	03: Ambos chegam juntos.
4 – Bola de Boliche.	04: ambas chegam ao mesmo tempo.

<p>5 – Os dois chegam juntos.</p> <p>6 – Eu imagino que as duas caem do mesmo tempo, pois se são abandonadas na mesma altura, conseqüentemente cairão na mesma velocidade.</p> <p>7 – Maça.</p> <p>8 – Os dois caem ao mesmo tempo.</p> <p>9 – Os dois, é a mesma coisa da pena e uma bola de boliche ambas caem na mesma sem ter vento presente no local (vi em um vídeo).</p> <p>10 – Eu acho que os 2 chegam ao mesmo tempo.</p> <p>11 – Elas chegarão ao mesmo tempo, já que a resistência do ar foi anulada.</p> <p>12 – Eu acho que os dois chegaram no chão ao mesmo tempo mas por que a bola de boliche tem mais massa a ...</p> <p>13 – Acho que seria a bola de boliche porque ela é mais pesada e densa a levando mais rápido ao chão.</p> <p>14 – Nunca parei para pensar nisso, mas acho que seja a maça, por conta de ser mais leve e tem mais rapidez.</p> <p>15 – Os dois cai ao mesmo tempo.</p> <p>16 – Os dois chegam ao mesmo tempo, pois foram soltos ao mesmo tempo.</p> <p>17 – Chegarão ao mesmo tempo.</p> <p>18 – Os dois objetos chegam no chão ao mesmo tempo.</p> <p>19 – Nenhum dos dois chegam ao mesmo tempo.</p>	<p>05: não houve resposta.</p> <p>06: não houve resposta.</p> <p>07: não houve resposta.</p> <p>08: Não tem relação com a velocidade e aceleração da gravidade.</p> <p>09: as duas.</p> <p>10 - Jaqueline: na minha opinião, as duas chegam ao mesmo tempo.</p> <p>11: não houve resposta.</p> <p>12: não houve resposta.</p> <p>13: não houve resposta.</p> <p>14: a maça.</p> <p>15: não houve resposta.</p> <p>16: não houve resposta.</p> <p>17: chegam ao mesmo tempo.</p> <p>18: os dois chegaram ao mesmo tempo no chão.</p> <p>19: não houve resposta.</p>
<p>2 – O que você compreende quando se diz que algo é “relativo” ou “absoluto”?</p>	
<p>1 – Não respondeu.</p> <p>2 – Não conheço.</p> <p>3 – Não respondeu.</p> <p>4 – Relativo é quando a propriedade pode mudar dependendo da condição. Absoluto e quando não muda independente da condição, ex: $\pi = 3,14$.</p>	<p>No questionário avaliativo final a questão foi apresentada de outra forma.</p>

<p>5 – Não sei.</p> <p>6 – Eu confundo como se fosse algo que já está pré-determinado para acontecer, e que não pode ser alterado.</p> <p>7 – Relativo: uma coisa que relata algo. Absoluto: uma coisa que você tem certeza ou também formulas.</p> <p>8 – Não sei.</p> <p>9 – Não respondeu.</p> <p>10 – Não sei.</p> <p>11 – Relativo vem de relação e se uma coisa tem relação com a outra, que dizer que elas se condizem. Uma coisa absoluta é uma coisa que é o que é e não tem como ser outra coisa.</p> <p>12 – Em dizer que está correto ou absoluto, ou relativo, indica novo ou xxxxx. Não sei.</p> <p>13 – Não sei muito sobre.</p> <p>14 – Relativo é algo que é estudado. Absoluto seria algo que já tem certeza o eu seja.</p> <p>15 – Não sei.</p> <p>16 – Relativo eu não sei, mas absoluto eu acredito que é algo haver com o total.</p> <p>17 – Não entendo muito sobre isso.</p> <p>18 – Não respondeu.</p> <p>19 – Não respondeu.</p>	
<p>3 – O que você conhece a respeito da teoria da relatividade de Einstein?</p>	
<p>1 – Não respondeu.</p> <p>2 – Não conheço. Abordam movimentos que se deslocam.</p> <p>3 – Não sei.</p> <p>4 – Que a massa e a gravidade de um objeto podem interferir no tempo e espaço. Ex: o tempo possa mais rápido perto de buraco negro.</p> <p>5 – Não sei.</p> <p>6 – Possuo dificuldades de entendê-la.</p> <p>7 – Nada.</p> <p>8 – Não sei.</p>	<p>No questionário avaliativo final a questão foi apresentada de outra forma.</p>

<p>9 – Nada, não lembro.</p> <p>10 – Não sei.</p> <p>11 – Eu entendo por exemplo “o tempo”, o tempo é relativo, imagino que seu sou reduzido a um átomo, o tempo passará mais rápido para quem não foi reduzido a um átomo e mais devagar para mim, na verdade o tempo passará normalmente.</p> <p>12 – Eu sei que o Einstein mudou o mundo inteiro isso é relativo.</p> <p>13 – Não conheço muito.</p> <p>14 – Uma das teorias de Einstein.</p> <p>15 – Não sei.</p> <p>16 – Basicamente nada.</p> <p>17 – Já ouvi falar mas não sei sobre.</p> <p>18 – Eu sei que dois raios caiam em um lugar diferente e se estamos em um trem em alta velocidade, vemos qual? “Não sei explicar isso”.</p> <p>19 – Não respondeu.</p>	
<p>4 – Qual a diferença entre a física clássica de Newton e a teoria da relatividade de Einstein?</p>	<p>4 – O que define o limite entra a física clássica de Newton e a teoria da relatividade?</p>
<p>1 – Não respondeu.</p> <p>2 – Não conheço.</p> <p>3 – Não sei.</p> <p>4 – Newton defendia regras já estabelecidas e comprovadas como absolutas. Einstein defendia que a física pode agir de forma diferente em determinadas condições.</p> <p>5 – Não sei.</p> <p>6 – Não possuo conhecimento sobre.</p> <p>7 – Não respondeu.</p> <p>8 – Não sei.</p> <p>9 – Não sei.</p> <p>10 – Não sei.</p> <p>11 – A teoria de Newton fala sobre gravidade e o Einstein fala sobre o tempo.</p>	<p>01:não respondeu.....</p> <p>02: gravidade</p> <p>03: a lei de Newton só funciona na Terra, fora da Terra as leis de Newton não se aplicam.</p> <p>04: a velocidade da luz, e o que é gravidade.</p> <p>05: não houve resposta.</p> <p>06: não houve resposta.</p> <p>07: não houve resposta.</p> <p>08: a gravidade.</p> <p>09: que as leis de Newton só funcionam na Terra, fora dela as leis de Newton não se aplicam.</p> <p>10:não respondeu.....</p> <p>11: não houve resposta.</p>

<p>12 – Não sei.</p> <p>13 – Não sei muito sobre.</p> <p>14 – Já ouvi falar nesse ano sobre esse tema (física clássica de Newton). Só que eu esqueci, e gostaria de lembrar.</p> <p>15 – Não sei.</p> <p>16 – Não sei.</p> <p>17 – Já vi uma coisa sobre isso mas não sei responder.</p> <p>18 – Não respondeu.</p> <p>19 – Não respondeu.</p>	<p>12: não houve resposta.</p> <p>13: não houve resposta.</p> <p>14: contração do espaço.</p> <p>15: não houve resposta.</p> <p>16: não houve resposta.</p> <p>17: não sei explicar, mas... a teoria da relatividade aborda os fenômenos que ocorrem em deslocamento de objetos.</p> <p>18:não respondeu.....</p> <p>19: não houve resposta.</p>	
<p>5 – Você já ouviu falar sobre a dilatação do tempo e contração do espaço, ou do paradoxo dos gêmeos? Se sim para algo, o quê?</p>	<p>2 – De acordo com a teoria da relatividade o que ocorre com o tamanho de um objeto, caso ele esteja em movimento com velocidade próxima a da luz?</p>	<p>3 – De acordo com a teoria da relatividade o que ocorre com a marcação do tempo de um objeto quando estiver em movimento com velocidade próxima a da luz?</p>
<p>1 – Não respondeu.</p> <p>2 – Não conheço.</p> <p>3 – Não sei.</p> <p>4 – Sim, motor de dobra de espaço-tempo que a Nasa tá desenvolvendo. Paradoxo dos gêmeos, pode parecer igual, mas funciona de forma diferente.</p> <p>5 – Nunca.</p> <p>6 – Não possuo muito conhecimento sobre, porém eu imagino que ambos são necessários para determinar, como exemplo, um fato histórico, sabendo-se o tempo e o espaço. O espaço muda de acordo com o tempo, porém o tempo não pode ser modificado.</p>	<p>01:não respondeu.....</p> <p>02: são objetos que possuem velocidades próximas ou são iguais a luz</p> <p>03: ocorre a dilatação dos comprimentos para um observador que está parado, e já o que está próximo a da luz ocorre a contração.</p> <p>04: acontece uma contração, ele diminui de tamanho.</p> <p>05: não houve resposta.</p> <p>06: não houve resposta.</p>	<p>01:não respondeu.....</p> <p>02: os intervalos de tempo marcados por um observador em repouso</p> <p>03: o tempo passa bem mais rápido para o objeto que está parado, já o objeto que está aproximadamente a altíssima velocidade passa bem mais devagar.</p> <p>04: ele dilata, ou seja, ele se expande.</p> <p>05: não houve resposta.</p> <p>06: não houve resposta.</p>

7 – Não.	07: não houve resposta.	07: não houve resposta.
8 – Não sei.	08: a teoria da relatividade aborda os fenômenos que ocorrem em deslocamentos de objetos que possuem velocidades próximos a velocidade ou iguais a da luz.	08: os intervalos de tempo marcados por um observador em repouso.
9 – Já ouvi falar desse paradoxo, que um irmão viaja pelo espaço e o outro fica na Terra, então o tempo passa diferente para os dois.	09: dependendo de que está olhando se é uma pessoa de fora da nave para ela a impressão que estará diminuindo.	09: o tempo passa mais rápido para um objeto parado. O objeto que está aproximadamente na velocidade da luz para ele passa mais devagar.
10 – Não sei.	10: para objetos na velocidade da luz, ocorre a dilatação do comprimento.	10:não respondeu.....
11 – Já ouvi falar dos 3, mas não aprofundei.	11: não houve resposta.	11: não houve resposta.
12 – Não sei.	12: não houve resposta.	12: não houve resposta.
13 – Sobre a dilatação do tempo não sei. Sobre o paradoxo dos gêmeos já ouvi falar mas já faz um tempo. Explicação: a teoria dos gêmeos é em que um vai para o espaço e o outro fica na Terra e se reencontrando um tempo depois.	13: não houve resposta.	13: não houve resposta.
14 – Acho que eu ouvi, só que não me lembro.	14: ele estaria sumindo porque seria tão rápido que estaria sugando o objeto até sumir.	14: estaria em dilatação.
15 – Não sei.	15: não houve resposta.	15: não houve resposta.
16 – Já ouvi sobre a dilatação do tempo, mas infelizmente não em lembro.	16: não houve resposta.	16: não houve resposta.
17 – Não.	17: afirma que o movimento, ou pelo menos o movimento retilíneo uniforme, só tem algum significado quando com algum outro ponto de referência.	17: o tempo fica mais lento.
18 – No filme Interestelar explica mais ou menos o paradoxo dos gêmeos, no espaço o tempo passa devagar e na Terra mais rápido.	18: Ele diminuir para o espectador e para o objeto o tempo passa mais devagar.	18: o tempo passa mais lentamente, quando perto da velocidade da luz.
19 – Não respondeu.	19: não houve resposta.	19: não houve resposta.

6 – Qual a trajetória mais provável para o movimento de um feixe de luz.	5 – Qual a trajetória mais provável para o movimento de um feixe de luz.
<p>1 – Não respondeu.</p> <p>2 – Não conheço.</p> <p>3 – Não sei.</p> <p>4 – Reta.</p> <p>5 – Não sei.</p> <p>6 – Não possuo conhecimento sobre.</p> <p>7 – Energia.</p> <p>8 – Não sei.</p> <p>9 – Não sei.</p> <p>10 – Não sei.</p> <p>11 – Ela pode ser infinita.</p> <p>12 – Eu sei que a luz costuma seguir direto numa direção.</p> <p>13 – Não sei.</p> <p>14 – No espaço.</p> <p>15 – Não sei.</p> <p>16 – Não sei.</p> <p>17 – Não sei.</p> <p>18 – Não respondeu.</p> <p>19 – Não respondeu.</p>	<p>01:não respondeu.....</p> <p>02:não respondeu.....</p> <p>03: o feixe acompanha a densidade do local.</p> <p>04 - Arthur: reta</p> <p>05: não houve resposta.</p> <p>06: não houve resposta.</p> <p>07: não houve resposta.</p> <p>08:não respondeu.....</p> <p>09: o feixe acompanha a densidade do local.</p> <p>10:não respondeu.....</p> <p>11: não houve resposta.</p> <p>12: não houve resposta.</p> <p>13: não houve resposta.</p> <p>14: estaria no mesmo lugar, dependendo do lugar iria está dando volta.</p> <p>15 não houve resposta.</p> <p>16: não houve resposta.</p> <p>17: não sei responder, não entendi a pergunta.</p> <p>18: o feixe acompanha a densidade do feixe.</p> <p>19: não houve resposta.</p>
7 – O que você sabe sobre Buraco Negro?	6 – O que você sabe sobre Buraco Negro?
<p>1 – Algo muito distante da Terra não sei se ele é um planeta ou pra que ele serve.</p> <p>2 – Que se algo entra em órbita já já o buraco engole.</p> <p>3 – E uma massa que cai sobre ela mesma.</p> <p>4 – São corpos celestes cujo a gravidade é forte e suficiente para puxar o lugar. Os supermaciços ficam no canto de galáxias. Apesar recentemente fora fotografado um.</p> <p>5 – Onde fica os cometas.</p>	<p>01: bolsões de matéria extremamente densos, objetos de massa tão incrível e volume minúsculo.</p> <p>02: que nele você não enxerga cor/nulo. Não é puxado pro branco nem pro preto pois em volta dele tem radiação.</p> <p>03: é um buraco supermassivo que a luz não consegue escapar.</p> <p>04: corpo com uma densidade tão grande que causa uma distorção no espaço-tempo que nem a luz consegue escapar.</p> <p>05: não houve resposta.</p>

<p>6 – Uma fenda no espaço e tempo, formado por matéria escura, que o mesmo, pode distorcer as leis da física.</p> <p>7 – Não tenho certeza, mas é alguma coisa que mexe com massa?</p> <p>8 – Não sei.</p> <p>9 – Que é como se fosse um certo caminho (não sei se é real, vi no filme Interrestelar) continuando é uma esfera que “suga” digamos assim tudo em volta perto dele o tempo é bem diferente também e ele é supermassivo.</p> <p>10 – Não sei.</p> <p>11 – Uma massa que está em constante crescimento.</p> <p>12 – Eu sei que os buracos negros precisam de ser extremo. É pelo tamanho da massa e do que é feito alguns são capazes de teleportar matéria para outros lugares no universo.</p> <p>13 – Só sei que é uma forsa gravitacional.</p> <p>14 – Buraco negro é uma das partes do sistema solar mais perigosas. Porque qualquer coisa se chegar perto dele, seria puxado na velocidade da luz.</p> <p>15 – Não sei.</p> <p>16 – Nunca parei para pesquisar, então não sei nada.</p> <p>17 – Pelo que sei é um buraco que puxa tudo.</p> <p>18 – Se não me engano é uma massa que cai sobe ela mesma.</p> <p>19 – Algo que é muito distante da Terra não sei se ele é um planeta ele é brilhante e grande, me desculpe se não for isso.</p>	<p>06: não houve resposta.</p> <p>07: não houve resposta.</p> <p>08:não respondeu.....</p> <p>09: que é um buraco supermassivo que a luz não consegue escapar.</p> <p>10:não respondeu.....</p> <p>11: não houve resposta.</p> <p>12: não houve resposta.</p> <p>13: não houve resposta.</p> <p>14: buraco negro é um buraco com uma luz em volta que provavelmente esse alguém chegar perto, ou morre sem puxado ou vai em outra dimensão (ninguém sabe)</p> <p>15: não houve resposta.</p> <p>16: não houve resposta.</p> <p>17: buraco negro é uma região do espaço-tempo em que o campo gravitacional é tão intenso que nada, nenhuma partícula ou radiação eletromagnética como a luz pode escapar.</p> <p>18: buraco negro é uma estrela com uma densidade e gravidade tão alta que nem a velocidade da luz consegue escapar.</p> <p>19: não houve resposta.</p>
	<p>7 – Qual o motivo de não percebermos os efeitos da teoria da relatividade em nosso cotidiano?</p>
<p>No questionário diagnóstico a questão foi apresentada de outra forma.</p>	<p>01:não respondeu.....</p> <p>02:não respondeu.....</p> <p>03: porque as velocidades com as quais nos movemos em relação a referenciais que estejam</p>

	<p>em repouso.</p> <p>04: porque nossa velocidade e da maioria das coisas em nosso cotidiano é insignificante perto da velocidade da luz.</p> <p>05: não houve resposta.</p> <p>06: não houve resposta.</p> <p>07: não houve resposta.</p> <p>08:não respondeu.....</p> <p>09:não respondeu.....</p> <p>10:não respondeu.....</p> <p>11: não houve resposta.</p> <p>12: não houve resposta.</p> <p>13: não houve resposta.</p> <p>14: insignificante (a velocidade)</p> <p>15: não houve resposta.</p> <p>16: não houve resposta.</p> <p>17 : tempo? Eu acho.</p> <p>18: porque estamos em constante movimento com a Terra no nosso ver “está tudo parado”, mas estamos em movimento.</p> <p>19: não houve resposta.</p>
<p>8 – Você é capaz de citar alguma aplicação cotidiana da teoria da relatividade?</p>	<p>8 – Você é capaz de citar uma aplicação cotidiana da teoria da relatividade?</p>
<p>1 – Não respondeu.</p> <p>2 – Mostra as possibilidades de encontrar com a luz no vácuo.</p> <p>3 – Não sei.</p> <p>4 – Relógio e meridionais.</p> <p>5 – Nadinha.</p> <p>6 – Eu imagino que seja os movimentos de rotação e translação da Terra.</p> <p>7 – Não.</p> <p>8 – Não sei.</p> <p>9 – Não.</p>	<p>01:não respondeu.....</p> <p>02:não respondeu.....</p> <p>03: o GPS se aplica no nosso cotidiano.</p> <p>04: GPS</p> <p>05: não houve resposta.</p> <p>06: não houve resposta.</p> <p>07: não houve resposta.</p> <p>08:não respondeu.....</p> <p>09: ela é aplicada nos GPS que usamos no nosso cotidiano, se não fosse ela não teríamos tanta</p>

10 – Não sei.	precisão no GPS. 10:não respondeu.....
11 – Imagine que em sua cabeça o tempo para, você acha que ele parou, mas na verdade o tempo esta passando normalmente.	11: não houve resposta.
12 – Não sei.	12: não houve resposta.
13 – Não sei.	13: não houve resposta.
14 – Não sei.	14: um GPS.
15 – Não sei.	15: não houve resposta.
16 – Não.	16: não houve resposta.
17 – Não.	17: Sim (??)
18 – Não respondeu.	18: o GPS.
19 – Não respondeu.	19: não houve resposta.

Fonte: o autor.

O grande desafio na aplicação do PE, sem dúvidas, consistiu nas diversas idades e principalmente nos diferentes anos escolares dos alunos. No entanto, observou-se que os alunos do 9º ano do ensino fundamental conseguem acompanhar e entender os conceitos básicos e serem despertados quanto à curiosidade ao tema.

Os alunos ainda realizaram uma avaliação referente à proposta do PE, sua metodologia e instrumentos utilizados. Foi avaliado da seguinte forma pelos alunos: para cada questão, as opções de resposta eram: a) concordo plenamente, b) concordo em partes, c) discordo em partes, d) discordo totalmente, e) não sei responder.

1) O professor demonstrou domínio do conteúdo e as explicações foram claras.
R: 67% concordo plenamente e 33% concordo em partes.

2) Os objetivos das aulas foram bem definidos, ficando bem claros aos alunos.
R: 75% concordo plenamente e 25% concordo em partes.

3) Os recursos metodológicos (quadrinhos, imagens, simulações, vídeos) ajudaram para uma melhor aprendizagem.

R: 59% concordo plenamente, 33% concordo em partes e 8% discordo em partes.

4) As aulas possibilitaram aos alunos o entendimento básico sobre a teoria da relatividade.

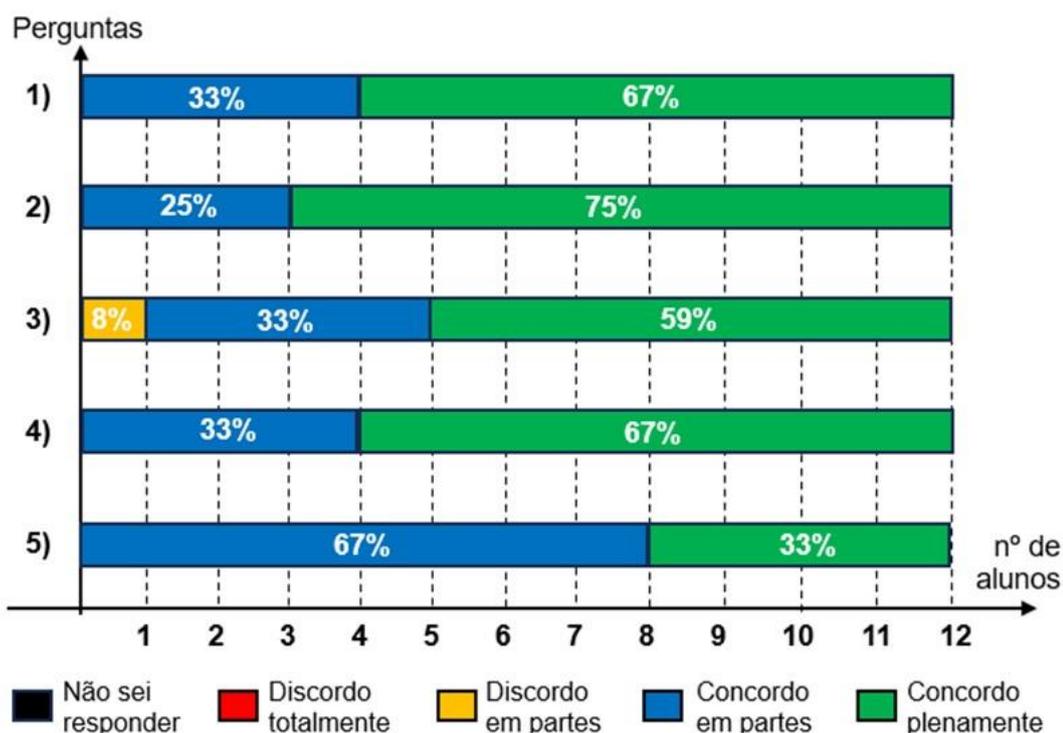
R: 67% concordo plenamente e 33% concordo em partes.

5) A abordagem do conteúdo sobre teoria da relatividade é importante para os alunos da educação básica, em especial, no ensino médio.

33% concordo plenamente e 67% concordo em partes.

Os percentuais das respostas, para cada uma das questões, são apresentados na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Gráfico das respostas ao questionário de avaliação da aplicação do Produto Educacional.



Fonte: o autor.

Analisando as respostas, nota-se uma aprovação considerável da pertinência do tema e da metodologia adotada na aplicação do PE. Procurando entender as respostas negativas ao trabalho, percebeu-se que alguns alunos tiveram dificuldade de acompanhar as explicações por estarem em anos escolares anteriores à outra

parte do grupo. A diferença significativa entre as séries que os alunos estudavam dificultou em partes a comunicação, pois ainda faltaram a eles subsunçores e organizadores prévios. Por outro lado, pode-se concluir que, feitas as devidas adequações na metodologia e linguagem do professor, é totalmente possível apresentar a teoria da relatividade para qualquer turma dos anos finais do ensino fundamental e do ensino médio.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta principal do presente trabalho é a abordagem de tópicos de FMC, mais precisamente da teoria da relatividade de Albert Einstein, partindo-se da problematização do desvio da luz oriunda de uma estrela que, ao passar pelo campo gravitacional do Sol, percebe-se o efeito desse ocorrido durante um eclipse observado na cidade de Sobral, Ceará, no ano de 1919. Tomando-se como referência a teoria da aprendizagem significava de David Ausubel, elaborou-se um Produto Educacional (PE) por meio de uma sequência didática (SD) em torno de uma história em quadrinhos (HQ), desenvolvida pelo autor do presente trabalho.

A cada unidade didática da SD, cria-se uma dinâmica de questionamentos que conduzem os alunos à quebra de paradigmas entre a teoria clássica newtoniana e a teoria da relatividade, em analisar as variáveis envolvidas no estudo de um movimento e no entendimento da gravidade.

A forma com que se foram trabalhados os tópicos da teoria da relatividade possibilitou a interdisciplinaridade com a Matemática, a História e a Arte. Procurou-se realizar a contextualização histórica que levou à teoria da relatividade e, uma vez que a SD foi sempre motivada por uma HQ, tornou-se fácil assimilar os elementos artísticos da proposta. Mesmo não sendo prioridade no trabalho, foram apresentadas e realizadas operações matemáticas, ressaltando-se que o esperado pelos alunos era que eles expressassem a aprendizagem por meio de desenhos e atividades lúdicas, como cruzadinhas e caça-palavras.

O grupo que participou dos trabalhos era constituído por alunos de diversas idades e, principalmente, de diferentes anos escolares. A adequação da linguagem e a necessidade de se abordar e fixar os subsunçores, previstos na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, foi um dos maiores desafios durante a aplicação do PE. Por várias vezes, foi necessário desenvolver organizadores prévios junto aos alunos. No entanto, o resultado se torna mais gratificante quanto maiores forem os desafios encontrados.

A utilização da teoria da aprendizagem significativa se mostrou apropriada, pois não só permite, mas convenciona a necessidade de resgatar os conhecimentos prévios, construindo assim, um itinerário formativo com o qual todos conseguem, além de acompanhar, aumentar o conhecimento de forma contínua e gradativa.

Analisando as respostas apresentadas no questionário avaliativo, e durante todo o processo, nota-se que os instrumentos utilizados no PE (HQ, simuladores, textos e vídeos) contribuíram para a potencialização de uma aprendizagem significativa, evidenciada junto aos alunos.

Ficou claro que é possível, com uso de atividades adequadas, abordar a temática da teoria da relatividade com os alunos de todas as etapas do ensino médio. Surpreendeu positivamente a participação e aos indicativos de aprendizagem com os alunos do primeiro ano. Observou-se, também, que os alunos do 9.º ano do ensino fundamental conseguem acompanhar o básico e serem despertados quanto ao interesse pelo tema.

A proposta do PE foi abordar aspectos das Teorias da Relatividade Restrita e Geral sequencialmente, paralelo a aspectos históricos. Adaptações do material podem ser consideradas de modo a reorganizar os conteúdos para serem trabalhados separadamente em momentos distintos, entre os anos do ensino médio ou, objetivando-se a divulgação do tema, trabalhar apenas os aspectos históricos.

Em nenhum momento o presente trabalho buscou tratar todos os aspectos da teoria da relatividade, mas permitir que, em número razoável de aulas de Física, tão escassas no ensino médio, tenha-se uma visão geral, que possibilite o entendimento do que é, onde se aplica e o futuro aprofundamento desse assunto tão fascinante, que é a teoria da relatividade.

Outra comprovação, como docente do ensino médio, na rede estadual, onde já há os desafios educacionais do dia a dia, realizar o mestrado sem desconto de carga horária (40 horas semanais, no caso do autor), é o quanto somos capazes de adaptarmos e superarmos as dificuldades que surgem repentinamente, afetando o mundo inteiro, que foi a pandemia da COVID-19 e suas consequências. Assim nasceu, desenvolveu-se e foi aplicado esse PE. Os personagens que foram os *pets*, são reais (Figura 4.1), restando somente um ainda vivo (o Ben) na presente data. Todos são significativos para o autor do presente trabalho e fica registrado nos quadrinhos como uma homenagem a eles. Outra homenagem de gratidão é atribuída aos orientadores do presente trabalho que, com a permissão deles, participaram também.

Figura 3.10 – Foto dos *pets* ilustrados nos quadrinhos: (a) Duque; (b) Bob; (c) Ben; (d) os três *pets* juntos.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: arquivos do autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, Oscar Adán.; MORAIS, Eduardo Messias de; PIMENTEL, Bruto Max. O Princípio de Equivalência. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 3, p. e20180329, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0329>>. Acesso em 04/06/2023.

ARAÚJO, Denise Lino de. O que é (e como faz) sequência didática? **Entrepalavras**, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 322-334, maio 2013. ISSN 2237-6321. Disponível em: <<http://www.entrepalavras.ufc.br/revista/index.php/Revista/article/view/148/181>>. Acesso em: 20/03/2023.

AUSUBEL, David P.; NOVAK, Joseph D.; HANESIAN, Helen. **Psicologia Educacional**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Interamericana Ltda. 1980.

BENDIA FILHO, Amâncio Gabriel. **Estratégias virtuais para a inserção do Espaço e Tempo Relativístico no Ensino de Física**. Dissertação (mestrado – MNPEF). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro. Campo dos Goytacazes, RJ, 2018. Disponível em <<https://portal1.iff.edu.br/pesquisa-e-inovacao/pos-graduacao-stricto-sensu/mestrado-nacional-profissional-em-ensino-de-fisica/projetos-e-dissertacoes-defendidas/dissertacoes-defendidas/estrategias-virtuais-para-a-insercao-do-espaco-e-tempo-relativisticos-no-ensino-de-fisica>>. Acesso em 15/08/2020.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidente da República. Disponível em <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em 31/03/2023.

BRASIL. Ministério da Educação. **PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília, 2002. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em 12/09/2021.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_-versaofinal_site.pdf>. Acesso em 13/03/2022.

BRAZ Júnior, Dulcídio. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

BRENNAN, Richard P. **Gigantes da Física: uma história moderna através de oito biografias**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed.: 2003.

CABRAL, Natanael Freitas. **Sequências didáticas: estrutura e elaboração**. Belém: SBEM / SBEM-PA, 2017. Disponível em: <http://www.sbembrasil.org.br/files/sequencias_didaticas.pdf>. acesso 19/03/2023.

CAPELARI, Danilo. **Uma sequência didática para ensinar relatividade restrita no ensino médio com o uso de TIC**. Dissertação (mestrado – MNPEF). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Ensino de Física. Campo Mourão, 2016. Disponível em <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2318>>. Acesso em 17/07/2022.

CELESTINO, Leandro Carlos de Freitas **O jogo de tabuleiro como recurso didático no ensino da Teoria da Relatividade no ensino médio**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS), Recife, 2020. Disponível em: <http://www.mnpef.ufrpe.br/sites/mnpef.ufrpe.br/files/documentos/dissertacao_final_para_publicar_leandro.pdf>. Acesso em 12/03/2023.

COSTA, Manoel Amoroso. **Introdução à teoria da relatividade**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1995.

DELORS, Jacques *et al.* Relatório para a UNESCO da Comissão Internacional sobre Educação para o século XXI. **Educação um tesouro a descobrir**, v. 6, 1996. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5938745/mod_resource/content/4/2012%20educ_tesouro_descobrir_Delors.pdf >. Acesso em 02/04/2023.

DOLZ, Joaquim; NOVERRAZ, Michèle; SCHNEUWLY, Bernard. **SEQUÊNCIAS DIDÁTICAS PARA O ORAL E A ESCRITA: APRESENTAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO**. 2004. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5794503/mod_resource/content/1/DOLZ%3B%20NOVERRAZ%3B%20SCHNEUWLY.%20Sequ%C3%A7%C3%A3o%20de%20sequ%C3%Aancias%20did%C3%A1ticas%20para%20o%20oral%20e%20para%20a%20escrita%20apresenta%C3%A7%C3%A3o%20de%20um%20procedimento.pdf>. Acesso em 17/05/2023.

D'SALETE, Marcelo. **Encruzilhada**. São Paulo: Veneta, 2016.

D'SALETE, Marcelo. **Angola Janga**. São Paulo: Veneta, 2017.

D'SALETE, Marcelo. **Cumbe**. 2 ed. São Paulo: Veneta, 2018.

DUARTE MIRANDA, Oswaldo. Avanço do Periélio de Mercúrio – O Primeiro Sucesso da Teoria da Relatividade Geral de Einstein. **Conexões - Ciência e Tecnologia**, [S.l.], v. 13, n. 2, p. 7-20, may 2019. ISSN 2176-0144. Disponível em: <<http://conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/view/1670>>. Acesso em 16/10/2023. doi:<https://doi.org/10.21439/conexoes.v13i2.1670>.

EINSTEIN, Albert. **Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento**. 1905. Disponível em: <http://ofp.cosmo.ufes.org/uploads/1/3/7/0/13701821/sobre_a_eletrodinamica_dos_corpos_em_movimento.pdf> Acesso em 16/09/21.

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade: sobre a teoria da relatividade especial e geral** (para leigos). Tradução: Silvio Levy. Título original: Uber die spezialle und die allgemeine Relativitätstheorie (1916). Porto Alegre: L&PM, 2019.

EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold. **A evolução da física**. Tradução: Giasone Rebupa. Título original: The Evolution of physics (1938). Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2008.

EISNER, Will. **Biblioteca Will Eisner: Um contrato com Deus**. 1 ed. São Paulo: Devir, 2019.

FEYNMAN, Richard P.; LEIGHTON, Robert B.; SANDS, Matthew. **Lições de física: a edição do novo milênio**. v. 1. Porto Alegre: Bookman, 2019.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia da Autonomia: saberes necessários à prática pedagógica**. São Paulo: Paz e Terra, 23 ed. 2002 (Coleção Leitura).

FREIRE, Joseil Carvalho. **Evolução de conceitos de mundo: uma proposta para inserção da teoria da relatividade no ensino médio**. Dissertação (mestrado profissional). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015. Disponível em <http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/10584/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Evolu%C3%A7%C3%A3o%20de%20conceitos%20de%20mundo%20uma%20proposta%20para%20inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20teoria%20da%20relatividade%20no%20ensino%20m%C3%A9dio.pdf>. Acesso em 15/08/2020.

FREIRE JR, Olival. Novo tempo, novo espaço, novo espaço-tempo: breve história da relatividade. Em: ROCHA, José Fernando M. (Org.). **Origens e evolução das ideias da física**. Salvador: Edufba, 2002. p. 283-297.

GOMES, André L. S.; HEUSY, Felype; ZANON, Ricardo A. S.; ROCHA, Carlos R. Construção de aparato experimental de baixo custo para visualização de curvaturas do espaço-tempo. **A física na escola** (online). 2022, v. 20, n. 1. Disponível em: <<http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol20-Num1/FnE-20-1-210202.pdf>>. Acesso em 12/06/2022.

GONÇALVES, Adair Vieira; DE BARROS, Eliana Merlin Deganutti. Planejamento sequenciado da aprendizagem: modelos e sequências didáticas. **Revista Linguagem & Ensino**, v. 13, n. 1, p. 37-69, 2010. Disponível em <<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/rle/article/view/15355>>. Acesso em 30/03/2023.

GONÇAVES, Davi Colombo. **Histórias em Quadrinhos como recurso didático para o ensino de Física na Educação de Jovens e Adultos**. Dissertação (mestrado profissional). Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. Araranguá, 2016. Disponível em <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/174125>>. Acesso em 28/03/2022.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Ótica e Física Moderna**. v. 4, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995.

JANUÁRIO, Maria Derlandia de Araújo. **Estudando a Relatividade Restrita com folhetos de cordel científico em forma de história em quadrinhos através de uma Sequência Didática à luz da Neurociência Educacional**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Universidade Regional do Cariri. Juazeiro do Norte, 2020. Disponível em <http://www.urca.br/mnpef/wp-content/uploads/sites/12/2021/06/mnpef_urca_polo31_dissertao_maria-derlndia_final-corrigida-aps-defesa-v1.pdf>. Acesso em 12/02/2023.

KITTEL, Charles; KNIGHT, Walter D.; RUDERMAN, Malvin A. **Mecânica**, Curso de Física de Berkeley. v. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1970.

LOVETRO, José Alberto. Quadrinhos - a linguagem completa. **Comunicação & Educação**, [S. l.], n. 2, p. 94-101, 1995. DOI: 10.11606/issn.2316-9125.v0i2p94-101. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/comueduc/article/view/36141>. Acesso em: 12 maio. 2023.

MARTINS, Roberto de Andrade. **A origem histórica da relatividade especial**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

MENEZES, Luis Carlos de. **A matéria uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico**. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005).

MIQUELANTE, M. A. et al.. As modalidades da avaliação e as etapas da sequência didática: articulações possíveis. **Trabalhos em Linguística Aplicada**, v. 56, n. Trab. linguist. apl., 2017 56(1), p. 259–299, jan. 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/tla/a/yK3TRnr6jh4Zcn7vDgVsZvJ/?lang=pt&format=pdf>> . Acesso 19/03/2023.

MOREIRA, Marco Antonio; MASINI, Elcie F. Salzano. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Centauro, 2001.

MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias de aprendizagem**. 2 ed. ampl. São Paulo: E.P.U., 2014.

NASCIMENTO, Nicolas. L. N. S.; CUZINATTO, Rodrigo. R.. Ondas gravitacionais de buracos negros coalescentes: um estudo quantitativo a partir de física básica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p. e20220004, 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0004>>. Acesso em 16/04/2023.

NUNES, Ricardo Capiberibe. **Um Estudo Histórico-Social das Contribuições de Henri Poincaré À Teoria Da Relatividade**: Subsídios para o Ensino de Física. Campo Grande. 2019. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciência, UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/343471489>>. Acesso em 07/11/2021.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 1: mecânica**. 5 ed. São Paulo: Blücher, 2013.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 3: eletromagnetismo**. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2015.

OLIVEIRA, Marina Aparecida Ferreira de. **Utilizando um fenômeno físico para medir o diâmetro de um fio de cabelo**. Orientador: Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Física, Programa de Pós-Graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, 2016. Disponível em: <<http://www.dfi.uem.br/dissertacao/mnpef/uem.php>>. Acesso em 15/08/2020.

PARANÁ. **Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Física**. Curitiba: SEED, 2008.

PARANÁ. **Referencial Curricular Para o Ensino Médio do Paraná**. Curitiba: SEED, 2021.

PEREIRA, Ricardo Vieira. **Múon Relativístico. UFABC**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em 17/07/2022.

PIATTELLA, Oliver. F. Introdução à relatividade geral. **Cadernos de Astronomia**, Vitória, v. 1, n. 1, p. 30–39, 2020. DOI: 10.47083/Cad.Astro.v1n1.30827. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrofisica/article/view/30827>. Acesso em: 2 maio de 2023.

PINHO ALVES, J.F^o. Regras da Transposição Didática Aplicada ao Laboratório Didático. Em: **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.21, n.1 (Edição Especial), p.44-58, 2004.

PINHO ALVES, J. F^o.; PINHEIRO, T. F.; PIETROCOLA, M. A Eletrostática como exemplo de Transposição Didática. In: PIETROCALA, M. (org.). **Ensino de física: conteúdos, metodologia e epistemologia em uma concepção integradora**. 2. ed. ver. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2005.

PORTO, C.M. e PORTO, M.B.D.S.M. **Uma visão do espaço na mecânica newtoniana e na teoria da relatividade de Einstein**. Revista Brasileira de Ensino de Física [online]. 2008, v. 30, n. 1 [Acessado 18 Outubro 2021], pp. 1603.1-1603.8. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172008000100017>>. Epub 24 Jun 2008. ISSN 1806-9126. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172008000100017>.

RIBEIRO, R. J., SILVA, S. de C. R. da ., & KOSCIANSKI, A.. Organizadores prévios para aprendizagem significativa em física: o formato curta de animação. **Ensaio Pesquisa Em Educação Em Ciências (Belo Horizonte)**, 14 (Ens. Pesqui. Educ. Ciênc. (Belo Horizonte), 2012 14(3)). Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1983-21172012140311>>, acesso em 21/02/2023.

ROSA, Carlos Augusto de Proença. **História da ciência: a ciência e o triunfo do pensamento científico no mundo contemporâneo – Volume III.** 2. ed. Brasília: FUNAG, 2012, (online). Disponível em: <<https://funag.gov.br/biblioteca-nova/todos/0?busca=Hist%C3%B3ria%20da%20Ci%C3%Aancia&filtro=1&ord=1>> Acesso em 28/06/2020.

SANTOS, Andrios Bemfica dos. **A Teoria da Relatividade Restrita em uma sequência de ensino potencialmente significativa com o uso de histórias em quadrinhos.** Dissertação (mestrado – MNPEF). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tramandaí, 2019. Disponível em <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/197466>>. Acesso em 11/03/2023.

SANTOS, Roberto Elísio dos. Aplicações da História em Quadrinhos. **Comunicação & Educação**, [S. l.], n. 22, p. 46-51, 2001. DOI: 10.11606/issn.2316-9125.v0i22p46-51. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/comueduc/article/view/36995>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

SATRAPI, Marjane. **Persépolis.** São Paulo: Companhia das Letras, 2007.

SEARA DA CIÊNCIA. **O Eclipse de Sobral e a Relatividade Geral.** 2019. Disponível em <<https://seara.ufc.br/pt/producoes/nossas-producoes-e-colaboracoes/secoes-especiais-de-ciencia-e-tecnologia/secoes-especiais-fisica/o-eclipse-de-sobral-e-a-relatividade-geral/>>. Acesso em: 04/06/2023.

SOARES, Domingos. **Os fundamentos físico-matemáticos da cosmologia relativista.** Revista Brasileira de Ensino de Física [Internet], v. 35, n. 3, p. 3302, jul. 2013. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172013000300002>>. Acesso em 15/06/2023.

SPIEGELMAN, Art. **Maus: a história de um sobrevivente.** São Paulo: Companhia das Letras, 2009.

STEINER, João E. Buracos negros: sementes ou cemitérios de galáxias? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, p. 723-742, 2010. Disponível em <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2010v27nespp723>>. Acesso em 06/11/2020.

THUILLIER, Pierre. **De Arquimedes a Einstein: a face oculta da invenção científica.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1994.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna.** 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

VERGUEIRO, Waldomiro. **Pesquisa acadêmica em história em quadrinhos.** 1 ed. São Paulo: Criativo 2017.

VERGUEIRO, Waldomiro. Uso das HQs no ensino. Em: **Como usar as histórias em quadrinhos na sala de aula.** VERGUEIRO, Waldomiro (org). 4 ed. São Paulo: Contexto, 2020. p. 7-29.

VILELA, Túlio. Os quadrinhos na aula de História. Em: **Como usar as histórias em quadrinhos na sala de aula**. VERGUEIRO, Waldomiro (org). 4 ed. São Paulo: Contexto, 2020. p. 105-129.

WOLFF, Jeferson Fernando de Souza: **O ensino da Teoria da Relatividade Especial no nível médio**: uma abordagem histórica e conceitual. Dissertação (mestrado – MNPEF). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. Disponível em <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7235/000497145.pdf?...1>>. Acesso em 17/07/2022.

ZABALA, Antoni. **A prática educativa: como ensinar**. Tradução Ernani F. da, F. Rosa. Porto Alegre: Artmed, 1998.

ZANELLA, Liane. Aprendizagem: uma introdução. Em: ROSA, Jorge La. (org.). **Psicologia e educação**: o significado do aprender. 9 ed. p.23-38. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

ANEXO A – Declaração de Revisão Ortográfica

Declaração

Eu, Lucinéia Scantamburlo de Lima, portadora do RG: 8078428-7, residente no município de Sarandi, estado do Paraná, licenciada em Letras e especialista em Língua Portuguesa pela Faculdade Eficaz, atualmente professora na rede pública de ensino do Estado do Paraná, declaro, para os devidos fins e a quem interessar que realizei a revisão ortográfica em Língua Portuguesa da dissertação de mestrado: “UMA ABORDAGEM DA CURVATURA ESPAÇO-TEMPO DA TEORIA DA RELATIVIDADE POR MEIO DE QUADRINHOS”, bem como, do Produto Educacional: A CURVATURA ESPAÇO-TEMPO DA TEORIA DA RELATIVIDADE POR MEIO DE QUADRINHOS: VAMOS CONHECER?

Por ser expressão de verdade, firmo a presente declaração.

Maringá-PR, 12 de janeiro de 2024.



Lucinéia Scantamburlo de Lima
RG: 8078428-7

APÊNDICE A – Produto Educacional

Neste Apêndice é apresentado de forma independente o material presente no Capítulo 2 da dissertação, que consiste no Produto Educacional, atendendo as normas do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) da Sociedade Brasileira de Física (SBF).

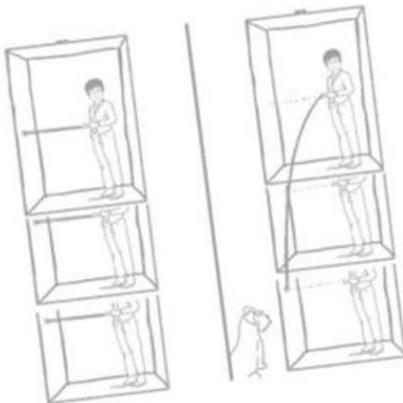


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MESTRADO NACIONAL
PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 20

PRODUTO EDUCACIONAL

A CURVATURA ESPAÇO-TEMPO DA TEORIA DA RELATIVIDADE POR MEIO DE QUADRINHOS: VAMOS CONHECER?

Autores:
NIVALDO BERTOLINI
BRENO FERRAZ DE OLIVEIRA
HATSUMI MUKAI



Produto Educacional da dissertação apresentada ao Polo 20 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Estadual de Maringá como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física no Ensino Médio.



Orientador: Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira
Coorientadora: Profa. Dra. Hatsumi Mukai



Maringá - PR
2023

APRESENTAÇÃO

Preparar aulas com recursos e técnicas diversas, objetivando que os alunos adquiram os conhecimentos propostos consiste em parte do trabalho do professor. A escolha dos recursos e técnicas pode se transformar em um grande desafio, pois essas escolhas irão colaborar diretamente para que seu trabalho seja eficiente e verdadeiramente transformador, despertando o interesse, a participação ativa e a aprendizagem potencialmente significativa por parte dos alunos.

Este Produto Educacional (PE) apresenta uma proposta de abordagem da Teoria da Relatividade de Albert Einstein, marco da física no início do século XX. Para o desenvolvimento do PE, utiliza-se como instrumento metodológico uma Sequência Didática (SD). A construção da SD está elaborada em torno de uma história em quadrinhos (HQ) que, partindo de uma problematização inicial, apresentação da situação, motiva uma produção inicial dos alunos, para a seguir, o desenvolvimento dos módulos de atividades e concluindo, os alunos apresentarem uma produção final.

A problematização sugerida foi o desvio da luz de estrelas pelo campo gravitacional do Sol, observado durante o eclipse em Sobral, Ceará, em 1919. Para explicar o fenômeno observado, a cada aula tópicos da Teoria da Relatividade Restrita e Geral surgem nos diálogos da HQ, até se chegar à curvatura do espaço-tempo na presença de uma grande massa.

Ao transcorrer as unidades didáticas da SD, o tema da Teoria da Relatividade é apresentado por três simpáticos cachorrinhos (Duque, Bob e Ben) que nos auxiliam, de forma lúdica, na aventura do conhecimento. Utiliza-se além da HQ, textos de apoio, simuladores, vídeos, produção de atividades por parte dos alunos. Sendo a Teoria da Relatividade um tema da física que foge ao nosso senso comum, a utilização de vários recursos didáticos para sua abordagem se mostra oportuna.

Por conta das características do trabalho, a SD além de desenvolver o conteúdo físico, contemplado no contexto das Ciências da Natureza e suas Tecnologias, possibilita a interdisciplinaridade com as componentes curriculares de Matemática, Arte e História.

Este texto é parte integrante da referência Bertolini (2023).

Maringá, 30 de agosto de 2023.

Os autores.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	178
2 – JUSTIFICATIVA.....	179
3 – OBJETIVOS.....	181
4 – METODOLOGIA.....	182
4.1 – Teoria da Aprendizagem Significativa.....	182
4.2 – Sequência Didática.....	185
4.3 – Histórias em Quadrinhos como instrumento de ensino.....	187
4.4 – Recursos.....	189
4.5 – Avaliação.....	190
5 – ORGANIZAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	191
6 – UNIDADES DIDÁTICAS.....	193
Unidade Didática 1.....	194
Unidade Didática 2.....	200
Unidade Didática 3.....	206
Unidade Didática 4.....	212
Unidade Didática 5.....	218
Unidade Didática 6.....	226
Unidade Didática 7.....	231
Unidade Didática 8.....	237
7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	239
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	239
APÊNDICE I - MATERIAL DO ALUNO.....	242

1 – INTRODUÇÃO

A Física é uma ciência dinâmica e em constante transformação à medida que novas tecnologias vão se desenvolvendo e novas necessidades são criadas na sociedade.

Nesse sentido, a partir do início do século XX, as descobertas científicas aconteceram de forma tão rápida que o sistema de ensino, muitas vezes inerte por falta de recursos dos mais diversos, não conseguiu dar conta de atender a todas essas novas descobertas.

Analisando alguns livros didáticos do ensino médio, disponibilizados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) e utilizados até o ano de 2011 pelas escolas públicas, pôde-se perceber que a Física ensinada era predominantemente baseada nas descobertas dos séculos XVII até o XIX. Toda revolução ou evolução surgidas desde o início do século XX ficavam limitadas a poucos capítulos ao final do volume reservado ao terceiro ano do ensino médio ou eram apresentadas como textos complementares no decorrer dos volumes utilizados durante todo o ensino médio²⁴.

A partir de 2022, as escolas públicas receberam novos livros didáticos, já adequados à proposta do Novo Ensino Médio²⁵. Entretanto, a abordagem do tema apresentou-se com aspecto apenas de divulgação, sem muito aprofundamento, mesmo que algumas das obras expusessem equações matemáticas e citassem fenômenos como buracos negros, ondas gravitacionais, lentes gravitacionais e a aplicação tecnológica em aparelhos de GPS. Uma das obras nem apresentava o conteúdo sobre teoria da relatividade.

Surgiu, então, a necessidade da abordagem de temas chamados tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) com os alunos na educação básica, abrindo os horizontes da ciência para eles, atualizando o currículo escolar como também a produção de ferramentas metodológicas para auxiliar os professores.

Nesse contexto, um assunto pouco abordado é a Teoria da Relatividade de Einstein, que surge como resposta para explicar a incompatibilidade entre o eletromagnetismo de Maxwell e a teoria clássica newtoniana da Física, quanto ao

²⁴ Foram pré-analisadas as obras de várias Editores que fornecem materiais para o Programa Nacional do Livro Didático: Ática (duas obras), Brasil, FDT, Moderna, Saraiva, Scipione e SM.

²⁵ Os livros didáticos analisados para o Novo Ensino Médio foram das seguintes editoras: FTD, Moderna, Scipione e SM.

problema em responder para qual referencial o valor da velocidade da luz (onda eletromagnética) deveria ser analisado. Realizaram-se vários experimentos em busca desse referencial privilegiado, o éter, porém ele não foi detectado. A necessidade de mudança na forma de como se entende o mundo e os eventos recorrentes a noção de tempo e espaço é um dos principais fatores que dificultam a assimilação dos conceitos da teoria da relatividade. Outra linha de pesquisa afirma que o problema da compreensão e até mesmo do aceite da teoria da relatividade não estão necessariamente na complexidade das equações matemáticas, mas, “no fato de a relatividade nos obrigar a reexaminar, criticamente, as nossas ideias de espaço e tempo” (HALLIDAY, 1995, p. 123). O espanto inicial diante da proposta é justificado pelo fato de todos os eventos que se podem observar no cotidiano acontecerem com velocidades muito pequenas quando comparadas à velocidade da luz.

O presente PE visa apresentar uma proposta de sequência didática, estruturada segundo as diretrizes de Antoni Zabala (ZABALA, 1998), utilizando história em quadrinhos para o desenvolvimento da teoria da relatividade de Einstein, com alunos de 2º e 3º anos do ensino médio.

Partindo-se de um evento real, o eclipse observado na cidade cearense de Sobral, em 1919, foi determinante para esta pesquisa, a qual tem como objetivo levar esses alunos a conhecer a proposta da teoria da relatividade e as suas aplicações tecnológicas, como o *Global Positioning System*²⁶ (GPS) e a ferramenta para estudos cosmológicos.

Fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, a escolha de história em quadrinhos como ferramenta de aprendizagem não só contribui para a liberdade de imaginação dos(as) estudantes, necessária para tratar a temática da relatividade, como também possibilita a utilização de uma metodologia dinâmica que leve o aluno à leitura, à interação com o texto, à produção de novos quadrinhos e ao desenvolvimento de atividades lúdicas, visando à apropriação do conhecimento.

2 – JUSTIFICATIVA

A atualização dos conteúdos abordados nas aulas de física se faz necessária para que os alunos possam ter contato com as novas teorias propostas pela ciência

²⁶ Sistema de Posicionamento Global.

e, conseqüentemente, entender melhor o mundo que os cerca, rompendo a ideia de fragmentação do conhecimento físico – clássico e moderno desvinculados – e conduzindo-os a um processo de transformação histórico e contextualizado, na busca de respostas às questões e necessidades que surgem na sociedade. Uma vez que se abordam temas de FMC em sala de aula, dá-se a oportunidade para que o aluno entenda melhor vários aparatos tecnológicos de seu cotidiano.

Além disso, nacionalmente, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) já levantam o questionamento da inserção da Física Moderna em detrimento a outros tópicos como a Cinemática (Brasil, 2002, p. 60). Com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), os tópicos sobre teoria da relatividade estão contemplados na segunda competência específica de Ciências da Natureza e suas Tecnologias para o ensino médio, conforme se observa em Brasil (2018):

Analisar 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 (BRASIL, 2018, p. 553).

Para a referida competência, são apresentadas algumas habilidades a seguir, por meio das quais fundamenta-se o estudo da teoria da relatividade:

(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, 2018, p. 557).

Ainda nesse contexto, a abordagem da teoria da relatividade também é proposta em documentos norteadores da educação no estado do Paraná. As Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Física (DCE – Física), de 2008 – organizam os conhecimentos da Física em conteúdos estruturantes, a saber: movimento, termodinâmica e eletromagnetismo. A teoria da relatividade é citada no tópico sobre o eletromagnetismo sobre a importância da abordagem da Física Moderna, destacando a “imutabilidade da velocidade da luz, como um dos princípios da relatividade” (PARANÁ, 2008, p. 61). O mesmo documento ainda propõe, ao se estudar o conteúdo básico de gravitação (contemplado no conteúdo estruturante de

movimento), que o aluno “compreenda o contexto e os limites do modelo newtoniano, tendo em vista a Teoria da Relatividade Geral” (PARANÁ, 2008, p. 94).

Recentemente, o Referencial Curricular para o Ensino Médio do Paraná (2021) organizou o conhecimento da Física em cinco unidades temáticas, cada uma subdividida em objetos de conhecimento nas quais são, finalmente, apresentadas as sugestões de conteúdo. A unidade temática cinco, denominada Cosmologia, nomeia o objeto de conhecimento também com a mesma nomenclatura e apresenta como sugestão de conteúdo a teoria da relatividade geral (PARANÁ, 2021, p. 419), contemplando as habilidades EM13CNT201 e EM13CNT204 da BNCC (BRASIL, 2018).

Percebe-se assim, a importância de se pensar e produzir materiais com as propostas metodológicas adequadas para a abordagem de tópicos da teoria da relatividade, partindo-se de uma problematização, contextualizando-se os conteúdos conceituais, os aspectos históricos e as suas aplicações tecnológicas.

3 – OBJETIVOS

Nesta seção apresenta-se os objetivos geral e os específicos para nortear o que queremos atingir no final da aplicação do PE, estruturada considerando aspectos metodológicos didáticos-pedagógicos, e embasada e analisada considerando a teoria da aprendizagem significativa.

Objetivo geral

Abordar o efeito da curvatura do espaço-tempo da teoria da relatividade, com os alunos do 2º e do 3º ano do ensino médio, por meio de uma sequência didática, utilizando-se a história em quadrinhos como instrumento didático facilitador para a assimilação por parte dos alunos.

Objetivos específicos

Trazer a discussão e a contextualização da Teoria da Relatividade de Einstein junto aos alunos do 2º e do 3º ano do ensino médio, como uma resposta a problemas enfrentados pela Física clássica na virada para o século XX.

Apresentar como se transformam os paradigmas da ciência, estimulando a criatividade dos alunos e a superação do senso comum.

Produzir material de apoio a professores e alunos, com entendimento acessível, abordando a teoria da relatividade.

Utilizar a mídia de História em Quadrinhos (HQ) ou gibi, forma comumente chamada, como ferramenta pedagógica e estimuladora da imaginação dos alunos, levando a uma reflexão sobre a curvatura espaço-tempo na Teoria da Relatividade.

4 – METODOLOGIA

Para que o(a) aluno(a) consiga percorrer um itinerário que leve a um verdadeiro processo de apropriação do conhecimento, é necessário a utilização de atividades orientadas que envolvam técnicas e estratégias visando a sua concretização. O método adotado pelo(a) professor(a) será decisivo para que o(a) aluno(a), ao percorrer o itinerário da aprendizagem, passe de ouvinte passivo a alguém que consiga aprender com certa autonomia, preparando-o(a) não apenas para as eventuais avaliações ao término de cada etapa de estudos, mas sim, para continuar aprendendo a partir dos novos conhecimentos adquiridos.

Assim, no presente trabalho, adotou-se como referência de psicologia educacional a Teoria da Aprendizagem Significativa, proposta por David Ausubel e, como recurso metodológico, a organização de um Sequência Didática, proposta por Antoni Zabala, conforme passa-se a discorrer.

4.1 – TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

A aprendizagem pode ser apresentada como o fator principal a ser desenvolvido na relação docente e discente no ambiente escolar, fazendo com que estudiosos e pensadores busquem apresentar propostas e alternativas que visem à realização desse processo.

David Ausubel (1918-2008), psicólogo da educação, nascido nos Estados Unidos, desenvolveu uma teoria cognitiva denominada aprendizagem significativa. Ela tem como base o fato de que a aprendizagem ocorre quando uma nova informação é ancorada naquilo que o(a) aluno(a) possui de conhecimento prévio. Nas palavras do próprio autor, “o fator singular mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe” (AUSUBEL, NOVAK, HANESIAN, 1980, p. 137). Moreira (2014, p. 159) apresenta a teoria da aprendizagem significativa como cognitiva, que se dá pela forma organizada com que as informações são armazenadas na estrutura mental, que é chamada de estrutura cognitiva.

O conhecimento prévio – já possuído pelo aprendiz e que servirá como âncora para a aprendizagem – é nominado subsunçor e tende a ser potencializado por uma nova informação adquirida e assimilada. A nova informação, quando organizada e integrada, não apenas influenciando, mas modificando a estrutura cognitiva do aprendiz, proporciona a aprendizagem (MOREIRA, 2014, p. 160). O fruto da combinação entre o novo conhecimento e o já possuído pelo aprendiz resulta num terceiro conhecimento modificado.

Segundo Moreira e Masini (2001), o conceito de aprendizagem significativa pode ser resumido como:

um processo pelo qual uma nova informação se relaciona com um aspecto relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo. Ou seja, neste processo a nova informação interage com uma estrutura de conhecimento específica, qual Ausubel define como conceito subsunçor ou, simplesmente, subsunçor (*subsumer*), existente na estrutura cognitiva do indivíduo. A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação ancora-se em subsunçores relevantes preexistentes na estrutura cognitiva de quem aprende (MOREIRA e MASINI, 2001, p. 17).

Subsunçor corresponde aos conceitos presentes na estrutura cognitiva que funcionam para ancorar um novo conceito, uma “ponte cognitiva daquilo que já sabe com a nova informação” (RIBEIRO, SILVA, KOSCIANSKI, 2012, p. 168). Considerando a frequência das interações, ou das aprendizagens significativas, um subsunçor pouco desenvolvido vai se tornando mais abrangente e desenvolvido, aumentando o grau de elaboração dos conceitos, tornando-os mais inclusivos. A aprendizagem significativa é um processo em que um novo conhecimento é assimilado (ou ancorado) a outro já existente e relevante na estrutura cognitiva, onde é organizado, fazendo que um conceito específico vá se tornando mais abrangente (MOREIRA, 2014, p. 161). Ocorre, desse modo, o crescimento e a modificação

conceitual do subsunçor. O professor, ao identificar os conhecimentos prévios dos alunos, permite que esses subsunçores possam ser mais bem explorados.

É de fundamental importância que o professor consiga identificar os conhecimentos prévios dos alunos, a fim de que possam ser mais bem explorados. À medida que o aluno não apresentar algum subsunçor, será necessária uma primeira abordagem, buscando estabelecê-lo para que, na sequência, crie-se assimilações, “processo que ocorre quando um conceito ou proposição **a**, potencialmente significativo, é assimilado sob uma ideia ou conceito mais inclusivo, já existente na estrutura cognitiva” (MOREIRA, 2014, p.166). O maior número de assimilações tende a propiciar uma aprendizagem potencialmente significativa também maior.

Na ausência de subsunçores, devido à novidade do assunto ou caso se tenha perdido algum deles na estrutura cognitiva do estudante, é necessária a manipulação dessa estrutura a fim de “preencher o hiato entre aquilo que o aprendiz já conhece e o que precisa conhecer antes de poder aprender significativamente a tarefa com que se defronta” (AUSUBEL, NOVAK, HANESIAN, 1980, p. 144). Para isso, utilizam-se os chamados organizadores prévios. Segundo Ribeiro, Silva e Koscianski (2012), quando o aluno carece de subsunçores,

sugere-se o uso de organizadores prévios, que são mecanismos pedagógicos auxiliares na ligação entre aquilo que o aprendiz já sabe e aquilo que irá adquirir. A justificativa para o uso dos organizadores prévios vem do fato de que as ideias existentes na estrutura cognitiva do aprendiz podem não ter a relevância e o conteúdo suficientes para estabelecerem ligações com as novas ideias introduzidas pelo material de instrução. Nesse caso, o organizador prévio faz o papel de mediador e também faz a alteração das ideias preexistentes, preparando-as para o estudo do material posterior (RIBEIRO, SILVA, KOSCIANSKI, 2012, p. 171).

Por meio de materiais apropriados, de conceitos com alto nível de abstração, generalizados e amplamente inclusivos, evoluem-se novos subsunçores que proporcionam futuras aprendizagens. Tais materiais, ditos potencialmente significativos, preparam a estrutura cognitiva do aluno com informações que possam estabelecer ligações das novas ideias aos conceitos apresentados.

Somando-se a utilização de materiais potencialmente significativos, outro fator de extrema importância está no fato de que “o aluno manifeste uma disposição para a aprendizagem significativa – ou seja, uma disposição para relacionar, de forma não arbitrária e substantiva, o novo material à sua estrutura cognitiva” (AUSUBEL, NOVAK, HANESIAN, 1980, p. 34)

Cabe ao professor compreender a estrutura conceitual, considerando aquilo que é unificador, inclusivo, de maior explanação e integração e organizando tudo de tal forma que os conceitos mais abrangentes possam ser direcionados aos mais específicos. Da mesma forma, identificar na estrutura cognitiva quais subsunções relevantes já se encontram instaladas e auxiliar na assimilação e organização dos conceitos na estrutura cognitiva, vai servir para que o aprendiz tenha clareza nos significados ao mesmo tempo que sejam estáveis e transferíveis (MOREIRA, 2014, p.170).

4.2 – SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A escolha da utilização de uma Sequência Didática (SD) é justificada por permitir “o estudo e a avaliação sob uma perspectiva processual, que inclua as fases de planejamento, aplicação e avaliação” (ZABALA, 1998, p. 18).

Antoni Zabala ainda apresenta uma definição do que se trata uma sequência didática:

[...] buscando os elementos que as compõem, nos daremos conta que são um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas para realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecidos tanto pelo professor como pelos alunos (ZABALA, 1998, p. 18).

A SD se apresenta como uma proposta metodológica na qual atividades, ou seja, etapas da aula, são articuladas e ordenadas, formando uma unidade didática que maximize a aprendizagem do aluno, sempre atrelada ao conteúdo e visando aos objetivos propostos previamente num planejamento. Em outras palavras, é necessário saber exatamente/ter o objetivo do que se vai ensinar previamente determinado, como isso vai ocorrer e para quem será ensinado.

Vale destacar a diferença entre um plano de aula e uma SD, onde o primeiro trata daquilo que será desenvolvido em apenas uma aula e a SD visa desenvolver por completo uma unidade didática, podendo assim, utilizar mais de uma aula para atingir seus objetivos.

Cada unidade didática deve articular as etapas de elaboração metodológica durante a aula, considerando uma maior ou menor participação dos estudantes. Dessa forma, a metodologia adotada pelo professor contribui para uma postura mais

ativa ou passiva por parte dos alunos. O número e a variedade das atividades favorecem o deslocamento do protagonismo do professor para o aluno.

Quanto aos conteúdos que serão contemplados em uma unidade didática, Zabala (1998, p. 39) propõem sua organização para além da classificação tradicional de componentes curriculares ou áreas (Matemática, Geografia, Ciências, Línguas...), considerando suas tipologias, assim classificados como conteúdos: factuais, conceituais, procedimentais e atitudinais. Tais conteúdos são organizados da seguinte forma:

- Conteúdos Factuais

Entende o conhecimento de fatos, acontecimentos, situações, dados e fenômenos concretos e singulares: a idade de uma pessoa, a conquista de um território, a localização ou a altura de uma montanha, os nomes, os códigos, os axiomas, um fato determinado num determinado momento (ZABALA, 1998, p. 41).

Percebe-se que todos os elementos de aprendizagem são concretos e que podem ser problematizados por meio de um texto, um vídeo, uma imagem, um quadrinho, que auxiliem na memorização e futura repetição por parte do aluno. Expressar e reproduzir de forma mais exata possível é sinônimo de êxito na aprendizagem de um conteúdo factual, o que é possível por meio de exercícios de repetição.

- Conteúdos Conceituais e Princípios

Os conceitos se referem ao conjunto de fatos, objetos ou símbolos que têm características comuns, e os princípios se referem às mudanças que se produzem num fato, objeto ou situação em relação a outros fatos, objetos ou situações e normalmente descrevem relações de causa-efeito ou de correlação (ZABALA, 1998, p. 42).

Ao contrário dos conteúdos factuais, os conceituais tratam de aspectos mais abstratos, uma vez que se faz necessário o entendimento de um significado. Como princípios, os conteúdos não se encerram, estes se relacionam e se completam permitindo a ampliação e o aprofundamento. Os conteúdos se tornam mais significativos à medida que se aumenta a compreensão do estudante.

- Conteúdos Procedimentais

Inclui entre outras coisas as regras, as técnicas, os métodos, as destrezas ou habilidades, as estratégias, os procedimentos – é um conjunto de ações

ordenadas e com um fim, quer dizer, dirigidas para a realização de um objetivo. São conteúdos procedimentais: ler, desenhar, observar, calcular, classificar, traduzir, recortar, saltar, inferir, espetar (ZABALA, 1998, p. 43).

Ao se colocar em prática os conhecimentos oriundos dos conteúdos conceituais, o aluno é direcionado à realização dos objetivos. Os conteúdos procedimentais consistem, então, nas ações ordenadas para que os objetivos se concretizem, por intermédio da prática repetitiva até se ter domínio dos processos e saiba resolver os problemas.

- Conteúdos Atitudinais

Engloba uma série de conteúdos que por sua vez podemos agrupar em valores, atitudes e normas. Cada um destes grupos tem uma natureza suficientemente diferenciada que necessitará, em dado momento, de uma aproximação específica (ZABALA, 1998, p. 41).

As explicações teóricas cedem espaço às práticas de vivência de ajuda, de cooperação, de respeito. Envolvem a conduta do aluno diante do outro e à natureza, uma atitude de refletir quanto às decisões, ao discernimento, ao posicionamento, ao envolvimento afetivo e à avaliação da própria conduta.

Em relação a uma proposta estrutural de SD utilizou-se a apresentada e discutida no trabalho de Araújo (2013, p. 323) que é a proposta por Dolz, Novarraz e Schneuwly (2004). Nela, a SD é apresentada em quatro etapas ou passos: apresentação da situação; produção inicial; módulos de atividades e produção final.

4.3 – HISTÓRIAS EM QUADRINHOS COMO INSTRUMENTO DE ENSINO

Desde os tempos mais remotos, a humanidade utiliza-se de desenhos, representações de animais, plantas e outros elementos da natureza para se comunicar. Os antigos desenhos em cavernas eram bem mais que rabiscos em paredes; eram também uma forma de transmissão e acumulação de conhecimentos. Nas crianças, a primeira forma de expressão de sentimentos se dá por rabiscos de imagens que expressam a forma com que elas percebem e se comunicam com o mundo. Pode-se dizer, então, que “as histórias em quadrinhos vão ao encontro das necessidades do ser humano, na medida em que utilizam fartamente um elemento de comunicação que esteve presente na história da humanidade desde os primórdios: a imagem gráfica” (VERGUEIRO, 2020, p.8).

O advento da imprensa, os avanços da indústria tipográfica, o surgimento de grandes grupos jornalísticos impressos são fatores que, segundo Vergueiro (2020, p. 10), contribuem para que as Histórias em Quadrinhos (HQs) se tornem cada vez mais comuns à grande massa da população, com temáticas variando entre aventura, terror, suspense, entre outros. No Brasil, os periódicos de HQs recebem o nome de gibis.

Após a Segunda Guerra Mundial, as HQs passam a ser questionadas quanto aos males que poderiam apresentar às crianças e aos adolescentes. Procurou-se provar, por meio da Psiquiatria, que crianças poderiam apresentar comprometimento em seu comportamento por lerem HQs. No final da década de 1940, é criado o Código de Ética dos Quadrinhos pelos editores norte-americanos.

Inicialmente, as HQs não foram acolhidas por pensadores e intelectuais, o que limitava sua aceitação enquanto expressão de linguagem e impossibilitava sua utilização voltada à educação. O final do século XX traz consigo uma mudança na perspectiva, não apenas da leitura de HQs como também de sua utilização em ambiente educacional. As HQs passam a ser vistas mais amigavelmente “recebendo um pouco mais de atenção das elites intelectuais e passando a ser aceitas como um elemento de destaque global de comunicação e como uma forma de manifestação artística com características próprias” (VERGUEIRO, 2020, p. 17).

A partir dos anos de 1990, no Brasil, passa-se a utilizar com mais frequência HQs vinculadas à educação, tornando-se comum encontrá-las nas páginas de livros didáticos e materiais paradidáticos. A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) (BRASIL, 2018), apresenta várias citações referentes à utilização de HQs, tirinhas e outros elementos de comunicação textual e gráfica como instrumentos para auxiliar o processo de aprendizagem, em especial, a leitura. A facilidade de compreensão dos textos aliada a ilustrações que instigam a imaginação tende a despertar o interesse pela leitura e a busca de outras fontes literárias. Segundo a BNCC (BRASIL, 2018),

o grau de envolvimento com uma personagem ou um universo ficcional, em função da leitura de livros e HQs anteriores, da vivência com filmes e games relacionados, da participação em comunidades de fãs etc., pode ser tamanho que encoraje a leitura de trechos de maior extensão e complexidade lexical ou sintática dos que os em geral lidos (BRASIL, 2018, p. 76).

O envolvimento, o desenvolvimento e o gosto pela leitura podem encontrar nas HQs sua porta de acesso. Graças aos elementos gráficos, as HQs podem constituir uma ferramenta importante na alfabetização de crianças ao associarem as imagens e situações aos textos presentes nos balões de diálogos. Paralelo a isso, pedir para

uma criança representar seus pensamentos e sentimentos por meio de um desenho é uma maneira de estimular sua imaginação. Santos (2001) converge para o mesmo pensamento ao afirmar que “a utilização de quadrinhos pode ser de grande valia para iniciar o jovem no caminho que leva à consolidação do hábito e do prazer de ler” (SANTOS, 2001, p. 47). Pode-se, ainda, constatar que “o gibi é o primeiro livro de leitura de uma criança” (LOVETRO, 1995, p. 95).

As HQs não devem ser consideradas apenas como meio de entretenimento e não necessariamente estarem atreladas a temáticas fictícias e fantasiosas. Podem apresentar roteiros históricos e autobiográficos e mesmo, quando ficção, é possível a abordagem de temas sociais e culturais relevantes. Uma HQ, mesmo que não seja “uma reconstituição dos fatos à qual se refere, tal como aconteceram, mas a sua recriação, do modo como são lembrados pelo autor; ou mesmo, como ele gostaria que fossem registrados para a posteridade” (VILELA, 2020, p. 116).

Sobre a utilização de HQs em ambiente escolar, Vergueiro (2020, p. 21) apresenta vários motivos que justificam sua utilização como ferramenta de auxílio na aprendizagem. O primeiro ponto relevante é a popularidade deste tipo de leitura entre crianças e adolescentes, o que potencializa a motivação “aguçando sua curiosidade e desafiando seu senso crítico” (VERGUEIRO, 2020, p. 21). A combinação de imagens e textos contribuem para que se ampliem o nível da comunicação, o que melhora a aprendizagem. Como as HQs permitem a abordagem de temas que vão desde o humor a temas históricos, à ficção científica, entre outros, torna-se alto o nível de informações possíveis de se trabalhar. O enriquecimento das possibilidades de comunicação presentes nas HQs contribui para que o hábito da leitura se torne rotineiro entre os estudantes, ao mesmo tempo que enriquece seu vocabulário.

4.4 – RECURSOS

Para a problematização e início do debate sobre o fenômeno da curvatura espaço-tempo, será apresentado um recorte de matéria de jornal referente à observação do eclipse solar na cidade de Sobral, no Ceará, em 29 de maio de 1919, primeira comprovação experimental das teorias de Einstein quanto à deformação do espaço-tempo.

A proposta é que a apresentação seja feita aos alunos por meio de um roteiro de uma história em quadrinhos (HQ), abordando desde o impasse entre a mecânica

newtoniana e as leis do eletromagnetismo, passando pela proposta de Einstein para solucionar o problema, levando como consequência, à ideia de curvatura do espaço-tempo.

Aproveitando o fato de que as salas de aula dos colégios estaduais do Paraná contam, em sua maioria, com TV Multimídia e alguns projetores na escola, serão selecionados alguns pequenos vídeos, visando contribuir para a melhor assimilação dos conceitos apresentados.

Outra proposta é a utilização de simuladores *online*, de uso livre, para experimentação virtual sobre a contração do espaço e a dilatação do tempo. Será utilizado no *site* Walter Fendt um simulador²⁷ e uma calculadora²⁸ para analisar e calcular a dilatação do tempo. Serão utilizadas outras propostas em aparelhos de *Smartphones* (*Physics at school* e T.E. Relatividade – aplicativos disponíveis gratuitamente na *Play Store*).

A ideia é despertar a sadia confusão na mentalidade dos alunos sobre a realidade da dilatação do tempo e a contração do espaço e, também, esclarecê-la.

Com o auxílio de vídeos selecionados no canal do YouTube^{BR}, pode-se fazer o resgate dos organizadores prévios necessários aos alunos, quando detectado que não apresentem subsunçores, como também reforçar conceitos e quantificar algumas grandezas abordadas durante as aulas.

4.5 – AVALIAÇÃO

Zabala (1998) apresenta a avaliação não apenas como um momento de quantificação (denominada de somativa) dos conteúdos assimilados ou decorados pelos alunos. A avaliação é apresentada como um processo em que não só o aluno é avaliado, mas também o professor e sua metodologia. Assim, “podemos distinguir claramente dois processos avaliáveis: como o aluno aprende e como o professor ou professora ensina” (ZABALA, 1998, p. 196).

Dessa forma, a avaliação será desenvolvida de forma processual, a cada aula, por meio de questões preestabelecidas pelo professor, sejam questões de pesquisa ou aquelas que já foram aplicadas em exames vestibulares, como também atividades

²⁷ <https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm>

²⁸ <https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm>

desenvolvidas pelos(as) próprios alunos(as), com as quais serão incentivadas atividades de caráter lúdico, como palavras cruzadas e desenhos. Durante as atividades, serão analisadas a relação do(a) aluno(a) em relação aos conceitos, procedimentos e atitudes.

Por fim, haverá a aplicação do questionário avaliativo proposto pelo professor, visando observar a apropriação dos conhecimentos pelos alunos.

5 – ORGANIZAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A SD terá as unidades organizadas e articuladas, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Cronograma de organização e encaminhamento da sequência didática.

ENCONTROS	UNIDADES DIDÁTICAS	CONTEÚDOS	OBJETIVOS	RECURSOS
1 (100 min)	01 (50 min)	-Aplicação do questionário para abordagem de conhecimentos prévios; apresentação do tema - problematização (eclipse de Sobral).	-Aplicar questionário para avaliação formativa inicial. -Introduzir e problematizar o tema sobre a teoria da relatividade.	-Folha de questionário e primeira parte da história em quadrinhos (HQ).
	02 (50 min)	-Eletromagnetismo x Física clássica.	-Desenvolver com os estudantes a ideia de mudança de referencial na mecânica clássica. -Discutir o problema da mudança de referencial para eventos eletromagnéticos. -Definir o significado de relativo, absoluto e referencial.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; texto de apoio.
2 (100 min)	03 (50 min)	-Postulados da teoria da relatividade.	-Definir o que é um postulados. -Tornar conhecidos os postulados da teoria da relatividade restrita. -Discutir as	-HQ; projeção de imagens ilustrativas; vídeo ilustrativo; texto de apoio. -Exercício quantitativo.

			implicações dos postulados.	
	04 (50 min)	-Dilatação do tempo e contração do espaço – física e tecnologia: GPS.	-Discutir com os alunos os fenômenos da dilatação temporal e contração espacial, assim como podemos verificar sua veracidade. -Entender como se aplica a dilatação temporal no funcionamento de um GPS.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; texto de apoio; -Simulador.
3 (100 min)	05 (50 min)	-Paradoxo dos gêmeos – resolução de exercícios.	-Apresentar o problema do paradoxo dos gêmeos como um exercício mental da teoria da relatividade restrita. -Aplicar a dilatação temporal como uma forma de entender as partículas múons que atingem a superfície da Terra.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; texto de apoio. -Lista de exercícios de vestibulares.
	06 (50 min)	-Teoria da relatividade geral – Princípio da equivalência.	-Debater com os alunos a relação entre aceleração e campo gravitacional. -Desenvolver a autonomia dos alunos quanto aos conhecimentos adquiridos.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; vídeo; texto de apoio. -Elaboração de exercícios de fixação pelos alunos.
4 (100 min)	07 (50 min)	-Teoria da relatividade geral – Curvatura do espaço-tempo. -Questionário avaliativo.	- Definir a curvatura do espaço-tempo como uma consequência do princípio da equivalência. - Entender como a trajetória da luz acompanha a deformação do espaço-tempo.	-HQ; <i>notebook</i> e projetor para imagens ilustrativas; folha de questionário avaliativo.
	08 (50 min)	-Análise dos resultados obtidos	-Realizar análise das respostas	-Questionário avaliativo.

		no questionário e avaliação da sequência didática.	apresentadas pelos alunos. -Avaliação da sequência didática.	
--	--	--	--	--

Fonte: o autor.

6 – UNIDADES DIDÁTICAS

Olá, querido(a) estudante! Iremos realizar pelas próximas páginas um pequeno passeio buscando conhecer um pouco sobre a teoria da relatividade proposta por Albert Einstein. Para isso, teremos a companhia de três cachorrinhos com personalidades bem diferentes, que irão auxiliar em nossa aventura pelo conhecimento.



Duque: um Vira-lata grandão e simpático, amigo e muito curioso, que apesar de não conhecer muito de ciências, adora aprender coisas novas.

Ben: um Spitz Alemão (Lulu da Pomerânia) impicante, ranheta e que adora questionar tudo. Apesar do gênio forte é um grande amigo e está sempre presente.



Bob: um Schnauzer muito carinhoso, amigo e que adora observar e aprender. Sempre partilha seus conhecimentos com os amigos e deseja que todos aprendam mais.

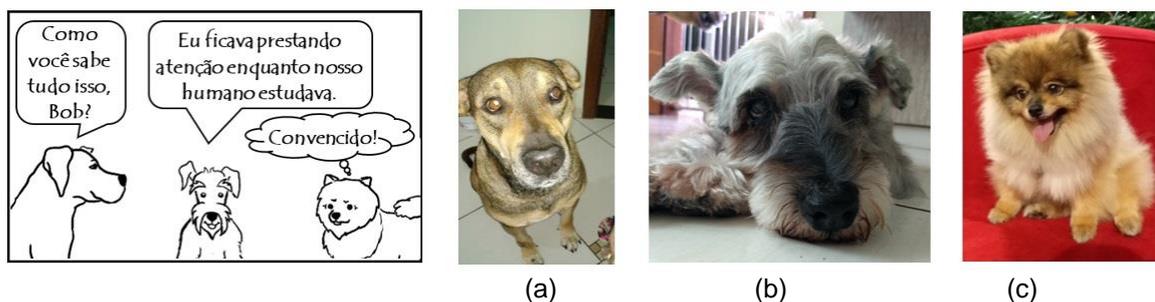
Os cachorrinhos são baseados em *pets* reais (Figura 2.1), e foram selecionados de acordo como o comportamento deles. Dos três, atualmente somente o Ben está entre nós.

O desenho e a utilização das caricaturas das pessoas foram autorizadas por elas.

Qualquer semelhança de nomes e situações foi mera coincidência.

Aproveitem o passeio pelo mundo fascinante da teoria da relatividade, divirtam-se e que ao final, consigam compreender as bases desta desafiadora teoria.

Figura 1 – Apresentação dos *pets*: (a) Duque, (b) Bob, (c) Ben.



Fonte: arquivos do autor.

UNIDADE DIDÁTICA 1

QUESTIONÁRIO DIAGNÓSTICO E APRESENTAÇÃO DO TEMA

Papel do professor

Com a realização do questionário diagnóstico, coletar informações sobre o conhecimento prévio dos alunos a respeito da teoria da relatividade e no que ela se difere da teoria clássica de Newton, ao mesmo tempo, o questionário tende a instigar a curiosidade dos alunos à medida que respondem as questões propostas.

O que se espera

Que ao preencher o questionário o aluno já inicie o processo de reflexão sobre os elementos que diferenciam a teoria da relatividade e a teoria clássica.

Que partindo de um fato histórico, o eclipse ocorrido na cidade cearense de Sobral em 1919, os alunos já comecem a assimilar a teoria da relatividade a eventos da natureza.

Encaminhamento: materiais e estratégias

Atividade 1 – Apresenta-se aos alunos o questionário diagnóstico ao mesmo tempo que são motivados a responder de forma mais sincera e objetiva possível, sem a preocupação com erro ou acerto. Lembrando que o questionário não possui caráter avaliativo, e sim, contribui como ferramenta visando resgatar o conhecimento que os alunos já possuem sobre o assunto, ou seja, os subsunçores.

Atividade 2 – Realiza-se a leitura individual da primeira parte da HQ, em que é apresentada a cópia de um artigo original de jornal referente ao evento de Sobral, o eclipse de 1919.

Atividade 3 – São propostas algumas questões para reflexão sobre a HQ.

Atividade 4 – Realiza-se a leitura coletiva do texto de apoio e apresenta-se a foto e ilustrações que representam o evento observado.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 1.

Atividade 1 – Questionário para diagnóstico formativa inicial (20 min.)

O questionário contendo oito questões dissertativas, que apresentamos a seguir, com as respostas esperadas.

1 – Desprezando a resistência do ar e considerando que uma bola de boliche e uma maçã são abandonadas da mesma altura, quem chega ao chão primeiro?

Ambas chegam ao mesmo tempo.

2 – O que você compreende quando se diz que algo é “relativo” ou “absoluto”?

Relativo: quando alguma coisa depende de outra. Necessita de condições e/ou informações iniciais.

Absoluta: quando alguma coisa não depende ou não está relacionada a outra, tem autonomia. Não necessita de condições iniciais.

3 – O que você conhece a respeito da teoria da relatividade de Einstein?

- Relatividade Restrita: mudança no entendimento dos movimentos. A velocidade da luz é considerada absoluta enquanto o espaço e o tempo são considerados relativos para observadores em referenciais inerciais diferentes.

- Relatividade Geral: considera a gravidade não como uma força de interação à distância, mas sim, uma deformação do tecido espaço-tempo na presença de corpo com grande massa. Considere a efeitos da aceleração e de um campo gravitacional com equivalentes.

4 – Qual a diferença entre a física clássica de Newton e a teoria da relatividade de Einstein?

- Newton: trata do movimento de objetos com velocidades pequenas quando comparadas com a velocidade da luz. Valores de velocidades na ordem de grandeza que conseguimos medir e observar. A velocidade é uma grandeza relativa enquanto o tempo e espaço são absolutos.

- Einstein: trata de movimentos próximos da velocidade da luz. A velocidade da luz é considerada uma grandeza absoluta e o espaço e tempo são considerados como grandezas relativas. Dá um novo entendimento a gravidade.

5 – Você já ouviu falar sobre a dilatação do tempo e contração do espaço, ou do paradoxo dos gêmeos? Se sim para algo, o que?

- Dilatação do tempo: a tempo passa mais lentamente para referenciais em movimento em relação a outro referencial em repouso.

- Contração do espaço: as dimensões de um corpo em um referencial em movimento apresentam medias menores para um observador em outro referencial em repouso.

- Paradoxo dos gêmeos: experimento mental que aborda a dilatação do tempo.

6 – Qual a trajetória mais provável para o movimento de um feixe de luz.

Linha reta.

7 – O que você sabe sobre Buraco Negro?

É uma deformação muito grande do espaço-tempo causada por um objeto muito denso, que nem mesmo a luz consegue escapar de sua interação gravitacional.

8 – Você é capaz de citar alguma aplicação cotidiana da teoria da relatividade?

Aparelho ou aplicativo de GPS.

Os resultados serão compilados logo após a aula e servirão como base para os devidos encaminhamentos das atividades e quando necessário, auxiliará o professor na revisão das estratégias em estabelecer organizadores prévios junto aos alunos.

A seguir, trabalhar com a primeira página da HQ, conforme apresentada na Figura 3. Nessa página está colocada a problematização pelo Duque por meio de um recorte de jornal que encontrou nas “coisas dos humanos” (uma inversão de papéis para tornar mais lúdica e semelhante às HQs tipo gibis). Ele é muito curioso. E trás para discutir o assunto com o Bob, que é o sabichão. No meio da conversa chega o Ben (Benjamin) que é ranzinza e duvida de tudo.

Nesse recorte (cópia do original) trata do eclipse ocorrido em Sobral no ano de 1919, cuja comitiva (Figura 2) liderada pelos ingleses Andrew Crommelin e Charles Davidson, comprovaram pela primeira vez a teoria do famoso físico Albert Einstein. Normalmente os alunos conhecem a fama de Einstein por ser um grande físico, mas, não compreendem realmente a sua contribuição com a ciência e o que isso tem a ver com os dias de hoje.

O recorte foi transcrito na parte inferior da página, pois a cópia não está tão nítida. A grafia era a da época.

Figura 2 – Cópia da fotografia dos participantes da expedição de Sobral.



Fonte: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/10/historia-do-eclipse-de-sobral-ce-que-comprovou-teoria-da-relatividade.html>. Acesso em 17/04/22.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 1 (Figura 3)

Figura 3 – Primeira página da HQ – Aula 1: o eclipse de Sobral em 1919 (problematização).

Aula 1

O eclipse de Sobral em 1919



Fonte: o autor.

O ECLYPSE SOLAR DE MAIO E OS SCIENTISTAS – Londres, 8 (H.)

Os resultados obtidos pela missão que foi ao Ceará e a Ilha do Príncipe observar o eclipse solar de Maio último estão causando o mais vivo interesse nos círculos científicos, porque esses resultados vêm confirmar uma lei de deflexão do professor suíço Einstein, cujas novas theories sobre o universo não admitem as leis de Newton²⁹.

²⁹ Reportagem “Há 100 anos, eclipse em Sobral põs Einstein e Teoria da Relatividade na História” de 25/05/2019 – Jornal Estadão. Disponível em:

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 1

Após a leitura da HQ, questionar os alunos sobre os seguintes aspectos:

- a) Qual foi o seu entendimento geral?
- b) Ficou claro o texto do jornal apresentado pelo Duque e qual foi a dúvida que lhe surgiu?
- c) Quais outros pontos que não tenham ficado claros durante a leitura da HQ?

Atividade 4 – Leitura do Material de apoio: O eclipse de Sobral

Texto para os alunos: O eclipse de Sobral

Nos anos de 1905 e 1915, Albert Einstein publicou dois artigos que tratavam, respectivamente, da teoria da relatividade restrita e da teoria da relatividade geral. Suas ideias não foram de pronto entendidas e aceitas pela comunidade científica. Muitas dúvidas cercavam a nova teoria que contrariava o que já era conhecido e aceito pela física newtoniana a respeito do espaço, tempo e gravidade. Além disso, um dos fatores que não colaboravam com sua aceitação estava na dificuldade de realizar demonstrações experimentais.

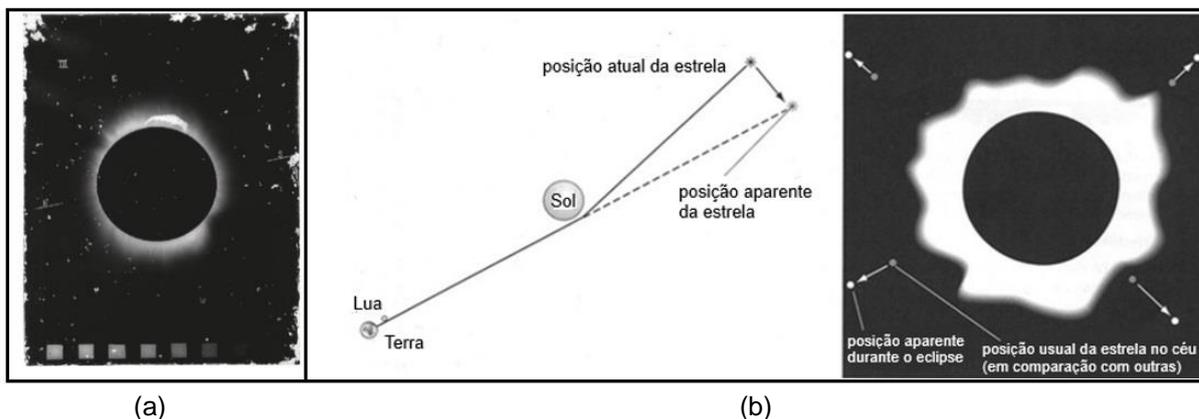
A teoria da relatividade geral apresentava uma nova compreensão para os efeitos da gravidade. Enquanto a teoria clássica de Newton atribuía à gravidade uma interação inversa ao quadrado da distância entre massas, Einstein propunha que a gravidade seria o efeito da deformação do espaço-tempo na presença de uma grande massa (o Sol, por exemplo). A luz, do ponto de vista clássico, por ser composta por partículas (fótons), que não possuem massa, percorreria sempre uma trajetória retilínea, não sendo influenciada pela ação da gravidade e no contexto da teoria da relatividade, a trajetória da luz acompanharia a deformação do espaço-tempo provocado pela presença de um astro massivo.

Em maio de 1919, duas expedições de cientistas ingleses se deslocaram, uma para a cidade de Sobral no Brasil, outra para a Ilha do Príncipe, na África Continental, para a realização de observações de um eclipse que permitiria visualizar estrelas durante os minutos que o Sol estivesse encoberto. O resultado obtido pela expedição que estava na África foi comprometido devido ao céu estar nublado. A equipe que

<https://img.estadao.com.br/thumbs/640/resources/jpg/2/7/1559067116972.jpg>. Acesso em 13/04/2022. A tradução possui a ortografia da época.

esteve presente em Sobral, no dia 29 de maio, conseguiu fotografar o eclipse e, conseqüentemente, várias estrelas em torno do Sol (Figura 4). Análises posteriores mostraram que as posições das estrelas nas fotos apresentavam desvios de suas reais posições. Os cálculos do desvio sofrido na trajetória da luz estavam de acordo com as estimativas da teoria da relatividade geral de Einstein.

Figura 4 – (a) Foto do eclipse de Sobral em 1919. (b) Esquema do desvio sofrido pela luz nas proximidades do Sol.



(a) <https://www.scielo.br/j/hcsm/a/3cQFXzYr5Fs8V7yKMVtzgQc/?lang=pt#ModalFig04>
(b) <https://www.scielo.br/j/rbef/a/7xnCndqcq78pSNZzpbkvfRr/?lang=pt#ModalFig1> (créditos: Arthur Eddington). Tradução do autor. Acesso em 07/04/2022.

Atividades de fechamento da aula

Para a primeira aula não será apresentada nenhuma atividade, pois os alunos já preencheram o questionário para avaliação formativa inicial. Sugere-se que todos assistam ao vídeo 1 da lista de materiais complementares.

Materiais complementares

Os materiais complementares, disponíveis em cada unidade didática, têm por objetivo ser uma fonte de pesquisas complementar para professores e alunos. São textos e vídeos referentes a cada assunto abordado durante as aulas. O fato das várias indicações se justificam por apresentar mais de uma forma de se tratar os temas, como também, uma garantia caso algum *link* não esteja mais disponível para acesso.

- VÍDEO 1 – “Eclipse de Sobral: O dia em que o Brasil ajudou a confirmar a teoria da relatividade de Einstein” - YouTube. Duração: 9min26s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>>. Acesso em: 31/05/2022.

- VÍDEO 2 – “5 Coisas sobre a Teoria da Relatividade - 100 anos de Sobral” - YouTube. Duração: 15min39s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>>. Acesso em: 02/06/2022.

- TEXTO 1 – “O eclipse de Sobral: como a Teoria da Relatividade foi comprovada no Ceará” – Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/o-eclipse-de-sobral-como-a-teoria-da-relatividade-foi-comprovada-no-ceara/>>. Acesso em 01/06/2022.

- TEXTO 2 – “O episódio histórico do centenário do eclipse de Sobral e suas implicações para o Ensino de Física por meio da divulgação científica” – Disponível em: <<https://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/educarmais/article/view/1800/1477>>. Acesso em 02/06/2022.

Referências

BRENNAN, Richard P. **Gigantes da Física**: uma história moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed.: 2003.

PIATTELLA, Oliver. F. Introdução à relatividade geral. **Cadernos de Astronomia**, Vitória, v. 1, n. 1, p. 30–39, 2020. DOI: 10.47083/Cad.Astro.v1n1.30827. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrofisica/article/view/30827>. Acesso em: 2 maio de 2023.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 2

ELETROMAGNETISMO X MECÂNICA CLÁSSICA

Papel do professor

Instigar a reflexão dos alunos aos conceitos de repouso, movimento e movimento relativo, segundo a teoria da mecânica clássica.

Apresentar o problema gerado pela teoria eletromagnética em relação à teoria da mecânica clássica no final do século XIX, de acordo com as referências de Menezes (2005).

O que se espera

Após a aula, que os alunos tenham clareza em relação aos conceitos sobre referencial, movimento, velocidade e que entendam de forma satisfatória o conceito de absoluto e relativo em um movimento e realizem operações matemáticas envolvendo as transformações de Galileu.

Encaminhamento: materiais e estratégias

Atividade 1 – Realiza-se um breve resgate da primeira aula e na sequência é apresentado o tema da segunda aula.

Atividade 2 – Leitura individual da HQ referente a segunda aula.

Atividade 3 – Questionamento e discussão sobre o que os alunos entenderam, o que foi novidade e o que ainda é dúvida após a leitura.

Atividade 4 – Leitura coletiva do texto de apoio para os alunos seguido de comentários.

Atividade 5 – Pesquisa na *internet* por meio do *smartphone* sobre o significado das palavras relativo, absoluto e referencial.

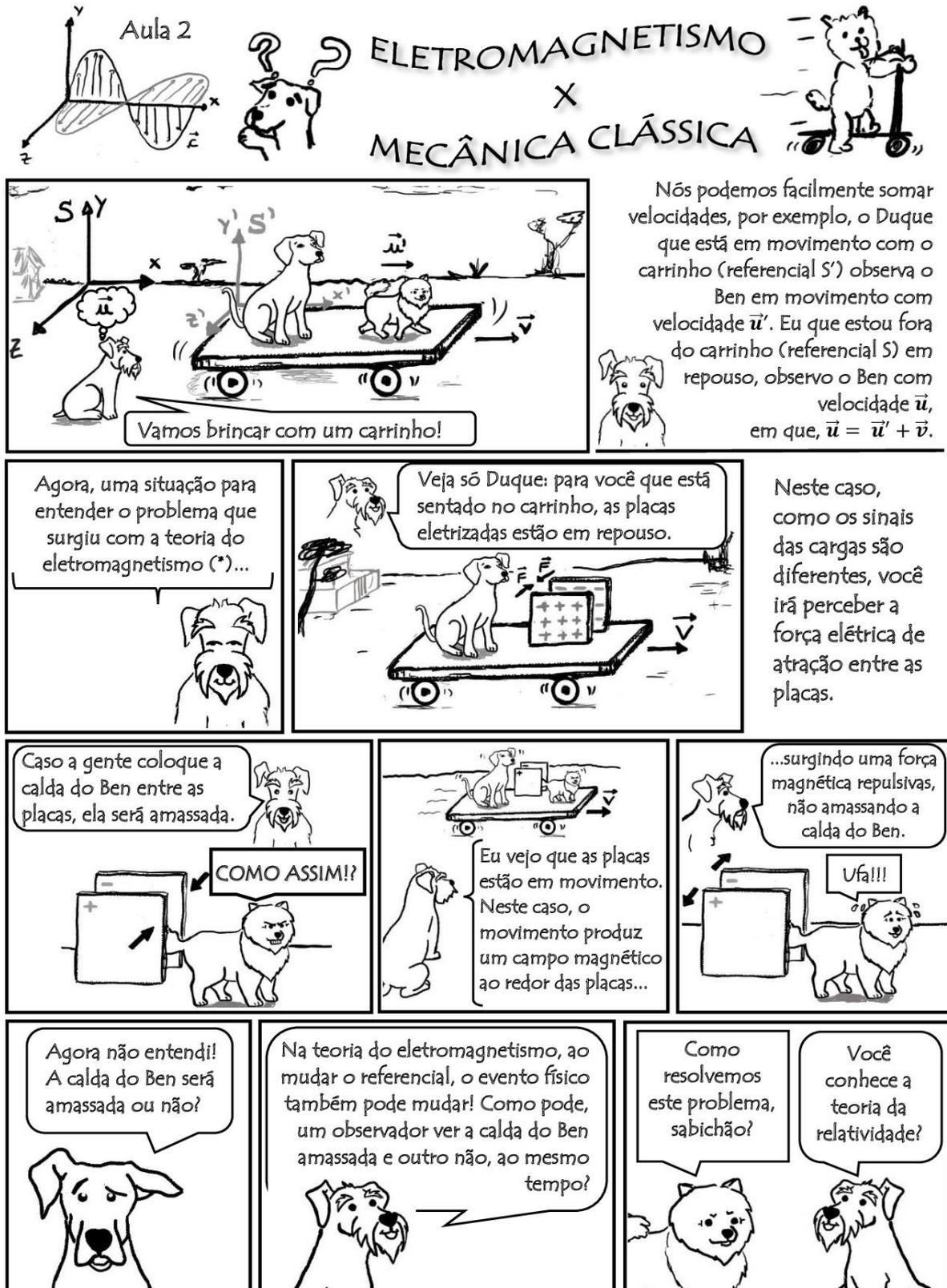
Atividade 6 – Resolução de exercícios envolvendo as transformações de Galileu.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 2.

Após revisar o conteúdo como proposto na Atividade 1, passa-se na sequência a leitura individual da segunda página da HQ (Figura 5). O seu conteúdo é importante, pois nele apresenta-se os aspectos físicos da teoria que previa a velocidade relativa e repouso entre corpos na mecânica newtoniana e o que ocorre com o advento do eletromagnetismo. Essa análise é importante para introduzir a relatividade restrita.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 2 (Figura 5)

Figura 5 – Segunda página da HQ – Aula 2: eletromagnetismo x mecânica clássica.



Fonte: o autor.

(*) Adaptação do autor, da exemplificação feita por Luis Carlos de Menezes em forma de texto, no livro "A matéria, uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento física" (Editora Livraria da Física, 2005, p. 120).

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 2

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após leitura.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: Referencial e movimento

Texto para os alunos: Referencial e movimento

Um evento físico é algo que pode ser analisado e mensurado por suas informações de espaço e tempo. A análise pode ser realizada por observadores que se encontram em referenciais distintos, ou seja, possuem pontos de vista diferentes, sem, entretanto, mudar o evento.

Por referenciais inerciais definimos os sistemas de coordenadas que estão em repouso ou em movimento em linha reta com velocidade constante, um em relação ao outro.

A mecânica newtoniana utiliza um conjunto de equações denominadas transformações de Galileu para encontrar os valores das grandezas físicas em referenciais inerciais distintos. Considerando dois referenciais espaciais cartesianos (x, y e z) e a temporal (t), um S em repouso e outro S' com velocidade constante em relação ao primeiro, o movimento apenas na coordenada x pode ser descrito da seguinte maneira:

$$x' = x - v \cdot t; \quad (2.1a)$$

$$y' = y; \quad (2.1b)$$

$$z' = z; \quad (2.1c)$$

$$t' = t, \quad (2.1d)$$

como ilustrado no primeiro quadro da página da HQ da Aula 2.

Da mesma forma, é possível uma transformação entre os valores das velocidades relativas para observadores em ambos os referenciais:

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v} \quad (2.2a)$$

ou,

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}. \quad (2.2b)$$

Todo evento físico é analisado e entendido a partir de referenciais que se adotam para mensurar suas variáveis. Ao estudar o movimento dos corpos deve-se ter em

mente as noções de espaço, tempo e a massa do objeto que se move. Da mesma forma, o evento físico observado deve manter uma coerência para referenciais diferentes. Não se pode mudar o evento físico em si, apenas pelo fato de ser analisado por outro referencial.

A teoria do eletromagnetismo de Maxwell, aliada aos resultados experimentais de Michelson e Morley, mostrava que a velocidade da luz não seguia a regras da física newtoniana. O valor da velocidade da luz se mantém constante para todos os observadores, em todos os referenciais, independentemente do movimento da fonte, podendo acontecer que um evento físico seja percebido de formas diferentes em referenciais também diferentes.

Assim, a teoria da relatividade proposta por Einstein apresenta uma solução para os conflitos entre a teoria newtoniana e o eletromagnetismo. O impasse entre a calda do Ben ser ou não amassada, é retomado na Figura 6, um quadrinho extra.

Figura 6 – Quadrinho extra sobre o impasse da calda do Ben ser amassada ou não, apresentado na HQ da Aula 2.



Fonte: o autor. (*) Na unidade didática 4, aguarde as cenas dos próximos capítulos.

Atividade 5 – Fechamento da aula: pesquisa a ser realizada por meio de *smartphone* e resoluções de questões

Chegou o momento de realizarmos algumas atividades para testarmos os conhecimentos adquiridos.

1) Realize uma pesquisa *online* sobre o significado das seguintes palavras:

- **Absoluto:** Que subsiste por si próprio; independente, autônomo; que não tem limites ou que não sofre restrição; ilimitado, irrestrito; que não se submete a condição; incondicional³⁰.

- **Relativo:** Que depende de certas condições; que depende de outro; que não pode ser afirmado sem reserva; que não é absoluto.

- **Referencial:** que contém referência; que constitui ou é utilizado como referência; (fis.): Diz-se de ou sistema de coordenadas espaciais e temporais, pelo qual é possível realizar a observação de fenômenos físicos, assim como sua descrição e a formulação de suas leis.

2) A velocidade de um objeto em movimento pode apresentar valores distintos para observadores diferentes. O que determina essa diferença de velocidade para os vários observadores?

A utilização de referenciais diferentes.

3) No primeiro quadro da historinha de hoje, considere a velocidade do Ben observada pelo Bob com o módulo de 4 m/s, ao mesmo tempo em que o Duque observa o Ben com velocidade 2,5 m/s. Qual será a velocidade do carrinho?

u' = velocidade do Ben, observada pelo Duque = 2,5 m/s

u = velocidade do Bem, observada no referencial do Bob = 4 m/s

v = velocidade do carrinho = ?

Utilizando-se da equação 2.2b, temos:

$$u = u' + v$$

$$v = u - u'$$

$$v = 4 - 2,5$$

$$v = 1,5 \frac{m}{s}$$

Materiais complementares

- TEXTO 1 – “O Conflito com a Mecânica Clássica” (livro digital) – Disponível em: <<https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504254>>. Acesso em: 19/07/2022.

- TEXTO 2 – “Introdução a Teoria da Relatividade” - Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4394955/mod_resource/content/0/Intro-Relatividade_SRM__EFC-2015_v3.pdf>. Acesso em: 19/07/2022.

Referências

³⁰ Escritos em azul, o significado encontrado na versão online do dicionário Michaelis, disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/>

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Ótica e Física Moderna**. v. 4, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995.

MENEZES, Luiz Carlos de. **A Matéria uma aventura do espírito**: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. 1 ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4**: ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 3

OS POSTULADOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Papel do professor

Apresentar e discutir com os alunos os postulados da teoria da relatividade restrita como uma solução para as observações quanto a constância da velocidade da luz, independentemente do referencial do observador.

Estimular a imaginação dos alunos para mudança de paradigma quando ao que é absoluto e relativo no estudo de movimentos.

O que se espera

Que o aluno compreenda que a velocidade da luz é apresentada na teoria da relatividade como uma grandeza constante, ou seja, absoluta na natureza e que não é possível realizar adição ou subtração de seu valor, como apresentado na equação 2.2a e 2.2b.

Encaminhamento: materiais e estratégias

Atividade 1 – Realizar um breve resgate do assunto tratado durante a Aula 2.

Atividade 2 – Abordar junto aos alunos os esforços dos cientistas no final do século XIX em descobrir o referencial privilegiado para o qual a velocidade da luz (onda eletromagnética) tivesse o valor proposto na teoria do eletromagnetismo de Maxwell. A não confirmação experimental da existência do éter vai culminar nos postulados da relatividade restrita.

Atividade 3 – Leitura individual da HQ referente a Aula 3, apresentada na Figura 7.

Atividade 4 – Breve partilha com os alunos sobre os aspectos que mais chamaram a atenção ou não foram bem compreendidos. Se necessário, retomar os conhecimentos prévios para fixação dos termos velocidade relativa, absoluta e constante.

Atividade 5 – Realizar a leitura conjunta e comentários do texto de apoio para os alunos.

Atividade 6 – Realizar pesquisa *online* (utilizando *smartphone*) do significado da palavra postulado e uso do simulador *Physics at School*, sobre o experimento de Michelson e Morley.

Atividade 7 – Assistir o vídeo proposto, resumindo a teoria da relatividade restrita.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 3.

Após a realização da Atividade 1 (relembrar o assunto da aula anterior), é abordado forma expositiva e dialogal pelo professor (Atividade 2) os esforços em provar experimentalmente a existência do éter, referencial no qual o valor da velocidade da luz é válido.

Para essa abordagem, frisar que, utilizando métodos experimentais distintos, os esforços de cientistas como Fizeau (1859), Babinet (1862), Ångström (1864), Mascart (1872), e com maior repercussão, Michelson e Morley (1887) (MARTINS, 2015), tentaram detectar o movimento da Terra através do éter, observando variações na velocidade da luz. Como nenhuma das tentativas detectou variações na velocidade da luz, algo não esperado, surgem tentativas de explicações, o que nos levam aos postulados da Teoria da Relatividade Restrita. E sem dúvida frisar sobre a participação de Maxwell com a sua teoria do eletromagnetismo nesta aventura científica, o que levou Einstein a propor tais postulados é o que trata a próxima HQ.

Atividade 3 – Leitura da HQ – Aula 3 (Figura 7)

Figura 7 – Terceira página da HQ – Aula 3: os postulados da Teoria da Relatividade Restrita.



Fonte: o autor.

Atividade 4 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 3

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após leitura.

Atividade 5 – Leitura do material de apoio: A velocidade da luz

Texto para os alunos: A velocidade da luz

A grande maioria dos cientistas, no final do século XIX, acreditavam ser necessária a existência do éter no espaço, como o referencial privilegiado em que a luz teria seu valor $c = 300.000.000$ m/s, conforme o previsto na teoria eletromagnética proposta por Maxwell. Acreditava-se também, na possibilidade de medir a velocidade da Terra em relação ao éter, somando velocidades, conforme a física clássica/transformações de Galileu, equações (2.1a) e (2.1b).

O segundo quadrinho central da HQ menciona que várias tentativas de se provar a existência do éter foram realizadas. A mais famosa consiste no experimento de Michelson e Morley, em 1887, por meio de um aparato experimental denominado interferômetro. O experimento consiste em um feixe de luz dividido em outros dois que percorrem direções perpendiculares. Uma das direções seria coincidente ao movimento de translação da Terra; a outra direção, como já dito, perpendicular a esse movimento. Após percorrerem distâncias iguais (os braços do interferômetro), os feixes separados incidem em espelhos, refletindo e se recombinado novamente. O feixe que está na mesma direção do movimento da Terra sofreria o efeito contrário do vento do éter, reduzindo sua velocidade. A menor velocidade provocaria uma diferença do tempo de propagação desse feixe em relação ao outro, que por sua vez seria percebida pelo interferômetro.

Apesar da precisão do aparelho, não foram encontradas evidências da existência do éter. Outra informação importante realizada foi a constância da velocidade da luz, independentemente da orientação do aparelho durante a realização das medidas.

Com base nos resultados negativos encontrados quanto ao éter, Einstein rompe definitivamente com a ideia de sua existência, ao mesmo tempo que propõem os dois postulados da teoria da relatividade restrita.

1.º postulado: para todos os referenciais inerciais, as leis da Física serão sempre as mesmas.

2.º postulado: a velocidade da luz é constante para qualquer referencial inercial.

O segundo postulado apresenta a luz com uma velocidade limite c , e, ao mesmo tempo, como uma constante da natureza. Independentemente de quem estiver

observando a fonte de luz em repouso, em seu referencial ou em movimento em um referencial, com velocidade constante, o valor de $c = 300.000.000 \text{ m/s}$, ela permanecerá inalterada, fato ilustrado no primeiro quadrinho central da HQ.

Atividade 6 – Fechamento da aula: pesquisa a ser realizada por meio de *smartphone* e utilização do simulador *Physics at school* para o experimento de Michelson e Morley

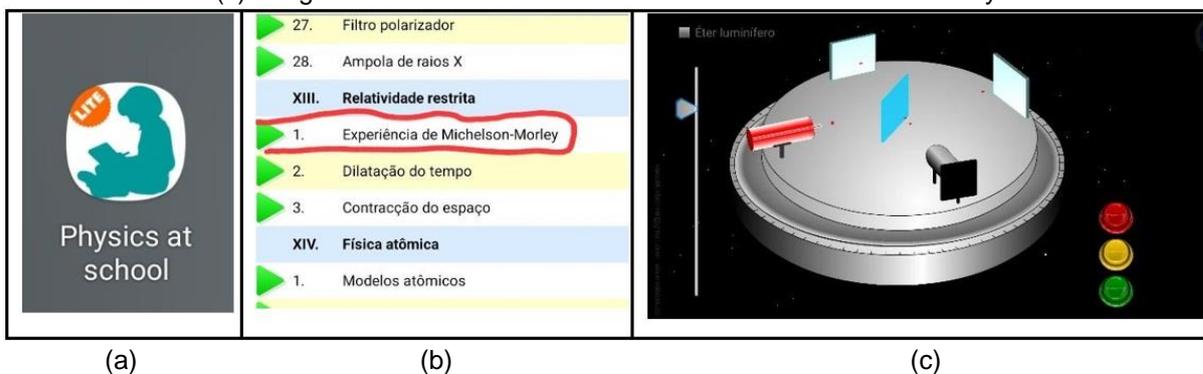
Para o fechamento da aula, foram propostas as seguintes questões:

1) Primeiramente, pesquise o significado da palavra **Postulado**.

Proposição não demonstrada e não evidente, que é considerada ponto de partida de um sistema teórico; princípio admitido.

2) Utilizaremos o aplicativo de *Physics at school* instalado no *smartphone*, para analisar os resultados do experimento de Michelson e Morley (Figura 8).

Figura 8 – Imagens do aplicativo *Physics at school*. (a) Ícone do aplicativo; (b) Seleção da simulação; (c) Imagem do simulador do interferômetro de Michelson e Morley.



Fonte: <https://www.vascak.cz/?id=1&language=pt#kapitola12>. Acesso em 15/07/2022.

Na Figura 8c visualizam-se três botões de comando (vermelho = parar, amarelo = pausar e verde = iniciar). É possível visualizar uma barra para rotação do aparato experimental em relação a direção do movimento e por fim, uma opção de realização da simulação com ou sem o éter luminífero. A finalidade da simulação é verificar se há variações na figura de interferência com a mudança do meio e da orientação do interferômetro.

Um modelo de interferômetro foi utilizado para demonstrar experimentalmente a existência de ondas gravitacionais. Como um objeto massivo é capaz de produzir

deformação na estrutura espaço-tempo, também poderia produzir ondulações quando em movimento. No entanto a sua comprovação ocorreu em 2015 por meio do LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*³¹), em Washington e na Lousiana, que detectou os resultados da colisão de buracos negros. (NASCIMENTO, CUZINATTO. 2022, p. 2).

Atividade 7 – Assistir um vídeo sobre o assunto da terceira página da HQ

Para conclusão da aula, os alunos devem assistir ao vídeo que trata da novidade da teoria da relatividade em considerar o espaço-tempo como grandeza relativa, enquanto a velocidade da luz se mostra como grandeza absoluta. Após o vídeo, faz-se um momento de comentários com a turma.

VÍDEO: *O Espaço-Tempo Explicado*.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kJ5xNaSleTI>>.

Duração: 11min58s.

Algumas informações do vídeo serão destacadas e tratadas na próxima aula: a contração do espaço e a dilatação do tempo.

Caso não haja compreensão dos(as) alunos(as) sobre as franjas de interferência, é possível a realização de um experimento simples, utilizando um fio de cabelo e uma ponteira *laser*. O trabalho de Oliveira³² (2016), para a conclusão do Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), neste mesmo polo, apresenta com detalhes o experimento com o fio de cabelo e a ponteira *laser*, mesmo que para outro fim, diferente do descrito no presente trabalho.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – *“Introdução experiência de Michelson-Morley - A relatividade especial - Física - Khan Academy”* - YouTube. Duração: 8min36s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bv2ataBdQ78>>. Acesso em: 07/07/2022.

- TEXTO 1 – *“O Experimento de Michelson-Morley”* – Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/o-experimento-de-michelson-morley/>>. Acesso em: 05/06/2022.

³¹ Observatório de ondas gravitacionais com interferômetro a laser.

³² Disponível em: <http://www.dfi.uem.br/dissertacao/mnpef/uem.php>.

Referências

BRENNAN, Richard P. **Gigantes da Física**: uma história moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed.: 2003.

MARTINS, Roberto de Andrade. **A origem histórica da relatividade especial**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

NASCIMENTO, Nicolas. L. N. S.; CUZINATTO, Rodrigo. R.. Ondas gravitacionais de buracos negros coalescentes: um estudo quantitativo a partir de física básica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p. e20220004, 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0004>>. Acesso em 16/04/2023.

MENEZES, Luis Carlos de. **A matéria uma aventura do espírito**: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005).

UNIDADE DIDÁTICA 4

DILATAÇÃO DO TEMPO E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Papel do professor

A partir da mudança entre as grandezas físicas consideradas relativas e absolutas a partir dos postulados de Einstein, despertar o interesse e o questionamento dos alunos sobre o comportamento do espaço-tempo na teoria da relatividade restrita.

Mostrar para os alunos que o conceito de dilatação temporal está presente no funcionamento do aparelho de GPS.

O que se espera

O aluno deverá terminar a aula entendendo a dilatação temporal e a contração do espaço como uma realidade da natureza, mesmo contrariando nosso senso comum.

Entenda que o aparelho/aplicativo de GPS só pode indicar a posição com ótima precisão caso aplique as correções previstas na teoria da relatividade.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – Inicia-se a aula com uma breve revisão sobre os postulados da teoria da relatividade restrita.

Atividade 2 – Indaga-se os alunos sobre a seguinte questão:

Uma vez que a teoria da relatividade restrita prevê que a velocidade da luz tenha sempre o mesmo valor para todo observador, em referenciais inerciais distintos, o que você espera que aconteça com os valores do tempo e do espaço?

Estimular para que as repostas não se limitem em “sofram mudança” ou “sejam relativas”.

Atividade 3 – Leitura individual da HQ (Figura 9) proposta para a aula.

Atividade 4 – Reserva-se um momento para ouvir os alunos sobre que chamou a atenção durante a leitura, as descobertas e dúvidas.

Atividade 5 – Realiza-se a leitura coletiva do texto para o aluno (Dilatação do tempo e contração do espaço), reservando um tempo ao final da leitura para conversa com os alunos. Fazer a leitura com calma procurando esclarecer todos os aspectos.

Atividade 6 – Assistir, na sequência, o vídeo “GPS, como funciona?”, objetivando uma aplicação cotidiana da teoria da relatividade, especificamente de um aparelho/aplicativo de GPS.

Atividade 7 – Utilização de simulador *online* sobre a dilatação do tempo, assim como uma calculadora, também *online*, para obtenção do resultado da dilatação temporal.

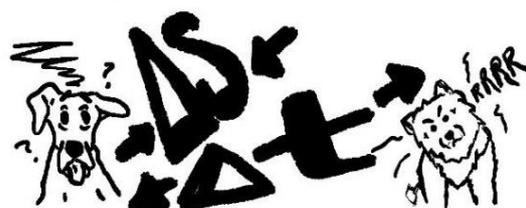
Atividade 8 – Desafia-se os alunos a realizarem um desenho, mesmo que simples, representando os efeitos da dilatação temporal e da contração do espaço. Pode ser proposto como atividade domiciliar.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 4.

Após ter realizado as Atividades 1 e 2, inicia-se a Atividade 3 que consiste na leitura da quarta página da HQ. O seu conteúdo levará a compreender o que ocorrerá com a calda do Ben, se ela será prensada pelas placas ou não. Além disso, levará os alunos a compreender como funciona um GPS, sendo essa uma das aplicações da teoria da relatividade que está presente no cotidiano do público em geral.

Atividade 3 – Leitura da HQ – Aula 4 (Figura 9)

Figura 9 – Quarta página da HQ – Aula 4: dilatação do tempo e contração do espaço.



Aula 4 DILATAÇÃO DO TEMPO E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO



Bob, o que muda com os postulados de Einstein?

Vamos começar pela física clássica.

A ideia mais simples que podemos ter sobre velocidade é a divisão entre um deslocamento e o tempo que foi gasto.

$$v = \frac{d}{t}$$

Duas pessoas podem medir valores diferentes de velocidades em referenciais diferentes. Igual na brincadeira com o carrinho que fizemos. Neste caso, a velocidade é relativa.

Para mim você está enrolando, já sabemos de tudo isso.

Calma... Outra coisa importante: independente do observador, 1 metro e 1 segundo é sempre igual para todos, ou seja, são absolutos.

Temos então o problema: para a velocidade da luz ser constante, ou seja, absoluta, em todos os referenciais inerciais, o espaço e o tempo devem ser relativos.

Não estou acreditando no que estou ouvindo!

Para velocidades próximas a da luz temos fenômenos que vão contra nosso senso comum e são chamados de dilatação do tempo e contração do espaço.

Tudo papo furado. Nem tem como provar isso.

Tem sim. Inclusive nós utilizamos a relatividade com frequência no aparelho de GPS.

É sério o que você está falando? O tempo demora mais para passar e o tamanho das coisas diminuem?

Fonte: o autor.

Atividade 4 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 4

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após leitura.

Atividade 5 – Leitura do material de apoio: dilatação do tempo e contração do espaço

Texto para os alunos: Dilatação do tempo e contração do espaço

A velocidade é uma grandeza física que relaciona o tempo necessário para que um objeto saia de uma posição e chegue a outra, realizando um deslocamento. Na mecânica clássica de Newton, é possível que observadores em referenciais inerciais distintos verifiquem valores diferentes para a velocidade do objeto em movimento. A relação dentre os valores encontrados se dá por meio das transformações de Galileu (equações 2.1a – 2.1b).

O segundo postulado da teoria da relatividade propõe que a velocidade da luz é sempre igual para qualquer referencial inercial, ou seja, seu valor é absoluto e, para que isso se torne possível, o espaço e o tempo devem ser relativos. Tem-se assim, os efeitos da dilatação do tempo e a contração do espaço. Um relógio se movendo próximo a velocidade da luz marcaria o tempo lentamente quando comparado a outro em repouso. Já uma régua teria suas dimensões comprimidas na mesma situação.

A dilatação do tempo e a contração do espaço são os aspectos que mais desafiam o senso comum quando se trata da teoria da relatividade.

Consideram-se dois observadores, O_1 em um referencial R em repouso e outro, O_2 em repouso num referencial R' , um trem por exemplo (Einstein utilizava muitos trens como exemplos), com velocidade constante v muito grande, próxima a velocidade da luz (v aproximadamente igual a c). Cada observador medirá o tempo de forma diferente em seu referencial quando comparados, sendo que o observador em movimento relativo observará o tempo passando mais devagar. A diferença entre os tempos medidos será dada pela expressão:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' \quad (2.3)$$

em que γ (letra grega gama) é chamado fator de Lorentz, dado por:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2.4)$$

Vamos considerar, agora, que no trem haja uma barra em repouso e com seu comprimento na direção do movimento do trem. Cada observador perceberá a barra com um comprimento diferente, sendo menor para o observador em repouso. A relação entre os diferentes comprimentos é dada pela expressão:

$$L = \frac{L'}{\gamma}. \quad (2.5)$$

O comprimento L' é chamado de comprimento próprio e consiste no tamanho percebido pelo observador em repouso relativo à barra.

Mesmo contrariando o senso comum, o efeito da dilatação do tempo é utilizado para que o aparelho/aplicativo de GPS (*Global Positioning System*) funcione adequadamente.

Atividade 6 – Apresentação do vídeo sobre o funcionamento do GPS

Sobre a aplicação da teoria da relatividade, mais especificamente sobre a dilatação do tempo, no funcionamento de GPS, assistir ao vídeo:

VÍDEO: *GPS, como funciona?*

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=qzOA41vA8Qw&t=6s>>.

Duração: 7min36s.

Visto a questão da dilatação temporal e contração espacial, é possível solucionar a dúvida sobre a calda do Ben, apresentada na página da HQ da Aula 2 e na Figura 6. A explicação está apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Resposta ao problema da calda do Ben na página da HQ da Aula 2.



Fonte: o autor.

Atividade 7 – Utilização de simulador *online*

Observar valores da dilatação do tempo por meio da equação 2.3, conferindo os valores com o simulador e a calculadora *online* da página Walter Fendt na *internet*:

- Simulador: <https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm>.
- Calculadora: <https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm>.

Na Figura 11a, percebe-se relógios em referenciais diferentes, em repouso e em movimento no interior da nave. Ao variar a velocidade da nave, verifica-se que o efeito da dilatação do tempo por meio das marcações dos relógios a medida que velocidade se aproxima da velocidade da luz. A Figura 11b por sua vez, apresenta a calculadora do *site*, onde é possível determinar os valores da dilatação do tempo para referenciais diferentes.

Figura 11 – *Print* de tela do simulador disponibilizado por Walter Fendt: (a) página inicial e (b) calculadora para calcular a dilatação temporal em referenciais diferentes.



Fontes: (a) = https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm
 (b) = https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm. Acesso em 15/07/2022.

Atividade 8 – Desafio aos alunos – atividade lúdica sobre o tema da aula

Desafio para os alunos: desenharem, mesmo que desenhos simples, algo representando a dilatação do tempo e a contração do espaço.

Materiais complementares

- TEXTO 1 – “Uma proposta de inserção da teoria da relatividade restrita no Ensino Médio via estudo do GPS”. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/ZR35rghCQxRq6rp9t7MsDvs/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 17/07/2022.

- VIDEO 1 – “Contração do espaço, dilatação do tempo e paradoxo dos gêmeos”. YouTube. Duração: 12min38s. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ody2_oNDuA>. Acesso em 20/07/2022.

- FILME – “Contato” – Plataformas de Streaming – Duração: 2h29min. 1997.

Referências

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade:** sobre a teoria da relatividade especial e geral (para leigos). Porto Alegre: L&PM, 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4:** ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna.** 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 5

O PARADOXO DOS GÊMEOS

Papel do professor

O professor deve apresentar e debater com os alunos sobre o experimento mental do paradoxo dos gêmeos. Se ele seria possível acontecer realmente e os resultados encontrados.

Por outro lado, na natureza, as partículas múons são uma forma de demonstrar que o efeito da dilatação do tempo é real, sendo considerada a explicação para a diferença entre o tempo de vida desta partícula em laboratório e ao entrarem na órbita da Terra.

O que se espera

Espera-se que os alunos entendam minimamente o paradoxo dos gêmeos, problema muito comum de se encontrar em livros ou referências sobre a teoria da relatividade.

Que além do GPS, fique claro aos alunos o comportamento das partículas denominadas múons, comprovando-se, na natureza, que a dilatação do tempo é real.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – Breve revisão da última aula e apresentação dos desenhos realizados na atividade domiciliar.

Atividade 2 – Leitura individual da HQ referente à Aula 5, abordando o paradoxo dos gêmeos, um dos experimentos mentais³³ mais conhecidos sobre a teoria da relatividade, abordando sua validade e suas possibilidades, uma vez que um dos referenciais está sob efeito de uma aceleração.

Atividade 3 – Ouvir os alunos sobre as informações que mais chamaram a atenção ou deixaram alguma dúvida.

Atividade 4 – Fazer a leitura coletiva do texto de apoio aos alunos em que é abordada a aplicação da dilatação do tempo para o entendimento do tempo de meia vida das partículas múons.

Atividade 5 – Essa aula será reservada para a resolução de alguns exercícios de vestibular sobre teoria da relatividade.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 5.

Após a revisão do conteúdo visto até o momento (Atividade 1), passa-se a Atividade 2 que é uma continuação sobre o assunto da dilatação temporal e contração espacial com um exemplo comumente citado da teoria da relatividade, denominado Paradoxo dos Gêmeos. Esta página da HQ ainda trata sobre a detecção de uma das partículas elementares, o múon. Mais uma comprovação experimental da validação da teoria da relatividade.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 5 (Figura 12)

³³ Experimento mental (*Gedanken* de Einstein): trata-se de um experimento não realizável na prática, porém, e idealizado mentalmente e constituído racionalmente. Os resultados são explorados pela imaginação, utilizando conceitos físicos e matemáticos.

Figura 12 – Quinta página da HQ – Aula 5: o paradoxo dos gêmeos.

Aula 5

O PARADOXO DOS GÊMEOS



Estou com dificuldade de entender essa história de contração do espaço e dilatação do tempo.

Tem uma situação que é utilizada para ajudar na compreensão da dilatação do tempo: o Paradoxo dos Gêmeos.

Vamos imaginar que o Ben tivesse um irmão gêmeo que fosse participar de uma missão espacial muito longe da Terra.

Sabia que iria sobrar pra mim.

A nave viaja com 90 % da velocidade da luz e demora 4 anos para concluir a viagem e retornar!

Utilizando a equação da dilatação temporal teremos que para o Ben, que ficou na Terra, passaram-se aproximadamente 9 anos.

Quer dizer que meu irmão estará 5 anos mais novo?

Nossa! Mas isso não acontece realmente?

Acontece sim. Inclusive é por meio da dilatação do tempo que os cientistas explicam como as partículas "múons" conseguem atingir a superfície da Terra, mesmo não apresentando tempo de vida média suficiente para isso.

O que é isso de múons

A física de partículas estuda as menores parcelas de matéria que formam tudo que conhecemos. As partículas que mais ouvimos falar são os prótons, nêutrons e elétrons. Os múons são outros exemplos assim como os fótons que são partículas de luz.

Pra variar, só enrolação... E o tal de "desvio da luz" das estrelas?

Fonte: o autor.

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 5

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e o professor, para apontarem os destaques, as descobertas e as dúvidas após a leitura.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: os múons

Texto para os alunos: Os múons³⁴

Um problema bastante comum em relatividade restrita é o que envolve o caso das partículas de altas energias, também chamados raios cósmicos. Na verdade, estamos interessados no que ocorre numa partícula que é um produto da interação dos raios cósmicos com a atmosfera da Terra. Os múons (cujo símbolo é a letra grega μ) são classificados em física de partículas como léptons, do grego leve. Temos como exemplo o elétron, o tau e os neutrinos.

Os raios cósmicos que geralmente são constituídos de prótons altamente energéticos, penetram na atmosfera da Terra e chocam-se com as moléculas de ar. Desse choque entre prótons energéticos e as moléculas da atmosfera, outras partículas se formam, como exemplos os píons e os káons. Múons que são partículas elementares e geralmente decaem em um elétron, um neutrino do múon (ν_μ) e num antineutrino do elétron (ν_{e^-}).

O tempo de vida de um múon é de aproximadamente $2,2 \mu s$ ³⁵. Tempo esse medido em seu referencial, ou seja, com o múon em um laboratório por exemplo, possuindo baixa velocidade.

Grande parte dos múons são criados a uma altitude de aproximadamente 15 km possuindo uma velocidade da ordem de $0,9998c$ (c = velocidade da luz no vácuo = $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Esta alta velocidade faz com que o seu tempo de vida no sistema de referencial do laboratório seja dilatado permitindo que a maioria alcance a superfície da Terra.

³⁴ Texto adaptado do original: “Múon Relativístico” – Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em: 05/06/2022.

³⁵ A letra grega μ (lê-se mú ou mi) também é utilizada para representar a notação científica 10^{-6} (micro), como nesse caso.

Pensando em um movimento com velocidade próxima à velocidade da luz para os múons, e calculando a distância percorrida ao entrarem na atmosfera usando a equação da velocidade $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, para $v = c$, isolando o deslocamento Δs :

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$

$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \cdot (2,2 \cdot 10^{-6}) \Delta s = 660m$$

Como é possível, então, que múons percorram apenas 660 m atmosfera adentro, e, ainda assim, sejam detectados próximos da superfície da Terra, que fica a aproximadamente 10.000 m mais distante do que o múon pode percorrer?

O tempo de vida do múon dilata-se em relação ao referencial do laboratório que está em Terra. Pode-se calcular essa dilatação aplicando as equações 2.3 e 2.4,

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

em que $\Delta t' = 2,2 \cdot 10^{-6} s$ (tempo próprio do múon) e $v = 0,9998c$. Assim:

$$\Delta t = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{0,9998^2 c^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = 110 \mu s.$$

Um resultado que faz com que o múon relativístico leve mais tempo para decair.

Uma sugestão é conferir o resultado utilizando a calculadora da página Walter Fendt (https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm), ilustrada na Figura 13.

Figura 13 – Print da tela da calculadora do site Walter Fendt.

Fonte: https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm. Acesso em: 15/01/2023.

Utilizando esse valor de vida e aplicando novamente,

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$

$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \cdot 110 \cdot 10^{-6}$$

$$\Delta s = 33.000m.$$

O que dá como resultado uma distância suficiente para ser detectada ao chegar próximo da superfície da Terra. Mostrando assim, que há uma dilatação do tempo em $107,8 \mu s$, possibilitando um deslocamento 50 vezes maior que o esperado em laboratório, comprovando, assim, o previsto pela teoria da relatividade.

Atividade 5 – Fechamento da aula: resolução de quatro questões de vestibulares

1 - (UEL PR) A Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, mas em perfeito acordo com os resultados experimentais. Ela é aplicada, entretanto, somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade, válida não só para referenciais inerciais, mas também para referencial não-inerciais.

Sobre os referenciais inerciais, consideram as seguintes afirmativas:

- I. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade constante.
- II. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade variável.
- III. Observadores em referenciais inerciais diferentes medem a mesma aceleração para o movimento de uma partícula.

Assinale a alternativa correta

- A) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
- B) Apenas a afirmativa II é verdadeira.
- C) As afirmativas I e II são verdadeiras.
- D) As afirmativas II e III são verdadeiras.
- E) As afirmativas I e III são verdadeiras. **(X)**

2 - (CFT-CE) Em 2005, Ano Mundial da Física, comemora-se o centenário da Teoria da Relatividade de Albert Einstein. Entre outras consequências esta teoria poria fim à ideia do éter, meio material necessário, semelhantemente ao som, através do qual a luz se propagava. O jargão popular “tudo é relativo” certamente não se deve a ele,

pois seus postulados estão fundamentados em algo absoluto: a velocidade da luz no vácuo – 300.000 km/s. Hoje sabe-se que:

- I. O som propaga-se no vácuo.
- II. A luz propaga-se no vácuo.
- III. A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite do universo.

É (são) verdadeira(s):

- A) todas
- B) nenhuma
- C) somente II
- D) II e III **(X)**
- E) somente III

3 - (UFRGS) De acordo com a Teoria da Relatividade quando objetos se movem através do espaço-tempo com velocidades da ordem da velocidade da luz, as medidas de espaço e tempo sofrem alterações. A expressão da contração espacial é dada por $L = L_0(1 - v^2/c^2)^{1/2}$, onde v é a velocidade relativa entre o objeto observado e o observador, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, L é o comprimento medido para o objeto em movimento, e L_0 é o comprimento medido para o objeto em repouso.

A distância Sol-Terra para um observador fixo na Terra é $L_0 = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. Para um nêutron com velocidade $v = 0,6 c$, essa distância é

- A) $1,2 \cdot 10^{10}$ m
- B) $7,5 \cdot 10^{10}$ m
- C) $1,0 \cdot 10^{11}$ m
- D) $1,2 \cdot 10^{11}$ m **(X)**
- E) $1,5 \cdot 10^{11}$ m

Utilizando as equações 2.4 e 2.5, tem-se:

$$L = \frac{L_0}{\gamma} \quad \text{ou} \quad L = L_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,6^2 \cdot c^2}{c^2}}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{1 - 0,36}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{0,64}$$

$$L = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 0,8$$

$$L = \mathbf{1,2 \cdot 10^{11} m}$$

4 - (UFPE) – Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante $0,8c$, em que c é a velocidade da luz no vácuo. No referencial da espaçonave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da Terra, em meses?

Utilizando as equações 2.3 e 2.4, tem-se:

$$\Delta t = \Delta t' \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou} \quad \Delta t = 12 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0,8^2 c^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = 12 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 0,64}}$$

$$\Delta t = \frac{12}{\sqrt{0,36}} \quad \Delta t = \mathbf{20 \text{ meses.}}$$

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “O Paradoxo dos Gêmeos Explicado” – YouTube. Duração 11min05s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=98OvQpOkOIU>>. Acesso em: 17/05/2022.

- VÍDEO 2 – “Raios Cósmicos, múon, Dilatação do Tempo e Contração do Espaço” – YouTube. Duração 9min53s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=QnLxDDyIEsM>>. Acesso em 17/07/2022.

- TEXTO 1 – “A vida do múon” – Disponível em: <<https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/2RelatividadeEspecial/2Avidadomuon/Avidadomuon.html>>. Acesso em: 12/06/2022.

- TEXTO 2 – “Medida da vida média do múon” – Disponível em: <<https://progp.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/wp-content/uploads/2018/04/Medida-da-vida-m%C3%A9dia-do-m%C3%BAon.pdf>>. Acesso em: 21/07/2022.

- TEXTO 3 – “Partículas elementares” – Disponível em: <<https://felipe9aes.wixsite.com/particulas/inicio>>. Acesso em: 21/07/2022.

Referências

BRAZ Júnior, Dulcídio. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

PEREIRA, Ricardo Vieira. **Múon relativístico**. Produto educacional do programa de Mestrado Nacional em Ensino de Física (MNPEF) da Sociedade Brasileira de Física (SBF) do polo da Universidade Federal do ABC (UFABC), 2019. Disponível em: <<https://progp.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em: 12/06/2022.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIDADE DIDÁTICA 6

O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA

Papel do professor

Espera-se que o professor possa envolver os estudantes no processo de ensino-aprendizagem, desenvolvendo junto a eles a segurança e a autonomia para exporem os conhecimentos adquiridos.

Que ele possa conduzir os alunos a vislumbrar a possibilidade de alcançar o conhecimento e conseguir reproduzi-lo.

Incentive o debate entre os alunos.

O que se espera

Ao término da aula, espera-se que os alunos sejam capazes de compreender a relação entre o efeito de um campo gravitacional e da aceleração, ou seja, o princípio da equivalência.

Que os alunos tenham argumentos para abordar aspectos relevantes da teoria da relatividade restrita e geral, conseguindo expressar por meio de exercícios de fixação. E sejam capazes de colaborar mutuamente, compartilhando os conhecimentos adquiridos.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – Inicia-se com um breve resumo da Aula 5 e, caso seja necessário, retomar os exercícios propostos.

Atividade 2 – Uma motivação para o tema dessa aula, seguida pela leitura individual da HQ.

Atividade 3 – Abre-se o debate como os estudantes com a finalidade de conferir o entendimento deles assim como suas dúvidas e questionamentos. Caso os alunos não interajam com questionamentos, cabe ao professor conduzir as questões aos alunos induzindo-os a reflexão.

Atividade 4 – Aprofunda-se o tema com a leitura do texto para os alunos sobre o princípio da equivalência. Novamente, cria-se um momento de partilha sobre as impressões dos alunos.

Atividade 5 – Assistir ao vídeo proposto com o tema da relatividade geral. Seguido pela realização da atividade proposta.

Atividade 6 – A última atividade dessa sexta aula visa incentivar os estudantes a expressarem os conhecimentos adquiridos até o momento por meio da elaboração de palavra cruzada ou cruzadinha, assim como uma autoanálise referente à maneira de como expressaram os conhecimentos adquiridos.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 6.

Após os alunos realizarem a Atividade 1, passa-se à Atividade 2, ou seja, explicar a motivação do conteúdo da sexta página da HQ (Figura 14), em que se introduz a Teoria da Relatividade Geral. Para essa abordagem, analisar o que diz o chamado Princípio da Equivalência, pois esse princípio é o que conduzirá a compreensão do motivo da luz se curvar e em quais condições.

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 6 (Figura 14)

Figura 14 – Sexta página da HQ – Aula 6: o Princípio da Equivalência.

Aula 6

O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA



Para entendermos a curvatura da luz próximo do Sol, vamos antes falar sobre a teoria da relatividade geral.

Não é tudo a mesma coisa?

Claro que não!

A física clássica descreve o movimento de um corpo conhecendo as forças que atuam sobre ele.

A gravidade é uma força, não é?

Para a física clássica sim.

Aí que entra o Einstein. Ele defendia que a gravidade não era uma força entre duas massas a certa distância, como previa a teoria clássica.

Mas qualquer objeto "cai" porque está sofrendo a ação da força da gravidade e fica acelerado.

Sim. E aí está a grande questão de Einstein: como relacionar a gravidade ao movimento com aceleração, sem falar de força.

Vamos usar a imaginação: caso o Ben esteja em uma nave espacial sem visão para fora da nave e bem afastada do planeta, sem a influência da gravidade.

Você estaria flutuando dentro da nave.

Se a nave começar a se mover cada vez mais rápida, ou seja, acelerada, o Ben sentirá uma força nas patinhas, chamada força inercial, semelhante a ação gravidade.

Sempre eu!!!

Parece legal.

Inclusive, se o Ben "deixar cair" algo, será semelhante ao que observa próximo da Terra.

Quer dizer que o efeito da aceleração é igual ao da gravidade e vice e versa?

Exatamente!!! E este é o princípio da equivalência.



Fonte: o autor.

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 6

Realiza-se um momento de partilha entre os alunos e professor, para apontarem os destaques, descobertas e dúvidas após a leitura.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: princípio da equivalência

Texto para os alunos: Princípio da equivalência³⁶

Se um observador está em pé sobre uma balança dentro de um elevador fechado, ao perceber que o ponteiro da balança começa a indicar um valor diferente para sua massa, duas explicações são possíveis.

- 1 – o elevador está em movimento com velocidade variável em módulo, ou
- 2 – o campo gravitacional local mudou.

Algo semelhante é sugerido no primeiro quadrinho da última tirinha da HQ.

Se o cabo do elevador arrebentou e ele entra em queda livre, a balança vai indicar zero, situação que chamamos de imponderabilidade³⁷. O observador e todos os objetos dentro do elevador parecem flutuar. Na HQ da sexta aula tal situação é ilustrada de forma semelhante no segundo quadrinho da terceira tirinha. Esse efeito de flutuação sugere gravidade zero, mas na verdade pode ser conseguido de duas formas:

- 1 – pela anulação do campo gravitacional, ou
- 2 – por um movimento do elevador com aceleração igual à gravidade em módulo.

De dentro do elevador, sem observar o que acontece lá fora, não há como saber o que de fato está acontecendo. A impossibilidade de decidir entre as duas explicações aceitáveis acima constitui basicamente o princípio da equivalência, que diz: Se um observador está dentro de um recinto fechado, sem ter como olhar para fora, não há como saber se o recinto está sob a ação de um campo gravitacional uniforme ou se está acelerado. Ou seja, a imponderabilidade.

³⁶ Texto extraído de: Braz Júnior, 2002, p. 29. Com modificações do autor.

³⁷ Imponderabilidade é o estado em que não se pode discernir se está sob a ação de um campo gravitacional ou em queda livre. Também é descrita como a sensação de ausência de compressão de apoio, resultante da ausência de força normal. (Wikipedia).

A dupla possibilidade entre a ação de um campo gravitacional ou de uma aceleração é denominado princípio da equivalência.

Atividade 5 – Compartilhar o vídeo “A relatividade geral explicada”, disponível no site: Ciência todo dia

Como forma de complementar os conhecimentos expostos até o momento, assistir ao vídeo indicado, seguido de momento de reflexão.

VÍDEO: *A relatividade geral explicada.*

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jYlr3G9yB8s>>.

Duração: 10min47s.

Atividades 6 – Fechamento da aula: elaboração de caça-palavras ou cruzadinha

A atividade dessa aula será desenvolvida pelos próprios alunos, organizados em pequenos grupos com 3 ou 4 alunos. Cada grupo desenvolve um caça-palavras ou uma cruzadinha, abordando o entendimento referente aos tópicos sobre relatividade estudados até agora.

Um grupo apresenta sua atividade para que o outro possa resolver. Ao término da atividade, os grupos trocam entre si opiniões sobre o que foi desenvolvido pelo outro grupo. Avaliação entre os pares, no caso, entre os grupos.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “RG05 - Princípio de equivalência” – YouTube – Duração: 20min44s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kSG4MqrWpFI>>. Acesso em: 17/07/2022.

- TEXTO 1 – “Teoria da relatividade geral” – Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/teoria-relatividade-geral.htm>>. Acesso em 23/07/2022.

- TEXTO 2 – “Princípio da equivalência” – Disponível em <<https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RG/node4PE.html#:~:text=na%20forma%20seguinte%3A-,Princ%C3%ADpio%20da%20Equival%C3%Aancia%20%5BEinstein%5D%20...,duas%20situa%C3%A7%C3%B5es%20por%20qualquer%20experi%C3%Aancia%22%20.>>>. Acesso em 11/07/2022.

Referências

BRAZ Júnior, Dulcideo. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade: sobre a teoria da relatividade especial e geral** (para leigos). Porto Alegre: L&PM, 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

UNIDADE DIDÁTICA 7

A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

Papel do professor

Cabe ao professor, no decorrer da aula, apresentar o efeito da curvatura do espaço-tempo na presença de um corpo altamente massivo.

Estimular a imaginação dos alunos para que compreendam como se dá a deformação do espaço-tempo na presença de um corpo com muita massa, a exemplo das estrelas. Para melhor entendimento sobre o que significa um corpo ter muita massa, normalmente ela é expressa em termos da massa do Sol, que é de aproximadamente $1,99 \cdot 10^{30}$ kg.

Discutir com os alunos a trajetória da luz no espaço-tempo curvo como uma explicação para as observações realizadas na cidade de Sobral em 1919.

Incentivar para que os alunos respondam o questionário final com tranquilidade e satisfação pelo caminho percorrido até aqui na aprendizagem de aspectos da teoria da relatividade.

O que se espera

Que os alunos sejam capazes de compreender como o princípio da equivalência conduz ao entendimento da curvatura do espaço-tempo, fazendo a relação entre o que foi apresentado durante a aula e a explicação da observação realizada durante o eclipse na cidade de Sobral – CE, em 1919.

Com base na abordagem dos temas referentes à teoria da relatividade, apresentados durante as aulas, que os alunos sejam capazes de responder o questionário avaliativo final, com tranquilidade e convicção.

Encaminhamentos: material e estratégia

Atividade 1 – O primeiro passo é que se retome o tema da aula anterior sobre o princípio da equivalência conduzindo a abordagem para o efeito da curvatura do espaço-tempo.

Atividade 2 – Após, realiza-se a leitura individual da HQ da Aula 7.

Atividade 3 – Comenta-se sobre o que se entendeu ou gerou dúvidas por parte dos alunos.

Atividade 4 – Numa próxima etapa da aula, é realizada a leitura coletiva e a discussão do texto para o aluno.

Atividade 5: Sugere-se assistir ao vídeo 1 (Como a gravidade deforma o tempo? Relatividade Geral), indicado nos materiais complementares.

Atividade 6 – Realizadas as devidas considerações sobre o tema da curvatura do espaço-tempo, retoma-se a problematização inicial, apresentado na primeira aula: a observação da luz de estrelas durante o eclipse observado em Sobral, em 1919.

Atividade 7 – Responde-se o questionário final para observar e quantificar a aprendizagem dos alunos.

Na sequência apresenta-se o desenvolvimento de cada atividade da Aula 7.

Chegamos ao fim de nossa jornada na HQ envolvendo a teoria da relatividade e usa primeira comprovação experimental, ainda mais envolvendo uma expedição ao Brasil para essa comprovação. Esse fato ocorreu há 104 anos e a teoria da relatividade continua sendo atual, como a sua aplicação no GPS, na detecção das ondas gravitacionais, já comentados anteriormente. Após trabalhar com os alunos a atividade 1, a proposta da atividade 2 é ler a última página da HQ (Figura 15).

Atividade 2 – Leitura da HQ – Aula 7 (Figura 15)

Figura 15 – Sétima página da HQ – Aula 7: a curvatura do espaço-tempo.

Aula 7

A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

Dentro da nave, sem ter visão de fora, não é possível definir se a nave está sobre a ação da gravidade ou acelerada.

Isso mesmo. Por isso o nome "princípio da equivalência".

Agora podemos falar sobre a curvatura da luz.

Opa! O "bicho vai pegar"!

Pensa comigo Ben: se uma pessoa está num elevador em queda livre com uma lanterna na mão. Como ela vê a trajetória da luz?

Vê, em linha reta! Batendo o tempo todo no mesmo lugar.

Exatamente. A pessoa e a lanterna estão no mesmo referencial.

E se o observador estivesse em um referencial externo ao elevador?

Vê! Neste caso, como o elevador está em queda acelerado e a luz bate o tempo todo no mesmo ponto do elevador. Quem está fora iria observar a luz numa trajetória curva.

Não estou entendendo nada!

Pelo princípio da equivalência, o mesmo efeito seria possível pela ação do campo gravitacional.

Deixar-me ver se acerto: Einstein concluiu que a gravidade poderia curvar a trajetória da luz!?

Isso mesmo!

Mas como seria possível curvar a trajetória da luz?

Einstein propôs que uma massa muito grande, causa deformação no espaço-tempo, da mesma forma que uma bola "pesada" deforma a superfície e um lençol esticado.

Na verdade, a luz estaria apenas acompanhando o espaço-tempo deformado.

Foi isto que os cientistas observaram no eclipse de Sobral?

Exatamente

FIM

Fonte: o autor.

Atividade 3 – Discussão sobre o conteúdo da HQ - Aula 7

Momento de discussão e partilha entre os alunos e professor sobre o conteúdo da última página da HQ, relacionada inicialmente como o conteúdo no recorte do jornal de Londres, apresentado na primeira página da HQ (Figura 3). Comenta-se sobre o que se entendeu ou gerou dúvidas por parte dos alunos.

Atividade 4 – Leitura do material de apoio: curvatura do espaço-tempo

*Texto para os alunos: Curvatura do espaço-tempo*³⁸

O princípio da equivalência torna-se contundente quando aplicado à luz. Imagine, por exemplo, um observador segurando uma lanterna dentro de um elevador. Supondo-se que o elevador despenque em queda livre e num certo momento da queda a lanterna é ligada. O Observador (O_2) dentro do elevador, cai com a lanterna e vê um raio de luz que segue em linha reta, cruza o elevador e bate na parede da frente, conforme ilustrado na parte central da HQ dessa aula, na figura a esquerda. Até aí, nada de mais.

Mas se outro observador externo (O_1), parado em relação ao chão, pudesse enxergar através das paredes do elevador, o que veria? Na figura central da HQ à direita, temos a visão desse observador.

Nota-se que para O_1 o raio de luz literalmente encurva! Neste caso, sabemos que a causa dessa curvatura é o movimento acelerado do elevador. Mas, pelo princípio da equivalência, o mesmo efeito poderia ser conseguido a partir de um campo gravitacional externo. Einstein concluiu, a partir desse raciocínio, que a gravidade deveria forçar a luz a fazer curva!

É a partir daí que surge a interpretação geométrica para os efeitos da gravidade. Podemos considerar que corpos com grande massa provocam uma curvatura no espaço-tempo ao seu redor. Dessa forma, mesmo a luz, caminhando supostamente em uma linha reta, deveria acompanhar a curvatura do espaço-tempo, como que sofrendo a ação atrativa da gravidade.

³⁸ Continuação do texto extraído de: Braz Júnior, 2002, p. 29. Com modificações do autor.

Segundo Einstein, corpos com grande massa, como estrelas, por exemplo, poderiam tirar a luz de sua suposta e previsível trajetória retilínea.

Mais uma vez surge a importante pergunta: como testar a teoria? Como vamos conseguir um corpo de massa estelar aqui na Terra? Impossível!

Novamente entra em cena a criatividade dos cientistas. Uma oportunidade importante para testar a teoria é um eclipse solar total. A ideia é fotografar as estrelas visualmente próximas ao Sol e que só aparecem quando o disco solar é encoberto pela Lua, no curto período em que o dia vira noite, na totalidade do eclipse. Numa outra época do ano, quando essa mesma constelação estiver visível à noite, sem a presença do Sol, uma segunda exposição fotográfica pode ser feita.

Nessa segunda foto, as posições das estrelas devem ser ligeiramente diferentes daquelas obtidas durante o eclipse, pois desta vez, sem o Sol, a luz chega até a máquina fotográfica em linha reta. Se conseguirmos medir essas mínimas diferenças nas posições das estrelas, então fica provado que na presença do Sol desvia, de fato, a luz! Genial, não?

Atividade 5 – Apresentar o vídeo sobre o princípio da equivalência e curvatura da luz

Sugere-se assistir ao vídeo 1, cujo *link* está disponível nos materiais complementares. O vídeo faz um resumo sobre o princípio da equivalência e a curvatura da luz.

Atividade 6 – Questionário avaliativo para os alunos responder e entregar

Os alunos responderão o questionário avaliativo final do Produto Educacional. As respostas esperadas estão em azul seguidas após cada questão.

1 – Desprezando a resistência do ar e considerando que uma bola de boliche e uma maçã são abandonadas da mesma altura, quem chega no chão primeiro?

Ambas chegam ao mesmo tempo.

2 – De acordo com a teoria da relatividade o que ocorre com o tamanho de um objeto, caso ele esteja em movimento com velocidade próxima a da luz?

Tem seu tamanho diminuído, contraído, para o observador em repouso.

3 – De acordo com a teoria da relatividade o que ocorre com a marcação do tempo de um objeto quando estiver em movimento com velocidade próxima a da luz?

O tempo é marcado lentamente, passa devagar, ou seja dilata, para o observador em repouso.

4 – O que define o limite entra a física clássica de Newton e a teoria da relatividade?

O objeto estar em movimento com velocidade muito alta, próxima a velocidade da luz.

5 – Qual a trajetória mais provável para o movimento de um feixe de luz.

Em linha reta, porém, acompanhando a curvatura do espaço-tempo.

6 – O que você sabe sobre Buraco Negro?

O efeito de deformação do espaço-tempo nas proximidades de um objeto com muita densidade de massa, produzindo um campo gravitacional de tamanha intensidade onde a velocidade de escape seja maior do que a velocidade da luz. Dessa forma, nem a luz consegue escapar da ação do campo gravitacional (daí o nome buraco negro).

7 – Qual o motivo de não percebermos os efeitos da teoria da relatividade em nosso cotidiano?

As velocidades que presenciamos são infinitamente menores que a velocidade da luz.

8 – Você é capaz de citar uma aplicação cotidiana da teoria da relatividade?

Aparelho/aplicativo de GPS.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “Como a gravidade deforma o tempo? Relatividade Geral” – YouTube – Duração: 17min37s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=56TJuxnWC-c&t=3s>>. Acesso em: 23/05/2022.

- VÍDEO 2 – “Relatividade Geral Explicada em 7 Níveis de Dificuldade” – YouTube. Duração: 6min53s. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=As-dDpwEnqU>>. Acesso em 25/03/2022.

- VÍDEO 3 – “Para finalmente entender a Teoria da Relatividade de Albert Einstein” – YouTube – Duração: 3min43s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=fwzzgJOLZkM&t=121s>>. Acesso em : 18/07/2022.

- VÍDEO 4 – “Relatividade geral: O ESPAÇO-TEMPO CURVO” – YouTube – Duração: 7min15s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=A7BiPY9vuQI>>. Acesso em: 19/07/2022.

- TEXTO 1 – “Porquê espaços-tempo curvos? Gravidade como curvatura do espaço-tempo”. Disponível em: <<https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RG/node8EspCurvos.html>>. Acesso em: 23/07/2022.

Referências

BRAZ Júnior, Dulcídio. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade: sobre a teoria da relatividade especial e geral** (para leigos). Porto Alegre: L&PM, 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

UNIDADE DIDÁTICA 8

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO QUESTIONÁRIO E AVALIAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Atividade 1 – O principal objetivo desta aula é realizar com os estudantes a devolutiva, quanto ao rendimento que obtiveram no questionário avaliativo final, realizado na aula anterior. Discutir sobre as possíveis respostas equivocadas e retomar tópicos importantes quando necessário.

Atividade 2 – Outra finalidade da aula é realizar uma avaliação da proposta apresentada para a abordagem do tema sobre tópicos da teoria da relatividade. Os alunos são convidados e motivados a responder as seguintes questões, de maneira livre e informal, para que as respostas correspondam à realidade da mudança no conhecimento individual de cada um.

1 – O professor demonstrou domínio do conteúdo e as explicações foram claras.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

2 – Os objetivos das aulas foram bem definidos, ficando bem claros aos alunos.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

3 – Os recursos metodológicos (quadrinhos, imagens, vídeos, simulações) ajudaram para uma melhor aprendizagem.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

4 – Por meios das aulas, os alunos conseguiram entender os aspectos básicos sobre a teoria da relatividade.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

5 – A abordagem do conteúdo sobre teoria da relatividade é importante para os alunos da educação básica, em especial, no ensino médio.

- A) concordo plenamente.
- B) concordo em partes.
- C) discordo em partes.
- D) discordo totalmente.
- E) não sei responder.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Produto Educacional objetivou o desenvolvimento de uma proposta de abordagem da curvatura do espaço-tempo da teoria da relatividade, partindo sempre de fatos, não necessariamente corriqueiros aos alunos e utilizando como ferramenta didática uma história em quadrinhos. Por meio do lúdico, buscou-se envolver os alunos despertando o interesse pelo assunto.

A cada unidade didática da SD, utilizou-se uma dinâmica de questionamentos visando conduzir os alunos à quebra de paradigmas entre a teoria clássica newtoniana e a teoria da relatividade, em analisar as variáveis envolvidas no estudo de um movimento e no entendimento da gravidade.

Procurou-se realizar a contextualização histórica que levou à teoria da relatividade e, uma vez que a SD foi sempre motivada por uma HQ, tornou-se fácil assimilar elementos da componente curricular de Arte na proposta. Mesmo não sendo prioridade no trabalho, foram apresentadas e realizadas operações matemáticas, ressaltando-se que o esperado pelos alunos era que eles expressassem a aprendizagem por meio de desenhos e atividades lúdicas, como cruzadinhas e caça-palavras.

Espera-se que este material contribua de alguma forma com os professores de física do Ensino Médio, quando trabalhado o tema da teoria da relatividade. Fica a critério de cada professor a melhor maneira de utilização do PE, podendo ser: a utilização na íntegra, optando-se por elementos da teoria da relatividade restrita ou geral, ou até mesmo, apenas a abordagem de aspectos históricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Denise Lino de. O que é (e como faz) sequência didática? **Entrepalavras**, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 322-334, maio 2013. ISSN 2237-6321. Disponível em: <<http://www.entrepalavras.ufc.br/revista/index.php/Revista/article/view/148/181>>. Acesso em: 20 mar. 2023.

AUSUBEL, David P.; NOVAK, Joseph D.; HANESIAN, Helen. **Psicologia Educacional**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Interamericana Ltda. 1980.

BERTOLINI, Nivaldo. **Uma abordagem da curvatura espaço-tempo da teoria da relatividade por meio de quadrinhos**. Dissertação de mestrado profissional do Programa de Pós-graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) do Departamento de Física (DFI) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), 2023. Disponível em: <<http://www.dfi.uem.br/dfimestrado/?q=node/57>>.

BRASIL. Ministério da Educação. **PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília, 2002. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em 12/09/2021.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/imagens/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf>. Acesso em 13/03/2022.

BRAZ Júnior, Dulcideo. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

DOLZ, Joaquim; NOVERRAZ, Michèle; SCHNEUWLY, Bernard. **SEQUÊNCIAS DIDÁTICAS PARA O ORAL E A ESCRITA: APRESENTAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO**. 2004. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5794503/mod_resource/content/1/DOLZ%3B%20NOVERRAZ%3B%20SCHNEUWLY.%20Sequ%C3%A7%C3%A3o%20de%20sequ%C3%Aancias%20did%C3%A1ticas%20para%20o%20oral%20e%20para%20a%20escrita%20apresenta%C3%A7%C3%A3o%20de%20um%20procedimento.pdf>. Acesso em 17/05/2023.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Ótica e Física Moderna**. v. 4, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995.

LOVETRO, José Alberto. Quadrinhos - a linguagem completa. **Comunicação & Educação, [S. l.]**, n. 2, p. 94-101, 1995. DOI: 10.11606/issn.2316-9125.v0i2p94-101. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/comueduc/article/view/36141>. Acesso em: 12 maio. 2023.

MARTINS, Roberto de Andrade. **A origem histórica da relatividade especial**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

MOREIRA, Marco Antonio; MASINI, Elcie F. Salzano. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Centauro, 2001.

MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias de aprendizagem**. 2 ed. ampl. São Paulo: E.P.U., 2014.

MENEZES, Luiz Carlos de. **A Matéria uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico**. 1 ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

NASCIMENTO, Nicolas. L. N. S.; CUZINATTO, Rodrigo. R.. Ondas gravitacionais de buracos negros coalescentes: um estudo quantitativo a partir de física básica. **Revista**

Brasileira de Ensino de Física, v. 44, p. e20220004, 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0004>>. Acesso em 16/04/2023.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

OLIVEIRA, Marina Aparecida Ferreira de. **Utilizando um fenômeno físico para medir o diâmetro de um fio de cabelo**. Orientador: Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Física, Programa de Pós-Graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, 2016. Disponível em: <<http://www.dfi.uem.br/dissertacao/mnpef/uem.php>>. Acesso em 15/08/2020.

PARANÁ. **Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Física**. Curitiba: SEED, 2008.

PARANÁ. **Referencial Curricular Para o Ensino Médio do Paraná**. Curitiba: SEED, 2021.

RIBEIRO, R. J., SILVA, S. de C. R. da., e KOSCIANSKI, A.. Organizadores prévios para aprendizagem significativa em física: o formato curta de animação. **Ensaio Pesquisa Em Educação Em Ciências (Belo Horizonte)**, 14 (Ens. Pesqui. Educ. Ciênc. (Belo Horizonte), 2012 14(3)). Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1983-21172012140311>>, acesso em 21/02/2023.

SANTOS, R. E. dos. Aplicações da História em Quadrinhos. **Comunicação & Educação, [S. l.]**, n. 22, p. 46-51, 2001. DOI: 10.11606/issn.2316-9125.v0i22p46-51. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/comueduc/article/view/36995>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

VERGUEIRO, Waldomiro. Uso das HQs no ensino. Em: **Como usar as histórias em quadrinhos na sala de aula**. VERGUEIRO, Waldomiro (org). 4 ed. São Paulo: Contexto, 2020. p. 7-29.

VILELA, Túlio. Os quadrinhos na aula de História. Em: **Como usar as histórias em quadrinhos na sala de aula**. VERGUEIRO, Waldomiro (org). 4 ed. São Paulo: Contexto, 2020. p. 105-129.

ZABALA, Antoni. **A prática educativa: como ensinar**. Tradução Ernani F. da F. Rosa. Porto Alegre: Artmed, 1998.

APÊNDICE I – Material do aluno

A finalidade deste Apêndice é oferecer uma apostila como material para que os alunos acompanhem as aulas. A intenção é que a cada aula os alunos recebam uma das páginas/aulas e realizem as atividades propostas. Ao término eles possuirão a história em quadrinhos completa, juntamente com todos os textos de apoios, atividades e sugestões de vídeos.

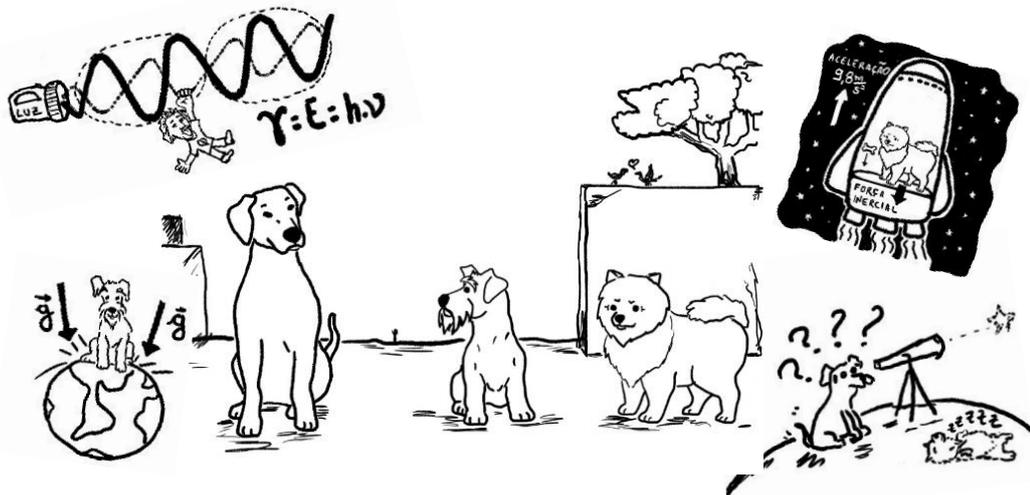
O material do aluno foi diagramado para ser impresso em frente e verso, para tanto, deixou-se de seguir as normas da ABNT.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ - DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO
DE FÍSICA - POLO 20

MATERIAL DO ALUNO

A CURVATURA ESPAÇO-TEMPO DA TEORIA DA RELATIVIDADE POR MEIO DE QUADRINHOS: VAMOS CONHECER?

Autores:
NIVALDO BERTOLINI
BRENO FERRAZ DE OLIVEIRA
HATSUMI MUKAI



APRESENTAÇÃO

Olá querido(a) estudante! Iremos realizar pelas próximas páginas um pequeno passeio buscando conhecer um pouco sobre a teoria da relatividade proposta por Albert Einstein. Para isso, teremos a companhia de três cachorrinhos com personalidades bem diferentes, que irão auxiliar em nossa aventura pelo conhecimento.



Duque: um Vira-lata grandão e simpático, amigo e muito curioso, que apesar de não conhecer muito de ciências, adora aprender coisas novas.

Ben: um Spitz Alemão (lulu da Pomerânia) impicante, ranheta e que adora questionar tudo. Apesar do gênio forte é um grande amigo e está sempre presente.



Bob: um Schnauzer muito carinhoso, amigo e que adora observar e aprender. Sempre partilha seus conhecimentos com os amigos e deseja que todos aprendam mais.

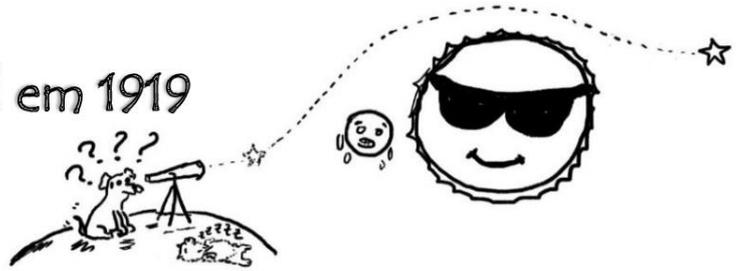
O desenho e a utilização das caricaturas das pessoas foram autorizadas por elas.

Qualquer semelhança de nomes e situações foi mera coincidência.

Aproveitem o passeio pelo mundo fascinante da teoria da relatividade, divirtam-se e que ao final, espero que consigam compreender as bases desta desafiadora teoria.



O eclipse de Sobral em 1919



O ECLIPSE SOLAR DE MAIO E OS SCIENTISTAS — Londres, 8 (H.) — Os resultados obtidos pela missão que foi ao Ceará e à Ilha do Príncipe observar o eclipse solar de Maio último estão causando o mais vivo interesse nos círculos científicos, porque esses resultados vêm confirmar uma das leis de deflexão do professor suíço Einstein, cujas novas theories sobre o universo não admitem as leis de Newton.



O ECLIPSE SOLAR DE MAIO E OS SCIENTISTAS — Londres, 8 (H.)
Os resultados obtidos pela missão que foi ao Ceará e a Ilha do Príncipe observar o eclipse solar de Maio último estão causando o mais vivo interesse nos círculos científicos, porque esses resultados vêm confirmar uma lei de deflexão do professor suíço Einstein, cujas novas theories sobre o universo não admitem as leis de Newton³⁹.

³⁹ Reportagem “Há 100 anos, eclipse em sobral pôs Einstein e Teoria da Relatividade na História” de 25/05/2019. Disponível em: <https://img.estadao.com.br/thumbs/640/resources/jpg/2/7/1559067116972.jpg>. Acesso em 13/04/2022.

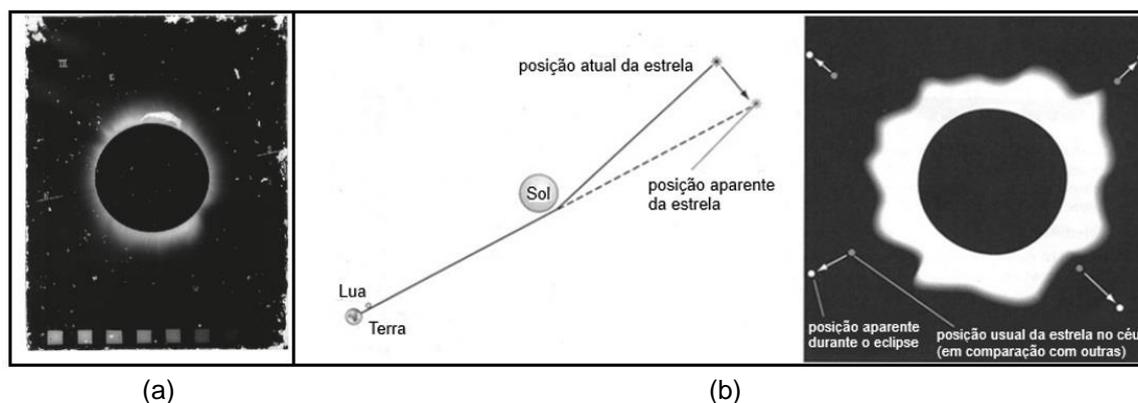
O ECLIPSE DE SOBRAL

Nos anos de 1905 e 1915, Albert Einstein publicou dois artigos que tratavam, respectivamente, da teoria da relatividade restrita e da teoria da relatividade geral. Suas ideias não foram de pronto entendidas e aceitas pela comunidade científica. Muitas dúvidas cercavam a nova teoria que contrariava o que já era conhecido e aceito pela física newtoniana a respeito do espaço, tempo e gravidade. Além disso, um dos fatores que não colaboravam com sua aceitação estava na dificuldade de realizar demonstrações experimentais.

A teoria da relatividade geral apresentava uma nova compreensão para os efeitos da gravidade. Enquanto a teoria clássica de Newton atribuía à gravidade uma interação inversa ao quadrado da distância entre massas, Einstein propunha que a gravidade seria o efeito da deformação do espaço-tempo na presença de uma grande massa (o Sol, por exemplo). A luz, do ponto de vista clássico, por ser composta por partículas (fótons), que não possuem massa, percorreria sempre uma trajetória retilínea, não sendo influenciada pela ação da gravidade e no contexto da teoria da relatividade, a trajetória da luz acompanharia a deformação do espaço-tempo provocado pela presença de um astro massivo.

Em maio de 1919, duas expedições de cientistas ingleses se deslocaram, uma para a cidade de Sobral no Brasil, outra para a Ilha do Príncipe, na África, para a realização de observações de um eclipse que permitiria visualizar estrelas durante os minutos que o Sol estivesse encoberto. O resultado obtido pela expedição que estava na África foi comprometido devido ao tempo estar nublado. A equipe que esteve presente em Sobral, no dia 29 de maio, conseguiu fotografar o eclipse e, conseqüentemente, várias estrelas em torno do Sol (Figura 1). Análises posteriores mostraram que as posições das estrelas nas fotos apresentavam desvios de suas reais posições. Os cálculos do desvio sofrido na trajetória da luz estavam de acordo com as estimativas da teoria da relatividade geral de Einstein.

Figura 1 – (a) Foto do eclipse de Sobral em 1919. (b) Esquema do desvio sofrido pela luz nas proximidades do Sol.



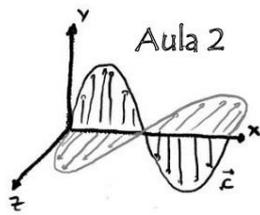
Fonte: (a) <https://www.scielo.br/j/hcsm/a/3cQFXzYr5Fs8V7yKMMVtzgQc/?lang=pt#ModalFig04>
(b) <https://www.scielo.br/j/rbef/a/7xnCndqcq78pSNZzpbkvfRr/?lang=pt#ModalFig1> (créditos: Arthur Eddington). Tradução do autor. Acesso em 07/04/2022.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “Eclipse de Sobral: O dia em que o Brasil ajudou a confirmar a teoria da relatividade de Einstein” - YouTube. Duração: 9min26s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>>. Acesso em: 31/05/2022.

- VÍDEO 2 – “5 Coisas sobre a Teoria da Relatividade - 100 anos de Sobral” - YouTube. Duração: 15min39s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>>. Acesso em: 02/06/2022.

- TEXTO 1 – “O eclipse de Sobral: como a Teoria da Relatividade foi comprovada no Ceará” – Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/o-eclipse-de-sobral-como-a-teoria-da-relatividade-foi-comprovada-no-ceara/>>. Acesso em 01/06/2022.



Aula 2



ELETROMAGNETISMO X MECÂNICA CLÁSSICA



Vamos brincar com um carrinho!

Nós podemos facilmente somar velocidades, por exemplo, o Duque que está em movimento com o carrinho (referencial S') observa o Ben em movimento com velocidade \vec{u}' . Eu que estou fora do carrinho (referencial S) em repouso, observo o Ben com velocidade \vec{u} , em que, $\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v}$.



Agora, uma situação para entender o problema que surgiu com a teoria do eletromagnetismo (*)...



Veja só Duque: para você que está sentado no carrinho, as placas eletrizadas estão em repouso.

Neste caso, como os sinais das cargas são diferentes, você irá perceber a força elétrica de atração entre as placas.



Caso a gente coloque a calça do Ben entre as placas, ela será amassada.

COMO ASSIM!?



Eu vejo que as placas estão em movimento. Neste caso, o movimento produz um campo magnético ao redor das placas...



...surgindo uma força magnética repulsivas, não amassando a calça do Ben.

Ufa!!!



Agora não entendi! A calça do Ben será amassada ou não?



Na teoria do eletromagnetismo, ao mudar o referencial, o evento físico também pode mudar! Como pode, um observador ver a calça do Ben amassada e outro não, ao mesmo tempo?



Como resolvemos este problema, sabichão?



Você conhece a teoria da relatividade?

(*) Adaptação do autor, da exemplificação feita por Luis Carlos de Menezes em forma de texto, no livro "A matéria, uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento física" (Editora Livraria da Física, 2005, p. 120).

REFERENCIAL E MOVIMENTO

Um evento físico é algo que pode ser analisado e mensurado por suas informações de espaço e tempo. A análise pode ser realizada por observadores que se encontram em referenciais distintos, ou seja, possuem pontos de vista diferentes, sem, entretanto, mudar o evento.

Por referenciais inerciais definimos os sistemas de coordenadas que estão em repouso ou em movimento em linha reta com velocidade constante, um em relação ao outro.

A mecânica newtoniana utiliza um conjunto de equações denominadas transformações de Galileu para encontrar os valores das grandezas físicas em referenciais inerciais distintos. Considerando dois referenciais espaciais cartesianos (x , y e z) e a temporal (t), um S em repouso e outro S' com velocidade constante em relação ao primeiro, o movimento apenas na coordenada x pode ser descrito da seguinte maneira:

$$x' = x - v \cdot t; \quad (1a)$$

$$y' = y; \quad (1b)$$

$$z' = z; \quad (1c)$$

$$t' = t, \quad (1d)$$

como ilustrado no quadro 1 da página da HQ da Aula 2.

Da mesma forma, é possível uma transformação entre os valores das velocidades relativas para observadores em ambos os referenciais:

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v} \quad (2a)$$

ou,

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}. \quad (2b)$$

Todo evento físico é analisado e entendido a partir de referenciais que se adotam para mensurar suas variáveis. Ao estudar o movimento dos corpos deve-se ter em mente as noções de espaço, tempo e a massa do objeto que se move. Da mesma forma, o evento físico observado deve manter uma coerência para referenciais diferentes. Não se pode mudar o evento físico em si,

Materiais complementares

- TEXTO 1 – “O Conflito com a Mecânica Clássica” (livro digital) – Disponível em: <<https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504254>>. Acesso em: 19/07/2022.

apenas pelo fato de ser analisado por outro referencial.

A teoria do eletromagnetismo de Maxwell, aliada aos resultados experimentais de Michelson e Morley, mostrava que a velocidade da luz não seguia a regras da física newtoniana. O valor da velocidade da luz se mantém constante para todos os observadores, em todos os referenciais, independentemente do movimento da fonte, podendo acontecer que um evento físico seja percebido de formas diferentes em referenciais também diferentes.

A teoria da relatividade proposta por Einstein apresenta uma solução para os conflitos entre a teoria newtoniana e o eletromagnetismo.

Atividade de fechamento da aula

Chegou o momento de realizarmos algumas atividades para testarmos os conhecimentos adquiridos.

1) Realize uma pesquisa *online* sobre o significado das seguintes palavras:

- **Absoluto:**

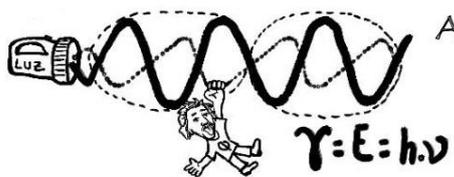
- **Relativo:**

- **Referencial:**

2) A velocidade de um objeto em movimento pode apresentar valores distintos para observadores diferentes. O que determina essa diferença de velocidade para os vários observadores?

3) No primeiro quadro da historinha de hoje, considere a velocidade do Ben observada pelo Bob com o módulo de 4 m/s, ao mesmo tempo em que o Duque observa o Ben com velocidade 2,5 m/s. Qual será a velocidade do carrinho?

- TEXTO 2 – “Introdução a Teoria da Relatividade” - Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4394955/mod_resource/content/0/Intro-Relatividade_SRM_EFC-2015_v3.pdf>. Acesso em: 19/07/2022.



AULA 3

OS POSTULADOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Bob, explique a teoria da relatividade.

Vamos falar novamente sobre o eletromagnetismo de Maxwell.

Ele concluiu que a luz é uma onda eletromagnética que se move com velocidade $c = 300.000 \text{ km/s}$.

Na época de Maxwell os cientistas acreditavam que a onda eletromagnética necessitaria de um meio privilegiado, chamado éter, para se propagar, em que a velocidade teria o valor "c".

UAAU!

Deixa ver se entendi: a partir deste tal de éter seria possível somar velocidades como fizemos ao brincar com o carrinho?

Exatamente! Vários experimentos foram realizados na época para provar a existência do éter. Porém, nenhum deu certo. Independente do movimento da fonte de luz, quem está se movendo com a fonte ou quem está em repouso em relação a ela, observa a luz com a velocidade igual.

Como assim?

Onde entra o Einstein na história?

Ele propôs dois postulados, para tentar resolver o problema:

1º postulado: as leis da física são iguais para todos os referenciais inerciais.

2º postulado: independente do movimento da fonte, a velocidade da luz é constante para todo referencial inercial.

Por que tenho a impressão que isso vai dar problema?

A VELOCIDADE DA LUZ

A grande maioria dos cientistas, no final do século XIX, acreditavam ser necessária a existência do éter no espaço, como o referencial privilegiado em que a luz teria seu valor $c = 300.000.000 \text{ m/s}$, conforme o previsto na teoria eletromagnética proposta por Maxwell. Acreditava-se também, na possibilidade de medir a velocidade da Terra em relação ao éter, somando velocidades,

conforme a física clássica/transformações de Galileu, equações (2.1a) e (2.1b).

O segundo quadrinho central da HQ menciona que várias tentativas de se provar a existência do éter foram realizadas. A mais famosa consiste no experimento de Michelson e Morley, em 1887, por meio de um aparato experimental denominado interferômetro. O experimento consiste em um feixe de luz dividido em outros dois que percorrem direções perpendiculares. Uma das direções

seria coincidente ao movimento de translação da Terra; a outra direção, como já dito, perpendicular a esse movimento. Após percorrerem distâncias iguais (os braços do interferômetro), os feixes separados incidem em espelhos, refletindo e se recombinando novamente. O feixe que está na mesma direção do movimento da Terra sofreria o efeito contrário do vento do éter, reduzindo sua velocidade. A menor velocidade provocaria uma diferença do tempo de propagação desse feixe em relação ao outro, que por sua vez seria percebida pelo interferômetro.

Apesar da precisão do aparelho, não foram encontradas evidências da existência do éter. Outra informação importante realizada foi a constância da velocidade da luz, independentemente da orientação do aparelho durante a realização das medidas.

Com base nos resultados negativos encontrados quanto ao éter, Einstein rompe definitivamente com a ideia de sua existência, ao mesmo tempo que propõem os dois postulados da teoria da relatividade restrita.

1.º postulado: para todos os referenciais inerciais, as leis da Física serão sempre as mesmas.

2.º postulado: a velocidade da luz é constante para qualquer referencial inercial.

O segundo postulado apresenta a luz com uma velocidade limite c , ao mesmo tempo, como uma constante da natureza. Independentemente de quem estiver

observando a fonte de luz em repouso, em seu referencial ou em movimento em um referencial, com velocidade constante, o valor de $c = 300.000.000 \text{ m/s}$, ela permanecerá inalterada, fato ilustrado no primeiro quadrinho central da HQ.

Um modelo de interferômetro foi utilizado para demonstrar experimentalmente a existência de ondas gravitacionais. Como um objeto massivo é capaz de produzir deformação na estrutura espaço-tempo, também poderia produzir ondulações quando em movimento. A confirmação da existência das ondas gravitacionais foi publicada no início de 2016; no entanto, a sua comprovação ocorreu em 2015 por meio do LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*), em Washington e na Lousiana, que detectou os resultados da colisão de buracos negros. (NASCIMENTO, CUZINATTO. 2022, p. 2).

Atividades de fechamento da aula

1) Primeiramente, pesquise o significado da palavra **Postulado**.

2) Utilizaremos o aplicativo de *Physics at school* instalado no smartphone, para analisar os resultados do experimento de Michelson e Morley.

Vídeo

Para conclusão da aula, assistir o vídeo, seguido por um momento de comentários com a turma.

VÍDEO: *O Espaço-Tempo Explicado*.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kJ5xNaSleTI>>.

Duração: 11min58s.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “*Introdução experiência de Michelson-Morley - A relatividade especial - Física - Khan Academy*” - YouTube. Duração: 8min36s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bv2ataBdQ78>>. Acesso em: 07/07/2022.

- TEXTO 1 – “*O Experimento de Michelson-Morley*” – Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/o-experimento-de-michelson-morley/>>. Acesso em: 05/06/2022.



Aula 4

DILATAÇÃO DO TEMPO E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Bob, o que muda com os postulados de Einstein?

Vamos começar pela física clássica.

A ideia mais simples que podemos ter sobre velocidade é a divisão entre um deslocamento e o tempo que foi gasto.

$$v = \frac{d}{t}$$

Duas pessoas podem medir valores diferentes de velocidades em referenciais diferentes. Igual na brincadeira com o carrinho que fizemos. Neste caso, a velocidade é relativa.



Para mim você está enrolando, já sabemos de tudo isso.

Calma... Outra coisa importante: independente do observador, 1 metro e 1 segundo é sempre igual para todos, ou seja, são absolutos.

Temos então o problema: para a velocidade da luz ser constante, ou seja, absoluta, em todos os referenciais inerciais, o espaço e o tempo devem ser relativos.

Não estou acreditando no que estou ouvindo!

Para velocidades próximas a da luz temos fenômenos que vão contra nosso senso comum e são chamados de dilatação do tempo e contração do espaço.

É sério o que você está falando? O tempo demora mais para passar e o tamanho das coisas diminuem?

Tudo papo furado. Nem tem como provar isso.

Tem sim. Inclusive nós utilizamos a relatividade com frequência no aparelho de GPS.

DILATAÇÃO DO TEMPO E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

A velocidade é uma grandeza física que relaciona o tempo necessário para que um objeto saia de uma posição e chegue a outra, realizando um deslocamento. Na mecânica clássica de Newton, é possível que observadores em referenciais inerciais distintos verifiquem valores diferentes para a velocidade do objeto em movimento. A relação dentre os valores encontrados se dá

por meio das transformações de Galileu (equações 1a – 1b).

O segundo postulada da teoria da relatividade propõe que a velocidade da luz é sempre igual para qualquer referencial inercial, ou seja, seu valor é absoluto e, para que isso se torne possível, o espaço e o tempo devem ser relativos. Tem-se assim, os efeitos da dilatação do tempo e a contração do espaço. Um relógio se movendo próximo a

velocidade da luz marcaria o tempo lentamente quando comparado a outro em repouso. Já uma régua teria suas dimensões comprimidas na mesma situação.

A dilatação do tempo e a contração do espaço são os aspectos que mais desafiam o senso comum quando se trata da teoria da relatividade.

Consideram-se dois observadores, O_1 em um referencial R em repouso e outro, O_2 em repouso num referencial R' , um trem por exemplo (Einstein utilizava muitos trens como exemplos), com velocidade constante v muito grande, próxima a velocidade da luz (v aproximadamente igual a c). Cada observador medirá o tempo de forma diferente em seu referencial quando comparados, sendo que o observador em movimento relativo observará o tempo passando mais devagar. A diferença entre os tempos medidos será dada pela expressão:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' \quad (3)$$

Vídeo

Sobre a aplicação da teoria da relatividade, mais especificamente sobre a dilatação do tempo, no funcionamento de GPS, assistir a vídeo:

VÍDEO: *GPS, como funciona?*

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=qzOA41vA8Qw&t=6s>>.

Duração: 7min36s.

Atividades de fechamento da aula

1 – Observar valores da dilatação do tempo por meio da equação X.3, conferindo os valores com o simulador e calculadora *online* da página Walter Fendt na *internet*.

- Simulador: <https://www.walter-fendt.de/html5/phpt/timedilation_pt.htm>.

- Calculadora: <https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm>.

2 – Desafio para os alunos: desenharem, mesmo que desenhos simples, algo representando a dilatação do tempo e a contração do espaço.

Materiais complementares

- TEXTO 1 – “Uma proposta de inserção da teoria da relatividade restrita no Ensino Médio via estudo do GPS”. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/rbef/a/ZR35rghCQxRq6rp9t7MsDvs/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 17/07/2022.

em que γ (letra grega gama) é chamado fator de Lorentz, dado por:

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

Vamos considerar, agora, que no trem haja uma barra em repouso e com seu comprimento na direção do movimento do trem. Cada observador perceberá a barra com um comprimento diferente, sendo menor para o observador em repouso. A relação entre os diferentes comprimentos é dada pela expressão:

$$L = \frac{L'}{\gamma} \quad (5)$$

O comprimento L' é chamado de comprimento próprio e consiste no tamanho percebido pelo observador em repouso relativo à barra.

Mesmo contrariando o senso comum, o efeito da dilatação do tempo é utilizado para que o aparelho/aplicativo de GPS (*Global Positioning System*) funcione adequadamente.

O PARADOXO DOS GÊMEOS

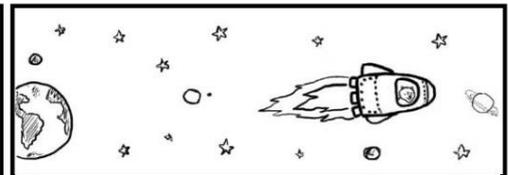


Estou com dificuldade de entender essa história de contração do espaço e dilatação do tempo.

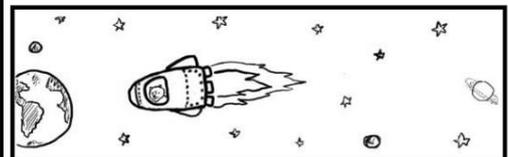
Tem uma situação que é utilizada para ajudar na compreensão da dilatação do tempo: o Paradoxo dos Gêmeos.

Vamos imaginar que o Ben tivesse um irmão gêmeo que fosse participar de uma missão espacial muito longe da Terra.

Sabia que iria sobrar pra mim.



A nave viaja com 90 % da velocidade da luz e demora 4 anos para concluir a viagem e retornar!



Utilizando a equação da dilatação temporal teremos que para o Ben, que ficou na Terra, passaram-se aproximadamente 9 anos.

Quer dizer que meu irmão estará 5 anos mais novo?

Nossa! Mas isso não acontece realmente?

Acontece sim. Inclusive é por meio da dilatação do tempo que os cientistas explicam como as partículas "múons" conseguem atingir a superfície da Terra, mesmo não apresentando tempo de vida média suficiente para isso.

O que é isso de múons

A física de partículas estuda as menores parcelas de matéria que formam tudo que conhecemos. As partículas que mais ouvimos falar são os prótons, nêutrons e elétrons. Os múons são outros exemplos assim como os fótons que são partículas de luz.

Pra variar, só enrolação... E o tal de "desvio da luz" das estrelas?

OS MÚONS⁴⁰

Um problema bastante comum em relatividade restrita é o que envolve o caso das partículas de altas energias, também chamados raios cósmicos. Na verdade, estamos interessados no que ocorre numa partícula que é um produto da interação dos raios cósmicos com a atmosfera da Terra. Os Múons (cujo símbolo é a letra grega μ) são classificados em física de partículas como Léptons, do grego leve. Temos como exemplo o elétron, o tau e os neutrinos.

Os raios cósmicos que geralmente são constituídos de prótons altamente energéticos, penetram na atmosfera da Terra e chocam-se com as moléculas de ar. Desse choque entre prótons energéticos e as moléculas da atmosfera, outras partículas se formam, como exemplos os píons e os káons. Múons que são partículas elementares e geralmente decaem em um elétron, um neutrino do múon (ν_μ) e num antineutrino do elétron (ν_{e^-}).

O tempo de vida de um Múon é de aproximadamente $2,2 \mu\text{s}$ ⁴¹. Tempo esse medido em seu referencial, ou seja, com o Múon em um laboratório por exemplo, possuindo baixa velocidade.

Grande parte dos múons são criados a uma altitude de aproximadamente 15 km possuindo uma velocidade da ordem de $0,9998c$ (c = velocidade da luz no vácuo = $3 \cdot 10^8$ m/s). Esta alta velocidade faz com que o seu tempo de vida no sistema de referencial do laboratório seja dilatado permitindo que a maioria alcance a superfície da Terra.

Pensando em um movimento com velocidade próxima à velocidade da luz para os Múons, e calculando a distância percorrida ao entrarem na atmosfera usando a equação da velocidade $v = \Delta \frac{s}{\Delta t}$, para $v = c$, isolando o deslocamento Δs :

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$
$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \cdot (2,2 \cdot 10^{-6}) \Delta s = 660m$$

Como é possível, então, que múons percorram apenas 660m atmosfera adentro, e, ainda assim, sejam detectados próximos da superfície da Terra, que fica a aproximadamente 10.000 metros mais distante do que o Múon pode percorrer?

O tempo de vida do Múon dilata-se em relação ao referencial do laboratório que está em Terra. Pode-se calcular essa dilatação aplicando as equações 2.3 e 2.4,

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

em que $\Delta t' = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{s}$ (tempo próprio do múon) e $v = 0,9998c$. Assim:

$$\Delta t = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{0,9998^2 c^2}{c^2}}}$$
$$\Delta t = 110 \mu\text{s}.$$

Um resultado que faz com que o Múon relativístico leve mais tempo para decair.

Uma sugestão é conferir o resultado utilizando a calculadora da página Walter Fendt (https://www.walter-fendt.de/zd/zd_app3.htm).

Utilizando esse valor de vida e aplicando novamente,

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$
$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \cdot 110 \cdot 10^{-6}$$
$$\Delta s = 33.000 \text{ m}.$$

O que dá como resultado uma distância suficiente para ser detectada ao chegar próximo da superfície da Terra. Mostrando assim, que há uma dilatação do tempo em $107,8 \mu\text{s}$, possibilitando um deslocamento 50 vezes maior que o esperado em laboratório, comprovando, assim, o previsto pela teoria da relatividade.

⁴⁰ Texto adaptado do original: “Múon Relativístico” – Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em: 05/06/2022.

⁴¹ A letra grega μ (lê-se micro) também é utilizada para representar a notação científica 10^{-6} , como nesse caso.

Atividades de fechamento da aula

1 - (UEL PR) A Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, mas em perfeito acordo com os resultados experimentais. Ela é aplicada, entretanto, somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade, válida não só para referenciais inerciais, mas também para referencial não-inerciais.

Sobre os referenciais inerciais, consideram as seguintes afirmativas:

I. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade constante.

II. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade variável.

III. Observadores em referenciais inerciais diferentes medem a mesma aceleração para o movimento de uma partícula.

Assinale a alternativa correta

- A) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
- B) Apenas a afirmativa II é verdadeira.
- C) As afirmativas I e II são verdadeiras.
- D) As afirmativas II e III são verdadeiras.
- E) As afirmativas I e III são verdadeiras.

2 - (CFT-CE) Em 2005, Ano Mundial da Física, comemora-se o centenário da Teoria da Relatividade de Albert Einstein. Entre outras consequências esta teoria poria fim à ideia do éter, meio material necessário, semelhantemente ao som, através do qual a luz se propagava. O jargão popular “tudo é relativo” certamente não se deve a ele, pois seus postulados estão fundamentados em algo absoluto: a velocidade da luz no vácuo – 300.000 km/s. Hoje sabe-se que:

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “O Paradoxo dos Gêmeos Explicado” – YouTube. Duração 11min05s. Disponível em:

<<https://www.youtube.com/watch?v=98OvQpOkOIU>>. Acesso em: 17/05/2022.

- VÍDEO 2 – “Raios Cósmicos, múon, Dilatação do Tempo e Contração do Espaço” – YouTube. Duração 9min53s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=QnLxDDylEsM>>. Acesso em 17/07/2022.

- TEXTO 1 – “A vida do múon” – Disponível em: <<https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/2Relatividade>

I. O som propaga-se no vácuo.

II. A luz propaga-se no vácuo.

III. A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite do universo.

É (são) verdadeira(s):

- A) todas
- B) nenhuma
- C) somente II
- D) II e III
- E) somente III

3 - (UFRGS) De acordo com a Teoria da Relatividade quando objetos se movem através do espaço-tempo com velocidades da ordem da velocidade da luz, as medidas de espaço e tempo sofrem alterações. A expressão da contração espacial é dada por $L = L_0(1 - v^2/c^2)^{1/2}$, onde v é a velocidade relativa entre o objeto observado e o observador, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, L é o comprimento medido para o objeto em movimento, e L_0 é o comprimento medido para o objeto em repouso.

A distância Sol-Terra para um observador fixo na Terra é $L_0 = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. Para um nêutron com velocidade $v = 0,6 c$, essa distância é

- A) $1,2 \cdot 10^{10}$ m
- B) $7,5 \cdot 10^{10}$ m
- C) $1,0 \cdot 10^{11}$ m
- D) $1,2 \cdot 10^{11}$ m
- E) $1,5 \cdot 10^{11}$ m

4 - (UFPE) – Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante $0,8c$, em que c é a velocidade da luz no vácuo. No referencial da espaçonave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da Terra, em meses?

Especial/2Avidadomuon/Avidadomuon.html>. Acesso em: 12/06/2022.

- TEXTO 2 – “Medida da vida média do múon” – Disponível em:

<<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/wp-content/uploads/2018/04/Medida-da-vida-m%C3%A9dia-do-m%C3%BAon.pdf>>. Acesso em: 21/07/2022.

- TEXTO 3 – “Partículas elementares” – Disponível em:

<<https://felipe9aes.wixsite.com/particulas/inicio>>. Acesso em: 21/07/2022.



Aula 6

O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA



Para entendermos a curvatura da luz próximo do Sol, vamos antes falar sobre a teoria da relatividade geral.

Não é tudo a mesma coisa?

Claro que não!

A física clássica descreve o movimento de um corpo conhecendo as forças que atuam sobre ele.

A gravidade é uma força, não é?

Para a física clássica sim.

Aí que entra o Einstein. Ele defendia que a gravidade não era uma força entre duas massas a certa distância, como previa a teoria clássica.

Mas qualquer objeto "cai" porque está sofrendo a ação da força da gravidade e fica acelerado.

Sim. E aí está a grande questão de Einstein: como relacionar a gravidade ao movimento com aceleração, sem falar de força.

Vamos usar a imaginação: caso o Ben esteja em uma nave espacial sem visão para fora da nave e bem afastada do planeta, sem a influência da gravidade.

Sempre eu!!!

Você estaria flutuando dentro da nave.

Se a nave começar a se mover cada vez mais rápida, ou seja, acelerada, o Ben sentirá uma força nas patinhas, chamada força inercial, semelhante a ação gravidade.

Parece legal.

ACELERAÇÃO $9,8 \frac{m}{s^2}$

FORÇA INERCIAL

Inclusive, se o Ben "deixar cair" algo, será semelhante ao que observa próximo da Terra.

Quer dizer que o efeito da aceleração é igual ao da gravidade e vice e versa?

Exatamente!!! E este é o princípio da equivalência.

PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA⁴²

Se um observador está em pé sobre uma balança dentro de um elevador fechado, ao perceber que o ponteiro da balança começa a indicar um valor diferente para sua massa, duas explicações são possíveis.

- 1 – o elevador está em movimento com velocidade variável em módulo, ou
- 2 – o campo gravitacional local mudou.

Algo semelhante é sugerido no primeiro quadrinho da última tirinha da HQ.

Se o cabo do elevador arrebentou e ele entra em queda livre, a balança vai indicar zero, situação que chamamos de imponderabilidade⁴³. O observador e todos os objetos dentro do elevador parecem flutuar. Na HQ da sexta aula tal situação é ilustrada de forma semelhante no segundo quadrinho da terceira tirinha. Esse efeito de flutuação sugere gravidade zero, mas na verdade pode ser conseguido de duas formas:

- 1 – pela anulação do campo gravitacional, ou
- 2 – por um movimento do elevador com aceleração igual à gravidade em módulo.

De dentro do elevador, sem observar o que acontece lá fora, não há como saber o que de fato está acontecendo. A impossibilidade de decidir entre as duas explicações aceitáveis acima constitui basicamente o princípio da equivalência, que diz: Se um observador está dentro de um recinto fechado, sem ter como olhar para fora, não há como saber se o recinto está sob a ação de um campo gravitacional uniforme ou se está acelerado. Ou seja, a imponderabilidade.

A dupla possibilidade entre a ação de um campo gravitacional ou de uma aceleração é denominado princípio da equivalência.

Vídeo

Como forma de complementar os conhecimentos expostos até o momento, assistir o vídeo indicado, seguido de momento de reflexão.

VÍDEO: *A relatividade geral explicada*.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jYlr3G9yB8s>>.

Duração: 10min47s.

Atividades de fechamento da aula

A atividade da aula será desenvolvida pelos próprios alunos, organizados em pequenos grupos com 3 ou 4 alunos. Cada grupo desenvolve um caça palavras ou uma cruzadinha, abordando o entendimento referente os tópicos sobre relatividade estudados até agora.

Um grupo apresenta sua atividade para que o outro possa resolver. Ao término da atividade, os grupos trocam entre si opiniões sobre o que foi desenvolvido pelo outro grupo. Avaliação entre os pares, no caso entre os grupos.

Materiais complementares

- VIDEO 1 – “*RG05 - Princípio de equivalência*” – YouTube – Duração: 20min44s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kSG4MqrWpFI>>. Acesso em: 17/07/2022.

- TEXTO 1 – “*Teoria da relatividade geral*” – Disponível em <<https://brasilescola.uol.com.br/fisica/teoria-relatividade-geral.htm>>. Acesso em 23/07/2022.

- TEXTO 2 – “*Princípio da equivalência*” – Disponível em <[---

⁴² Texto extraído de: Braz Júnior, 2002, p. 29. Com modificações do autor.](https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RG/node4PE.html#:~:text=na%20forma%20seguinte%3A-,Princ%C3%ADpio%20da%20Equival%C3%Aancia%20%5BEinstein%5D%20...,duas%20situa%C3%A7%C3%B5es%20por%20qualquer%20experi%C3%Aancia%22%20.>”. Acesso em 11/07/2022.</p></div><div data-bbox=)

⁴³ Imponderabilidade é o estado em que não se pode discernir se está sob a ação de um campo gravitacional ou em queda livre. Também é descrita como a sensação de ausência de compressão de apoio, resultante da ausência de força normal. (Wikipedia).



Aula 7

A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

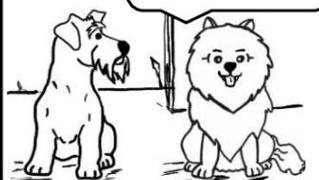
Dentro da nave, sem ter visão de fora, não é possível definir se a nave está sobre a ação da gravidade ou acelerada.



Isso mesmo. Por isso o nome "princípio da equivalência".

Agora podemos falar sobre a curvatura da luz.

Opa! O "bicho vai pegar"!



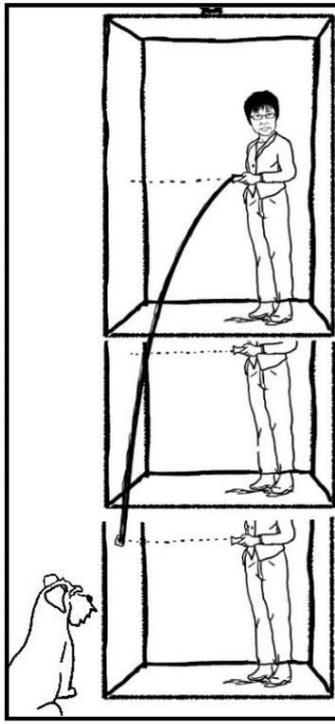
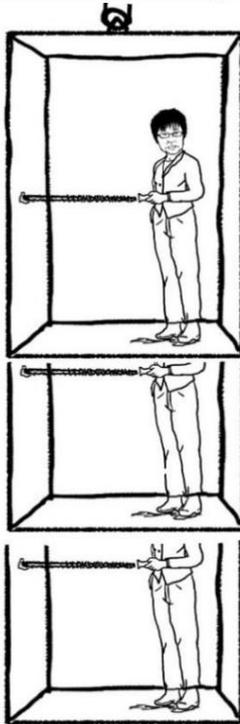
Pensa comigo Ben: se uma pessoa está num elevador em queda livre com uma lanterna na mão. Como ela vê a trajetória da luz?



Ué, em linha reta! Batendo o tempo todo no mesmo lugar.



Exatamente. A pessoa e a lanterna estão no mesmo referencial.



Ué! Neste caso, como o elevador está em queda acelerado e a luz bate o tempo todo no mesmo ponto do elevador. Quem está fora iria observar a luz numa trajetória curva.



E se o observador estivesse em um referencial externo ao elevador?



Não estou entendendo nada!



Pelo princípio da equivalência, o mesmo efeito seria possível pela ação do campo gravitacional.



Deixar-me ver se acerto: Einstein concluiu que a gravidade poderia curvar a trajetória da luz!?

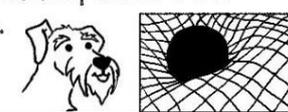
Isso mesmo!



Mas como seria possível curvar a trajetória da luz?



Einstein propôs que uma massa muito grande, causa deformação no espaço-tempo, da mesma forma que uma bola "pesada" deforma a superfície e um lençol esticado.



Na verdade, a luz estaria apenas acompanhando o espaço-tempo deformado.



Foi isto que os cientistas observaram no eclipse de Sobral?

Exatamente



CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO⁴⁴

O princípio da equivalência torna-se contundente quando aplicado à luz. Imagine, por exemplo, um observador segurando uma lanterna dentro de um elevador. Supondo-se que o elevador despenque em queda livre e num certo momento da queda a lanterna é ligada. O Observador (O_2) dentro do elevador, cai com a lanterna e vê um raio de luz que segue em linha reta, cruza o elevador e bate na parede da frente, conforme ilustrado na parte central da HQ dessa aula, na figura a esquerda. Até aí, nada de mais.

Mas se outro observador externo (O_1), parado em relação ao chão, pudesse enxergar através das paredes do elevador, o que veria? Na figura central da HQ à direita, temos a visão desse observador.

Nota-se que para O_1 o raio de luz literalmente encurva! Neste caso, sabemos que a causa dessa curvatura é o movimento acelerado do elevador. Mas, pelo princípio da equivalência, o mesmo efeito poderia ser conseguido a partir de um campo gravitacional externo. Einstein concluiu, a partir desse raciocínio, que a gravidade deveria forçar a luz a fazer curva!

É a partir daí que surge a interpretação geométrica para os efeitos da gravidade. Podemos considerar que corpos com grande massa provocam uma curvatura no espaço-tempo ao seu redor. Dessa forma, mesmo a luz, caminhando supostamente em uma linha reta, deveria acompanhar a curvatura do espaço-tempo, como que sofrendo a ação atrativa da gravidade.

Segundo Einstein, corpos com grande massa, como estrelas, por exemplo, poderiam tirar a luz de sua suposta e previsível trajetória retilínea.

Mais uma vez surge a importante pergunta: como testar a teoria? Como vamos conseguir um corpo de massa estelar aqui na Terra? Impossível!

Novamente entra em cena a criatividade dos cientistas. Uma oportunidade importante para testar a teoria é um eclipse solar total. A ideia é fotografar as estrelas visualmente próximas ao Sol e que só aparecem quando o disco solar é encoberto pela Lua, no curto período em que o dia vira noite, na totalidade do eclipse. Numa outra época do ano, quando essa mesma constelação estiver visível à noite, sem a presença do Sol, uma segunda exposição fotográfica pode ser feita.

Nessa segunda foto, as posições das estrelas devem ser ligeiramente diferentes daquelas obtidas durante o eclipse, pois desta vez, sem o Sol, a luz chega até a máquina fotográfica em linha reta. Se conseguirmos medir essas mínimas diferenças nas posições das estrelas, então fica provado que na presença do Sol desvia, de fato, a luz! Genial, não?

Vídeo

Sugere-se assistir o vídeo 1, cujo *link* está disponível nos materiais complementares.

Atividades finais da aula

Os alunos responderão o questionário avaliativo final do Produto Educacional.

Materiais complementares

- VÍDEO 1 – “*Como a gravidade deforma o tempo? Relatividade Geral*” – YouTube – Duração: 17min37s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=56TJuxnWC-c&t=3s>>. Acesso em: 23/05/2022.

- TEXTO 1 – “Porque espaços-tempo curvos? Gravidade como curvatura do espaço-tempo”. Disponível em: <<https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RG/node8EspCurvos.html>>. Acesso em: 23/07/2022

⁴⁴ Continuação do texto extraído de: Braz Júnior, 2002, p. 29. Com modificações do autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAZ Júnior, Dulcídio. **Física moderna: tópicos para ensino médio**. 1 ed. Campinas: Companhia da Escola, 2002.

BRENNAN, Richard P. **Gigantes da Física**: uma história moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed.: 2003.

EINSTEIN, Albert. **A teoria da relatividade: sobre a teoria da relatividade especial e geral** (para leigos). Tradução: Silvio Levy. Título original: *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* (1916). Porto Alegre: L&PM, 2019.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Ótica e Física Moderna**. v. 4, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995.

MARTINS, Roberto de Andrade. **A origem histórica da relatividade especial**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

MENEZES, Luis Carlos de. **A matéria uma aventura do espírito**: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005).

NASCIMENTO, Nicolas. L. N. S.; CUZINATTO, Rodrigo. R.. Ondas gravitacionais de buracos negros coalescentes: um estudo quantitativo a partir de física básica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p. e20220004, 2022. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0004>>. Acesso em 16/04/2023.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica, 4**: ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2014.

PEREIRA, Ricardo Vieira. **Múon relativístico**. Produto educacional do programa de Mestrado Nacional em Ensino de Física (MNPEF) da Sociedade Brasileira de Física (SBF) do polo da Universidade Federal do ABC (UFABC), 2019. Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/resolucao-dos-exercicios-relatividade-restrita/>>. Acesso em: 12/06/2022.

PIATTELLA, Oliver. F. Introdução à relatividade geral. **Cadernos de Astronomia**, Vitória, v. 1, n. 1, p. 30–39, 2020. DOI: 10.47083/Cad.Astro.v1n1.30827. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrologia/article/view/30827>. Acesso em: 2 maio de 2023.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLIN, Ralph A. **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.