



VINÍCIO MERÇON POLTRONIERI

**UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM PARA O ENSINO DE
CINEMÁTICA RELATIVÍSTICA NO ENSINO MÉDIO
BASEADA EM APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE
AUSUBEL**

Vitória

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

VINÍCIO MERÇON POLTRONIERI

UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM PARA O ENSINO DE
CINEMÁTICA RELATIVÍSTICA NO ENSINO MÉDIO
BASEADA EM APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE
AUSUBEL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Espírito Santo/ Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (PPGEnFis/MNPEF-Polo 12), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Gimenes Alvarenga

Vitória

2017

Modelo de ficha catalográfica fornecido pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas da Ufes para ser confeccionada pelo autor

M552p Merçon Poltronieri, Vinício, 1984-
Uma proposta de abordagem para o ensino de cinemática
relativística no ensino médio baseada em aprendizagem
significativa de Ausubel / Vinício Merçon Poltronieri. - 2017.
169 f. : il.

Orientador: Flávio Gimenes Alvarenga.

Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Exatas.

1. Cinemática relativística. 2. Aprendizagem significativa.
3. David Ausubel. I. Gimenes Alvarenga, Flávio. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Exatas. III. Título.

CDU: 53

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA

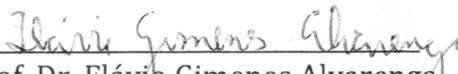
"Uma Proposta de Abordagem para o Ensino de Cinemática Relativística no Ensino Médio Baseada em Aprendizagem Significativa de Ausubel"

Vinício Merçon Poltronieri

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física - Mestrado Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em 21 de dezembro de 2017.

Comissão Examinadora


Prof. Dr. Flávio Gimenes Alvarenga
(Orientador PPGEnFis/UFES)


Prof. Dr. Luiz Otávio Buffon
(Membro Externo IFES - Cariacica)


Prof. Dr. Breno Rodrigues Segatto
(Membro Interno CEUNES/UFES)

Ao meu pai, que me ensinou tanto o bom quanto o mau caminho e me deu a liberdade de escolher.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu pai, Alberto Mário Poltronieri, por ser meu exemplo de vida e à minha mãe, por respeitar meu jeito peculiar de ser em casa.

Aos meus irmãos, Jacqueline e Vitor, que se sacrificaram para que eu pudesse seguir adiante nos estudos e, ainda, por ajudarem na escrita do *Abstract* desta dissertação.

À minha enorme família, que sempre esteve disposta a ajudar nos momentos mais difíceis.

À direção do Centro Educacional Charles Darwin, por abrir as portas da escola para o meu projeto, mesmo em meio a dificuldades com a alteração da rotina e do calendário dos estudantes e dos funcionários.

Aos alunos, que me incentivaram a realizar o curso de teoria da relatividade na escola, norteando minha escolha em relação ao tema escolhido.

Aos professores e aos colegas do PPGEnFis, por estarem dispostos a ensinar e a aprender com a turma, mostrando o verdadeiro papel do professor.

Ao professor Laércio Ferracioli, por tomar a frente do programa de Mestrado e também por me apresentar o autor David Ausubel, me incentivando a estudá-lo.

Em especial ao meu orientador, Flávio Gimenes Alvarenga, por não ter medo de tentar aprender, por transmitir o amor à Física por onde passa, não importa o quão difícil for o assunto e principalmente por ser aguerrido, não desistindo do nosso projeto mesmo com os tantos problemas de saúde e familiares que tivemos ao longo do curso.

A todos que não pude citar aqui, mas que fizeram parte da realização deste projeto.

“A ciência é feita com fatos, assim como uma casa com pedras, mas uma acumulação de fatos não mais uma ciência do que um monte de pedras é uma casa.”

Jules Henri Poincaré

Sumário

Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xii
Resumo	xiii
Abstract	xiv
Capítulo 1. Introdução	15
Capítulo 2. Referencial Teórico.....	18
2.1 Aprendizagem significativa segundo David Ausubel	18
2.2 Cinemática relativística para o ensino médio	21
Capítulo 3. Cinemática Relativística.....	23
3.1 A cinemática clássica e a cinemática relativística	23
3.2 O experimento de Michelson-Morley e a velocidade da luz	24
3.3 Dilatação do tempo	27
3.4 Fator de Lorentz e o limite da velocidade dos corpos	30
3.5 Contração do espaço	31
3.6 Sincronização e dessincronização	34
3.7 Transformações de Lorentz	39
Capítulo 4. Metodologia e Coleta de Dados.....	48
4.1 Objetivos.....	48
4.2 Sujeitos	49
4.3 Construção do material instrucional e interação com a aula	49
4.3.1 Construção do capítulo 1 (parte 1) – Introdução.	50
4.3.2 Construção do capítulo 2 (parte 1) – A velocidade da luz.....	52
4.3.3 Construção do capítulo 3 (parte 1) – O limite da velocidade dos corpos.....	59
4.3.4 Construção do capítulo 4 (parte 1) – A dilatação do tempo.	62
4.3.5. Construção do capítulo 5 (parte 1) – A contração do espaço.	72
4.3.6. Construção do capítulo 6 (parte 1) – Respostas dos exercícios.....	77
4.3.6. Construção do capítulo 1 (parte 2) – Dessincronização.	78
4.3.6. Construção do capítulo 1 (parte 3) – Transformações de Lorentz.	85
4.4 Distribuição de conteúdos por aula e evolução das aulas.....	85
4.5 Relatos considerados relevantes em entrevistas prévias com alunos.	87
Capítulo 5. Análise de Dados	89

5.1 Análise do primeiro questionário (apêndice D), aula 1:	89
5.2 Análise do segundo questionário (apêndice E), aula 5 (turma A) e aula 4 (turma B):.....	99
Capítulo 6. Conclusões	118
Referências	121
Apêndice A - Material Instrucional - Parte 1	122
Apêndice B - Material Instrucional - Parte 2.....	147
Apêndice C - Material Instrucional - Parte 3	155
Apêndice D - Questionário Aula 1	162
Apêndice E - Questionário Aulas 4 e 5	166

Lista de figuras

Figura 1: Movimento relativo dos carros – estrada como referencial.	23
Figura 2: Movimento relativo – referencial no carro A.....	24
Figura 3: Experimento de Michelson-Morley.	25
Figura 4: Diferentes orientações no Experimento de Michelson-Morley.	26
Figura 5: Trem de Einstein com observador O' em repouso dentro do vagão.....	28
Figura 6: Trem de Einstein com observador O fora do vagão.....	29
Figura 7: Experimento mental dilatação do tempo com observador O' no vagão.	32
Figura 8: Experimento mental dilatação do tempo com observador O na Terra.....	33
Figura 9: Instante inicial detectado pelo observador no referencial R (sistema solar).....	35
Figura 10: Instante final detectado pelo observador no referencial R (sistema solar).	36
Figura 11: Instante final detectado pelo observador no referencial R' (nave) (a).....	37
Figura 12: Instante final detectado pelo observador no referencial R' (nave) (b).....	37
Figura 13: Observações dos eventos nos referenciais R e R'.....	39
Figura 14: Instante inicial do movimento da partícula P com observador na Terra.....	41
Figura 15: Instante final do movimento da partícula P com observador na Terra.	41
Figura 16: Instante inicial do movimento da partícula P com observador O' na nave.....	43
Figura 17: Instante final do movimento da partícula P com observador O' na nave.	43
Figura 18: Velocidades medidas por movimento relativo.....	51
Figura 19: Movimento relativo para a luz.	53
Figura 20: Aparato experimental do interferômetro de Michelson-Morley.....	54
Figura 21: Esquema – funcionamento do aparato experimental de Michelson-Morley.	54
Figura 22: Esquema da emissão de fótons pelo decaimento de píons.....	55
Figura 23: Interferômetro de Michelson-Morley.....	58
Figura 24: Interferômetro de Michelson-Morley.....	59
Figura 25: Observação de um feixe luminoso (referencial da nave).....	61
Figura 26: Observação de um feixe luminoso (referencial fora da nave).	61
Figura 27: Emissão/recepção sob o ponto de vista do observador O' no vagão.	63
Figura 28: Emissão/recepção sob o ponto de vista do observador O na Terra.....	64
Figura 29: Emissão/recepção observado no referencial S' (no vagão).	73
Figura 30: Emissão/recepção observado no referencial S (na Terra).....	73
Figura 31: Garota brincando numa nave espacial.	76
Figura 32: Nave em movimento (inicial).	80
Figura 33: Nave em movimento (final).	81
Figura 34: Satélite B passando pela nave, que está em repouso.	82
Figura 35: Nave em repouso (final).....	82
Figura 36: Sequências de eventos nos dois referenciais, R(sistema solar) e R' (nave).....	84
Figura 37: Velocidades medidas por movimento relativo.....	125
Figura 38: Movimento relativo para a luz.	127
Figura 39: Aparato experimental do interferômetro de Michelson-Morley.....	128

Figura 40: Esquema – medida da velocidade da luz.	128
Figura 41: Esquema da emissão de fótons pelo decaimento de píons.	129
Figura 42: Interferômetro de Michelson-Morley.....	131
Figura 43: Interferômetro de Michelson-Morley.....	132
Figura 44: Observação de um feixe luminoso (referencial da nave).	133
Figura 45: Observação de um feixe luminoso (referencial fora da nave).	134
Figura 46: Emissão/recepção sob o ponto de vista do observador O' no vagão.	135
Figura 47: Emissão/recepção sob o ponto de vista do observador O na Terra.....	136
Figura 48: Emissão/recepção observado no referencial S' (no vagão).	142
Figura 49: Emissão/recepção observado no referencial S (na Terra).	143
Figura 50: Garota brincando numa nave espacial.	145
Figura 51: Nave em movimento (inicial).	150
Figura 52: Nave em movimento (final).	151
Figura 53: B Satélite B passando pela nave, que está em repouso.	152
Figura 54: Nave em repouso (final).	152
Figura 55: Sequências de eventos nos dois referenciais, R(sistema solar) e R' (nave).	154
Figura 56: Referencial O (antes).	158
Figura 57: Referencial O (depois).	158
Figura 58: Referencial O' (antes).	159
Figura 59: Referencial O' (depois).	159

Lista de tabelas

Tabela 1: Transformações de Lorentz para as velocidades.....	46
Tabela 2: Organização da turma A.....	86
Tabela 3: Organização da turma B.....	87
Tabela 3: Anotações das entrevistas prévias.....	88
Tabela 4: Respostas dadas para questão 1 (Questionário 1).....	89
Tabela 5: Respostas dadas para questão 2 (Questionário 1).....	90
Tabela 6: Respostas dadas para questão 3a (Questionário 1).....	91
Tabela 7: Respostas dadas para questão 3b (Questionário 1).....	92
Tabela 8: Respostas dadas para questão 3c (Questionário 1).....	93
Tabela 9: Respostas dadas para questão 3d (Questionário 1).....	94
Tabela 10: Respostas dadas para questão 3e (Questionário 1).....	95
Tabela 11: Respostas dadas para questão 3f (Questionário 1).....	96
Tabela 12: Respostas dadas para questão 3g (Questionário 1).....	97
Tabela 13: Respostas dadas para questão 3h (Questionário 1).....	98
Tabela 14: Transcrição das respostas dadas na questão 4 (Questionário 1).....	99
Tabela 15: Respostas dadas para questão 1 (Questionário 2).....	100
Tabela 16: Respostas dadas para questão 2 (Questionário 2).....	101
Tabela 17: Respostas dadas para questão 3 (Questionário 2).....	102
Tabela 18: Respostas dadas para questão 4a (Questionário 2).....	103
Tabela 19: Respostas dadas para questão 4b (Questionário 2).....	104
Tabela 20: Respostas dadas para questão 4c (Questionário 2).....	105
Tabela 21: Respostas dadas para questão 4d (Questionário 2).....	107
Tabela 22: Respostas dadas para questão 4e (Questionário 2).....	108
Tabela 23: Respostas dadas para questão 5 (Questionário 2).....	109
Tabela 24: Respostas dadas para questão 6 (Questionário 2).....	110
Tabela 25: Respostas dadas para questão 7 (Questionário 2).....	112
Tabela 26: Respostas dadas para questão 8 (Questionário 2).....	113
Tabela 27: Respostas dadas para questão 9 (Questionário 2).....	115
Tabela 28: Transcrição da opinião dos alunos sobre a aplicação do material instrucional....	116

Resumo

Nós, professores, vivenciamos constantes mudanças nos conteúdos sobre os quais lecionamos. É importante evidenciar, no entanto, que não só o conteúdo, mas também a forma como trabalhamos deve evoluir. Esta dissertação apresenta uma pesquisa que visa pôr em evidência a importância disso e exemplificar uma maneira de aplicar as teorias de notórios autores diretamente em sala de aula. Como referência, adotamos a teoria de Aprendizagem Significativa de David Ausubel, sob o ponto de vista e as orientações de Marco Antônio Moreira, aplicada à cinemática relativística para alunos de ensino médio, da 1ª à 3ª série na forma de curso extracurricular no Centro Educacional Charles Darwin, em Vitória-ES, entre junho e agosto de 2016. Procuramos incorporar todos os principais elementos da Aprendizagem Significativa em aula, tais como conhecimentos prévios, produtos interacionais, subsunçores e tempo de assimilação, visando tornar as aulas mais completas e dinâmicas, verificando o nível de entendimento dos alunos ao longo do curso. O grande objetivo é, portanto, encorajar outros professores a se aprofundarem no estudo de teorias de ensino, mostrando que é possível aprimorar sua técnica e, claro, mostrar que mesmo a cinemática relativística, famosa por ser de compreensão anti-intuitiva, não é tão difícil de se aprender, se a progressão do aprendizado acontece de forma lógica e bem estruturada.

Palavras-chave: Cinemática relativística. Aprendizagem significativa. David Ausubel.

Abstract

We teachers have experienced constant changes in the contents we teach. However, it is important to point out that not only the content but also the way we work must evolve.

This dissertation presents a research which aims to highlight its importance and exemplify a way to apply the theories of renowned authors directly in the classroom.

As a reference, we adopted the Meaningful Learning Theory of David Ausubel, from the point of view and Marco Antonio Moreira guidelines, and the chosen subject was the Relativistic Kinematics for high school students, from 1st to 3rd grade, which was applied as an extracurricular course at Charles Darwin Educational Center in Vitória-ES, between June and August 2016.

We tried incorporating all the key elements of Meaningful Learning in class, such as prior knowledge, interactional products, subsumers and time of assimilation, in order to make the most complete and dynamic classes, checking the level of understanding of students throughout the course.

Therefore, the main purpose of this dissertation is to encourage other teachers to deepen the study of educational theories, which show it is possible to improve their technique and certainly which show that even Kinematics Relativistic, famous for being anti-intuitive understanding, is not so difficult to learn if the progression of learning takes place in a logical and well-structured way.

Keywords: Relativistic kinematics. Meaningful learning. David Ausubel.

Capítulo 1

Introdução

Em minha “caminhada” pelo conhecimento de Física, desde aluno no início da década de 2000 e, posteriormente, como professor, percebi que a evolução do ensino médio no Brasil vem ocorrendo com fortes e constantes mudanças nos últimos anos. Em 1996 foi formalizada a Lei 9.394 – Lei de Diretrizes e Bases (LDB) – detalhando todos os objetivos, deveres e direitos dos atores da área de educação. Em 1998, após amplo debate entre especialistas e a sociedade, foram definidos os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) (Brasil, 1998), já estabelecendo normas para as áreas específicas, como a Física, em território nacional. Posteriormente, em 2002, o Ministério da Educação publicou um novo documento chamado PCN+ (Brasil, 2002), com novo enfoque. A mais recente mudança ocorreu em 2016 com a Medida Provisória 746, que alterou vários artigos da LDB e vem sendo chamada de “Reforma do Ensino Médio”.

Diante de todo esse contexto, percebi que o ensino de Física vem perdendo seu caráter unidisciplinar e se incorporando à área do conhecimento chamada “Ciências da Natureza”, que integra também a Química e a Biologia. Nessa nova forma de organizar o ensino médio, a Física tem redução no seu papel específico de ser apenas uma ferramenta para futuros engenheiros ou cientistas, adquirindo caráter de objeto de estudo e mesmo de linguagem, sobre a qual os estudantes investigam, compreendem, contextualizam e se comunicam. Sendo assim, há uma sensível tendência de nós, professores, e da comunidade educacional do Brasil, no sentido de trocar o aprendizado mais metódico, ou seja, aquele em que o aluno aprende as ferramentas e como usá-las, por uma compreensão mais focada no cotidiano tecnológico e ambiental, embora ainda ensinemos muito a parte ferramental.

Por outro lado, há a discrepância entre os vários tipos de escolas no país. A escola pública regular sofre gravemente com descaso de governos e desinteresse dos alunos e mesmo das famílias. Isso faz com que os alunos não procurem aprender mais e melhor, pois não enxergam o estudo como forma de evoluir. Algumas escolas públicas, no entanto, oferecem ótima estrutura, boa perspectiva de mercado e um ensino bastante completo, como é o caso dos Institutos Federais e algumas escolas militares. Essas instituições infelizmente são acessíveis apenas a uma parcela pequena da população, muitas vezes exigindo rigoroso processo de

seleção para candidatos que queiram estudar nelas. Eu sou professor na rede privada e as nossas escolas particulares, em sua maioria, têm como grande atrativo o desempenho dos seus alunos em exames vestibulares, principalmente o Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM). Isso é um problema, pois esses exames acabam direcionando fortemente os conteúdos e suas formas como os abordamos, assim como toda a produção de material didático, que é guiada pelo mercado.

Nesta pesquisa de mestrado, tive como um dos seus objetivos específicos retomar alguns valores antigos, do ensino “tradicional” de Física, baseado numa lógica matemática bem estruturada, com a nova forma de incentivar a tecnologia, justamente por trazer o ensino de cinemática relativística para o ensino médio com uma linguagem adequada, com sequência didática adaptada aos conhecimentos prévios (MOREIRA, 2011) dos alunos e com total adaptação da matemática ao nível do público-alvo, sem recorrer ao cálculo de limites, derivadas e integrais. A grande questão aqui é: como fazer isso? E na procura da resposta, eu trilhei o caminho da Aprendizagem Significativa de David Ausubel (AUSUBEL, 1982), cuja obra foi descrita e magnificamente elucidada pelo trabalho de Marco Antônio Moreira.

O grande motivo de eu escolher a cinemática relativística como assunto das aulas foi o fato de ela estar extremamente limitada no currículo regular da escola da rede privada onde apliquei a pesquisa, assim como na maioria das escolas do Brasil, pois não é assunto cobrado com profundidade no ENEM. Dessa forma, escolhi um assunto previsto pelos PCN+, mas pouco abordada, sendo praticamente um assunto novo para os alunos e, assim, sofrendo pouca influência das aulas regulares ministradas por outros professores. vale lembrar que a cinemática relativística é cobrada com profundidade em concursos do nível médio, como o vestibular do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA-SP), o que incentiva algumas escolas no país a ensiná-la de forma mais completa, preparando seus alunos para esse tipo de concurso. Eu mesmo participei como aluno e posteriormente como professor de uma turma de treinamento para vestibulares do tipo militar em Campinas-SP entre 2005 e 2013, o que me fez ter contato com essa física mais avançada e me motivou a trazer o conhecimento “avançado” para um nível mais comum no ensino médio, por meio da utilização de método e linguagem adequados.

Realizei a pesquisa entre junho e agosto de 2016 no Centro Educacional Charles Darwin em Vitória-ES e ela contou com a participação de alunos em duas turmas: A primeira com alunos da 3ª série e do pré-vestibular e a segunda com alunos de 1ª e 2ª séries. Ministrei, no contra turno, um curso extracurricular de teoria da relatividade, onde foi ensinada a cinemática relativística que julguei aplicável ao nível do ensino médio, tendo cerca de 8 horas-aula cada

curso, incluindo toda a parte da pesquisa, como a aplicação de questionários. Realizei entrevistas verbais com alunos, assim como filmagem das aulas (apenas o professor e a lousa foram filmados, não mostrando os alunos, mas havendo captação de suas vozes). O material didático utilizado foi produzido com grande cuidado para que guiasse o andamento das aulas enfaticamente baseado na Aprendizagem Significativa de Ausubel, havendo espaço para, por exemplo, ativação de conhecimentos prévios, formação de subsunçores, tempo de assimilação, etc. (MOREIRA, 2011) dentro da dinâmica de sala de aula, sem utilização de grandes recursos tecnológicos (como vídeos, simuladores e aplicativos) justamente para mostrar que, embora tais recursos sejam desejáveis, o método de ensino por si só já é capaz de produzir resultados.

Certamente boa parte do andamento dos cursos ocorreu dentro do planejado, mas muitas surpresas me chamaram a atenção, como a expectativa inicial de alguns alunos que pensavam que iriam estudar teoria de cordas e buraco de minhoca no curso. Outro fato que me surpreendeu foi a rapidez com que os alunos assimilaram o conteúdo durante as aulas, mesmo aqueles que declararam “não ser de exatas”, ou seja, aqueles que fizeram o curso sabendo que teriam dificuldade acima da média com a parte matemática. Isso ocorreu mesmo em assuntos mais abstratos ou anti-intuitivos, como a dilatação do tempo e a contração do espaço.

Para analisar os dados, fiz um questionário antes e um após o curso, coletando informações sobre os conhecimentos prévios dos alunos, bem como testando os conhecimentos adquiridos, a capacidade de resolver problemas e a conexão de uma informação nova com seus subsunçores. Todo o vídeo das aulas foi analisado e os pontos que considere mais relevantes utilizei na análise, que fiz de forma crítica e construtiva, evidenciando resultados desejados e não deixando de mostrar contratempos, também comparando diferentes momentos das aulas para mostrar quando a Aprendizagem seguiu seu caráter significativo e quando, por algum eventual descuido, a sequência de Ausubel não foi seguida com rigor.

Posso, por fim, afirmar que me surpreendi com o método e que já venho adaptando elementos da minha pesquisa para aplicar em minhas aulas regulares de todos os assuntos. Recomendo que todo professor estude teorias de ensino/aprendizagem, não necessariamente de Ausubel, mas de algum autor de sua preferência e que as aplique em sala de aula, pois, dessa forma, estamos contribuindo com a educação de qualidade para a sociedade.

Capítulo 2

Referencial Teórico

2.1 Aprendizagem significativa segundo David Ausubel

Ausubel é um representante do cognitivismo (MOREIRA, 2011, p. 160) e, para ele, portanto, a aprendizagem tem como resultado um armazenamento organizado de informações na mente.

Aprendizagem significativa, resumidamente, é um processo no qual um novo conhecimento é associado aos conhecimentos já preexistentes de forma organizada. Essa associação não pode ser aleatória, ou seja, o novo conceito não pode se associar a qualquer conhecimento prévio do indivíduo. Ela também deve ocorrer de forma não literal, o que implica entendimento completo e não uma simples memorização desse conceito. Um ponto muito importante desse processo é que, quando o novo e os antigos conceitos se associam, eles criam um novíssimo conceito, que pode posteriormente se associar a outros conhecimentos externos e estabelecer mais um produto e assim sucessivamente.

Nesta pesquisa, a linha de trabalho objetivando a aprendizagem significativa dos alunos se baseou fortemente nos conceitos de nova informação (ou novo conhecimento), conhecimentos prévios, subsunçores, ancoragem, produto interacional, material potencialmente significativo, assimilação, diferenciação progressiva, organizadores prévios, reconciliação integrativa (ou integradora), organização sequencial e consolidação (MOREIRA, 2011):

A **nova informação** é o conhecimento que o aluno supostamente ainda não tem e que será apresentada a ele, na tentativa de fazê-lo aprender significativamente.

Os **conhecimentos prévios** envolvem tudo o que o aluno já sabe, tendo aprendido de forma mecânica (não significativa) ou não. Também envolvem todos os assuntos relevantes ou não para se agregarem à nova informação.

Os **subsunçores** fazem parte dos conhecimentos prévios, mas são apenas aqueles conhecimentos capazes de se associar à nova informação. Exemplificando, com o objetivo de ensinar/aprender velocidade relativa, um aluno que já sabe o que significa velocidade (subsunçor), pode utilizar isso para receber o conhecimento de mudança de referencial (nova

informação). Já um conhecimento prévio de que as cores são determinadas pela frequência da onda, por exemplo, dificilmente serviriam de subsunçor para aprender velocidade relativa.

A **ancoragem** é a ligação de novas informações a um conceito subsunçor. Vale lembrar que várias informações podem ir se ancorando a um mesmo subsunçor, um por vez, o tornando cada vez mais robusto e completo.

O **produto interacional** é o conjunto do subsunçor modificado pela nova informação com a nova informação modificada pelo subsunçor, dando origem a um conceito mais específico que, posteriormente, poderá ser utilizado como subsunçor para novas ideias. Um exemplo aqui seria o conceito de força (subsunçor, mais geral) recebendo a nova informação de que cargas elétricas interagem entre si. Assim, o subsunçor “força” é modificado, pois se aplica também a cargas elétricas, com atração e repulsão à distância, assim como a nova informação “interação entre cargas elétricas” também é modificada, pois a forma como essa interação se dá é regida pelas mesmas regras vetoriais aplicáveis a qualquer força. Nesse caso o produto interacional é resumido como o conceito de força elétrica.

O **material potencialmente significativo** é composto pelas novas ideias que são capazes de se ancorar a um determinado subsunçor de forma significativa. Na preparação da aula, o professor tem o dever de buscar os pontos de ancoragem entre o que o aluno já sabe e o que se quer ensinar. Os alunos, por outro lado, têm o dever de manifestar disposição para realizar esse processo. Aqui cabe a observação de que, por uma sutileza, pode-se entender tanto o material didático (livros, apostilas, vídeos, etc.) como material potencialmente significativo quanto o conteúdo deles (teorias, conceitos, exemplos, etc.).

A **assimilação** é basicamente o processo de evolução da ancoragem, criando, a partir de um subsunçor **A** e de uma informação potencialmente significativa **a**, um produto interacional **A'a'** com ambos modificados (**A'** e **a'**) ao final do processo. Isso leva um tempo e é de suma importância em sala de aula, quando se quer que o aluno aprenda de forma significativa. É um processo que envolve discutir o assunto com o professor e com os colegas, resolver exercícios, tirar dúvidas, etc. O tempo de assimilação foi, portanto, um dos pontos-chaves para esta pesquisa.

A **diferenciação progressiva** do conceito subsunçor é a forma como um conceito mais geral vai evoluindo e se diferenciando em outros mais específicos quando a aprendizagem é significativa. A ideia de força, por exemplo, vai se diferenciando entre força elétrica, força magnética, força de atrito, etc.

A **reconciliação integrativa** é a interação das ideias com apontamento de semelhanças e diferenças entre elas, por meio de comparação ou discussão. Esse processo pode não ter um tempo curto, como o da assimilação, pois ao longo da vida, o aluno poderá comparar e enxergar semelhanças e diferenças entre o que aprendeu na escola e outras situações na faculdade ou no trabalho. Um exemplo é a reconciliação entre os conceitos de velocidade, aceleração e força gravitacional, quando é apresentado o exemplo de um objeto sendo lançado para cima. O aluno pode ter a aprendizagem mecânica e aceitar que a força sempre está para baixo, ou, por meio dessas interações de ideias, entender o processo como um todo e, principalmente, ser capaz de entender discrepâncias e semelhanças entre esses três conceitos ao resgatá-los, embora provavelmente tenham sido aprendidos em momentos bem diferentes.

A **organização sequencial** também tem papel protagonista nessa pesquisa, pois, como o nome já diz, é a forma como a sequência de assuntos é ensinada/aprendida. Essa sequência precisa seguir uma lógica, podendo ser histórica, matemática, hierárquica (do mais geral para o mais específico, como defende Ausubel), etc., desde que o material tenha pontos de ancoragem, sendo potencialmente significativo. No caso da teoria da relatividade, pode-se caminhar por sequências históricas ou matemáticas, dependendo dos pontos de ancoragem criados ao longo das aulas. Quase inevitavelmente, ao fazer isso, o professor guia as aulas por uma sequência hierárquica, já que inicialmente parte do conceito de velocidade, passa por velocidade relativa e, por fim, chega a todas as especificidades da velocidade relativística.

A **consolidação** é o processo em que o aluno ganha domínio sobre o produto interacional que aprendeu. Ao contrário da aprendizagem mecânica, a aprendizagem significativa, permite que o aluno relacione, resolva problemas, reflita, crie proposições ou promova reconciliação integrativa, mostrando domínio.

A vasta obra de David Ausubel apresenta vários outros conceitos de grande valor para melhorar o trabalho de professores, tais como aprendizagem cognitiva, afetiva, psicomotora, representacional, conceitual, proposicional, subordinada, superordenada e combinatória (MOREIRA, 2011). A proposta neste trabalho, no entanto, é dar ênfase aos elementos supracitados que foram explicados e mostrar que, com eles, já se tem o suficiente para montar um ótimo plano de trabalho em sala de aula, criando fortes elementos de aprendizagem significativa.

2.2 Cinemática relativística para o ensino médio

A teoria da relatividade restrita (ou especial) nasceu por volta do ano de 1900, quando vários pesquisadores se depararam com inconsistências na cinemática clássica, em especial quanto ao movimento da luz. O nome “relatividade” vem de “relativo a um referencial” e é fortemente ligado ao conceito de velocidade, assim como posição, deslocamento e mesmo de tempo. No Capítulo 3 há uma explicação mais detalhada sobre essa teoria. Resumidamente, podem-se pontuar os seguintes conceitos que foram utilizados nas aulas desta pesquisa:

A velocidade escalar medida de um corpo é dada pela razão entre seu deslocamento escalar e o tempo de duração desse deslocamento. Esse valor medido sempre depende do movimento do observador, ou seja, de quem tem os instrumentos de medida (régua, relógios, etc.) e é chamado de “velocidade relativa” do corpo em relação ao observador;

O *princípio da constância da velocidade da luz*, postulado por Albert Einstein (1879-1955) em 1905 sugere que a medida da velocidade de um feixe de luz no vácuo terá sempre o mesmo valor numérico, independentemente do movimento da fonte de luz. Posteriormente, concluiu-se que tal velocidade também não depende do movimento do observador que está medindo. Isso significa que todas as velocidades relativas de um mesmo feixe de luz têm o mesmo valor, o que dá o caráter de absoluto e não mais de relativo a tal velocidade (EINSTEIN, 1905). O postulado de Einstein pode ser compreendido com base no experimento de Michelson-Morley (MICHELSON e MORLEY, 1887), embora o cientista alemão não tenha se baseado em tais resultados experimentais, que, sobretudo, discutiam a existência e a possível velocidade do éter, não a velocidade da luz em si (DAMASIO e PEDUZZI, 2017).

O fato de a luz ter sua velocidade absoluta fez com que essa velocidade se tornasse ferramenta matemática para se determinar a dilatação do tempo, descrita matematicamente por:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t',$$

onde $\Delta t'$ é o tempo medido de duração de um evento ocorrido num referencial O' em movimento em relação a outro referencial O , em repouso, que mede Δt para a duração do mesmo evento.

A dilatação do tempo está intrinsecamente ligada à contração do espaço, que é descrita por:

$$L = \frac{L'}{\gamma},$$

onde L é o comprimento de um objeto medido de um objeto que se move medido num referencial O em repouso, γ é o fator de Lorentz, e L' é o comprimento do objeto medido em repouso no seu referencial próprio, O' , que está em movimento em relação a O .

Em 1904, Henri Poincaré mostrou que as transformações de Lorentz implicavam numa quebra de sincronização dos relógios em diferentes referenciais (MARTINS, 2012, p.33). Nas aulas desta pesquisa, foi mostrada a dessincronização de relógios com exemplos e reflexões sobre a dilatação do tempo e a contração do espaço, sem a necessidade de apresentar as transformações de Lorentz (embora uma das turmas tenha chegado até elas).

Em suma, na pesquisa têm-se como referencial teórico os preceitos da Aprendizagem Significativa de Ausubel no ensino de cinemática relativística, os quais serão descritos em detalhes no capítulo seguinte.

Capítulo 3

Cinemática Relativística

3.1 A cinemática clássica e a cinemática relativística

A chamada cinemática clássica, ou cinemática de Galileu Galilei (1564-1642), começou a ser desenvolvida ao final do século XVI e é uma teoria muito bem aceita pela comunidade científica até hoje.

Basicamente, o estudo de objetos em movimento se inicia com a medição de posições, distâncias, tempo e duração de eventos e, com esses valores, mede-se a velocidade. No Movimento Retilíneo e Uniforme (MRU), tem-se:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t},$$

sendo v a velocidade, Δs o deslocamento e a Δt a duração do deslocamento

É importante ressaltar que essas medidas são feitas em um referencial (local onde se encontram esses instrumentos) e, caso outro observador num referencial diferente faça as mesmas medidas, encontrará valores numéricos eventualmente diferentes. Toda velocidade é, portanto, uma grandeza relativa, ou seja, tem seu valor medido em relação a um referencial.

Por exemplo, a seguir dois carros A e B se deslocam em MRU numa estrada, em sentidos contrários. Caso os instrumentos de medidas (“régua” e “relógios”) estejam no referencial da estrada, suponha os seguintes valores de velocidades:

Estrada como referencial:

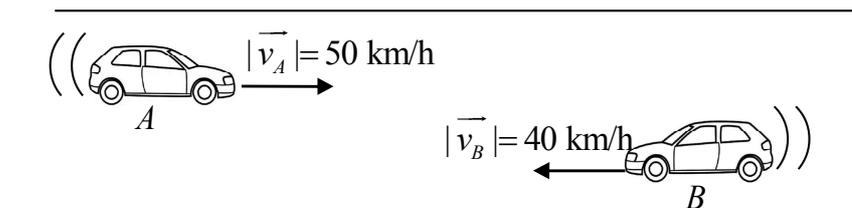


Figura 1: Movimento relativo dos carros – estrada como referencial.

Caso os instrumentos de medidas estejam no referencial do carro A , os valores são os seguintes:

Carro A como referencial:

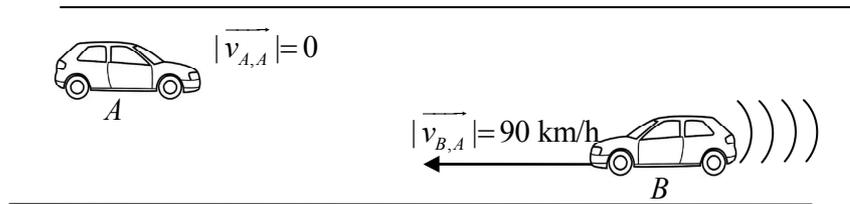


Figura 2: Movimento relativo – referencial no carro A.

Na mudança de referencial, calcula-se, vetorialmente, $\vec{v}_{B,A} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$ e nesse caso, em módulo, $|\vec{v}_{B,A}| = |\vec{v}_B| + |\vec{v}_A|$, segundo a cinemática clássica.

Já a cinemática relativística começou a surgir no fim do século XIX. Até então, se pensava que a cinemática galileana valia para todo tipo de objeto e para qualquer condição de tamanho, velocidade, massa, etc. O movimento da luz, no entanto, seria uma exceção e foi demonstrado acontecer de forma bastante peculiar, não seguindo as leis que regiam o movimento dos demais corpos. A partir dessa “descoberta”, vários cientistas famosos e anônimos começaram a especular sobre as limitações da ciência da época, futuramente sendo necessária uma mudança considerável nas equações, principalmente para a luz e para objetos a altas velocidades, próximas à da luz. Os trabalhos, por exemplo, de Joseph Larmor (1857-1942) na cinemática e de Hendrik Lorentz (1853-1928) no eletromagnetismo demonstraram indícios do que seria futuramente batizado por Poincaré de equações de “transformações de Lorentz”. Einstein, por sua vez, estruturou a teoria de uma forma muito mais simples (MARTINS, 2015).

3.2 O experimento de Michelson-Morley e a velocidade da luz

Um provável fato que contribuiu para o nascimento da teoria da relatividade foi o trabalho de Albert Michelson (1852-1931) e Edward Morley (1838-1923). Eles buscavam demonstrar a presença e características do chamado “éter”, que seria uma espécie de fluido que ocuparia todo o espaço, inclusive no vácuo (MICHELSON, 1887).

Sabendo que a luz é uma onda (eletromagnética), o éter serviria como seu meio de propagação, como o ar serve para o som, por exemplo. No caso do som, quando há movimento de uma massa de ar (vento), a velocidade do som sofre alteração e, seguindo-se a cinemática clássica, pode-se calcular vetorialmente sua velocidade relativa de forma análoga à situação descrita na sessão anterior para os carros e a estrada.

O experimento de Michelson-Morley (1887) visava, então, detectar a alteração da velocidade da luz em várias direções de forma que, com os devidos cálculos, fosse determinada também a direção e o sentido do movimento do éter. Imaginava-se que o éter poderia ser arrastado ou não pela superfície da Terra, em seu movimento circular, bem como se mover em relação ao sistema solar, à galáxia e, possivelmente, não se mover, estando parado em um referencial absoluto (RESNICK, 1968, p. 21).

O aparato experimental consiste em uma fonte de luz monocromática, um espelho semi-reflexivo, dois espelhos A e B e um anteparo receptor para a luz. Tudo é montado sobre uma mesa que pode girar, para que se mudem os caminhos feitos pela luz no espaço.



Figura 3: Experimento de Michelson-Morley.

Fonte: <http://fisica.fe.up.pt/luz/michelson.html>.

As diferentes configurações nada mais são do que o mesmo experimento realizado em diferentes orientações espaciais, como nos dois exemplos a seguir:

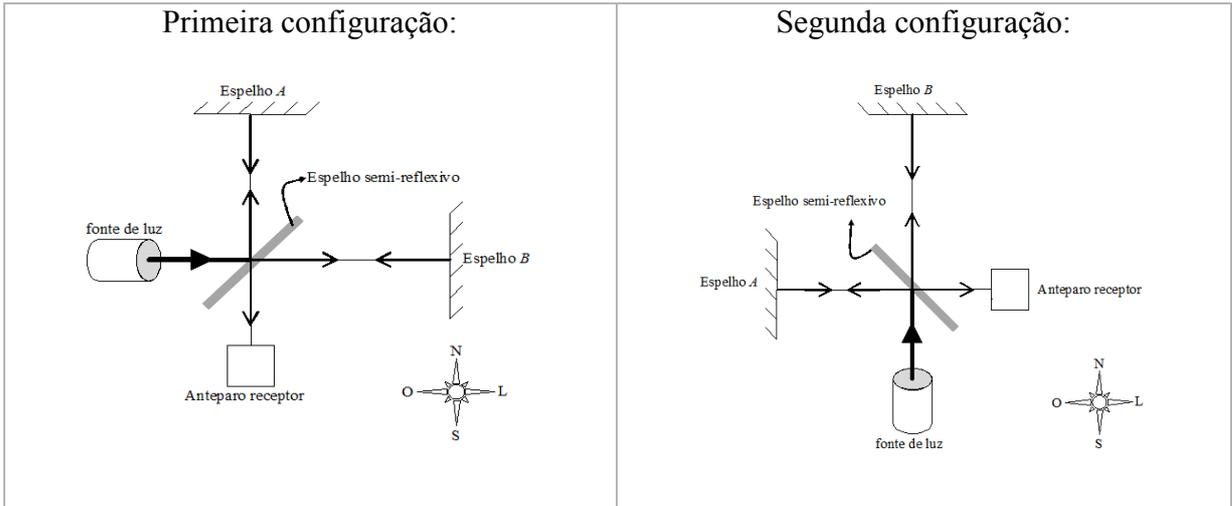


Figura 4: Diferentes orientações no Experimento de Michelson-Morley.

Considerando-se o movimento relativo da luz no espaço (ou no éter), poderia se supor, por exemplo, que o aparato se move para Leste. A luz na primeira configuração, portanto, poderia levar muito tempo para atingir o espelho B na ida e pouco na volta, gerado uma notável diferença de caminhos entre o feixe que passou pelo espelho A e o que passou pelo espelho B. Isso seria detectado na forma de diferença de fase entre os feixes no receptor, podendo criar um padrão de interferência construtiva ou destrutiva. Certamente ao girar a mesa com o aparato, os tempos de ida e volta dos feixes seriam alterados, provocando alteração no padrão de interferência no receptor.

Para surpresa dos cientistas, a luz não mostrou qualquer alteração em sua velocidade, pois em qualquer que fosse a orientação da mesa, o padrão observado era sempre o mesmo. A hipótese inicial mais lógica seria que o éter não se move em relação à mesa, talvez arrastado pela superfície da Terra, mas tal hipótese foi descartada, principalmente quando se orientou o aparato em outras direções, como a vertical, ou em diferentes altitudes e latitudes, além de terem sido feitas observações astronômicas que embasavam a ideia, como a aberração da luz de estrelas (MARTINS, 2012, p.9). Posteriormente, foi feito o experimento no espaço, solidificando ainda mais a ideia de que a luz simplesmente não tem velocidade relativa em relação a qualquer que seja o referencial. Vale lembrar que os experimentos utilizaram o ar como meio, sendo que a luz no ar tem praticamente a mesma velocidade que no vácuo. Também foram feitos, segundo Martins montagens análogas utilizando outros meios, como em meados do século XIX a água poderia arrastar o éter no experimento de Fizeau. Por fim, parece não haver base experimental aceitável para a teoria do éter, tanto estacionário, quanto arrastado pela matéria (RESNICK, p. 37)

A luz, portanto, foi provavelmente a primeira exceção à cinemática galileana descoberta, já que não há mudança em sua velocidade relativa, ao se mudar de referencial, como acontece com objetos comuns no cotidiano da vida humana. Esse fato levou a comunidade científica a iniciar uma reescrita das leis da cinemática, com elementos a princípio anti-intuitivos.

Em 1905, Einstein propôs dois postulados que, por serem postulados, não são provados, mas havia base experimental para eles (MARTINS, 2012, p.2). O “princípio da relatividade” diz respeito à não alteração das leis da eletrodinâmica em referenciais inerciais. Já o “princípio da constância da velocidade da luz” diz que a velocidade da luz não depende da velocidade da sua fonte.

Ainda segundo Martins (MARTINS, 2012, p.3), referindo-se a Einstein:

[...] Nota-se também que o segundo postulado não afirmava, segundo ele, que a velocidade da luz é a mesma em todos os referenciais (como muitos livros didáticos apresentam), e sim que a velocidade da luz no vácuo não depende da velocidade da sua fonte.

3.3 Dilatação do tempo

Utilizando-se o fato de a luz ter sua velocidade constante em qualquer referencial e independente da velocidade da fonte, pode-se demonstrar, utilizando exclusivamente linguagem adequada ao nível do ensino médio, que o tempo sofre uma alteração dependente do referencial. É importante ressaltar que a teoria da relatividade restrita (TRR), proposta neste trabalho, se refere apenas a referenciais inerciais (não acelerados) e a Movimentos Retilíneos e Uniformes (MRU). Para isso, lança-se mão do experimento mental (EINSTEIN, 1999) chamado “trem de Einstein”.

Imagina-se um vagão de trem espacial que pode viajar em MRU a uma velocidade v altíssima, próximo à velocidade da luz, passando perto da Terra. Um viajante dentro do trem (observador O') realiza um experimento bem simples, colocando um emissor de luz no chão, um espelho no teto, a uma altura D e um receptor de luz no chão, bem próximo ao emissor:

Referencial S' (no vagão):

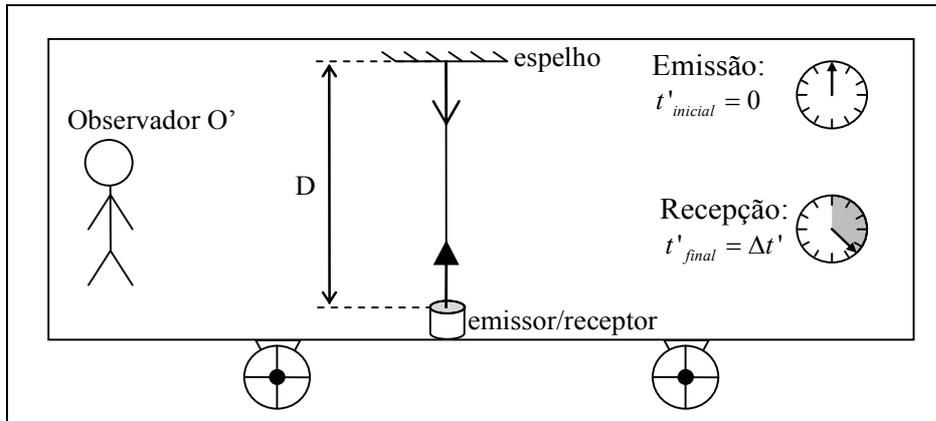


Figura 5: Trem de Einstein com observador O' em repouso dentro do vagão.

Um pulso de luz levará um determinado tempo $\Delta t'$ para ser emitido e posteriormente recebido, percorrendo a distância total $2D$. Pelo postulado de Einstein, a velocidade da luz medida pelo viajante é praticamente a mesma da luz no vácuo, c , então:

$$c = \frac{2D}{\Delta t'}$$

Já um observador O, na Terra, verá o vagão percorrer uma distância Δx e o pulso de luz leva um tempo Δt (medido por um cronômetro na Terra) para percorrer uma trajetória:

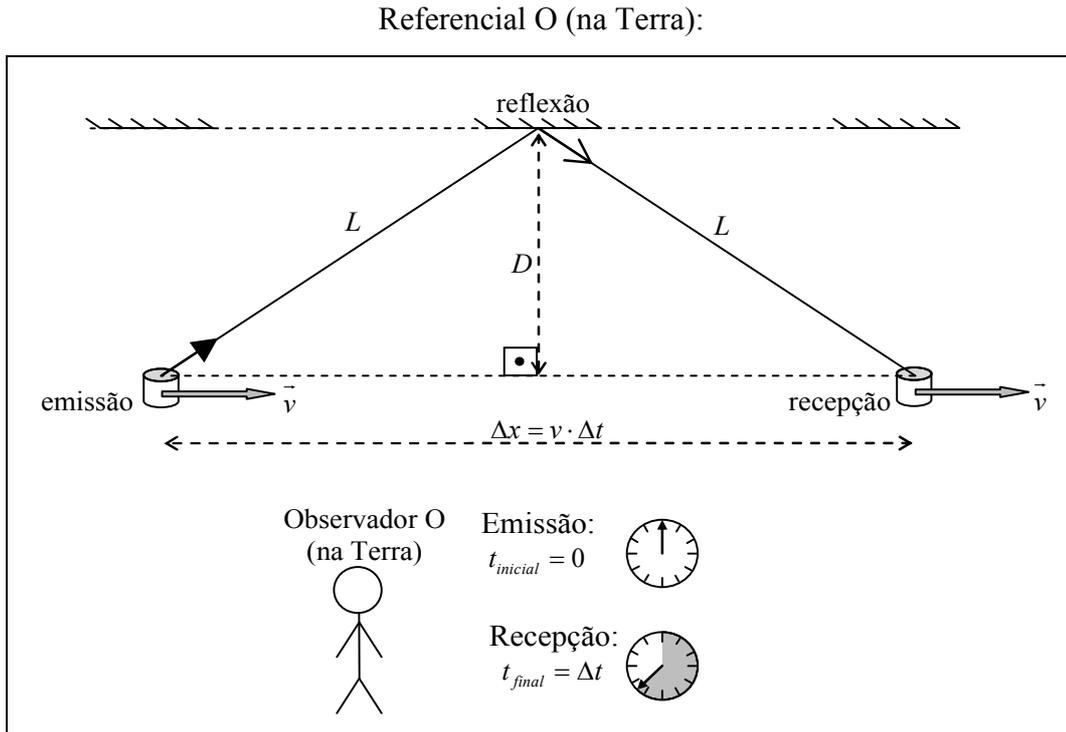


Figura 6: Trem de Einstein com observador O fora do vagão.

O observador O detecta um tempo Δt para o movimento do pulso que, obviamente, percorreu uma distância maior, $2L$, então:

$$c = \frac{2L}{\Delta t}.$$

Como $\Delta t' = \frac{2D}{c}$ e $\Delta t = \frac{2L}{c}$, com $D < L$, conclui-se que:

$$\Delta t' < \Delta t.$$

Assim, o observador sempre detectará um cronômetro que se move com um funcionamento mais lento, marcando menos tempo para um mesmo evento que o cronômetro parado junto com o observador. Ao assumir isso e pensar que o outro observador também detectará o cronômetro que ficou na Terra mais lento, aparentemente há uma contradição. Na verdade não há contradição e isso será posteriormente demonstrado apenas com linguagem matemática no nível do ensino médio.

3.4 Fator de Lorentz e o limite da velocidade dos corpos

No experimento mental da seção anterior é possível, ainda, determinar a relação entre as medidas de tempo Δt (na Terra) e $\Delta t'$ (no vagão) para o mesmo evento (ida e volta do pulso de luz).

No referencial da nave (O'):

$$c = \frac{2D}{\Delta t'}$$

Podem-se isolar $\Delta t'$ e D :

$$\Delta t' = \frac{2D}{c}, \tag{3.4.1}$$

$$D = \frac{c \cdot \Delta t'}{2}. \tag{3.4.2}$$

No referencial da Terra (O):

Podem-se isolar L e Δx :

$$c = \frac{2L}{\Delta t} \Rightarrow L = \frac{c \cdot \Delta t}{2},$$

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v \cdot \Delta t. \tag{3.4.3}$$

Aplicando o Teorema de Pitágoras em um dos triângulos retângulos:

$$(L)^2 = \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2 + D^2,$$

$$\left(\frac{c \cdot \Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2 + D^2. \tag{3.4.4}$$

Podemos isolar Δt :

$$\Delta t = \frac{2\sqrt{D^2 + (\Delta x)^2}}{c}. \tag{3.4.5}$$

Substituindo (3.4.2) e (3.4.3) em (3.4.4):

$$\left(\frac{c \cdot \Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v \cdot \Delta t}{2}\right)^2 + \left(\frac{c \cdot \Delta t'}{2}\right)^2.$$

Isolando Δt :

$$\Delta t = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t' . \quad (3.4.6)$$

Definimos então o chamado fator γ de Lorentz:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} . \quad (3.4.7)$$

Na equação (3.4.6), caso a velocidade v fosse maior do que c , teríamos o absurdo resultado com uma raiz quadrada de número negativo para a relação entre os tempos. Se fosse $v = c$, teríamos um denominador nulo, também absurdo. Logo, conclui-se que $v < c$ para qualquer que seja o corpo em movimento.

É importante ressaltar que um observador só consegue fazer medidas de espaço e tempo com um relógio e uma “régua” (referencial de espaço) próprios, ou seja, que estejam em repouso em relação ao observador. Assim, pode-se definir o “tempo próprio” como duração do evento, quando medida em um referencial em repouso em relação ao evento – o “referencial próprio”, e estabelecer a equação da dilatação do tempo:

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

Vale quando o evento ocorre no referencial O' ($\Delta t'$ é o tempo próprio do evento) e é observado tanto no referencial O' quanto no referencial O .

3.5 Contração do espaço

Assim como a medida da passagem do tempo tem valores diferentes em referenciais inerciais que se movem um em relação ao outro, chegou-se à conclusão de que isso também acontece com as medidas de distâncias. Se por um lado o tempo medido no referencial próprio tem o menor valor possível para um evento (o período de um pêndulo, por exemplo), por outro, o tamanho de um objeto terá seu maior valor medido no referencial próprio. Assim, os fenômenos chamados de “dilatação do tempo” e de “contração do espaço”, respectivamente, estão associados às medidas feitas pelo observador que assiste o movimento.

Uma demonstração da contração do espaço usa a mesma lógica do “trem de Einstein” para a dilatação do tempo: um experimento mental.

Pode-se imaginar, agora, que a fonte emissora e o detector estão na parte traseira do vagão e o espelho na parte dianteira. Ao passar próximo à Terra, um viajante dentro do trem (observador O') realiza um experimento, colocando um emissor de luz na parte traseira de um vagão, um espelho na parte dianteira, a uma distância L' e um receptor de luz na parte traseira, bem próximo ao emissor:

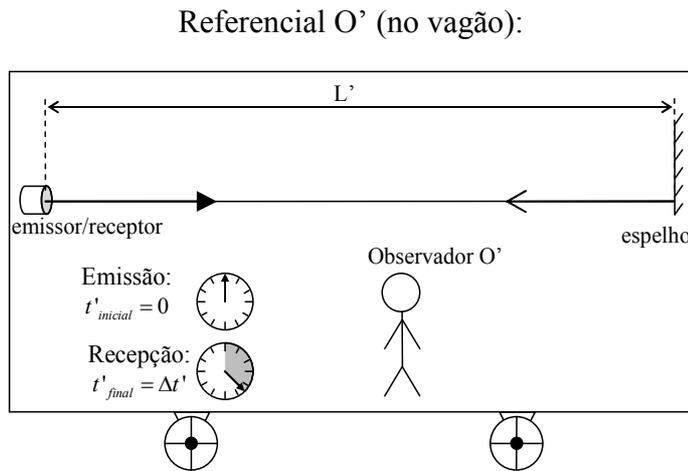


Figura 7: Experimento mental dilatação do tempo com observador O' no vagão.

O pulso de luz levará um tempo $\Delta t'$ para ser emitido e recebido, percorrendo a distância total $2L'$. Pelo postulado de Einstein, a velocidade da luz medida pelo viajante é c , então:

$$c = \frac{2L'}{\Delta t'}$$

Logo:

$$\Delta t' = \frac{2L'}{c} \tag{3.5.1}$$

Já um observador O, na Terra, verá o vagão com um comprimento L percorrer uma distância $v \cdot \Delta t_1$ até o pulso de luz chegar ao espelho e $v \cdot \Delta t_2$ para ele sair do espelho e chegar ao receptor:

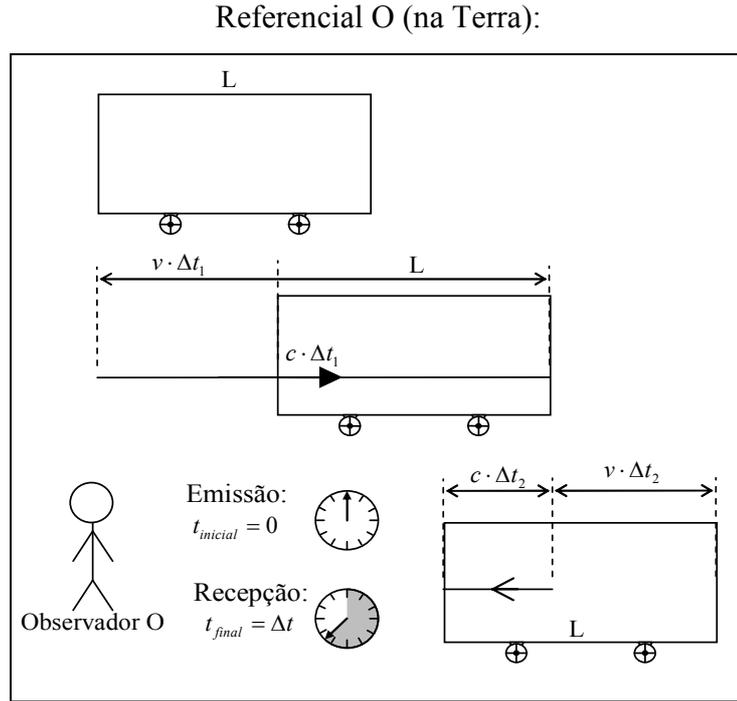


Figura 8: Experimento mental dilatação do tempo com observador O na Terra. A luz percorre, nas duas etapas, as distâncias de $c \cdot \Delta t_1$ e $c \cdot \Delta t_2$, respectivamente. O tempo total será:

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

Pela figura, observa-se que:

$$c \cdot \Delta t_1 = v \cdot \Delta t_1 + L , \quad (3.5.2)$$

$$c \cdot \Delta t_2 + v \cdot \Delta t_2 = L . \quad (3.5.3)$$

Somando e subtraindo (3.5.2) e (3.5.3), temos, respectivamente:

$$c \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2) = 2L + v \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_2) , \quad (3.5.4)$$

$$(\Delta t_1 - \Delta t_2) = \frac{v}{c} (\Delta t_1 + \Delta t_2) . \quad (3.5.5)$$

Substituindo (3.5.5) em (3.5.4) e considerando $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ e $\frac{1}{\gamma^2} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$:

$$c \cdot \Delta t = 2L + v \cdot \frac{v}{c} \Delta t \Rightarrow 2L = \Delta t \left(c - \frac{v^2}{c} \right) \Rightarrow 2L = \Delta t \cdot c \cdot \left(\frac{c^2 - v^2}{c^2} \right) \Rightarrow 2L = \Delta t \cdot c \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) ,$$

$$2L = \Delta t \cdot c \cdot \frac{1}{\gamma^2} .$$

Incluindo a dilatação do tempo, $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$:

$$2L = \gamma \cdot \Delta t' \cdot c \cdot \frac{1}{\gamma^2}.$$

Substituindo (3.5.1):

$$2L = \gamma \cdot \frac{2L'}{c} \cdot c \cdot \frac{1}{\gamma^2}.$$

Dáí:

$$L = \frac{L'}{\gamma},$$

estabelece a equação de contração do espaço.

Vale quando o evento ocorre no referencial O' (L' é o comprimento próprio) e é observado (medido) tanto no referencial O' quanto no referencial O . Em (HALLIDAY, 2016, p.156) é colocado que é necessário demonstrar que o comprimento só é afetado na direção do movimento, embora não apresente tal demonstração. Neste trabalho, partiu-se desse pressuposto.

3.6 Sincronização e dessincronização

A ideia de sincronização vem da simultaneidade de eventos. Dois eventos A e B distantes entre si são simultâneos se ocorrem ao mesmo tempo e, para verificar a simultaneidade, é suficiente que seja emitido um sinal no local e no instante em que cada evento ocorre. Para que não haja imprecisões, os sinais devem ser eletromagnéticos, pois as ondas eletromagnéticas sabidamente têm sua velocidade não dependente do referencial onde ela é detectada, nem da velocidade da fonte. Ao detectar os sinais, o observador deve, então, considerar o tempo de viagem das ondas, bem como a distância das fontes até ele para que seja feita a verificação com uma cinemática simples.

O problema é que, ao invés de ser absoluto, a simultaneidade seria um conceito relativo (RESNICK, 1971, p.59).

Pode-se dizer que dois relógios estão sincronizados se todas as suas medidas de tempo coincidem. Vale observar que, entre dois relógios em referenciais relativísticos que se movem um em relação ao outro, a sincronização não acontece, devido à dilatação do tempo.

Já entre dois relógios no mesmo referencial inercial, pode-se verificar se há sincronização por meio da própria luz (ou qualquer sinal eletromagnético), sendo suficiente calcular o tempo de viagem da luz do relógio até o detector.

Assim, tendo dois relógios sincronizados em repouso, mudar um deles para um referencial com grande velocidade é suficiente para a sincronização se desfazer.

Dizer que a sincronização é relativa, ou seja, que ela depende do referencial, é dizer que dois (ou mais) relógios num mesmo referencial O , uma vez sincronizados, sempre marcarão as mesmas medidas sob o ponto de vista de um observador em O e que marcarão medidas diferentes para outro observador em um referencial O' que se move em relação a O .

Utilizando-se apenas os conceitos de dilatação do tempo e contração do espaço, é possível visualizar bem a dessincronização de relógios com a mudança de referencial por meio de um experimento mental: Imagina-se uma nave (Referencial R') que se move no sistema solar (referencial R) com velocidade $v = 0,6c$ ($\gamma = 1,25$). Ela passa muito próxima de um planeta A e, em seguida, pelo seu satélite B , sendo detectado o tempo $\Delta t = 1,00$ s na Terra para esse evento. Podem-se supor, ainda, cronômetros na Terra, no planeta A e no satélite B , sincronizados entre si, logo $\Delta t_A = 1,00$ s e $\Delta t_B = 1,00$ s. Para melhor compreensão, considera-se que os cronômetros do sistema solar marcam zero quando a nave passa por A e, nesse instante, o piloto zera o cronômetro da nave.

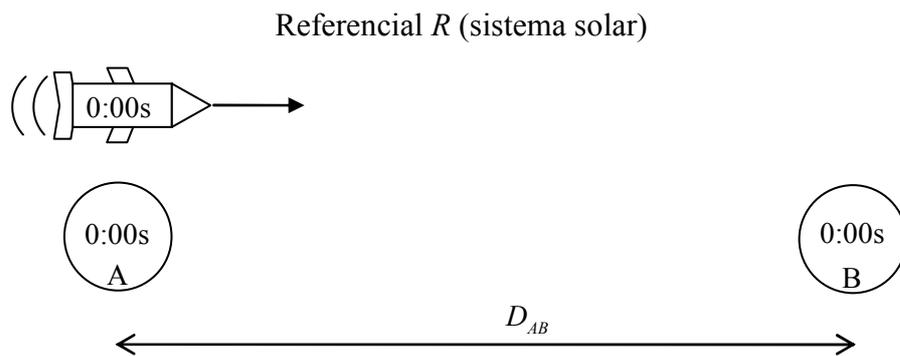


Figura 9: Instante inicial detectado pelo observador no referencial R (sistema solar).

Aqui, $t_0 = 0,00$ s e $t'_0 = 0,00$ s.

O relógio da nave detectou que o evento durou $\Delta t'$:

Dilatação do tempo (R em repouso e R' em movimento, logo $\Delta t > \Delta t'$):

$$\Delta t = 1,00 \text{ s e } \gamma = 1,25;$$

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'.$$

Daí:

$$1,00 = 1,25 \cdot \Delta t' \Rightarrow \Delta t' = 0,80 \text{ s.}$$

Distância entre A e B , no referencial R :

$$v = 0,6c = 0,6 \cdot 3 \cdot 10^8 = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m/s;}$$

$$v = \frac{D_{AB}}{\Delta t} \rightarrow 1,8 \cdot 10^8 = \frac{D_{AB}}{1,00} \Rightarrow D_{AB} = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m,}$$

que é a distância própria entre A e B :

Referencial R (sistema solar)

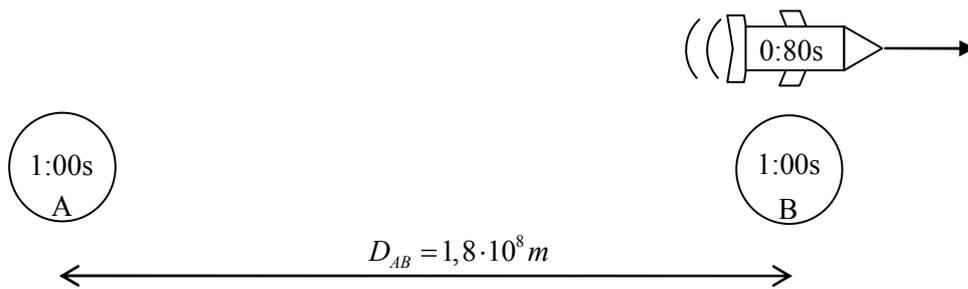


Figura 10: Instante final detectado pelo observador no referencial R (sistema solar).
Aqui, $t_A = t_B = 1,00 \text{ s}$ e $t' = 0,80 \text{ s}$.

Dilatação do tempo (R' parado e R em movimento, com velocidade $-0,6c$, logo $\Delta t < \Delta t'$):

$$\Delta t' = 0,8 \text{ s e } \gamma = 1,25,$$

$$\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t.$$

Daí:

$$0,80 = 1,25 \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta t = 0,64 \text{ s.}$$

Aparentemente há uma contradição, mas será mostrado que não.

O piloto da nave vê A e B passando por ele num intervalo de $0,80\text{s}$, com velocidades $0,6c$ (em módulo), logo:

$$|v_A'| = |v_B'| = 0,6c = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m/s;}$$

$$|v_A'| = \frac{D'_{AB}}{\Delta t'} \rightarrow 1,8 \cdot 10^8 = \frac{D'_{AB}}{0,80} \Rightarrow D'_{AB} = 1,44 \cdot 10^8 \text{ m} - \text{Contração do espaço. Menor distância}$$

entre os planetas, que também parecem “achatados”, com 80% do seu comprimento:

Referencial R':

A situação em B deve ser idêntica, ou seja, o piloto vê seu cronômetro marcar 0,80s e pode ver também o satélite B marcando 1,00s. Um observador em B veria exatamente a mesma coisa. Cabe a observação de que, para o piloto, a nave tem seu comprimento máximo (comprimento próprio) e o planeta está contraído:

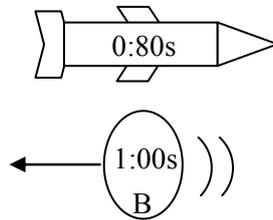


Figura 11: Instante final detectado pelo observador no referencial R' (nave) (a).

Pela dilatação do tempo, se na nave se passou $\Delta t' = 0,80s$, em A se passou $\Delta t_A = 0,64s$. Logo, acontece a seguinte situação:

Referencial R' (nave)

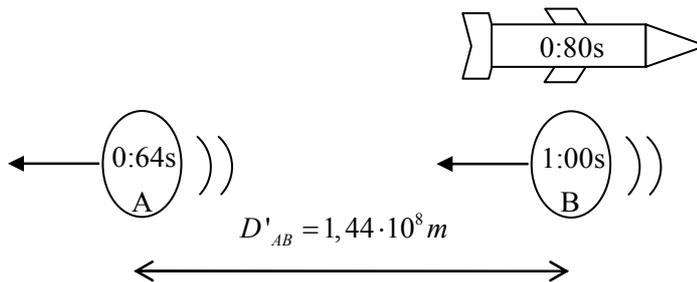


Figura 12: Instante final detectado pelo observador no referencial R' (nave) (b).

Aqui, $t_A = 0,64s$, $t_B = 1,00s$ e $t' = 0,80s$.

É importante observar que, para o piloto, o cronômetro de B mediu $\Delta t_B = 0,64s$ e $t_B = 1:00s$, ou seja:

$$t_B - t_{0B} = \Delta t_B \rightarrow 1,00 - t_{0B} = 0,64;$$

$$t_{0B} = 0,36 \text{ s.}$$

Como $t_{0A} = 0$, claramente a sincronização entre A e B não vale no referencial R' , ou seja, a sincronização é relativa (depende do referencial).

Para A :

$$t_A - t_{0A} = \Delta t_A \rightarrow t_A - 0 = 0,64;$$

$$t_A = 0,64 \text{ s.}$$

Concluimos então que sob o ponto de vista do piloto em R' , Esse evento não se iniciou quando B marcava $0,00$ s (e sim $t_{0B} = 0,36$ s). Esse evento não se finalizou quando A marcava $1,00$ s (e sim $t_A = 0,64$ s). Nesse evento, um objeto (A ou B) a $0,6c$ não se deslocou por $1,00$ s (e sim $0,80$ s) e não percorreu $1,8 \cdot 10^8$ m (e sim $1,44 \cdot 10^8$ m).

Sendo assim, não há contradição de $\Delta t_A = \Delta t_B = 0,64$ s encontrados aqui com os valores medidos de $\Delta t_A = \Delta t_B = 1,00$ s, como descrito no enunciado, pois simplesmente são medidas de duração de tempo para dois eventos diferentes.

A sequência de situações para os dois eventos seria:

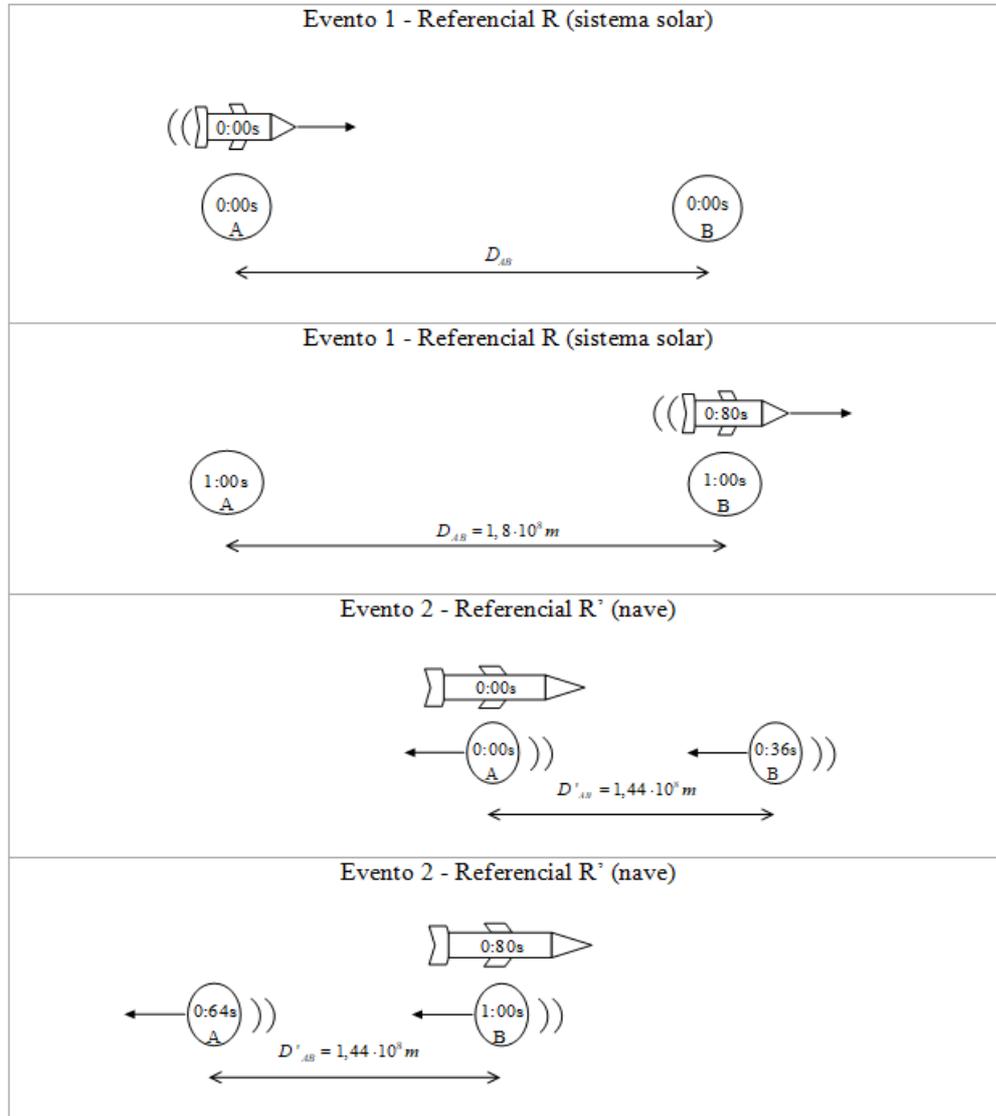


Figura 13: Observações dos eventos nos referenciais R e R'.

3.7 Transformações de Lorentz

Com a dilatação do tempo e a contração do espaço, é possível determinar, para um evento, suas coordenadas de posição e tempo, mesmo que se faça a medida em um referencial O e se calcule as medidas feitas em outro referencial O' . Para isso, é necessário saber a velocidade de um referencial em relação a outro.

Deve-se partir do princípio de que em um referencial O são possíveis de serem feitas as medidas x e t para posição e tempo, respectivamente, e de que o observador em O não consegue utilizar as régua e os relógios em O' , que se move a uma velocidade u em relação a O , medindo x' e

t' . Apesar disso, x' e t' podem ser calculados com os valores de x , t e v , medidos em O . Também pode-se considerar que v pode ser determinado por algum sistema de medição de velocidades em O .

As equações que serão demonstradas a seguir levam um nome que homenageia Hendrik Lorentz e determinam a forma de converter os valores de posição (x e x'), instante de tempo (t e t') e velocidade (u e u') de um objeto que se move em MRU com velocidade u em relação a um referencial O e u' em relação a um referencial O' .

Embora não tenha sido encontrada, na bibliografia desta pesquisa, uma demonstração das equações que levem em conta apenas os conceitos mostrados até aqui, será apresentada uma demonstração adequada ao nível do ensino médio, desenvolvida pelo autor.

Imagine um observador na Terra (referencial O) e outro em uma nave (referencial O') que se move com velocidade v em relação à Terra, sendo o fator de Lorentz γ correspondente a essa velocidade. Uma partícula P se move com velocidade u em relação à Terra e u' em relação à nave. Em um determinado instante, ambos zeram seus cronômetros e adotam o $x_0 = x_0' = 0$ como a posição do objeto naquele instante. O objeto P se move em MRU até a posição final Δx (se for medida em O) ou $\Delta x'$ (se for medida em O'), sendo que os relógios marcaram Δt e $\Delta t'$ quando a partícula atingiu essa posição.

Sob o ponto de vista do observador em O , observe que a “régua” x' está menor, devido à contração do espaço. Dessa forma, a distância que originalmente seria $\Delta x'$ é vista pelo observador em O com o tamanho $\frac{\Delta x'}{\gamma}$.

O deslocamento do referencial O' foi de $v \cdot \Delta t$.

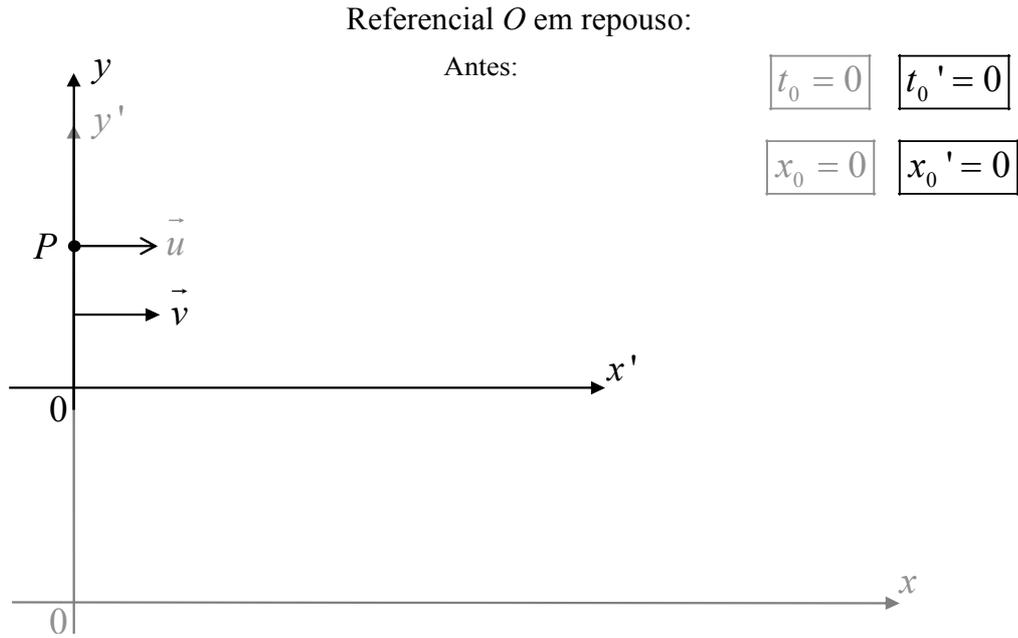


Figura 14: Instante inicial do movimento da partícula P com observador na Terra.

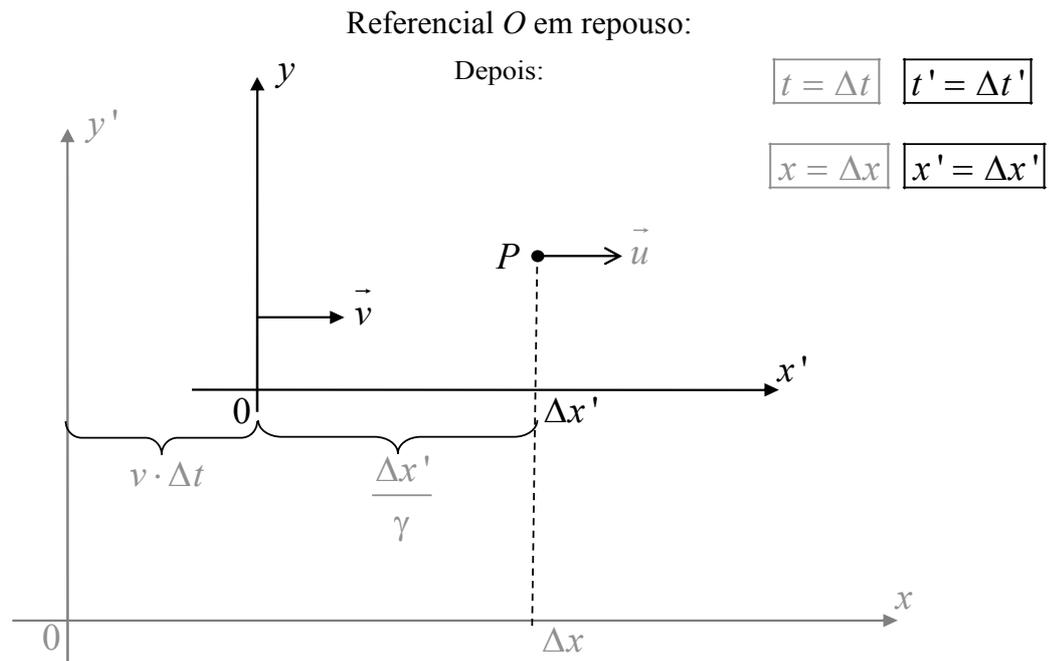


Figura 15: Instante final do movimento da partícula P com observador na Terra.

Observe que o referencial x mede, para o deslocamento total:

$$\Delta x = v \cdot \Delta t + \frac{\Delta x'}{\gamma}.$$

Isolando $\Delta x'$:

$$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v \cdot \Delta t). \quad (3.7.1)$$

(Transformação de Lorentz para o deslocamento $\Delta x'$ quando o observador faz medidas em O)

Analogamente, o observador na nave (referencial O') enxerga o referencial O se movendo com velocidade $-v$ e a “régua” x contraída, com tamanho $\frac{\Delta x}{\gamma}$, uma vez que o fator γ de Lorentz só depende do módulo da velocidade. O módulo do deslocamento do referencial O , nesse caso, é $v \cdot \Delta t'$, já que o tempo próprio medido agora se dá com o relógio de O' .

Referencial O' em repouso:

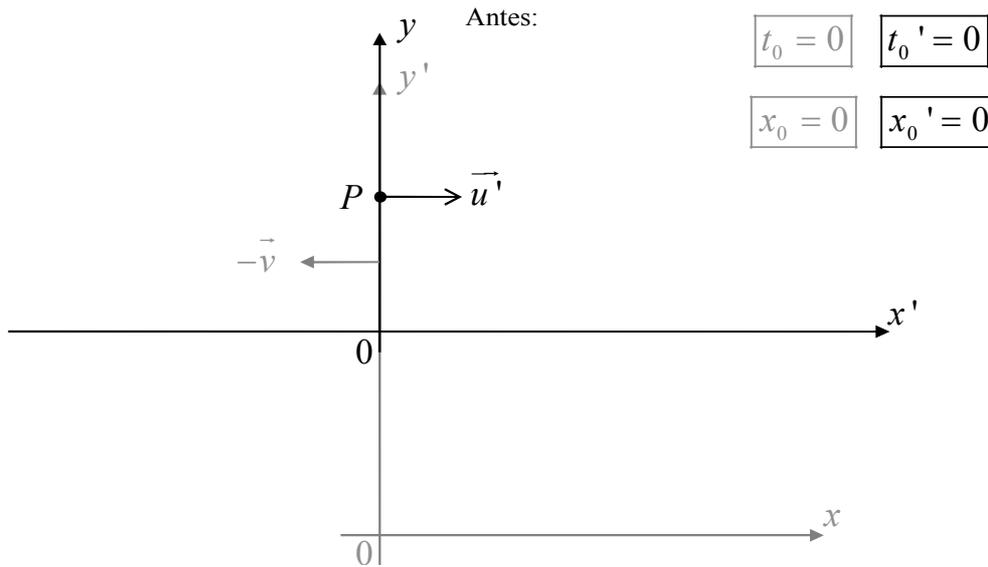


Figura 16: Instante inicial do movimento da partícula P com observador O' na nave. Referencial O' em repouso:

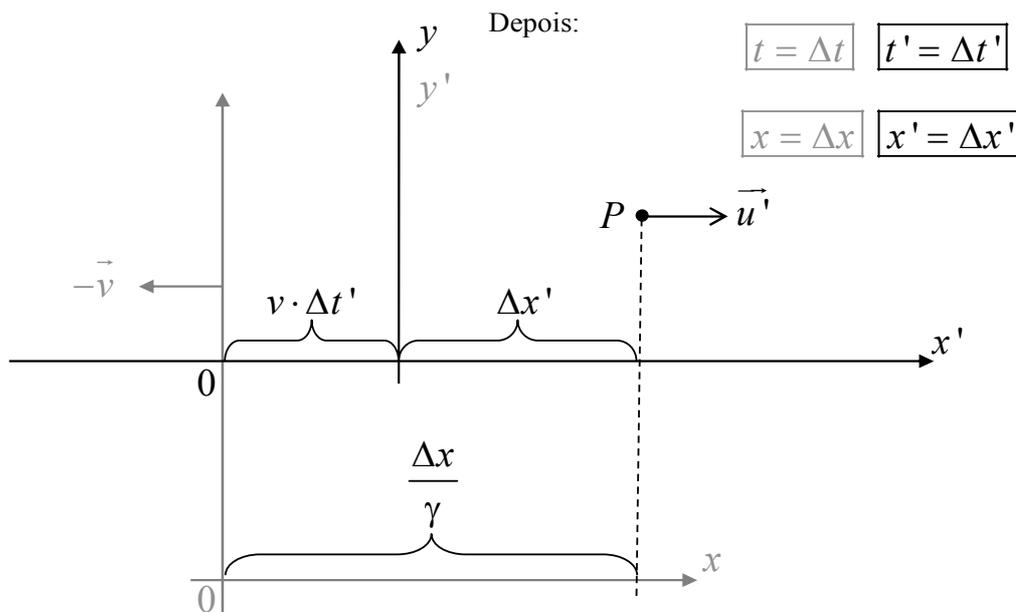


Figura 17: Instante final do movimento da partícula P com observador O' na nave. Observe que o referencial x' mede:

$$\frac{\Delta x}{\gamma} = v \cdot \Delta t' + \Delta x'$$

Isolando Δx :

$$\Delta x = \gamma(\Delta x' + v \cdot \Delta t'). \tag{3.7.2}$$

Esta é a transformação de Lorentz para o deslocamento Δx , quando o observador faz medidas em O'.

Para encontrar as transformações de Lorentz para os tempos, primeiro vamos manipular a equação (3.4.7):

$$\gamma^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

$$\frac{1}{\gamma^2} = 1 - \frac{v^2}{c^2}. \quad (3.7.3)$$

Substituindo (3.7.1) em (3.7.2), tem-se:

$$\Delta x = \gamma(\gamma(\Delta x - v \cdot \Delta t) + v \cdot \Delta t').$$

Isolando $\Delta t'$:

$$\Delta t' = \frac{\Delta x - \gamma^2(\Delta x - v \cdot \Delta t)}{\gamma \cdot v},$$

$$\Delta t' = \gamma \left(\frac{\Delta x(1 - \gamma^2) + \gamma^2 \cdot v \cdot \Delta t}{\gamma^2 \cdot v} \right),$$

$$\Delta t' = \gamma \left(\frac{\Delta x}{v} \left(\frac{1}{\gamma^2} - 1 \right) + \Delta t \right).$$

Substituindo (3.7.3):

$$\Delta t' = \gamma \left(\frac{\Delta x}{v} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} - 1 \right) + \Delta t \right),$$

$$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{v \cdot \Delta x}{c^2} \right). \quad (3.7.4)$$

Esta é a transformação de Lorentz para o tempo $\Delta t'$ quando o observador faz medidas em O .

Por fim, de forma análoga, substituindo (3.7.2) em (3.7.1), têm-se:

$$\Delta x' = \gamma(\gamma(\Delta x' + v \cdot \Delta t') - v \cdot \Delta t).$$

Isolando Δt :

$$\Delta t = \frac{-\Delta x' + \gamma^2(\Delta x' + v \cdot \Delta t')}{\gamma \cdot v},$$

$$\Delta t = \gamma \left(\frac{-\Delta x' + \gamma^2 (\Delta x' + v \cdot \Delta t')}{\gamma^2 \cdot v} \right),$$

$$\Delta t = \gamma \left(-\frac{\Delta x'}{v} \left(\frac{1}{\gamma^2} - 1 \right) + \Delta t' \right).$$

Substituindo (3.7.3):

$$\Delta t = \gamma \left(-\frac{\Delta x'}{v} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} - 1 \right) + \Delta t' \right),$$

$$\Delta t = \gamma \left(\Delta t' + \frac{v \cdot \Delta x'}{c^2} \right). \quad (3.7.5)$$

Esta é a transformação de Lorentz para o tempo Δt quando o observador faz medidas em O' .

Além de deslocamentos e intervalos de tempos, podemos expandir o raciocínio para velocidades:

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Substituindo (3.7.2) e (3.7.5):

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

Dividindo numerador e denominador por $\Delta t'$:

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

Considerando $u' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'}$:

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

Acima obtivemos a transformação de Lorentz para a velocidade u quando o observador faz medidas em O' .

Analogamente:

$$u' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'}$$

Substituindo (3.7.1) e (3.7.4):

$$u' = \frac{\gamma(\Delta x - v \cdot \Delta t)}{\gamma\left(\Delta t - \frac{v \cdot \Delta x}{c^2}\right)}$$

Dividindo numerador e denominador por Δt :

$$u' = \frac{\frac{\Delta x}{\Delta t} - v}{1 - \frac{v \cdot \Delta x}{\Delta t \cdot c^2}}$$

Considerando $u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$:

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{u \cdot v}{c^2}}$$

Esta é a transformação de Lorentz para a velocidade u' quando o observador faz medidas em O .

Em suma, podemos descrever todas as transformações de Lorentz:

Tabela 1: Transformações de Lorentz para as velocidades.

Medidas feitas em O :	Medidas feitas em O' :
$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v \cdot \Delta t),$	$\Delta x = \gamma(\Delta x' + v \cdot \Delta t'),$
$\Delta t' = \gamma\left(\Delta t - \frac{v \cdot \Delta x}{c^2}\right),$	$\Delta t = \gamma\left(\Delta t' + \frac{v \cdot \Delta x'}{c^2}\right),$
$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{u \cdot v}{c^2}}$	$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u' \cdot v}{c^2}}$

É importante ressaltar que essas equações foram deduzidas a partir de proposições e técnicas totalmente contidas ou aplicáveis num contexto de ensino médio.

Capítulo 4

Metodologia e Coleta de Dados

Este capítulo apresenta a forma como foi feita a tentativa de levar elementos de aprendizagem significativa para a sala de aula. Se isso for feito de forma metódica, por meio de material instrucional bem estruturado, é possível que outros profissionais do ensino utilizem as mesmas técnicas (ou técnicas análogas) para ministrar as suas aulas utilizando o material criado, ou mesmo tenham um norte para criar um material próprio, de acordo com o conteúdo que apresentará. Dessa forma, inicialmente será focada a construção do material instrucional e posteriormente a maneira como foram aplicadas as aulas e coletados dados que mostrariam fatores favoráveis ou desfavoráveis em relação à aparição de elementos da aprendizagem significativa.

4.1 Objetivos

Objetivos gerais:

- O objetivo geral desta pesquisa é mostrar que é possível que um professor de Física, visando ensinar cinemática relativística, tenha a capacidade de estruturar sua ação em sala de aula com base na teoria de ensino referente à aprendizagem significativa de Ausubel.
- Mostrar que a teoria da relatividade especial (TRR) pode ter seu papel no ensino médio, abrindo caminho para a sua inclusão no currículo de forma sistemática e não apenas facultativa, podendo ser apresentada com linguagem compreensível e adequada ao nível do ensino médio, evitando que se lance mão de teorias de nível superior para justificar conceitos e equações, como limites, derivadas, integral, álgebra linear ou conhecimentos de teoria da relatividade geral;

Objetivos específicos:

- Em sala de aula, determinar o conhecimento prévio pertinente dos alunos, identificar os subsunçores dentro dos conhecimentos prévios, apresentar a nova informação com o material potencialmente significativo presente no material instrucional, mediar o estabelecimento da ancoragem da nova informação com o subsunçor adequado, permitir e

o processo de assimilação, identificar o produto interacional, apresentar situações nas quais se possa incentivar e verificar a consolidação dos conceitos, utilizar o novo produto interacional como subsunçor para uma nova informação e, assim, de forma cíclica, avançar pelo conteúdo das aulas;

- Garantir que o material instrucional, bem como as aulas, sigam uma organização sequencial, como definido por (MOREIRA, 2011).

4.2 Sujeitos

Este trabalho foi produzido e aplicado no Centro Educacional Charles Darwin em Vitória-ES, entre junho e agosto de 2016. Foi realizado no contra turno, na forma de um curso oferecido gratuitamente a alunos do ensino médio numa turma de primeiro e segundo anos (turma B) e em outra com alunos de terceiro ano e pré-vestibular (turma A).

Desconsiderando alunos desistentes, ou que perderam parte importante do curso por faltas, a turma A teve oito alunos e a turma B teve dez.

Considerando apenas aqueles alunos que não faltaram, a turma A teve seis alunos e a turma B teve cinco.

4.3 Construção do material instrucional e interação com a aula

A produção do material instrucional deve ser criteriosa, pois:

Uma das condições para a ocorrência da aprendizagem significativa, portanto, é que o material a ser aprendido seja relacionável (ou incorporável) à estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não arbitrária e não literal. Um material com essa característica é dito potencialmente significativo. Essa condição implica não só que o material seja suficientemente não arbitrário em si, de modo que possa ser aprendido, mas também que o aprendiz tenha disponível em sua estrutura cognitiva os subsunçores adequados. (MOREIRA, 2011, p. 164).

Em busca dos conhecimentos prévios relacionados à cinemática galileana, o professor deve consultar seus alunos quanto a já terem aprendido cinemática escalar e velocidade relativa. Teoricamente, alunos de segundo ano do ensino médio em diante já possuem esses conhecimentos e alunos de primeiro ano estão aprendendo, mas a verificação se faz necessária. Para contribuir com essa verificação, lançou-se mão de um questionário antes do início da utilização do material instrucional propriamente dito. Uma das perguntas do questionário é a seguinte:

“Um carro A se move numa estrada retilínea a 50 km/h. Um carro B se move na mesma estrada, a 60 km/h no mesmo sentido.

a) Qual a velocidade relativa do carro B em relação ao carro A?

b) Qual a velocidade relativa do carro A em relação ao carro B?

c) Se B se movesse em sentido oposto a A, qual seria a velocidade relativa do carro A em relação ao carro B?”

Dessa forma, o professor pode dosar quanto tempo dedicará à revisão da cinemática escalar antes de iniciar a TRR de fato. Isso será feito no primeiro capítulo do material instrucional.

Sendo assim, a partir do tópico 4.3.1 a seguir, será feita uma descrição detalhada de como cada capítulo do material instrucional foi produzido, justificando-se a sequência didática apresentada.

4.3.1 Construção do capítulo 1 (parte 1) – Introdução.

O primeiro capítulo é estruturado para integrar o campo dos conhecimentos prévios, então o material instrucional se inicia com uma revisão de cinemática galileana com o seguinte texto e a seguinte figura:

“Em nosso cotidiano, estamos acostumados a conviver com o conceito de velocidade, que nos dá a ideia de movimento. Podemos facilmente imaginar o movimento de uma pessoa, um carro, um avião, uma bola de futebol, uma formiga, etc.

É importante ressaltar que o movimento é uma grandeza relativa, ou seja, um corpo se move em relação a um referencial (outro corpo, ou uma estrada, por exemplo).

A cinemática de Galileu Galilei (1564-1642) nos permite calcular com precisão deslocamentos, velocidades e tempos, em especial no Movimento Retilíneo e Uniforme (MRU). Assim, se motorista de um carro vê passar uma hora no seu relógio para chegar a uma cidade a 60 km de distância, fez o percurso com uma velocidade média de 60 km/h. Já um carro que se move numa estrada a 50 km/h num sentido e outro que se move a 40 km/h, no sentido oposto, se deslocam com a velocidade relativa de 90 km/h entre eles, ou seja, a soma dos módulos de suas velocidades”.

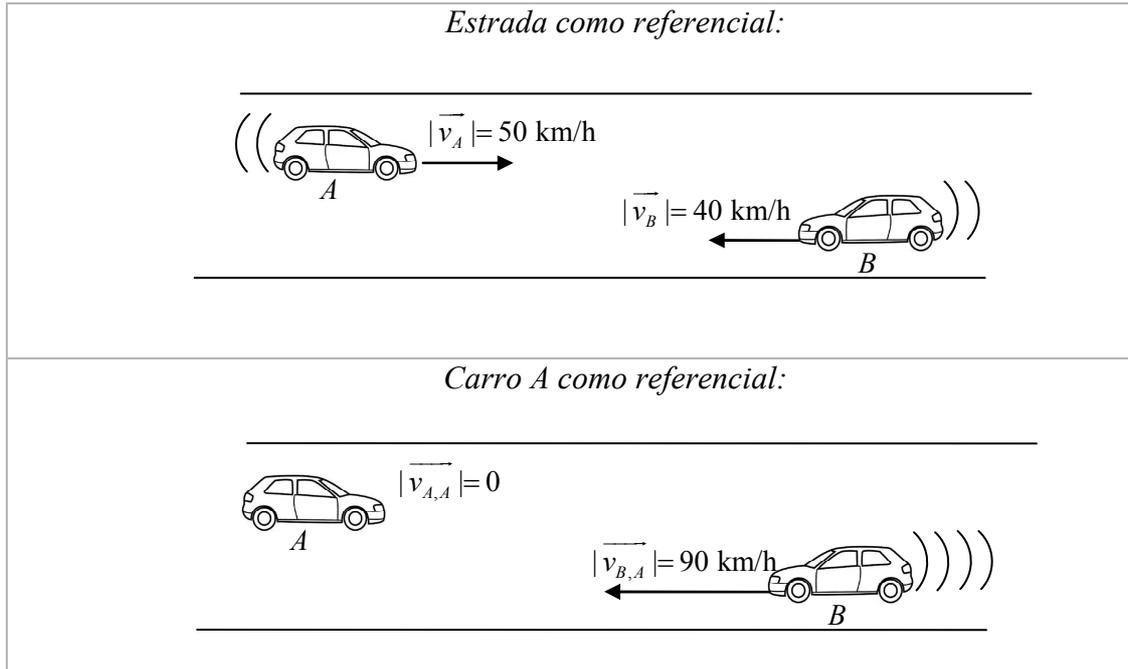


Figura 18: Velocidades medidas por movimento relativo.

Nesse trecho do material instrucional, identifica-se o conhecimento prévio “cinemática escalar galileana” como subsunçor para nova informação que virá a seguir. A nova informação será “o fato de a luz ter sua velocidade relativa não dependente do movimento da fonte nem do observador”. O ponto de ancoragem no subsunçor é, portanto, o conhecimento de “velocidade relativa”, bem como a técnica para se calcular tal velocidade num sistema de objetos que se movem. O próximo texto, portanto, deve iniciar a ligação pretendida, como se segue:

“Agora, precisamos nos perguntar: Essas medidas são sempre tão precisas, quando tratamos de velocidades altíssimas, como de cometas, satélites, partículas emitidas por radioatividade, ventos solares, etc.?”

No final do século XIX e no início do século XX, grandes cientistas, como Albert Einstein (1879-1955) e Hendrik Lorentz (1853-1928) se depararam com sérios dilemas, ao notarem que a luz tinha um movimento muito peculiar, fugindo aos padrões cotidianos, o que os fez levantar diversas hipóteses e imaginar que a cinemática Galileana não daria resultados corretos para objetos com velocidades muito altas.

De fato, para corpos que se movem a 80% da velocidade da luz (ou $2,4 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), por exemplo, podemos ter erros da ordem de até 60% nas medidas de espaço, tempo e velocidade.

Antes de chegar a essas conclusões, precisamos entender melhor o movimento da luz.”.

Esse trecho abre caminho para a chegada da nova informação, ou seja, cria um ponto de ancoragem nela, buscando a ligação com o subsunçor.

4.3.2 Construção do capítulo 2 (parte 1) – A velocidade da luz.

A confecção do capítulo 2 leva em conta que a chegada da nova informação deve ser feita de forma convincente, não apenas imposta como verdade pela vontade do professor ou por ser um postulado. Dessa forma, é válido citar fatos históricos ou experimentais, buscando maior receptividade dos alunos. O texto feito com esse objetivo tem a seguinte forma:

“2.1. Velocidade da Luz no Vácuo:

A luz (onda eletromagnética visível), assim como qualquer onda eletromagnética, é um fenômeno da natureza com características tanto de partículas (fótons), quanto de ondas. No vácuo ela tem seu movimento praticamente desimpedido, o que a permite ter maior velocidade possível, que chamamos de c .

$$c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo.

Observação: na verdade a luz no vácuo tem a velocidade de 299 792 458 m/s por definição. No ar atmosférico a luz praticamente não encontra moléculas em seu caminho, devido à baixa densidade, tendo quase a mesma velocidade que tem no vácuo. Pela cinemática de Galileu, podemos imaginar que, se um objeto se movesse, por exemplo, a $2 \cdot 10^8$ m/s para a direita e fosse iluminado por um raio de luz que se move para a esquerda, com $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, o objeto detectaria esse raio se movendo com velocidade relativa de $3 \cdot 10^8 + 2 \cdot 10^8 = 5 \cdot 10^8$ m/s (mais rápido do que a luz).

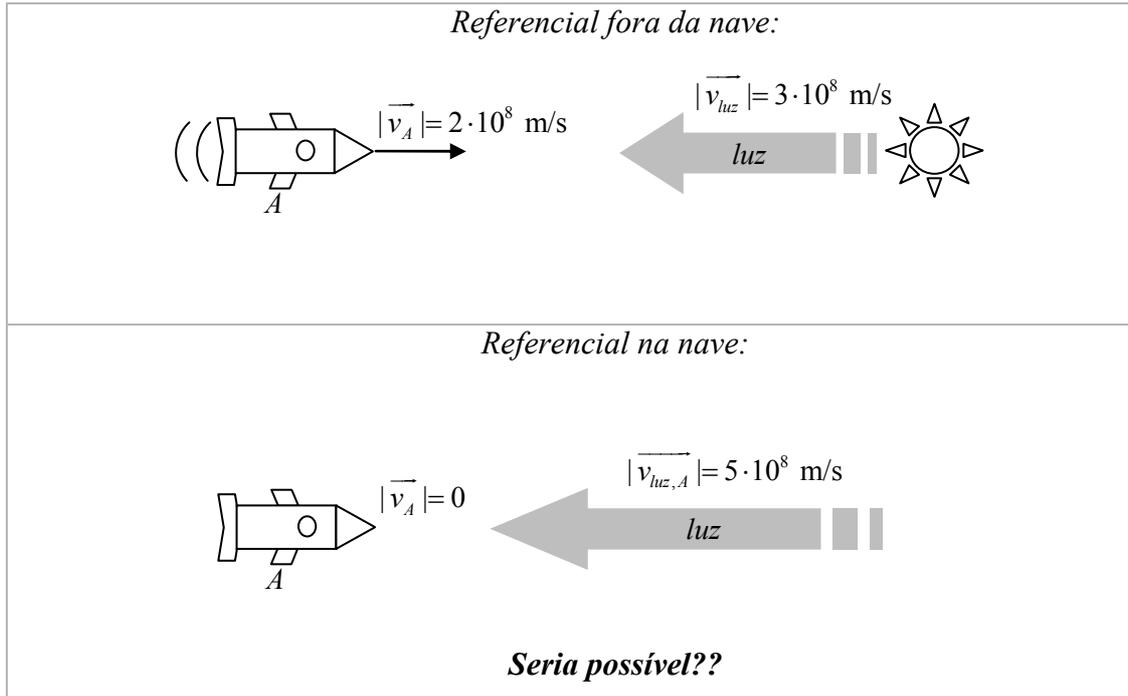


Figura 19: Movimento relativo para a luz.

Em 1887, no entanto, Albert Michelson (1852 - 1931) e Edward Morley (1838 - 1923) verificaram experimentalmente que isso é IMPOSSÍVEL!

No material criado, foi descrito o experimento de Michelson-Morley como fato histórico e experimental:

2.2. O Experimento de Michelson-Morley (1887):

Defendia-se a ideia de que o éter (uma espécie de fluido) ocuparia todo o espaço, inclusive no vácuo (ausência de matéria). Dessa forma, a luz se moveria no éter com velocidade constante, como uma onda sonora se move em relação ao ar. Assim, considerando-se todos os movimentos da Terra (rotação, translação, etc), certamente ela se moveria em relação ao éter.

Dessa forma, o experimento de Michelson-Morley pretendia verificar que a luz teria velocidades diferentes, quando se movesse em diferentes direções na superfície da Terra (a favor do éter, contrária ao éter, ou mesmo perpendicularmente a ele). Hoje se sabe que a terra se move a cerca de 29,8 km/s em torno do Sol, velocidade grande o suficiente para comparar experimentalmente com os 300.000 km/s da velocidade da luz. No experimento, um jogo de espelhos e um espelho semi-reflexivo imprimiu dois diferentes caminhos para um feixe de luz emitido por uma única fonte.



Figura 20: Aparato experimental do interferômetro de Michelson-Morley.

Fonte: <http://fisica.fe.up.pt/luz/michelson.html>

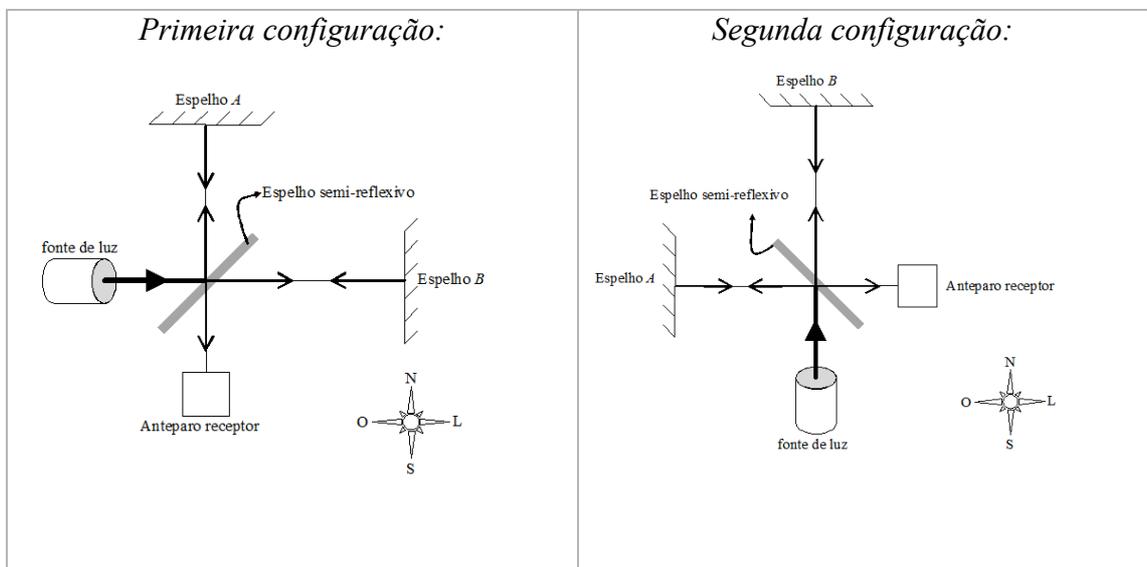


Figura 21: Esquema – funcionamento do aparato experimental de Michelson-Morley.

Cada caminho (A e B) é feito em diferentes tempos, Δt_A e Δt_B . Ao se reencontrarem e seguirem para o anteparo receptor, as ondas luminosas criam um padrão de interferência bem definido, determinado por essa diferença entre os tempos.

Se o experimento for girado ou posto na posição vertical, as velocidades da luz nos dois caminhos sofreriam alterações, pois o suposto éter mantém seu movimento e, certamente, haveria mudanças tanto em Δt_A quanto em Δt_B , criando um novo padrão de interferência.

Ao utilizar essa parte do texto, o professor deve ficar atento, pois alguns conceitos, como “éter” e “padrão de interferência” provavelmente não foram aprendidos pelos alunos e não devem entrar como nova informação para um ciclo de aprendizagem significativa, pois isso desviaria o material do objetivo de ensinar TRR. Vale uma breve explicação de interferência construtiva

e destrutiva, caso o professor julgue que seus alunos teriam dificuldade em aceitar que os tais padrões podem ser iguais ou diferentes. Dando continuidade, a informação é complementada e concluída como a seguir:

Para surpresa dos cientistas, os padrões não sofreram quaisquer alterações quando o aparato experimental foi girado, ou mesmo feito num plano vertical. Isso significaria futuramente que a teoria do éter cairia em desuso.

Mesmo diante de uma razoável hipótese de que a superfície da Terra “arrasta” o fluido éter e, por isso, não seria detectado seu movimento nas proximidades da superfície, a tecnologia espacial permitiu que o experimento de Michelson-Morley fosse reproduzido longe do planeta Terra, decretando o fim a qualquer dúvida sobre o assunto.

Uma nova ideia começou a surgir: A velocidade da luz não depende do movimento do referencial (Terra), do observador nem da fonte!

Finalizada a escrita do tópico 2.2, considerou-se válido apresentar mais um fato experimental. O decaimento de píons neutros foi esse outro fato citado para reforçar a compreensão de que o movimento da luz não depende do movimento da fonte, o que originou o seguinte tópico:

2.3. O decaimento de píons neutros (π^0):

Outra evidência da maneira peculiar como a luz e as outras ondas eletromagnéticas se propagam é a emissão de fótons por decaimento de píons.

Os mésons pi (píons) neutros, π^0 , são partículas subatômicas previstas na década de 1930 e detectadas em 1950. Seu tempo médio de vida é de poucos nanossegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$) e logo se transforma em raios gama (γ):

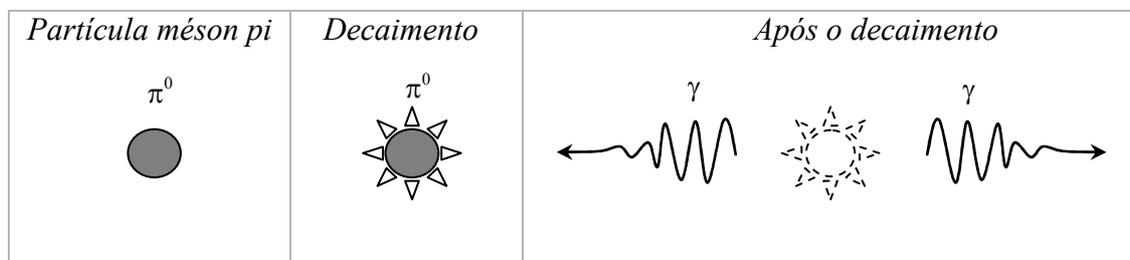
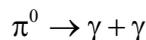


Figura 22: Esquema da emissão de fótons pelo decaimento de píons.

Em aceleradores de partículas, mesmo quando $v_{\pi^0} = 0,99975c$, a velocidade dos raios γ detectados é sempre igual àquela medida para o π^0 em repouso!

Isso reforça a ideia de que o movimento da fonte não interfere na velocidade da radiação eletromagnética emitida.

Observação: O brasileiro César Lattes (1924-2005), que foi professor da Unicamp-SP, participou da equipe que descobriu os primeiros mésons π .

Estabelecidos e sugeridos os possíveis pontos de ancoragem, a nova informação é finalmente apresentada, na forma dos postulados de Einstein no próximo tópico:

2.4. Postulado* de Einstein para a Velocidade da Luz:

**Postulado: afirmação ou fato admitido sem necessidade de demonstração.*

Einstein não foi o único autor, mas compilou teorias de outros autores sobre a relatividade, organizando de forma mais didática. Sem afirmar nem negar a teoria do éter, preferiu postular uma ideia equivalente a:

"A velocidade da luz no vácuo independe do movimento da fonte e do movimento do observador."

Em outras palavras, a velocidade da luz é uma grandeza absoluta (não relativa), ou seja, não depende do referencial onde ela é medida.

Nesse momento, o professor tem elementos o suficiente para abrir um debate com os alunos visando à interação da nova informação com o subsunçor, dando outros exemplos, tirando dúvidas, revisitando o experimento de Michelson ou o de píons e, assim, evoluindo o processo de ancoragem para o de assimilação. Os exercícios que se seguem também devem contribuir com esse processo, até que o professor tenha elementos para considerar que o produto interacional já é robusto o suficiente para ser um novo subsunçor que possa receber outra nova informação.

A lista de exercícios também pode ter uma organização sequencial, visitar e revisar os conhecimentos prévios e novos, pois ela contribui com o processo de diferenciação progressiva e com o início da reconciliação integrativa, que pode levar muito tempo, é fato, mas seu início já durante as aulas é possível.

É importante notar que a forma como os exercícios serão resolvidos e discutidos tem sua função, pois é fundamental a interação entre alunos e entre professor e alunos. Diante disso, a seção de exercícios ficou assim construída:

2.5. Exercícios:

REVISÃO DE CONHECIMENTOS PRÉVIOS:

<p>2.5.1. Dois carros colidem frontalmente em uma estrada, que serve de referencial. Se o carro A se movia a 60 km/h e o carro B a -80 km/h, o impacto causado pela colisão, sentido pelo carro A é semelhante a A parado e B o atingindo a</p>	<p>a) 20 km/h b) -20 km/h c) 70 km/h d) 140 km/h e) -140 km/h</p>
---	---

<p>2.5.2. Em um jogo de futebol americano, dois jogadores correm no mesmo sentido e o de trás lança a bola para o da frente. O de trás se move a 10 km/h, o da frente a 25 km/h. O jogador de trás lança a bola com uma velocidade de 90 km/h em relação ao seu próprio corpo. Qual a velocidade relativa da bola (em relação ao corpo) para o jogador que a recebe?</p>	<p>a) 90 km/h b) 75 km/h c) 85 km/h d) 100 km/h e) 125 km/h</p>
--	---

ASSIMILAÇÃO

<p>2.5.3. Tendo a Terra como referencial, seja c a velocidade da luz. Uma nave espacial A a $0,6c$ se aproxima da nave B, a $-0,8c$. Qual a velocidade da luz emitida pelos faróis da nave B, quando medida por um detector <u>parado na Terra</u>?</p>	<p>a) $2,4c$ b) $1,8c$ c) $1,6c$ d) $1,0c$ e) $0,4c$</p>
--	---

<p>2.5.4. Tendo a Terra como referencial, seja c a velocidade da luz. Uma nave espacial A a $0,6c$ se aproxima da nave B, a $-0,8c$. Qual a velocidade da luz emitida pelos faróis da nave B, quando medida por um detector <u>na nave A</u>?</p>	<p>a) $2,4c$ b) $1,8c$ c) $1,6c$ d) $1,0c$ e) $0,4c$</p>
--	---

2.5.5. Suponha um interferômetro de Michelson-Morley, como na figura abaixo, em que as distâncias dos espelhos A e B ao espelho semi-reflexivo sejam iguais a d . Suponha, ainda, que o movimento da Terra, na ocasião, seja em direção a Leste, com velocidade v , e que c é a velocidade da luz em questão. A luz leva um tempo Δt_A para ir do espelho semi-reflexivo até o receptor quando refletida pelo espelho A e Δt_B pelo espelho B .

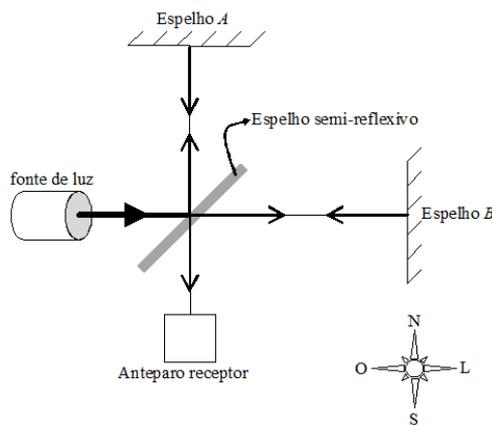


Figura 23: Interferômetro de Michelson-Morley.

Numa abordagem relativística (e real), qual será a relação entre Δt_A e Δt_B ?

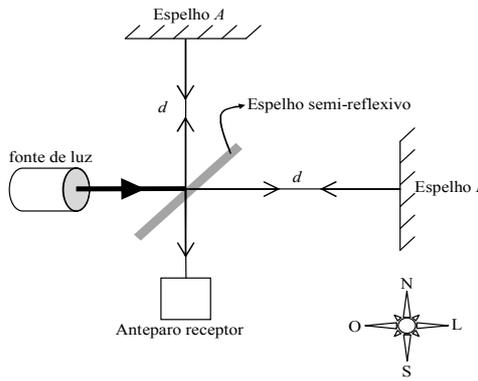
- a) $\Delta t_A = \Delta t_B$.
- b) $\Delta t_A = (c - v) \cdot \Delta t_B$.
- c) $\Delta t_A = v \cdot \Delta t_B$.
- d) $\Delta t_A = \frac{c}{c - v} \cdot \Delta t_B$.
- e) $\Delta t_A = \sqrt{\frac{c^2 - v^2}{c^2}} \cdot \Delta t_B$.

Os exercícios 2.5.1. até 2.5.5. tem o objetivo de incentivar a diferenciação progressiva, uma vez que provoca o confronto entre a cinemática de galileu para objetos, e o movimento peculiar da luz. É um momento importante, pois caso o professor verifique que os alunos estão respondendo a perguntas similares de forma correta e com naturalidade, ele identifica que o processo de consolidação está se desenvolvendo e, caso detecte dificuldades, ele pode mostrar mais exemplos, fazer novas perguntas ou sugerir que os alunos que começaram a entender discutam com os colegas, até que a consolidação seja detectável (AUSUBEL, 1982)

APROFUNDAMENTO:

2.5.6. Suponha um interferômetro de Michelson-Morley, como na figura abaixo, em que as distâncias dos espelhos A e B ao espelho semi-reflexivo sejam iguais a d . Suponha, ainda, que o movimento da Terra, na ocasião, seja em direção a Leste, com velocidade v , e que c é a velocidade da luz em questão. A luz leva um tempo Δt_A para ir do espelho semi-reflexivo até o receptor quando refletida pelo espelho A e

Δt_B pelo espelho B. Se for usada uma abordagem clássica, com a luz se movendo com velocidade c em relação ao espaço, mas sua velocidade relativa ao aparato experimental sendo calculada somando ou subtraindo vetorialmente pela velocidade da Terra, qual deveria ser a relação entre Δt_A e Δt_B ? (Observe que a abordagem clássica não prevê corretamente o resultado experimental).

 <p>Figura 24: Interferômetro de Michelson-Morley.</p>	<p>a) $\Delta t_A = \Delta t_B$.</p> <p>b) $\Delta t_A = (c - v) \cdot \Delta t_B$.</p> <p>c) $\Delta t_A = v \cdot \Delta t_B$.</p> <p>d) $\Delta t_A = \frac{c}{c - v} \cdot \Delta t_B$.</p> <p>e) $\Delta t_A = \sqrt{\frac{c^2}{c^2 - v^2}} \cdot \Delta t_B$.</p>
---	--

<p>2.5.7. Uma estrela se afasta radialmente da Terra. Detecta-se que a faixa da luz violeta emitida pelo hidrogênio contido na estrela chega à Terra com 410,4 nm de comprimento de onda. Sabendo que a faixa violeta do espectro do hidrogênio corresponde a 410,2 nm, calcule a velocidade aproximada da estrela em relação à Terra.</p>	<p>a) $1,5 \cdot 10^3$ m/s.</p> <p>b) $1,5 \cdot 10^4$ m/s.</p> <p>c) $1,5 \cdot 10^5$ m/s.</p> <p>d) $1,5 \cdot 10^6$ m/s.</p> <p>e) $1,5 \cdot 10^7$ m/s.</p>
--	--

O professor deve considerar que os exercícios de aprofundamento exigem conhecimentos de outras áreas, como ondulatória e cinemática vetorial. Essas questões, portanto, devem ser facultadas aos alunos, não podendo ser exigidas e muito menos entrar nos processos de avaliação. Aparentemente esses exercícios podem estar fora de contexto, mas é importante lembrar que a reconciliação integrativa faz parte da aprendizagem e, nesse momento, a aula de TRR pode contribuir com a reconciliação dos conceitos de vetores e ondulatória e vice-versa.

4.3.3 Construção do capítulo 3 (parte 1) – O limite da velocidade dos corpos.

Este capítulo visa criar um debate com os alunos para que o professor possa verificar conhecimentos prévios, pontos de ancoragem e preparar a chegada de novas informações. Nele,

surge um aparente paradoxo e uma possível dificuldade que os professores de ensino médio têm ao ensinar TRR é saber lidar com esses paradoxos ao apresentá-los aos alunos, ou mesmo o professor ter dificuldade em entendê-lo, então este material também objetiva facilitar a compreensão e sugerir formas de exposição das ideias ao professor, evitando cometer erros conceituais, mas também levando uma linguagem não tão técnica, compreensível aos alunos:

3.1. O "Experimento Mental de Einstein"*

** Um experimento mental consiste em imaginar um fenômeno sem colocá-lo em prática de fato, mas seguindo fielmente todas as teorias relevantes.*

Aos 16 anos (muito antes do surgimento da teoria da relatividade), Einstein imaginou a seguinte situação: Se alguém puder perseguir, com velocidade c , um feixe de luz, o que ele observaria?

Essa curiosidade o levou, posteriormente, a desenvolver muito sobre a teoria da relatividade.

Baseado nesse experimento mental e na já conhecida limitação para o movimento da luz podemos imaginar outro experimento:

"Se um viajante em uma nave pudesse perseguir, com velocidade muito próxima à da luz, por exemplo, suponha $v_{luz} = 299\,790\,001$ m/s, $v_{nave} = 299\,790\,000$ m/s e seu rosto emite um feixe de luz para um espelho 1 m à sua frente, como ele veria a imagem?"

Para responder a isso, primeiramente já temos base para saber o que acontece no referencial da nave:

A luz que é refletida pela pessoa, atinge o espelho e é detectada por ela mesma, sempre se movendo com velocidade c em relação a ela. Assim, certamente essa luz voltará quase instantaneamente ao observador, após a reflexão no espelho, independentemente do movimento do referencial.

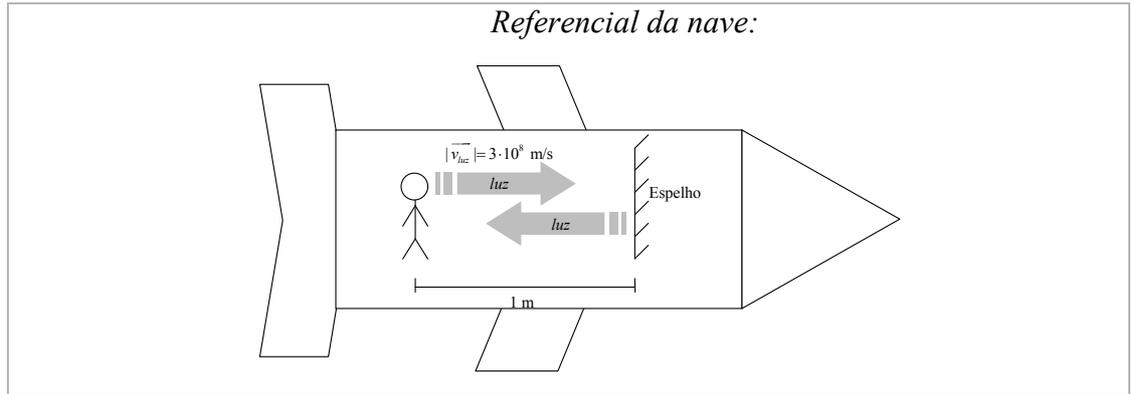


Figura 25: Observação de um feixe luminoso (referencial da nave).

Já para um observador parado fora da nave e vendo ela se mover, identificaria a luz se deslocando 299 790 001 m a cada segundo e a nave se movendo 299 790 000 m a cada segundo. De acordo com a cinemática de Galileu, ele detectaria a luz levando 1 segundo só para percorrer 1 m e atingir o espelho.

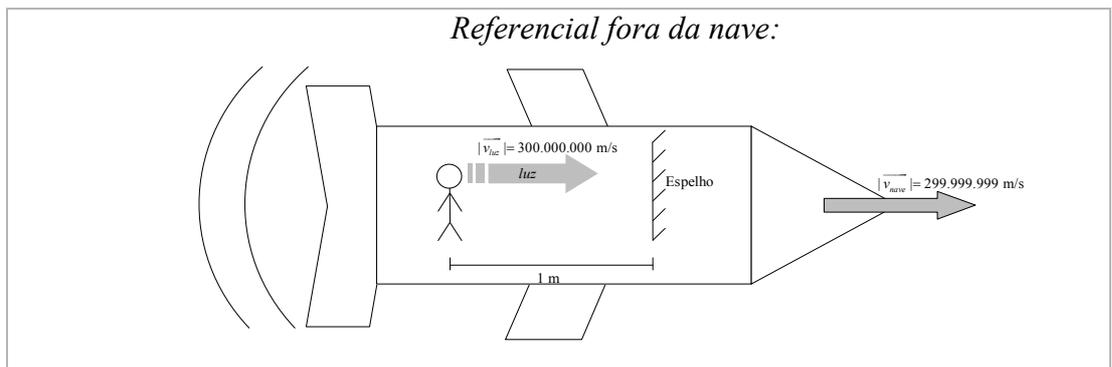


Figura 26: Observação de um feixe luminoso (referencial fora da nave).

Assim, o observador veria a sua imagem com um atraso considerável! Se a velocidade da nave se igualasse à velocidade da luz, então o observador nunca veria sua imagem! Pior ainda seria se ele ultrapassasse a velocidade da luz. Isso é absurdo, pois uma simples mudança de referencial do observador não pode interferir no evento (o fato de a pessoa da nave ver ou não a sua imagem no espelho).

Essas aparentes contradições começam a sugerir a essência da teoria da relatividade, pois cada observador, no seu referencial, detecta um mesmo fenômeno com características de tempo e distância bem diferentes, ou seja, a expressão “tudo é relativo”, nesse caso, se refere às noções de espaço e tempo. Futuramente ainda vamos mostrar que essa diferença de distâncias percorridas pela luz não é exatamente 1m e que os corpos não podem se mover com velocidade maior ou igual à da luz.

Como a explicação desse tipo de contradição só surge em capítulos posteriores, parece não haver ponto de ancoragem entre os conhecimentos prévios, incluindo a cinemática galileana e o movimento peculiar da luz, e a nova informação “paradoxo do viajante que vê com atraso ou

não vê a sua imagem, dependendo de quem observa o fenômeno”. Sendo assim, não há um ciclo completo para verificar aprendizagem significativa neste capítulo, mas a tentativa de encontrar respostas não contraditórias para a situação do viajante na nave pode abrir um ponto de ancoragem para a nova informação, que será a descrição do trem de Einstein, apresentada no capítulo seguinte.

4.3.4 Construção do capítulo 4 (parte 1) – A dilatação do tempo.

Ainda buscando pontos de ancoragem entre o subsunçor o “movimento peculiar da luz” e a nova informação que ainda não apareceu “resultado do experimento do trem de Einstein”, este capítulo se inicia tratando de referenciais e medidores de espaço e tempo com linguagem adequada, visando a receptividade dos alunos aos conhecimentos que virão. Assim, é conveniente tratar de referenciais de espaço e tempo como “régua” e “relógio”, que são objetos cotidianos e conhecidos pelos estudantes. O próximo tópico, então, tem o seguinte texto:

4.1. “Régua e Relógio”:

Diante das novas descobertas, algumas aparentes contradições foram percebidas, necessitando de uma interpretação mais condizente com a realidade.

É importante salientar que nós temos instrumentos capazes de medir distâncias curtas (régua) e a passagem do tempo em locais bem próximos (relógio). Também é possível detectar a posição de um objeto longe em um determinado instante com o auxílio de um feixe de luz laser, medindo o tempo de ida e volta e calculando o caminho percorrido, baseado na velocidade da luz. Caso o objeto esteja em movimento, não se pode esquecer que ele não estará mais na posição detectada quando o aparelho receber a luz refletida.

Sendo assim, podemos realizar mais experimentos mentais, seguindo fielmente as possibilidades físicas de medição de posições (com “régua”) e durações de eventos, ou tempos (com “relógio”).

A nova informação surge, exigindo partes da geometria e da álgebra que, teoricamente, já são de conhecimento do aluno. É apreciável que os alunos participem ativamente da construção das equações durante a aula e que o professor tenha a certeza de que todos eles estão conseguindo acompanhar, pois, de certa forma, essa sequência de cálculos age como ligação entre uma informação e outra. Assim, os cálculos apresentam característica de ponto de ancoragem e são

fundamentais nesse capítulo. Mais do que isso, ao fazer os cálculos sem cometer erros conceituais, orientados pelo professor, o aluno está reforçando a diferenciação progressiva dos conceitos já estudados. Por fim, ao inserir conceitos já aprendidos significativamente em novos contextos, fazendo cálculos e discutindo possibilidades, há indícios de uma reconciliação integradora entre antigos e novos conceitos. Este capítulo, portanto, é bem robusto e completo, transitando entre vários aspectos da aprendizagem significativa ausubeliana. O próximo tópico, então, é apresentado como:

4.2. O "Trem de Einstein":

Existe um experimento mental chamado "O trem de Einstein":

Imagine um vagão de trem espacial que pode viajar em movimento retilíneo e uniforme (MRU) a uma velocidade v altíssima, próximo à velocidade da luz, passando perto da Terra:

Ao passar próximo à Terra, um viajante dentro do trem (observador O') realiza um experimento bem simples, colocando um emissor de luz no chão, um espelho no teto, a uma altura D e um receptor de luz no chão, bem próximo ao emissor:

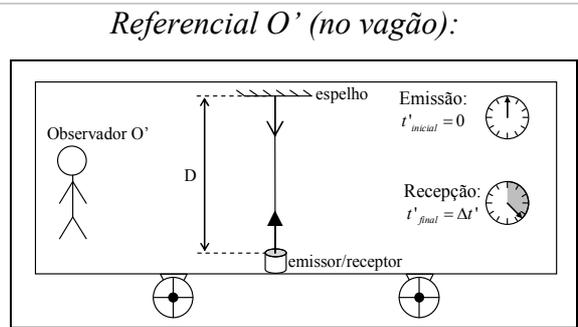


Figura 27: Emissão/recepção sob o ponto de vista do observador O' no vagão.

Um pulso de luz levará um determinado tempo $\Delta t'$ para ser emitido e posteriormente recebido, percorrendo a distância total $2D$, que pode ser medida com algum tipo de "régua". Esse tempo pode ser detectado por um "relógio" extremamente preciso. Pelo postulado de Einstein, a velocidade da luz medida pelo

viajante é c , então: $c = \frac{2D}{\Delta t'}$

Já um observador O , na Terra, verá o vagão percorrer uma distância Δx , medida com algum tipo de “régua”, e o pulso de luz leva um tempo Δt (medido por um “relógio” na Terra) para percorrer uma trajetória como na figura a seguir:

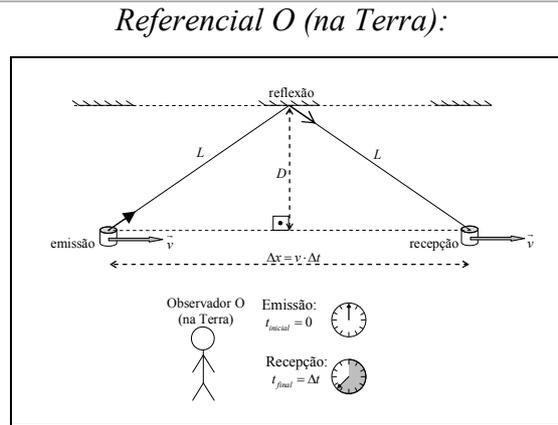


Figura 28: Emissão/recepção sob o ponto de vista do observador O na Terra.

O observador O detecta, em seu “relógio”, um tempo Δt para o movimento do pulso que, obviamente, percorreu uma distância maior, $2L$, que também pode ser medida com uma “régua”, então: $c = \frac{2L}{\Delta t}$.

Observe que $D < L$, pois a hipotenusa é maior que o cateto, então $2D < 2L$, que são as distâncias percorridas pela luz nos dois referenciais (vagão e Terra).

Vários experimentos e o postulado de Einstein, no entanto, já mostram que a luz percebida pelo observador na terra, se move também com velocidade c em relação a ele.

A mudança de referencial não é capaz de determinar uma nova velocidade para a luz. A situação também não pode cair em uma contradição física.

Dessa forma, chega-se à seguinte interpretação para o evento emissão/recepção do pulso:

Se os módulos das velocidades dos feixes de luz são iguais e as distâncias medidas são diferentes, certamente os relógios medirão tempos diferentes para o mesmo evento!

Sim, é isso o que acontece!

Perceba que $\Delta t' = \frac{2D}{c}$ e $\Delta t = \frac{2L}{c}$, mas com $D < L$, concluímos que $\Delta t' < \Delta t$.

Nesta passagem, não se pode deixar de evidenciar a importância do conhecimento subsunçor que é a forma como a luz se move com velocidade que independe do referencial. Caso o aluno não tenha convicção desse fato, ele possivelmente não estará convicto de que os tempos medidos realmente são diferentes e, portanto, não entenderá como o tempo pode se dilatar e toda a cadeia de aprendizagem pode estar comprometida. A ancoragem por meio da demonstração matemática também deve ter a participação de todos os alunos, sem exceção,

visto que, sem essa ancoragem, o conceito subsunçor não se ligará à nova informação e serão duas ideias desconexas. Mesmo que o aluno aceite e entenda, por algum motivo, ele não terá aprendido significativamente de acordo com a teoria de Ausubel. Para refutar essa hipótese, o material segue com uma passagem que visa assimilação, apresentando casos em que as medidas de tempo têm valores diferentes, embora o termo “dilatação do tempo” só apareça mais adiante, dando margem à discussão, apresentação de ideias e dúvidas por parte dos alunos. É quase desnecessário dizer que o professor que pretende ensinar relatividade restrita deve estar preparado para o debate, evitando ele mesmo cometer erros conceituais e pesquisando previamente sobre casos em que a TRR pode ser aplicada, contribuindo com o processo de assimilação dos alunos e levando conhecimentos que podem ir além do apresentado neste material instrucional. O próximo trecho tem alguns elementos que objetivam auxiliar tal discussão em sala de aula, como se segue:

De fato, aviões, satélites e aparelhos que viajam longas distâncias com alta velocidade, sofrem sistematicamente um pequeno atraso em seus relógios, por mais precisos que sejam, mesmo feitos de diversos materiais de altíssima tecnologia. Sendo assim, a velocidade é capaz de “retardar” o movimento natural dos átomos daquele relógio.

Ainda é possível discutir vários outros casos. Se uma pessoa estiver usando tal relógio na nave, ela não perceberá que está funcionando mais lentamente, pois todos os seus átomos terão exatamente o mesmo atraso no funcionamento e, portanto, a sua sensação de passagem do tempo será inalterada. Esse tipo de filosofia fica a cargo da imaginação do estudante.

Também seria válido supor que os relógios mediriam tempos iguais e, na verdade, as distâncias percorridas pelo feixe de luz nos dois referenciais seriam iguais, sendo que a altura D do vagão seria reduzida, como um “encolhimento”. Essa hipótese, porém, é facilmente descartada por vários experimentos reais ou mentais, como o atraso nos relógios de aeronaves e atraso no tempo de decaimento de partículas, como discutiremos mais adiante.

Aqui cabe a observação muito bem colocada por (HALLIDAY, 2016), de que seria necessário demonstrar que essa alteração na altura da nave não ocorre, porém a literatura estudada neste trabalho não apresentou tal demonstração. Após discussão com os alunos, alguns pontos de ancoragem já estão sendo criados para que novas informações possam chegar. Essa assimilação amadurece com o cálculo do fator de Lorentz que, por sua vez, será fundamental para ligar a

dilatação do tempo ao conceito de contração do espaço, intermediado pela definição de tempo próprio. Dessa forma, o próximo tópico apresenta a seguinte demonstração:

4.3. O Fator de Lorentz (γ):

Matematicamente, pode-se determinar, então, a relação entre as medidas de tempo Δt (na Terra) e $\Delta t'$ (no vagão) para o mesmo evento (ida e volta do pulso de luz).

No referencial da nave (O'):	No referencial da Terra (O):
$c = \frac{2D}{\Delta t'}$ <p>Podemos isolar $\Delta t'$ e D:</p> $\Delta t' = \frac{2D}{c}, \quad (4.3.1)$ $D = \frac{c \cdot \Delta t'}{2}. \quad (4.3.2)$	<p>Podemos isolar L e Δx :</p> $c = \frac{2L}{\Delta t} \Rightarrow L = \frac{c \cdot \Delta t}{2};$ $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v \cdot \Delta t. \quad (4.3.3)$ <p>Aplicando o Teorema de Pitágoras em um dos triângulos retângulos:</p> $(L)^2 = \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2 + D^2,$ $\left(\frac{c \cdot \Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2 + D^2. \quad (4.3.4)$ <p>Podemos isolar Δt :</p> $\Delta t = \frac{2\sqrt{D^2 + (\Delta x)^2}}{c}. \quad (4.3.5)$

Podemos, ainda, substituir (4.3.2): e (4.3.3) em (4.3.4):

$$\left(\frac{c \cdot \Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v \cdot \Delta t}{2}\right)^2 + \left(\frac{c \cdot \Delta t'}{2}\right)^2.$$

Isolando Δt :

$$\Delta t = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t'. \quad (4.3.6)$$

Definimos então o fator γ de Lorentz:

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

O tópico 4.3 evidencia que o produto interacional contém o subsunçor (constância da velocidade da luz) modificado, pois, o simples fato de a luz ter sua velocidade constante agora passa também a poder ser uma ferramenta de cálculo de deslocamentos, velocidades e tempos. A nova informação, que seria o experimento mental do trem de Einstein, já possui modificação, pois, inicialmente mostrou-se apenas que os tempos seriam diferentes, mas a assimilação por meio de álgebra transformou tal informação em uma ideia mais específica, com uma expressão matemática restringindo a relação entre os dois tempos medidos. Esse produto interacional se torna um novíssimo conceito subsunçor para a ancoragem com uma nova informação, criando mais um pequeno ciclo de aprendizagem significativa. Tal nova informação seria a simples mudança de referencial, concluindo que um observador detecta que o outro sempre está mais lento em termos de funcionamento de relógios. Para a ancoragem, o tópico 4.4 apresenta uma diferenciação entre os valores de medidas de tempo, chamando a menor medida de tempo próprio:

4.4. Tempo Próprio:

Comparando as equações (4.3.1) $\Delta t' = \frac{2D}{c}$ e (4.3.5) $\Delta t = \frac{2\sqrt{D^2 + (\Delta x)^2}}{c}$, observa-se que:

$$\Delta t > \Delta t' . \tag{4.4.1}$$

Isso significa que no referencial que não se move em relação ao evento (ida e volta do pulso), ou seja, no vagão, o tempo medido é o menor possível. Chamamos esse tempo de tempo próprio.

“Tempo próprio”
É a duração do evento, quando medida em um referencial em repouso em relação ao evento – o “referencial próprio”.

Também concluímos que

$$\gamma > 1 \text{ para qualquer objeto!}$$

A expressão "dilatação do tempo" significa, portanto, que um evento em seu referencial próprio (em repouso) tem um tempo medido menor possível e se o evento se move em relação a outro referencial, qualquer medida de tempo de duração do

evento feita em tal referencial terá como resultado uma duração maior, dependendo da sua velocidade, como se o tempo sofresse uma dilatação.

A nova informação, então, é imaginar o que aconteceria caso o observador O' medisse um evento realizado nas proximidades de O e concluir que não há motivo para que, segundo as conclusões anteriores, O' meça um valor maior.

Vale destacar que se, por exemplo, um evento ocorresse na Terra e tivesse uma duração com medida Δt (portanto, seu tempo próprio), um observador O' no vagão do trem de Einstein detectaria esse mesmo evento com um tempo $\Delta t' > \Delta t$, pois o evento “se movendo” tem seu tempo dilatado, como se os átomos funcionassem mais lentamente, vistos pelo observador O' no vagão. Assim, a relação entre essas medidas seria $\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t$ ao invés de $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$. É de extrema importância que saibamos diferenciar esses dois casos, pois é uma questão de referencial, sendo a essência da teoria da relatividade.

Comparando-se relógios:

“Um relógio se movendo sempre medirá a passagem do tempo mais lentamente, para o observador parado”.

Talvez se pudesse imaginar que a simples mudança de referencial seja uma modificação tão sutil no produto interacional anterior, que faria parte da sua assimilação e não viria como uma nova informação. Aqui se tenta argumentar, no entanto, que essa sutil mudança pode gerar novos questionamentos por parte dos estudantes e acaba modificando aquele produto, que serviu de subsunção para se ancorar à tal nova informação, originando o tópico 4.5 seguinte. Um dos objetivos desta pesquisa foi justamente evitar a criação de interpretações incorretas (MARTINS, 2012) durante o processo de aprendizagem, como o paradoxo dos gêmeos (BOHM, 2014) e (GOBBI e ALVARENGA, 2016), em que supostamente dois irmãos gêmeos passariam a ter idades diferentes, caso um dos dois fosse posto a se mover com altíssimas velocidades, chegando mais novo que o que esteve em repouso e, por uma simples inversão de referencial, o outro gêmeo veria seu irmão se movendo e, assim, ele seria o mais velho, não o mais novo. No caso, com exemplos mais simples que aparecerão na lista de exercícios, com relógios marcando cerca de 1,0 s, o professor pode ilustrar bem essa mudança de referencial. Caso o aluno não parta de princípios não concluídos ou demonstrados durante o curso, ele não chegará a qualquer paradoxo. O senso comum, no entanto, pode levá-lo a fazer conclusões

falaciosas e é importante que imediatamente o professor aponte qual hipótese foi utilizada incorretamente pelo estudante. Com todos esses objetivos, foi confeccionado o tópico seguinte:

4.5. Dilatação do Tempo:

Da equação (4.3.6) e do fator de Lorentz, temos:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'.$$

(equação da dilatação do tempo!)

Vale quando o evento ocorre no referencial O' ($\Delta t'$ é o tempo próprio do evento) e é observado (medido por relógios) tanto no referencial O' quanto no referencial O .

Esse curto trecho já pode gerar discussões e apresentações de exemplos muito variadas no debate com os alunos durante a aula, produzindo assimilação. Dotados desse conhecimento, professor e alunos podem encontrar algebricamente outra nova informação (o limite para a velocidade dos corpos) com a matemática fazendo a ancoragem praticamente de forma automática entre ela e tudo o que se aprendeu no curso até então. Isso é apresentado no próximo tópico da seguinte forma:

4.6. Velocidade dos Corpos e a Velocidade da Luz:

Da equação (4.3.6), temos:

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

Logo:

$$\sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ é um número real.}$$

Assim, o denominador $1 - \frac{v^2}{c^2} > 0$.

Daí:

$$\frac{v^2}{c^2} < 1.$$

Como v e c são positivos, então:

$$v < c.$$

- Lembrando que v é a velocidade do vagão, isso significa que:

“Nenhum objeto se move com velocidade em módulo acima ou igual à da luz no vácuo!”

Para evoluir com assimilação, o material instrucional lança mão de algumas suposições falaciosas sobre a viagem no tempo ao passado e uma prova por absurdo, como se segue:

Curiosidade: Algumas histórias de ficção dizem que quando um objeto se move acima da velocidade da luz, esse objeto ou o observador pode "voltar no tempo".

Interpretamos fisicamente isso como comparar dois relógios quaisquer medindo Δt e $\Delta t'$, de forma que um deles tenha medida negativa em relação ao outro, ou seja, seus sinais são opostos e o fator γ de Lorentz seria negativo.

Matematicamente, isso é uma falácia, pois se $v > c$, não temos $\gamma < 0$, mas (lembrando que c é positivo e v é não negativo):

$$v > c \Leftrightarrow v^2 > c^2 \Leftrightarrow \frac{v^2}{c^2} > 1 \Leftrightarrow 1 - \frac{v^2}{c^2} < 0,$$

$$\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 0.$$

Como $\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, então o resultado disso é:

“ γ é um número complexo” e não “ $\gamma < 0$ ”

Fisicamente, até o momento, não temos uma interpretação clara do que seria esse γ complexo, então não podemos dizer que essa "viagem ao passado" é possível. O mesmo vale para um objeto se movendo com $v = c$, pois teríamos um denominador nulo, também absurdo matematicamente e de interpretação física duvidosa.

O texto, portanto, faz algumas sugestões para guiar a discussão em aula, o que de forma alguma impede que o debate siga outras linhas de raciocínio. O tópico 4.7, por sua vez, busca promover assimilação e consolidação dos últimos conceitos trabalhados, como se segue:

4.7. Exercícios:

ASSIMILAÇÃO:

<p>4.7.1. Uma nave A se move com 60% da velocidade da luz e uma nave B se move com 80% da velocidade da luz. Quais os fatores de Lorentz correspondentes?</p>	<p>a) $\gamma_A = \frac{5}{4}$ e $\gamma_B = \frac{5}{3}$. b) $\gamma_A = \frac{4}{5}$ e $\gamma_B = \frac{5}{3}$</p> <p>c) $\gamma_A = \frac{5}{4}$ e $\gamma_B = \frac{3}{5}$. d) $\gamma_A = \frac{4}{5}$ e $\gamma_B = \frac{3}{5}$</p> <p>e) $\gamma_A = \frac{5}{3}$ e $\gamma_B = \frac{5}{4}$.</p>
---	--

<p>4.7.2. Os aviões supersônicos mais modernos dificilmente ultrapassam a velocidade de 1000m/s. Essa velocidade é muito mais baixa que a velocidade da luz. Qual o valor mais próximo do fator de Lorentz para o avião nessa velocidade?</p>	<p>a) $\gamma_A \approx 0$.</p> <p>b) $\gamma_A \approx 1$.</p> <p>c) $\gamma_A \approx 10^{10}$.</p> <p>d) $\gamma_A \approx 10^{-10}$.</p> <p>e) $\gamma_A \approx 10^5$.</p>
---	--

<p>4.7.3. Um avião a 1000m/s sobrevoa a superfície de uma cidade. No relógio de um homem parado no solo, o tempo para atravessar um bairro é de 1s. Quanto tempo, aproximadamente, se passou no relógio do piloto do avião para atravessar a cidade?</p>	<p>a) 0 s.</p> <p>b) 1 s.</p> <p>c) $1 \cdot 10^{10}$ s.</p> <p>d) $1 \cdot 10^{-10}$ s.</p> <p>e) $1 \cdot 10^5$ s.</p>
--	---

<p>4.7.4. Uma nave se move a $0,6c$ em relação à Terra. Um observador <u>na Terra mede 2,00 s</u> para a nave ir da Terra à Lua. Quanto tempo se passou no relógio de um tripulante da nave para ir da Terra à lua? (Dica: o relógio em movimento sempre está mais lento)</p>	<p>a) 1,00 s. b) 1,28 s. c) 1,60 s. d) 2,00 s. e) 2,5 s.</p>
<p>4.7.5. Uma nave se move a $0,6c$ em relação à Terra. Um observador <u>na nave mede 1,60 s</u> para a nave ir da Terra à Lua. Quanto tempo se passou no relógio de uma pessoa na Terra, vista pelo tripulante na nave? (Dica: o relógio em movimento sempre está mais lento)</p>	<p>a) 1,00 s. b) 1,28 s. c) 1,60 s. d) 2,00 s. e) 2,5 s.</p>

4.3.5. Construção do capítulo 5 (parte 1) – A contração do espaço.

A construção do capítulo 5 continua seguindo a mesma lógica apresentada nos capítulos anteriores, sendo que agora tudo o que se aprendeu até dilatação do tempo é utilizado como subsunçor para a chegada da nova informação (mais um experimento mental com vagão), que será ancorada por meio de deduções matemáticas, culminando na evolução para o conceito de contração do espaço, destacado pela equação $L' = \gamma \cdot L$. O tópico 5.1, portanto, se formou assim:

5.1. Experimento Mental:

Consolidada a dilatação do tempo, novamente algumas aparentes contradições podem ser discutidas. Se, por exemplo, uma nave se move em relação à Terra, então a Terra se move com a mesma velocidade em relação à nave, em sentido contrário. Assim, um observador na Terra vê o relógio da nave funcionar mais lento e o observador da nave vê um relógio na Terra também ser mais lento. Qual dos dois está correto?

Ambos estão corretos! Mais à frente entenderemos melhor como isso acontece, mas precisamos entender, além da dilatação do tempo, o que acontece com o espaço em altas velocidades. Seguindo a mesma lógica do “trem de Einstein”, podemos imaginar

que a fonte emissora e o detector estão na parte traseira do vagão e o espelho na parte dianteira:

Ao passar próximo à Terra, um viajante dentro do trem (observador O') realiza um experimento, colocando um emissor de luz na parte traseira de um vagão, um espelho na parte dianteira, a uma distância L' e um receptor de luz na parte traseira, bem próximo ao emissor:

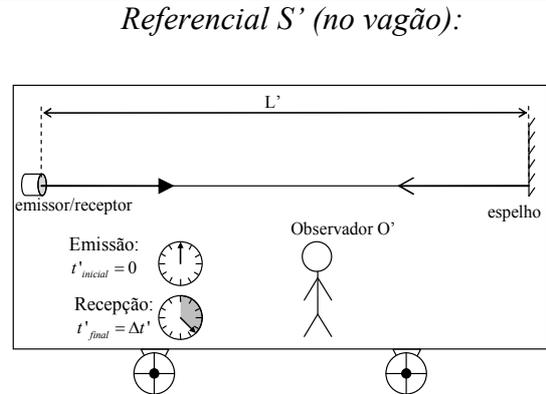


Figura 29: Emissão/recepção observado no referencial S' (no vagão).

O pulso de luz levará um tempo $\Delta t'$ para ser emitido e recebido, percorrendo a distância total $2L'$

Pelo postulado de Einstein, a velocidade da luz medida pelo viajante é c , então:

$$c = \frac{2L'}{\Delta t'}$$

Logo:

$$\Delta t' = \frac{2L'}{c} \tag{5.1.1}$$

Já um observador O , na Terra, verá o vagão com um comprimento L percorrer uma distância $v \cdot \Delta t_1$ até o pulso de luz chegar ao espelho e $v \cdot \Delta t_2$ para ele sair do espelho e chegar ao receptor:

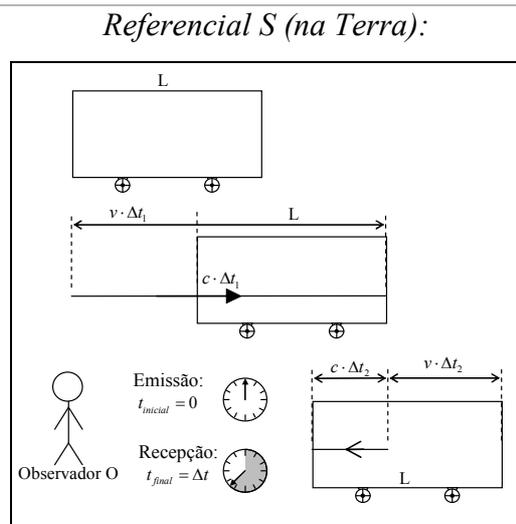


Figura 30: Emissão/recepção observado no referencial S (na Terra).

A luz percorre, nas duas etapas, as distâncias de $c \cdot \Delta t_1$ e $c \cdot \Delta t_2$, respectivamente.

O tempo total será $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$

Pela figura, observamos que:

$$c \cdot \Delta t_1 = v \cdot \Delta t_1 + L. \quad (5.1.2)$$

$$c \cdot \Delta t_2 + v \cdot \Delta t_2 = L. \quad (5.1.3)$$

Utilizaremos um pouco de álgebra, para concluir algo importante!

Somando e subtraindo (5.1.2) e (5.1.3), temos, respectivamente:

$$c \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2) = 2L + v \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_2), \quad (5.1.4)$$

$$(\Delta t_1 - \Delta t_2) = \frac{v}{c} (\Delta t_1 + \Delta t_2). \quad (5.1.5)$$

Substituindo (5.1.5) em (5.1.4) e considerando $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ e $\frac{1}{\gamma^2} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$:

$$c \cdot \Delta t = 2L + v \cdot \frac{v}{c} \Delta t,$$

$$2L = \Delta t \left(c - \frac{v^2}{c} \right),$$

$$2L = \Delta t \cdot c \cdot \left(\frac{c^2 - v^2}{c^2} \right),$$

$$2L = \Delta t \cdot c \cdot \frac{1}{\gamma^2}.$$

Incluindo a dilatação do tempo, $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$:

$$2L = \gamma \cdot \Delta t' \cdot c \cdot \frac{1}{\gamma^2}.$$

Finalmente, substituindo (5.1.1):

$$2L = \gamma \cdot \frac{2L'}{c} \cdot c \cdot \frac{1}{\gamma^2}.$$

Daí:

$$L' = \gamma \cdot L.$$

(equação da contração do espaço)

Vale quando o evento ocorre no referencial O' (L' é o comprimento próprio) e é observado (medido) tanto no referencial O' quanto no referencial O .

Sim! Qualquer objeto com uma velocidade suficientemente alta sofre uma contração no seu comprimento. Se medimos o espaço com réguas e essas réguas se contraem, podemos dizer que o próprio espaço se contrai!

Por fim, a lista de exercícios do tópico 5.2 retoma não só a contração do espaço como também a dilatação do tempo e mudança de referencial. Indiretamente, é possível afirmar que essa lista retoma, na verdade, todos os conceitos do curso, já que eles foram fundamentais para se chegar até aqui. Com isso, tem-se o próximo tópico:

5.2. Exercícios:

ASSIMILAÇÃO:

<p>5.2.1. Uma nave se move a $0,6c$ em relação à Terra. Originalmente ela foi construída com $10,0\text{ m}$ de comprimento. Qual o comprimento da nave, se medido por radares na Terra?</p>	<p>a) $8,0\text{ m}$. b) $10,0\text{ m}$. c) $12,0\text{ m}$. d) $12,5\text{ m}$. e) $15,0\text{ m}$.</p>
--	--

<p>5.2.2. Duas naves idênticas são fabricadas no mesmo local, na Terra, tendo 10 m de comprimento, cada. Se uma das naves decola e passa perto da Terra, se movendo a $0,6c$, qual o comprimento da nave do solo, medida pelos radares da nave que viaja?</p>	<p>a) $8,0\text{ m}$. b) $10,0\text{ m}$. c) $12,0\text{ m}$. d) $12,5\text{ m}$. e) $15,0\text{ m}$.</p>
--	--

<p>5.2.3. A Terra, junto com o sistema solar, se desloca a uma velocidade de 240 km/s em relação ao centro da galáxia. Em termos relativísticos, parece pouco, se considerarmos que a essa velocidade, corresponde um fator de Lorentz $\gamma \cong 1,0000005$. Mas se em algum planeta próximo ao centro da galáxia alguém medir o diâmetro da Terra, encontrará um valor diferente do que nós medimos aqui (12742 km). Qual é a diferença entre as medidas de tal diâmetro, aproximadamente?</p>	<p>a) 6 cm. b) 60 cm. c) 6 m. d) 60 m. e) 6000 m.</p>
--	---

5.2.4. (AFA 2014) Uma garota de nome Julieta se encontra em uma nave espacial brincando em um balanço que oscila com período constante igual a T_0 , medido no interior da nave, como mostra a figura abaixo.

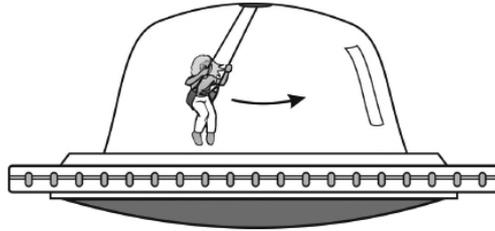


Figura 31: Garota brincando numa nave espacial.

A nave de Julieta passa paralelamente com velocidade $0,5c$, em que c é a velocidade da luz, por uma plataforma espacial, em relação à qual, o astronauta Romeu se encontra parado. Durante essa passagem, Romeu mede o período de oscilação do balanço como sendo T e o comprimento da nave, na direção do movimento, como sendo L . Nessas condições, o período T , medido por Romeu, e o comprimento da nave, medido por Julieta, são respectivamente

- a) $2T_0\sqrt{3}/3$ e $2L\sqrt{3}/3$.
- b) $2T_0\sqrt{3}/3$ e $L\sqrt{3}/2$.
- c) $T_0\sqrt{3}/2$ e $2L\sqrt{3}/3$.
- d) $T_0\sqrt{3}/2$ e $L\sqrt{3}/2$.

APROFUNDAMENTO:

5.2.5. (UFES 2010) Os mésons mu ou múons são partículas instáveis com tempo médio de vida de 2 μ s. Os múons são produzidos na alta atmosfera, milhares de km acima do nível do mar. A velocidade típica desses múons é de 0,998c (c = 300.000 km/s é a velocidade da luz no vácuo).

A) Em uma abordagem não relativista, calcule a distância média percorrida pelos múons.

B) Em uma abordagem relativista, sabendo que o fator de Lorentz é $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-0,998^2}} \cong 15$, calcule a distância média percorrida pelos múons do ponto de vista de um observador em repouso na Terra.

C) Do ponto de vista do múon, explique, usando novamente uma abordagem relativista, como muitos múons podem atingir o nível do mar, apesar de isso ser impossível em uma abordagem não relativista.

Os exercícios no final do capítulo 5 visam não só a assimilação dos conceitos apresentados nele, como também retomam todos os conhecimentos já discutidos desde o início do curso, a fim de produzir um momento de consolidação, permitindo que o aluno por si só interaja, pense, reflita, reconcilie e critique sobre situações que envolvem essa parte da TRR.

4.3.6. Construção do capítulo 6 (parte 1) – Respostas dos exercícios.

Ao final do curso, o capítulo 6 visa auxiliar o professor na resolução correta das questões, sendo assim apresentado:

3.5.1 e	4.7.1 a	5.2.1 a	5.2.5
3.5.2 b	4.7.2 b	5.2.2 a	A) $\Delta y = 598,8 \text{ m}$.
3.5.3 d	4.7.3 b	5.2.3 e	B) $\Delta y = 8982 \text{ m}$.
3.5.4 d	4.7.4 c	5.2.4 a	C) Do ponto de vista de um observador no referencial do múon há uma contração do espaço, $\Delta y'' = \frac{\Delta y'}{\gamma} = \Delta y$, tal que
3.5.5 a	4.7.5 b		uma distância de 8982 m no referencial de um observador no solo para o múon é de apenas 598,8 m.
3.5.6 e			
3.5.7 c			

Todo o processo descrito até aqui foi preparado para durar no máximo três aulas de duas horas cada, fechando uma sequência de ciclos que se iniciou na cinemática de Galileu e teve desfecho na contração do espaço.

Inicialmente a pesquisa foi planejada para terminar nesse ponto, mas a curiosidade e os pedidos dos próprios alunos serviram de incentivo para continuar. Essa primeira fase foi chamada, então, de “parte 1” e a próxima, que trata da dessincronização, de “parte 2”. O mesmo fenômeno ocorreu ao final da parte 2 na turma A, sendo produzida uma “parte 3”, com as transformações de Lorentz.

4.3.6. Construção do capítulo 1 (parte 2) – Dessincronização.

De posse do subsunçor “contração do espaço”, sabe-se que neste trabalho ele foi originado na “dilatação do tempo”, considera-se que esses conceitos agora são robustos o suficiente para agregar novas informações e modificá-las, também sendo modificados, iniciando novamente um ciclo de aprendizagem significativa. As novas informações, aqui, são o conceito de simultaneidade e de sincronização, apresentados de forma muito básica, mas suficiente para se estudar. Além disso, um experimento mental é também apresentado não exatamente como um tema novo, mas algo que já trabalhe assimilando e reconciliando diversos pontos previamente discutidos. No material potencialmente significativo chamado “parte 2”, a apresentação dessas novas informações foi feita da seguinte maneira:

1.1. Simultaneidade:

Dois eventos são simultâneos se ocorrem ao mesmo tempo. Em um referencial inercial (que não sofre aceleração, nem efeitos gravitacionais), para verificar a simultaneidade de dois eventos A e B, distantes entre si, é suficiente que um pulso de luz emitido por cada evento seja detectado simultaneamente em algum ponto equidistante de A e B.

1.2. Sincronização:

Dois relógios estão sincronizados se todas as suas medidas de tempo coincidem simultaneamente. Observe que a sincronização envolve a passagem do tempo e não apenas um instante (o que define simultaneidade e não sincronização). Observe também que entre dois referenciais relativísticos, a sincronização não pode acontecer, devido à dilatação do tempo.

Já entre dois relógios no mesmo referencial inercial, pode-se verificar se há sincronização por meio da própria luz, mesmo que seja necessário calcular o tempo de viagem da luz do relógio até o detector.

Podemos entender isso na astronomia, naturalmente, pois sabemos que a luz recebida de fenômenos simultâneos em estrelas diferentes é detectada na Terra em diferentes épocas, devido às enormes distâncias envolvidas (da ordem de anos-luz).

Assim, tendo dois relógios sincronizados em repouso, ao mudarmos um deles para um referencial com grande velocidade, a sincronização se desfaz.

Agora, será que num mesmo referencial dois (ou mais) relógios uma vez sincronizados, sempre marcarão as mesmas medidas?

Observa-se que na apresentação da nova informação, já há uma modificação no conceito de sincronização, pelo simples fato de compará-lo com hipóteses provenientes da dilatação do tempo, sendo iniciado o processo de assimilação. Em seguida, apresenta-se um experimento mental que começa a estabelecer pontos de ancoragem entre o subsunçor e as novas informações. Como ele tem valores numéricos, os alunos já podem trabalhar junto com o professor em sala, embora as resoluções estejam descritas no material instrucional. É fundamental que o professor faça a mediação, delimitando quais hipóteses levantadas pelos alunos podem ou não ser aceitas. O texto na forma de “exercício”, então, tem o seguinte conteúdo:

1.3. Experimento Mental:

Imagine uma nave (Referencial R') que se move no sistema solar (referencial R) com velocidade $v=0,6c$ ($\gamma=1,25$). Ela passa muito próxima de um planeta A e, em seguida, pelo seu satélite B , sendo detectado o tempo de $1,00s$ na Terra para esse evento. Podemos supor, ainda, cronômetros no planeta A e no satélite B , sincronizados entre si. Para melhor compreensão, considere que os cronômetros do sistema solar marcam zero quando a nave passa por A e, nesse instante, o piloto zera o cronômetro da nave. Surgem algumas perguntas:

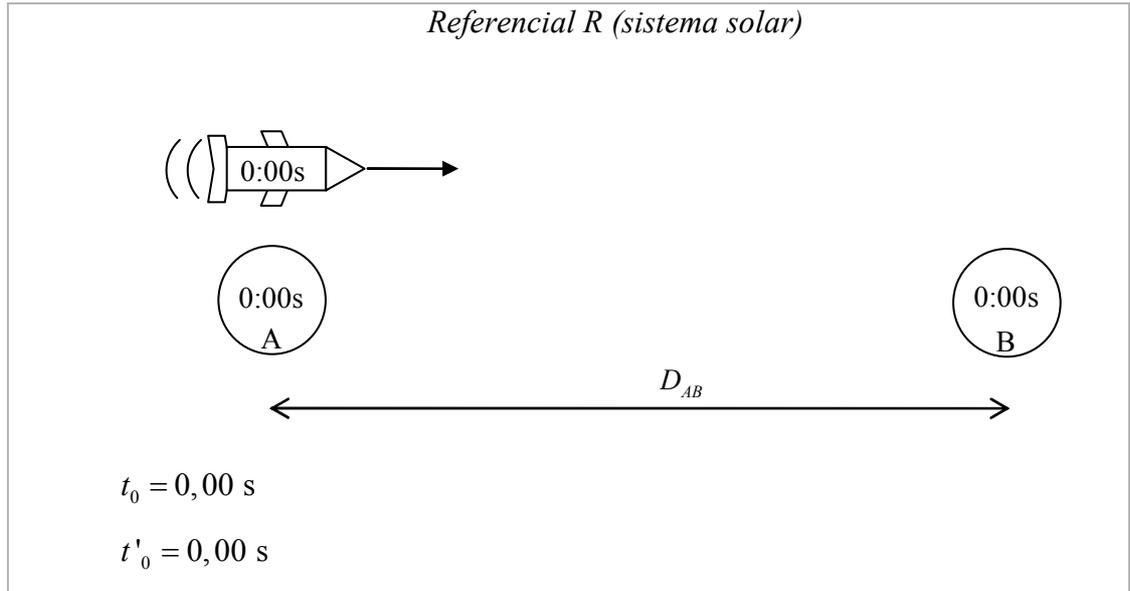


Figura 32: Nave em movimento (inicial).

- a) Quanto tempo foi detectado para o evento no relógio da nave?
- b) Qual a distância entre A e B, no referencial R?
- c) Visto pelo piloto da nave, quanto tempo se passou num relógio no planeta A? E no satélite B? Esses valores são contraditórios com a medida de 1,0s?
- d) Qual a distância entre A e B, no referencial R'?
- e) Quando a nave passa por B, quanto tempo marca o cronômetro na nave? E em A e B?

No desenvolvimento das resoluções dos itens a, b, c e d já é utilizada explicitamente a sincronização aplicada numa situação de cinemática relativística, estabelecendo-se, assim, a ancoragem:

DESENVOLVIMENTO:

- a) Dilatação do tempo (R parado e R' em movimento, logo $\Delta t > \Delta t'$):

$$\Delta t = 1,00 \text{ s e } \gamma = 1,25;$$

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'.$$

Daí:

$$1,00 = 1,25 \cdot \Delta t',$$

$$\Delta t' = 0,80 \text{ s}.$$

Pela sincronização de A com B, observe que $\Delta t_A = \Delta t_B = 1,00 \text{ s}$:

- b) No referencial R:

$$v = 0,6c = 0,6 \cdot 3 \cdot 10^8 = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m/s};$$

$$v = \frac{D_{AB}}{\Delta t} \rightarrow 1,8 \cdot 10^8 = \frac{D_{AB}}{1,00} \Rightarrow D_{AB} = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m},$$

que é a distância própria entre A e B!

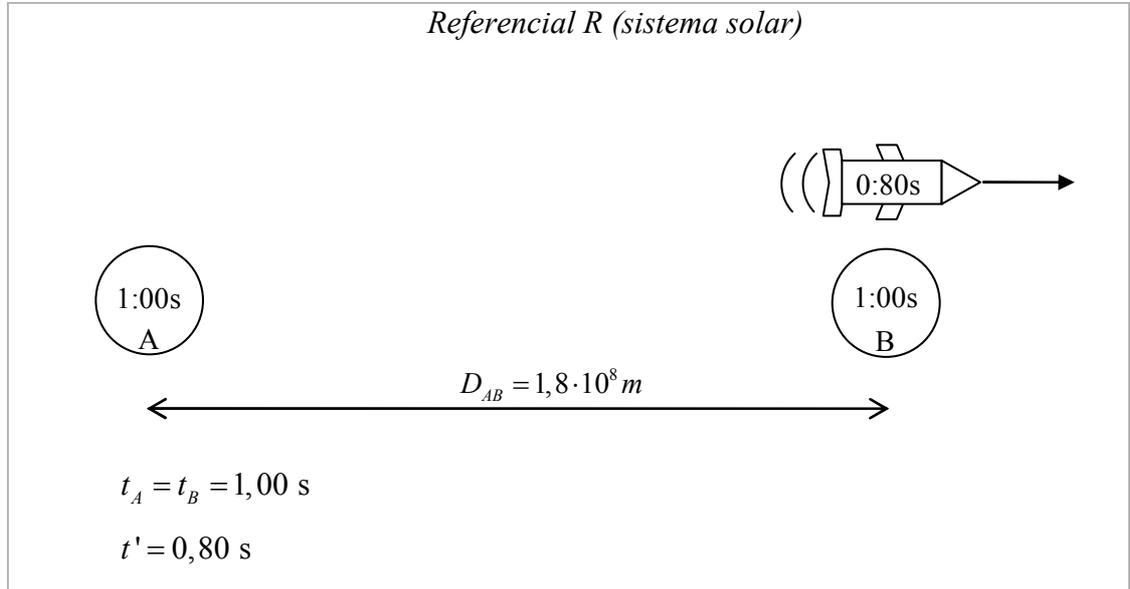


Figura 33: Nave em movimento (final).

c) Dilatação do tempo (R' parado e R em movimento, com velocidade $-0,6c$, logo $\Delta t < \Delta t'$):

$$\Delta t' = 0,8 \text{ s e } \gamma = 1,25;$$

$$\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t.$$

$$\text{Daí: } 0,80 = 1,25 \cdot \Delta t,$$

$$\Delta t = 0,64 \text{ s}.$$

Aparentemente há uma contradição! Vamos continuar descrevendo toda a situação para verificar que não há contradições.

d) O piloto da nave vê A e B passando por ele num intervalo de 0,80s, com velocidades 0,6c (em módulo), logo:

$$|v_A'| = |v_B'| = 0,6c = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m/s};$$

$$|v_A'| = \frac{D'_{AB}}{\Delta t'} \rightarrow 1,8 \cdot 10^8 = \frac{D'_{AB}}{0,80} \Rightarrow D'_{AB} = 1,44 \cdot 10^8 \text{ m}.$$

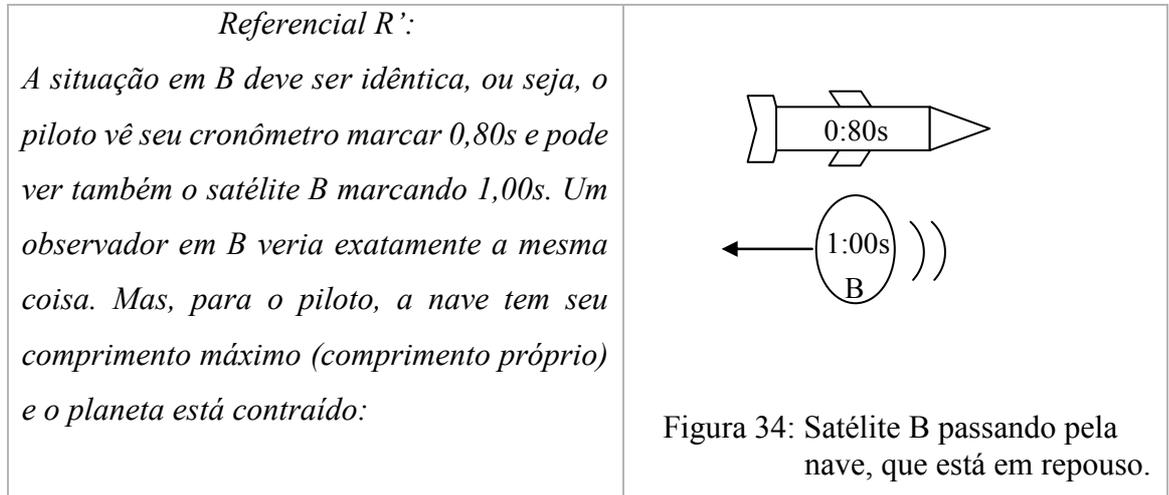
Contração do espaço! Menor distância entre os planetas, que também parecem “achatados”, com 80% do seu comprimento.

Já na resolução do item e, tem-se a assimilação modificando tanto a nova informação (a sincronização depende do referencial), quanto o subsunçor (a dilatação do tempo vista com

coordenadas de tempo se torna mais clara e concisa, reduzindo a possibilidade de falsas contradições).

e) Referencial R:

Pela figura do item b), os tempos marcados são $t_A = 1,00$ s, $t_B = 1,00$ s e $t' = 0,80$ s.



Pela dilatação do tempo, se na nave se passou $\Delta t' = 0,80$ s, em A se passou $\Delta t_A = 0,64$ s. Logo, acontece a seguinte situação:

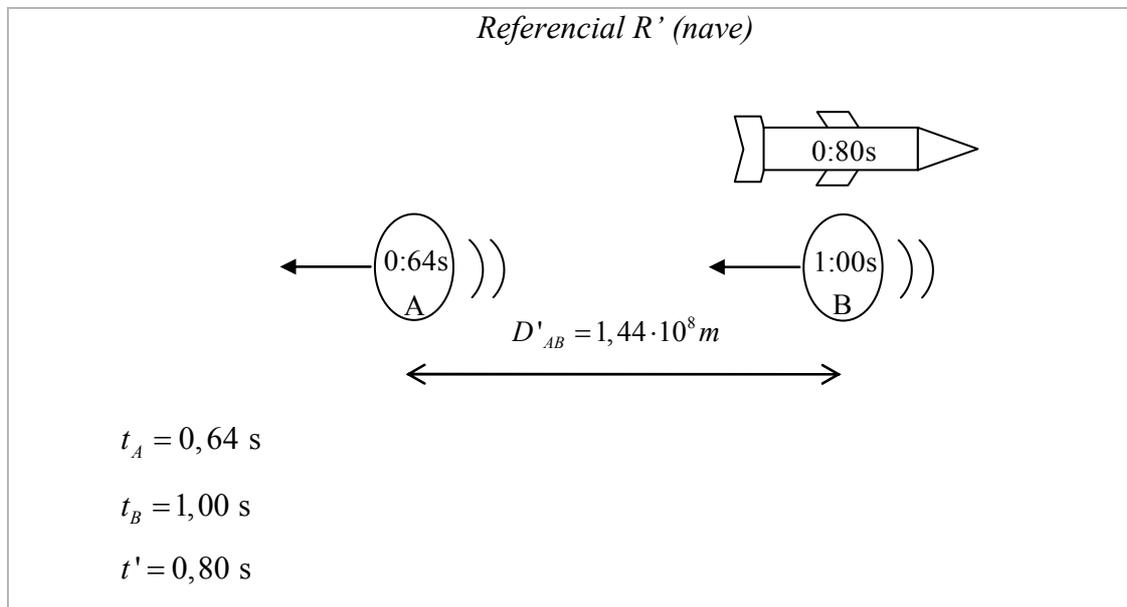


Figura 35: Nave em repouso (final).

É importantíssimo observar que, para o piloto, o cronômetro de B mediu $\Delta t_B = 0,64$ s e $t_B = 1:00$ s, ou seja:

$$t_B - t_{0B} = \Delta t_B \rightarrow 1,00 - t_{0B} = 0,64,$$

$$t_{0B} = 0,36 \text{ s.}$$

Claramente a sincronização entre A e B não vale no referencial R', ou seja, a sincronização é relativa (depende do referencial)!

Para A:

$$t_A - t_{0A} = \Delta t_A \rightarrow t_A - 0 = 0,64,$$

$$t_A = 0,64 \text{ s.}$$

Conclusão: Esse evento não se iniciou quando B marcava 0,00 s (e sim $t_{0B} = 0,36$ s)!

Esse evento não se finalizou quando A marcava 1,00s (e sim $t_A = 0,64$ s)! Nesse evento, um objeto (A ou B) a 0,6c não se deslocou por 1,00 s (e sim 0,80 s) e não percorreu $1,8 \cdot 10^8$ m (e sim $1,44 \cdot 10^8$ m).

Sendo assim, não há contradição de $\Delta t_A = \Delta t_B = 0,64$ s encontrados aqui com os valores medidos de $\Delta t_A = \Delta t_B = 1,00$ s, como descrito no enunciado, pois simplesmente são dois eventos diferentes!

Veja a sequência de situações para os dois eventos:

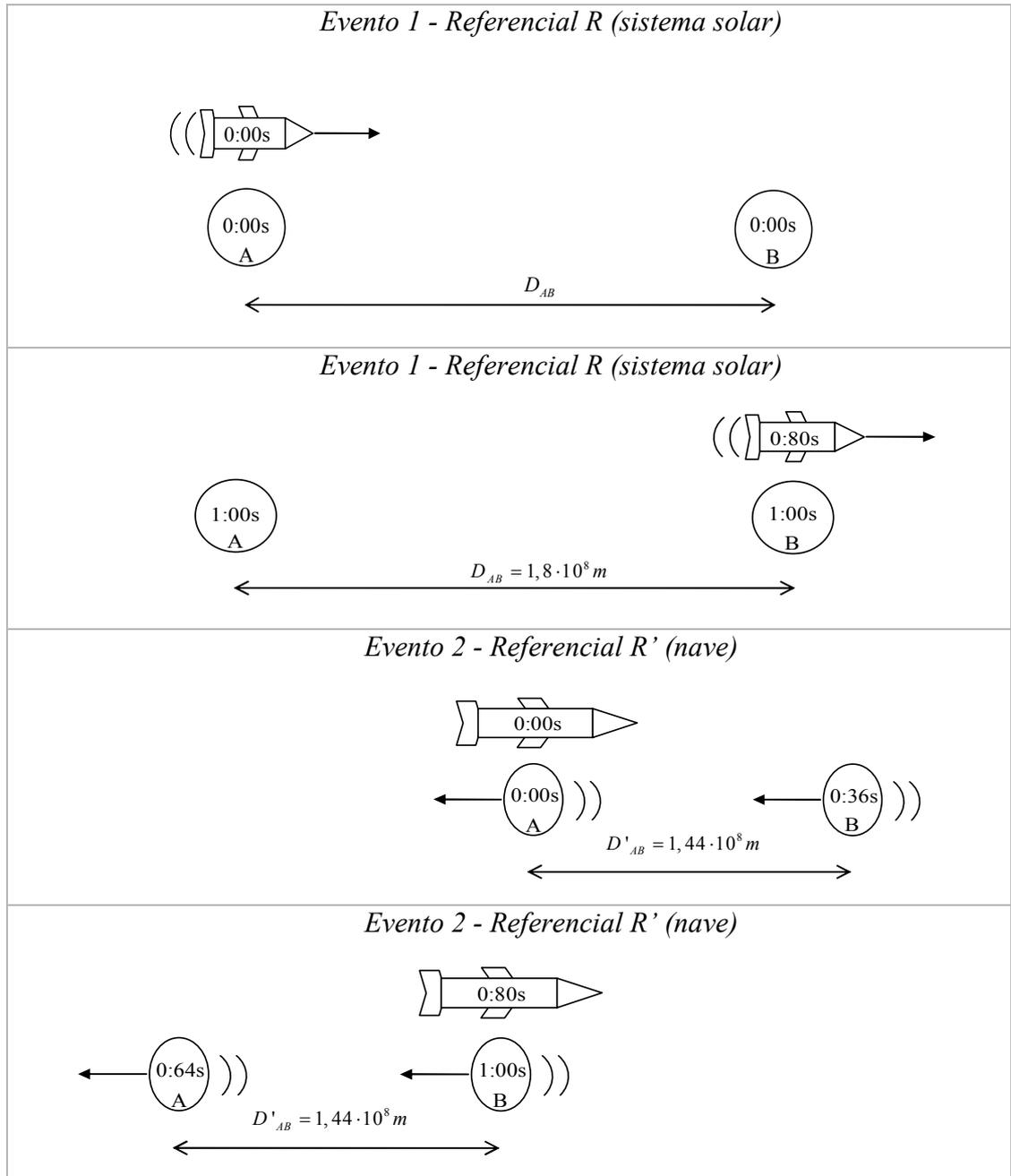


Figura 36: Sequências de eventos nos dois referenciais, R (sistema solar) e R' (nave).

A interpretação detalhada do item e, bem como a discussão das dúvidas dos alunos tem o potencial de gerar um longo debate, produzindo assimilação e iniciando-se a consolidação, caso os alunos se mostrem capazes de responder a perguntas do professor relacionadas à situação. Como a pesquisa não foi programada para chegar neste ponto, não foi possível produzir lista de exercícios para casa e sua posterior resolução em sala de aula, o que seria ideal para se verificar a consolidação em mais detalhes. No caso da turma A (3º ano), a 5ª aula retomou esse conceito ao demonstrar as transformações de Lorentz, inclusive utilizando uma das equações para

calcular a “dessincronização de 0,36s” entre o planeta A e o satélite B aqui presente, mas a turma B encerrou o curso neste ponto.

4.3.6. Construção do capítulo 1 (parte 3) – Transformações de Lorentz.

Como dito, a parte 3 foi produzida apenas para a turma A com as transformações de Lorentz (que também trabalhou noções de dinâmica relativística sem utilizar o modelo de aprendizagem significativa que está proposto neste trabalho). O apêndice C tem a estrutura com a sequência da aula e alguns desenhos prévios, entregue aos alunos. A aula seguiu a interpretação apresentada no capítulo 3 desta dissertação, mas foi apresentada no quadro, não sendo produzido, portanto, um material instrucional. Apesar disso, as novas informações foram escolhidas sob a restrição de possuírem pontos de ancoragem com a parte 2 (dessincronização) e, conseqüentemente, com toda a TRR estudada até então. Essas novas informações foram basicamente a “contração das réguas” (eixos x e x') que medem posições de objetos que se movem. O processo de ancoragem e assimilação se deu pela discussão matemática, culminando em tais equações, inclusive um exercício foi reinterpretar o experimento mental da parte 2 do material instrucional com a aplicação direta de algumas transformações de Lorentz.

4.4 Distribuição de conteúdos por aula e evolução das aulas.

Um dos objetivos do curso foi remodelar o sistema adotado pela escola, mas não substituí-lo. Isso significa que as aulas evoluíram de forma bastante costumeira para aquela comunidade, sendo uma introdução verbal feita pelo professor, seguida de perguntas dos alunos, antes de se iniciar a escrita no quadro, resolução de exercícios, etc. Uma forma de priorizar o material instrucional, no entanto, foi o pedido para que os alunos o lessem antes de se iniciar a aula. Cada capítulo era lido pelos alunos, até que eles manifestassem ter terminado, ou cerca de 5 minutos para cada capítulo ou tópico. Em geral, foi adotado um padrão com aproximadamente 10 minutos de explicação oral e escrita pelo professor, seguido de 10 minutos de perguntas dos alunos, comentários sobre curiosidades e discussão entre os próprios alunos intermediada pelo professor. Ao se chegar a cada lista de exercícios do material, os alunos tinham a liberdade de resolver sozinhos ou em grupos, por 5 a 15 minutos, ou até que todos mostrassem ser capazes de resolver sozinhos ou com ajuda às questões. De forma alguma foi dada sequência a uma aula sem que todos os alunos presentes manifestassem ativamente que estavam satisfeitos com a explicação e a discussão até aquele momento.

Basicamente, a diferença entre o andamento dos cursos para as turmas A e B se deve ao fato de que na turma A (3º ano) houve uma quinta aula sobre transformações de Lorentz (cerca de 1h de duração) e uma introdução à dinâmica relativística (também de 1h), assunto que não entra nesta pesquisa. Abaixo está sintetizada a distribuição de aulas do material aplicado por conteúdos.

Tabela 2: Organização da turma A.

Aula (duração de 2h)	Conteúdo trabalhado
1ª aula (parte 1)	Aplicação do primeiro questionário (apêndice D); Capítulo 1. Introdução; Capítulo 2. A velocidade da luz.
2ª aula (parte 1)	Capítulo 3. O limite da velocidade dos corpos; Capítulo 4. A dilatação do tempo;
3ª aula (parte 1)	Capítulo 5. A contração do espaço;
4ª aula (parte 2)	Capítulo 1. Dessincronização.
5ª aula (parte 3)	Capítulo 1. Transformações de Lorentz; Noções de dinâmica relativística (não incluído nesta pesquisa); Aplicação do segundo questionário (apêndice E).

Tabela 3: Organização da turma B.

Aula (duração de 2h)	Conteúdo trabalhado
1ª aula (parte 1)	Aplicação do primeiro questionário (apêndice D); Capítulo 1. Introdução; Capítulo 2. A velocidade da luz.
2ª aula (parte 1)	Capítulo 3. O limite da velocidade dos corpos; Capítulo 4. A dilatação do tempo;
3ª aula (parte 1)	Capítulo 5. A contração do espaço;
4ª aula (parte 2)	Capítulo 1. Dessincronização; Aplicação do segundo questionário (apêndice E).

4.5 Relatos considerados relevantes em em entrevistas prévias com alunos.

Dias antes de se iniciar o curso, alguns alunos procuraram o professor ou foram chamados para conversas verbais, não os identificando, sendo anotados apenas comentários ou perguntas considerados relevantes, pelo professor. Alguns dos comentários seguem na tabela 3.

Tabela 4: Anotações das entrevistas prévias.

Locutor	Interlocutor(es)	Pergunta/comentário
Professor	Grupo de alunos de 1º e 2º ano (aproximadamente seis) interessados em participar do curso, durante treino de Handebol	<i>“Quais os melhores horários e quais fatores poderiam dificultar a participação no curso? Vocês já aprenderam relatividade na escola? Em que série?”</i>
Grupo de alunos interessados em participar do curso, durante treino de Handebol	Professor	Sobre a pergunta do professor, alguns responderam ser melhor à tarde, outros à noite, havendo um claro conflito de horários, dado que uns estudam à tarde e outros de manhã. Um fator que poderia dificultar seriam os estudos para as provas, pois o curso extra poderia interferir no tempo dedicado a isso. Sobre o fato de terem aprendido previamente teoria da relatividade, foram unânimes em dizer que não fez parte do currículo, desde o ensino fundamental até o 2º ano do ensino médio.
Aluno de 2º ano interessado em astronomia	Professor	<i>“Como a teoria de cordas explica a relatividade?”. “Vamos estudar buraco negro?”</i>
Professor	Aluno de 2º ano interessado em astronomia	<i>“Apesar de ser físico formado, nunca estudei teoria de cordas, então infelizmente não posso responder, mas se participar do curso, você vai ver fatores que tem ou não a ver com a relatividade. Também não estudaremos buraco negro, pois, entre outros conhecimentos, utiliza a chamada relatividade geral, que inclui efeitos gravitacionais e aceleração. O que nós estudaremos é mais simples”.</i>
Aluna de 3ºano	Professor	<i>“Cai relatividade no ITA e na FUVEST?”</i>
Professor	Aluna de 3ºano	<i>“No ITA sim, na FUVEST podemos procurar sabem”.</i> Posteriormente foi visto que não é cobrada a relatividade na FUVEST.

Capítulo 5

Análise de Dados

Com base nos questionários aplicados procede-se por questão a análise das respostas e evolução do conhecimento adquirido através do material instrucional, apresentado no apêndice A.

5.1 Análise do primeiro questionário (apêndice D), aula 1:

Questão 1. (dividida em três subitens 1a, 1b e 1c).

- Objetivos:

- Verificação de conhecimentos prévios relacionados à cinemática galileana;
- Recapitulação do conteúdo;
- Preparação de pontos de ancoragem da cinemática galileana com a nova informação sobre a velocidade absoluta da luz.

- Respostas esperadas:

1 a) 10 km/h.

1 b) - 10 km/h.

1 c) 110 km/h.

- Resultados:

Tabela 5: Respostas dadas para questão 1 (Questionário 1).

Aluno	1 a	1 b	1 c	Aluno	1 a	1 b	1 c
A01	10 km/h	- 10 km/h	110 km/h	B01	10 km/h	- 10km/h	110 km/h
A02	10 km/h	10 km/h	110 km/h	B02	não lembro	não lembro	não lembro
A03	-	-	-	B03	60 km/h	50km/h	60 km/h
A04	10 km/h	parado	110 km/h	B04	10 km/h	- 10km/h	110 km/h
A05	10 km/h	0 km/h	- 10 km/h	B05	10 km/h	- 10km/h	110 km/h
A06	10 km/h	- 10 km/h	110 km/h	B06	não lembro	não lembro	não lembro
A07	10 km/h	- 10 km/h	- 110 km/h	B07	10 km/h	- 10km/h	110 km/h
A08	10 km/h	- 10 km/h	- 110 km/h	B08	10 km/h	- 10km/h	110 km/h
				B09	10 km/h	- 10km/h	110 km/h
				B10	10 km/h	- 10km/h	110 km/h

Observa-se que dos dezoito alunos, catorze (77,8%) responderam corretamente o item 1a, porém apenas nove (50,0%) mostraram domínio e responderam a todas as três perguntas respeitando a convenção de sinais no cálculo das velocidades relativas.

Após a apresentação da aula sobre o Capítulo 1- Introdução, no entanto, verificou-se que os alunos passaram a responder corretamente às perguntas análogas feitas pelo professor, além de manifestarem não ter mais dúvidas sobre como calcular velocidade relativa galileana unidimensional.

Questão 2.

- Objetivos:

- Verificação de conhecimentos prévios relacionados a estimativa de velocidades de variados objetos cotidianos, bem como o conhecimento de unidades básicas, tais como mm/s, cm/s, m/s e km/s.

- Preparação de pontos de ancoragem para a aprendizagem do conceito de velocidade relativística.

- Resposta esperada:

Sequência: 3, 2, 4, (5 ou 6), 1, (7 ou 8), (7 ou 8), 11.

- Resultados:

Tabela 6: Respostas dadas para questão 2 (Questionário 1).

Aluno	2 (sequência)	Aluno	2 (sequência)
A01	3, 2, 4, 5, 1, 6 , 7, 11	B01	3, 2, 4, 5, 1, 9 , 8, 11
A02	-	B02	3, 2, 4, 7 , 1, 8, 5 , 9
A03	3, 2, 4, 5, 1, 4 , 8, 11	B03	3, 1, 4, 7 , 2 , 8, 6 , 11
A04	3, 2, 4, 5, 1, 10 , 9 , 11	B04	3, 2, 4, 5, 1, 6 , 8, 9
A05	3, 2, 4, 5, 1, 9 , 10 , 11	B05	3, 2, 4, 5, 1, 8, 9 , 10
A06	3, 2, 4, 5, 1, 8, 10 , 11	B06	3, 2, 4, 7 , 1, 8, 9 , 10
A07	3, 2, 4, 5, 1, 7, 8, 11	B07	3, 2, 4, 5, 1, 10 , 9 , 11
A08	3, 2, 4, 5, 1, 6 , 8, 11	B08	3, 1, 4, 5, 2 , 8, 9 , 11
		B09	3, 1, 4, 5, 1, 8, 9 , 11
		B10	4 , 3 , 5 , 6 , 8 , 10 , 9 , 11

Nas três primeiras opções (pessoa caminhando, formiga e carro), apenas um aluno teve dificuldade em dar uma resposta condizente com uma boa estimativa. A quarta e a quinta opções

(avião e bactéria, respectivamente) apresentaram apenas três respostas não condizentes, todas na turma B, possivelmente pelo fato de alunos do 3º ano já terem resolvido mais exercícios exemplificando tais velocidades. A última opção remete à velocidade das ondas eletromagnéticas, valor geralmente conhecido, a qual foram associadas quatro respostas não condizentes, também todas na turma B. Os alunos mostraram maior dificuldade em estimar as velocidades de um meteorito e da Terra em torno do Sol (quinta e sexta opções), apresentando mais de 50,0% de respostas não condizentes no total.

Questão 3 subitem a.

- **Objetivos:**

- Verificação de conhecimentos prévios relacionados à Física Moderna como um todo, exemplificando uma possível tendência de o aluno adquirir conhecimentos falaciosos por fontes diversas.

- O assunto escolhido (física quântica) foi baseado em entrevista prévia com alunos, ao serem consultados sobre que assuntos eles esperavam aprender no curso de teoria da relatividade.

- **Resposta esperada:**

1 ou 2.

- **Resultados:**

Tabela 7: Respostas dadas para questão 3a (Questionário 1).

Aluno	3 a		Aluno	3 a
A01	1		B01	1
A02	1		B02	2
A03	1		B03	1
A04	1		B04	3
A05	1		B05	1
A06	3		B06	1
A07	4		B07	5
A08	1		B08	1
			B09	4
			B10	1

Doze alunos (66,7%) dos dezoito se mostraram certos de que seria ficção um “tunelamento” de uma bola de tênis, enquanto quatro alunos acreditaram ser realidade, atribuindo 4 ou 5 como resposta. É possível correlacionar este subitem com o 3 b para melhor análise.

Questão 3 subitem b.

- Objetivos:

- Estabelecer uma conexão com o subitem a da questão 3 para mapear possíveis alunos com conhecimento básico em física quântica (tunelamento de partículas), que é um dos ramos da Física Moderna passíveis de serem propostos no ensino médio ou de serem veiculados aos alunos por meio de vídeos, revistas, etc.

- Resposta esperada:

4 ou 5.

- Resultados:

Tabela 8: Respostas dadas para questão 3b (Questionário 1).

Aluno	3 b		Aluno	3 b
A01	3		B01	5
A02	4		B02	3
A03	4		B03	5
A04	3		B04	3
A05	4		B05	2
A06	4		B06	5
A07	5		B07	4
A08	1		B08	2
			B09	1
			B10	3

De forma isolada, nove alunos concordaram com a possibilidade de haver efeito túnel (embora esse termo não tenha sido explicitado no questionário) em elétrons. Desses nove, três (A06, A07 e B07) não apresentaram coerência com o subitem 3 a, resultando em seis alunos (33,3%) com possibilidade de conhecerem previamente o assunto. Vale ressaltar, ainda, que apenas os três alunos (16,7%) B01, B03 e B06 mostraram total coerência nas respostas (1 e 5, respectivamente).

Questão 3 subitem c.

- Objetivos:

- Verificação de conhecimentos prévios relacionados à teoria da relatividade, exemplificando uma falácia no conhecimento de dilatação do tempo, com a esperança de que o aluno previamente conhecedor do assunto saiba identificar tal incoerência com a teoria.

- Resposta esperada:

1 ou 2.

- Resultados:

Tabela 9: Respostas dadas para questão 3c (Questionário 1).

Aluno	3 c		Aluno	3 c
A01	1		B01	5
A02	1		B02	2
A03	2		B03	1
A04	5		B04	2
A05	4		B05	4
A06	2		B06	4
A07	2		B07	5
A08	1		B08	4
			B09	1
			B10	4

Dez alunos (55,6%) acreditaram ser ficção a “volta no tempo” e a viagem acima da velocidade da luz. Apenas cinco (27,8%), no entanto, estavam convictos e atribuíram resposta 1. Três alunos (16,7%) responderam 5, afirmando ter certeza sobre a situação, que não se apresenta correta cientificamente.

Questão 3 subitem d.

- Objetivos:

- Respalda o próximo subitem, além de ajudar a criar pontos de ancoragem com a cinemática relativística, uma vez que o conhecimento básico sobre funcionamento de relógios deve estar em evidência.

- Resposta esperada:

4 ou 5.

- Resultados:

Tabela 10: Respostas dadas para questão 3d (Questionário 1).

Aluno	3 d		Aluno	3 d
A01	3		B01	5
A02	2		B02	2
A03	4		B03	2
A04	4		B04	4
A05	3		B05	5
A06	5		B06	5
A07	5		B07	2
A08	5		B08	2
			B09	4
			B10	2

Dez alunos (55,6%) acreditam na possibilidade de a temperatura influenciar no mecanismo físico ou químico de funcionamento de um relógio, sendo seis deles (33,3%) convictos disso, atribuindo 5 como resposta. Também oito alunos (44,4%) mostraram-se inseguros, respondendo 3 ou 2, enquanto nenhum deles respondeu 1, que seria a resposta menos esperada. Diante disso, as turmas mostraram uma porcentagem considerável de alunos com insuficientes conhecimentos prévios relacionados ao funcionamento de relógios e, portanto, com fracos pontos de ancoragem entre esses conhecimentos e a dilatação do tempo ou a dessincronização por efeitos relativísticos. Baseado nisso, o professor fez um breve debate perguntando sobre possíveis influências da temperatura no funcionamento de relógios e seguiu com a aula após os alunos chegarem a um consenso de que pode sim haver atrasos ou mesmo adiantamentos em relógios fabricados de forma idêntica, quando submetidos a diferentes condições.

Questão 3 subitem e.

- Objetivos:

- Solicitar diretamente que o aluno mostre possível conhecimento prévio de teoria da relatividade, explicando uma dessincronização de relógios, tendo suma importância na comparação com o questionário final. Um dos objetivos aqui, além disso, é fazer uma comparação com os subitens 3c e 3d.

- Resposta esperada:

4 ou 5.

- Resultados:

Tabela 11: Respostas dadas para questão 3e (Questionário 1).

Aluno	3 e		Aluno	3 e
A01	5		B01	5
A02	4		B02	3
A03	5		B03	2
A04	5		B04	1
A05	5		B05	3
A06	2		B06	4
A07	5		B07	5
A08	5		B08	4
			B09	5
			B10	3

Doze alunos (66,7%) responderam acreditando na possibilidade de a velocidade influenciar em atrasos de relógios, sendo nove (50,0%) convictos, atribuindo resposta 5. Seis alunos (33,3%) ficaram inseguros ou não mostraram conhecimento prévio, atribuindo 1, 2 ou 3 como resposta. Um deles se equivocou, manifestando segurança na impossibilidade da dilatação do tempo, respondendo 1.

Ao se comparar os subitens 3c, 3d e 3e, observa-se que quatro alunos (A03, A07, A08 e B09) mostraram coerência entre as respostas, sendo que apenas um (A08) mostrou coerência e convicção nas respostas. Sendo assim, poderia se estimar que no máximo quatro alunos (22,2%) chegaram ao curso com algum conhecimento prévio básico de teoria da relatividade, em especial de cinemática relativística, que foi o foco do curso. Ao se levar em consideração o subitem 3h, no entanto, será necessário refazer essa estimativa, pois ele considera a contração dos comprimentos.

Questão 3 subitem f.

- Objetivos:

- Interromper uma possível associação entre os conceitos de teoria da relatividade apresentados em 3e e em 3h. a pergunta feita em 3e explicitamente contém teoria da relatividade. Outro

objetivo em paralelo seria detectar possíveis convicções por parte dos alunos com relação a conhecimentos falaciosos, como “poder da mente” para mover objetos.

- Resposta esperada:

1 ou 2.

- Resultados:

Tabela 12: Respostas dadas para questão 3f (Questionário 1).

Aluno	3 f		Aluno	3 f
A01	1		B01	1
A02	1		B02	2
A03	1		B03	1
A04	1		B04	1
A05	1		B05	2
A06	2		B06	1
A07	2		B07	2
A08	1		B08	3
			B09	3
			B10	2

Aqui nenhum aluno atribuiu resposta equivocada (4 ou 5), sendo que apenas dois se mostraram inseguros, respondendo 3.

Questão 3 subitem g.

- Objetivos:

- Detectar conhecimento prévio de dilatação térmica;
- Detectar potenciais pontos de ancoragem para a contração do espaço.

- Resposta esperada:

4 ou 5.

- Resultados:

Tabela 13: Respostas dadas para questão 3g (Questionário 1).

Aluno	3 g		Aluno	3 g
A01	5		B01	5
A02	5		B02	4
A03	5		B03	4
A04	5		B04	2
A05	5		B05	5
A06	4		B06	4
A07	5		B07	2
A08	5		B08	2
			B09	4
			B10	5

Quinze alunos (83,3%) atribuíram uma resposta adequada, sendo dez (55,6%) convictos. Apenas três alunos atribuíram resposta 2, não evidenciando conhecimento prévio de dilatação térmica. Um provável motivo para isso é o fato de esse assunto ser tratado geralmente no 2º ano do ensino médio e apenas em algumas escolas no ensino fundamental. Sendo assim, todos os alunos da turma A (3º ano) responderam adequadamente, bem como a maioria da turma B (1º e 2º anos), embora apenas três alunos da turma B tenham convicção.

Questão 3 subitem h.

- Objetivos:

- Detectar conhecimento prévio de contração do espaço;
- Observar potenciais pontos de ancoragem para a dessincronização de relógios e para as transformações de Lorentz (apenas na turma A).

- Resposta esperada:

4 ou 5.

- Resultados:

Tabela 14: Respostas dadas para questão 3h (Questionário 1).

Aluno	3 h		Aluno	3 h
A01	3		B01	1
A02	4		B02	3
A03	4		B03	4
A04	2		B04	4
A05	2		B05	5
A06	3		B06	3
A07	4		B07	2
A08	1		B08	4
			B09	4
			B10	2

Apenas um aluno (B05) se mostrou convicto quanto à contração do comprimento. Esse aluno, no entanto, não foi coerente nas respostas dadas aos itens 3c e 3e, não sendo possível afirmar que ele tinha conhecimento prévio de teoria da relatividade. Outros sete (39,9% do total) demonstraram acreditar na possibilidade, embora sem convicção. Destes últimos, somente A03, A07 e B09 (16,7% do total) também foram coerentes nos subitens 3c, 3d e 3e, o que leva à estimativa de que no máximo três alunos demonstraram possivelmente dominar os conceitos básicos de dilatação do tempo e contração do espaço antes do início do curso.

Questão 4 (somente para a turma B).

- Objetivos:

- Permitir que os alunos manifestassem espontaneamente possíveis conhecimentos sobre teoria da relatividade;
- Identificar possíveis concepções cientificamente aceitas ou alternativas sobre a teoria da relatividade, como divulgada por diversos meios, uma vez que, em entrevistas, os alunos manifestaram não terem aprendido em curso regular de ensino fundamental ou médio.

- Resultados (transcrição):

Tabela 15: Transcrição das respostas dadas na questão 4 (Questionário 1).

B01	Mecânica Quântica, supercordas, antimatéria, etc.
B02	Espero que aprender um pouco sobre o tempo no espaço e como funciona a velocidade da luz, interferindo ou não nesses itens.
B03	Imagino que vou aprender sobre coisas que compoem o universo e suas aplicações de acordo com a Teoria da Relatividade
B04	Contração do espaço, dilatação temporal
B05	Não sei
B06	Buracos negros, matéria escura, teoria do multiverso, deformações no espaço-tempo, formação do universo, diferença da passagem do tempo entre a terra e outros pontos do universo, etc
B07	Ondas gravitacionais, defasagem temporal, antimatéria, matéria escura
B08	Não sei
B09	Sinceramente não consigo imaginar o que aprenderei.
B10	Buraco negro, relatividade tempo-espaço

Cinco alunos (50,0%) apresentaram algum termo ou conceito de TRR, embora apenas dois (20,0%) tenham se limitado a apenas conceitos relacionados. Quatro alunos (40,0%) explicitaram termos de relatividade geral ou de outras áreas, como “supercordas” e “buraco negro”. Três alunos manifestaram não saber o que esperar, inclusive o aluno B09, que foi o único da turma B que mostrou coerência entre as respostas da questão 3 relacionadas à TRR.

5.2 Análise do segundo questionário (apêndice E), aula 5 (turma A) e aula 4 (turma B):

Questão 1.

- Objetivos:

- Evidenciação, em relação ao texto do material instrucional, de seu caráter potencialmente significativo;

- Busca de evidências de que houve aprendizagem significativa do conceito “Constancia da velocidade da luz no vácuo” por parte dos alunos.

- Respostas esperadas:

4 ou 5.

- Resultados:

Tabela 16: Respostas dadas para questão 1 (Questionário 2).

Aluno	Questão 1		Aluno	Questão 1
A01	5		B01	5
A02	5		B02	4
A03	4		B03	5
A04	5		B04	5
A05	5		B05	5
A06	5		B06	5
A07	5		B07	5
A08	5		B08	5
			B09	5
			B10	5

Dezesseis dos dezoito alunos (88,9%) se mostraram totalmente convictos ao ler o texto, não necessariamente manifestando que tal convicção foi proveniente da participação em todas as etapas do curso. Apenas dois alunos (11,1%) indicaram parcial convicção. De qualquer maneira, nenhum aluno demonstrou, após o término do curso, discordar de que a luz tem sua velocidade constante independentemente do referencial adotado.

Questão 2.

- Objetivos:

- Evidenciação da importância do papel da organização sequencial (no caso, tanto por sequencia histórica, quanto matemática) para a aprendizagem significativa;

- Buscar, segundo o entendimento dos alunos, elementos que corroborem a ideia de MARTINS (2015), ao citar aspectos da TRR preexistentes a 1905 - ano em que Einstein começou a participar do seu desenvolvimento - afirmando que “Esses resultados não foram obtidos de forma rápida nem foram o resultado da ‘genialidade’ de uma única pessoa. Foram construídos gradualmente, por um conjunto de pesquisadores [...]”.

- Respostas esperadas:

4 ou 5.

- Resultados:

Tabela 17: Respostas dadas para questão 2 (Questionário 2).

Aluno	Questão 2		Aluno	Questão 2
A01	5		B01	5
A02	4		B02	5
A03	5		B03	5
A04	5		B04	5
A05	5		B05	5
A06	5		B06	4
A07	5		B07	5
A08	5		B08	5
			B09	5
			B10	5

Novamente, dezesseis dos dezoito alunos (88,9%) se mostraram totalmente convictos e apenas dois alunos (11,1%) indicaram parcial convicção, sendo que nenhum aluno manifestou discordar de que, apesar de muito relevante, o trabalho de Einstein teve fundamental participação de outros cientistas, bem como embasamento matemático. Também é possível afirmar que, segundo o resultado do questionário, há evidências de que o material instrucional e o curso apresentaram suficientes elementos do contexto do advento dos postulados de Einstein em relação ao movimento da luz. É importante ressaltar, ainda, que os alunos tiveram um momento de leitura do material instrucional antes do início de cada aula, sendo fundamental que o texto se apresentasse de forma inteligível mesmo para leigos em relatividade e, ainda assim, nenhum aluno relatou dificuldade em compreender a sua proposta sobre o movimento da luz.

Questão 3.

- Objetivos:

- Fazer um levantamento da opinião geral dos alunos quanto à apresentação do material instrucional e sua capacidade de, por si só, criar pontos de ancoragem, trazer novas informações e ter organização sequencial, sendo potencialmente significativo.

- Respostas esperadas:

4 ou 5.

- Resultados:

Tabela 18: Respostas dadas para questão 3 (Questionário 2).

Aluno	Questão 3		Aluno	Questão 3
A01	5		B01	4
A02	5		B02	4
A03	4		B03	4
A04	5		B04	5
A05	5		B05	5
A06	5		B06	4
A07	4		B07	5
A08	5		B08	5
			B09	4
			B10	4

Embora 100,0% dos alunos afirmem que o texto é suficiente, as duas turmas apresentaram certa discrepância entre os níveis 4 (razoavelmente suficiente) e 5 (muito suficiente). Na turma A, apenas dois dos oito alunos (25,0%) acreditam que o material poderia ser mais completo, enquanto na turma B, seis dos dez alunos (60,0%) tiveram essa opinião. O caráter objetivo da questão 3, no entanto, não permite determinar que aspectos do material poderiam ser incrementados.

Questão 4 subitem a.

- Objetivos:

- Verificação de evidência de aprendizagem significativa em relação ao conceito de dilatação do tempo;
- Identificação de possíveis “[...] raciocínios errôneos resultantes da aplicação equivocada da teoria da relatividade especial” (MARTINS, 2012);
- Comparar com o resultado da análise da questão 3 subitem c do questionário aula 1, que na verdade foi a mesma afirmação, porém aplicada após pelo menos o intervalo de um mês.

- Resposta esperada:

1.

- Resultados:

Tabela 19: Respostas dadas para questão 4a (Questionário 2).

Aluno	4 a		Aluno	4 a
A01	1		B01	1
A02	2		B02	1
A03	1		B03	1
A04	1		B04	1
A05	1		B05	1
A06	1		B06	1
A07	1		B07	5
A08	1		B08	5
			B09	1
			B10	5

Catorze dos dezoito alunos (77,8%) se mostraram convictos de que a situação descrita não condiz com a teoria. Um aluno (5,6%) respondeu corretamente, mas não mostrou convicção, atribuindo resposta 2. Os alunos B07, B08 e B10 (16,7% do total) analisaram de forma equivocada a afirmação, dizendo ser certamente realidade.

Ao se comparar com o subitem c da questão 3 do questionário aula 1, de forma geral, a quantidade de alunos que apresentaram a resposta esperada aumentou de cinco para catorze (27,8% para 77,8%). Um aluno (B07) manteve a resposta 5. O aluno A02, que havia se mostrar certo da resposta adequada no primeiro questionário, manifestou não estar convicto da incoerência da afirmação no último questionário, apresentando a resposta 2. Dois alunos (B08 e B10), no entanto, mudaram a resposta de 4 para 5, aparentemente reforçando a aplicação errônea de algum raciocínio e não detectando a exposição de uma afirmação com falha conceitual.

Questão 4 subitem b.

- Objetivos:

- Comparar o seu resultado com o subitem anterior;

- Comparar o seu resultado com o subitem d da questão 3 do questionário aula 1, que apresentou a mesma afirmação;

- Verificar possível influência das aulas de TRR no entendimento da passagem do tempo e do funcionamento de relógios, embora este não tenha sido um tema central no curso.

- Resposta esperada:

4 ou 5.

- Resultados:

Tabela 20: Respostas dadas para questão 4b (Questionário 2).

Aluno	4 b		Aluno	4 b
A01	5		B01	5
A02	5		B02	3
A03	4		B03	4
A04	5		B04	4
A05	4		B05	5
A06	5		B06	5
A07	4		B07	4
A08	5		B08	2
			B09	4
			B10	4

Oito alunos (44,4%) apresentaram resposta 5 e oito (44,4%) resposta 4, totalizando dezesseis (88,9%) respostas consideradas adequadas no que tange a influência de outros fatores, como a temperatura, no funcionamento de relógios, sem necessariamente haver distorções no tempo.

Comparando com o subitem d da questão 3 do questionário aula 1, a quantidade de respostas adequadas, nesse molde, aumentou de dez (55,6%) para dezesseis (88,9%). Se compararmos, no entanto apenas a quantidade de respostas 5, tem-se um aumento de seis (33,3%) para oito (44,4%), sendo um aumento mais modesto.

Para se analisar o subitem anterior do questionário (aplicando diretamente TRR), é conveniente evidenciar a variação na atribuição de respostas 5, que passou de seis para oito (33,3% para 44,4%), ao passo que no presente subitem (envolvendo temperatura de relógios) aumentou de cinco para catorze (27,8% para 77,8%).

Aparentemente, portanto, houve sim uma interferência do curso no entendimento de mecanismos de funcionamento de relógios, embora o fator convicção tenha sofrido menor mudança nas respostas dos alunos. Possivelmente isso se deve ao fato de que o tema do curso tenha sido as influências de efeitos relativísticos nas medidas dos tempos – fator que possibilita tal convicção - e não influências de outros fatores.

Questão 4 subitem c.

- Objetivos:

- Verificação de evidências de aprendizagem significativa em relação ao conceito de dilatação do tempo;

- Comparar o seu resultado com os dois subitens anteriores;

- Comparar o seu resultado com o subitem e da questão 3 do questionário aula 1, que apresentou a mesma afirmação;

- Resposta esperada:

5.

- Resultados:

Tabela 21: Respostas dadas para questão 4c (Questionário 2).

Aluno	4 c		Aluno	4 c
A01	5		B01	5
A02	5		B02	5
A03	5		B03	5
A04	5		B04	5
A05	5		B05	5
A06	5		B06	4
A07	5		B07	5
A08	5		B08	5
			B09	5
			B10	5

Dezessete dos dezoito alunos (94,4%) responderam corretamente e com convicção. Apenas o aluno B06 acertou, mas se mostrou em dúvida.

Comparando-se com o subitem e da questão 3 do questionário aula 1, no qual as quantidades de alunos que responderam 4 ou 5 acreditando na afirmação e que responderam 5 demonstrando convicção dela eram, respectivamente, doze e nove (66,7% e 50,0%), temos uma mudança para dezessete e dezoito (94,4% e 100,0%) nas quantidades de respostas ao mesmo subitem.

Comparando-se com os dois subitens anteriores, a b e c apresentaram respectivamente quantidades de alunos com respostas adequadas iguais a catorze, dezesseis e dezessete (77,8%, 88,9% e 94,4%), valores superiores aos considerados adequados nas mesmas afirmações

apresentadas no questionário aula 1, que foram cinco, dez e doze (27,8%, 55,6% e 66,7%). Vale notar ainda, que nos subitens a e c da questão 4 do último questionário, foi considerada apenas a resposta que demonstra convicção, diferentemente das afirmações idênticas mostradas no questionário aula 1. Isso foi feito pois se espera de um aluno que ele seja capaz de dar uma resposta consistente relacionada ao curso. Isso não seria aplicável, portanto, ao subitem b, pois trata de um assunto não central das aulas. Mesmo com essa elevação no nível de exigência, foi detectado um aumento sistemático na quantidade de respostas esperadas nos três primeiros subitens da questão 4.

Diante desse cenário, é possível afirmar que há forte indício de que houve aprendizagem significativa do conceito de dilatação do tempo, uma vez que a situação descrita na afirmação faz referência direta a essa teoria. É importante evidenciar também que o trabalho de Ausubel leva a crer que tal conceito, sendo mais específico, depende de outros mais gerais que foram sendo ancorados criando subsunçores modificados, como cinemática galileana, velocidade da luz, postulados de Einstein, etc. Dessa forma, o resultado deste item corrobora a evidenciação de que vários passos da aprendizagem significativa provavelmente foram seguidos, levando a uma criação de significado na mente dos alunos.

Questão 4 subitem d.

- Objetivos:
 - Comparar o seu resultado com o subitem seguinte;
 - Comparar o seu resultado com o subitem g da questão 3 do questionário aula 1, que apresentou a mesma afirmação;
 - Verificar possível influência das aulas de teoria de TRR no entendimento da alteração do comprimento dos corpos, embora este não tenha sido um tema central no curso.

▪ Resposta esperada:

4 ou 5.

- Resultados:

Tabela 22: Respostas dadas para questão 4d (Questionário 2).

Aluno	4 d		Aluno	4 d
A01	5		B01	5
A02	5		B02	4
A03	5		B03	5
A04	5		B04	5
A05	5		B05	5
A06	4		B06	4
A07	5		B07	5
A08	5		B08	2
			B09	5
			B10	5

Dezessete alunos dos dezoito (94,4%) responderam de forma adequada, sendo catorze (77,8%) convictos.

Na comparação com o subitem g da questão 3 do questionário aula 1, com quinze respostas adequadas (83,3%), sendo dez (55,6%) com convicção, há um aumento. Dois alunos (B04 e B07) mudaram de resposta 2 para 5 e um (B08) não mudou de opinião, respondendo novamente 2. Durante as aulas, foi discutido que fatores poderiam fazer variar o comprimento de um objeto e a dilatação térmica foi lembrada pelos próprios alunos, o que provavelmente impulsionou esse resultado. É prematuro, portanto, concluir que o aprendizado de contração relativística tenha direta relação com esta análise. Não se pode deixar de evidenciar, todavia, que houve um momento de reconciliação integrativa, principalmente relacionado à dilatação térmica, indo ao encontro das ideias de Ausubel, mesmo não sendo esse o tema central da aula nem da afirmação do questionário.

Questão 4 subitem e.

- Objetivos:

- Verificação de evidências de aprendizagem significativa em relação ao conceito de contração do espaço;

- Comparar o seu resultado com o subitem anterior;

- Comparar o seu resultado com o subitem h da questão 3 do questionário aula 1, que apresentou a mesma afirmação;

- Resposta esperada:

5.

- Resultados:

Tabela 23: Respostas dadas para questão 4e (Questionário 2).

Aluno	4 e		Aluno	4 e
A01	5		B01	5
A02	5		B02	4
A03	5		B03	5
A04	5		B04	5
A05	5		B05	5
A06	5		B06	3
A07	5		B07	5
A08	5		B08	4
			B09	5
			B10	5

Quinze dos dezoito alunos (83,3%) responderam de forma adequada, estando convictos. Apenas um aluno (B06) respondeu 3 (indefinido) e dois (B02 e B 08) responderam 4, item correto, mas sem convicção.

Comparando com o subitem h da questão 3 do questionário aula 1, no qual oito alunos (44,4%) apresentaram resposta adequada, observa-se uma importante evolução.

Comparando-se com o item anterior, devido ao fato de haver muitas respostas adequadas – o que geraria baixa variação percentual, é razoável observar a quantidade de alunos que responderam de forma inadequada, que passou de três (33,3%) para um (5,6%) no item que descrevia a dilatação térmica, enquanto foi de dez (55,6%) para três (16,7%) no atual item. A queda proporcional à quantidade inicial, portanto, não foi muito discrepante. Sendo assim, cabe uma análise da comparação entre as respostas 5, que demonstram total convicção. Neste caso, a afirmação sobre dilatação térmica teve aumento de dez (55,6%) para catorze (77,8%), enquanto o subitem sobre contração do espaço teve aumento de um (5,6%) para quinze (83,3%) respostas adequadas e com convicção. Dessa forma, é possível encontrar uma evolução mais importante no conceito de contração do espaço do que no de dilatação térmica, o que corrobora o fato de o tema central não ser este último e sim o primeiro. Fica evidente, ainda, que há

consideráveis indícios de aprendizagem significativa, como se esperava na análise deste subitem.

Questão 5.

- Objetivos:

- Verificação de indícios de aprendizagem significativa em relação ao conceito de dessincronização;

- Resposta esperada:

5.

- Resultados:

Tabela 24: Respostas dadas para questão 5 (Questionário 2).

Aluno	5		Aluno	5
A01	5		B01	5
A02	5		B02	4
A03	4		B03	5
A04	5		B04	5
A05	5		B05	5
A06	5		B06	5
A07	5		B07	5
A08	5		B08	5
			B09	5
			B10	5

Os dezoito alunos (100,0%) manifestaram ter convicção sobre a dessincronização. Mesmo se desconsideradas as respostas 4 (convicção parcial), ainda se tem dezesseis (88,9%) respostas adequadas e nenhum aluno se manifestou contrário ao entendimento do assunto. Dessa forma, ainda considerando que a dessincronização foi a última teoria apresentada e deduzida e que depende de conhecimentos subsunçores construídos ao longo do curso, observa-se indícios da aprendizagem significativa na proposta apresentada.

Questão 6.

▪ Objetivos:

- Evidenciação de indícios de aprendizagem significativa sobre o movimento peculiar da luz;
- Identificar interpretação incorreta da teoria (na primeira afirmação);
- Identificar (na última afirmação) se, na opinião dos alunos, fica evidente que o conhecimento da constância da velocidade da luz pode ser fundamental para se aprender significativamente a dilatação do tempo, segundo a interpretação de Ausubel.
- Identificação de conhecimentos prévios antes do início do curso e formação de produtos interacionais (segunda, terceira e quarta afirmações).

▪ Resposta esperada (sequência):

F, X, X, X, V, onde as três afirmações com X podem ser V (verdadeira) ou F (falsa), pois não é esperada uma das respostas como adequada. Espera-se, no entanto, que apenas uma das três seja marcada, pois se excluem.

▪ Resultados:

Tabela 25: Respostas dadas para questão 6 (Questionário 2).

Aluno	6		Aluno	6
A01	F, V, F, F, V		B01	F, F, V, F, V
A02	F, F, F, V, F		B02	F, F, V, F, V
A03	F, F, V, F, V		B03	F, F, V, F, V
A04	F, F, F, V, V		B04	F, F, F, V, V
A05	F, F, V, F, F		B05	F, F, F, V, V
A06	F, F, F, V, V		B06	F, F, V, F, F
A07	F, F, V, F, V		B07	F, F, V, F, V
A08	F, F, F, V, V		B08	F, F, F, V, V
			B09	F, F, V, F, V
			B10	F, F, F, V, F

Todos os alunos concordam que a primeira afirmação não é incorreta e todos assinalaram apenas uma das três seguintes como correta, o que era esperado para a validação da questão.

Analisando a segunda, a terceira e a quarta afirmações, um aluno (5,6%) manifestou ter conhecimento prévio suficiente sobre a velocidade da luz, nove (50,0%) disseram conhecer, mas que aprenderam mais detalhes e oito (44,4%) confirmaram que foi uma informação praticamente nova.

Sobre a última afirmação, catorze alunos (77,8%) manifestaram concordar com a ancoragem da constância da velocidade da luz com a dilatação do tempo.

Cabe ainda uma ressalva sobre três alunos (A02, B06 e B10) que mantiveram o padrão de responder apenas uma afirmação como correta em todas as questões 6, 7, 8 e 9, que seguiram o mesmo modelo. É possível que esse comportamento se dê ao fato de que, no contexto escolar desses alunos, as provas objetivas apresentam exatamente cinco afirmações e apenas uma é correta, podendo ter havido má interpretação dessas questões no presente questionário. Se essa ressalva for plausível e as respostas dos três alunos forem desconsideradas, tem-se catorze dos quinze alunos restantes (93,3%) concordando com a frase que descreve elementos de ancoragem.

Questão 7.

- Objetivos:

- Evidenciação de indícios de aprendizagem significativa sobre a dilatação do tempo;
- Identificar interpretação incorreta da teoria (na primeira afirmação);
- Identificar (na última afirmação) se, na opinião dos alunos, fica evidente que o conhecimento da dilatação do tempo pode ser fundamental para se aprender significativamente a contração do espaço, segundo a interpretação de Ausubel.
- Identificação de conhecimentos prévios antes do início do curso e formação de produtos interacionais (segunda, terceira e quarta afirmações).

- Resposta esperada (sequência):

F, X, X, X, V, onde as três afirmações com X podem ser V (verdadeira) ou F (falsa), pois não é esperada uma das respostas como adequada. Espera-se, no entanto, que apenas uma das três seja marcada, pois se excluem.

▪ Resultados:

Tabela 26: Respostas dadas para questão 7 (Questionário 2).

Aluno	7		Aluno	7
A01	F, F, V, F, V		B01	F, F, F, V, V
A02	F, F, F, V, F		B02	F, F, F, V, V
A03	F, F, F, V, F		B03	F, F, V, F, V
A04	F, F, F, V, V		B04	F, F, F, V, V
A05	F, V, F, F, F		B05	F, F, F, V, V
A06	V, F, F, F, F		B06	F, F, F, V, F
A07	F, F, F, V, F		B07	F, F, V, F, V
A08	F, F, V, F, V		B08	F, F, F, V, V
			B09	F, F, F, V, F
			B10	F, F, V, F, F

Dezessete alunos (94,4%) concordam que a afirmação não é incorreta (primeira afirmação) e, com exceção do aluno (A06), todos assinalaram apenas uma das três seguintes como correta, o que era esperado para a validação da questão. Se for excluída a resposta de A06, tem-se 100% dos alunos respondendo adequadamente à primeira afirmação.

Analisando a segunda, a terceira e a quarta afirmações sem considerar o aluno A06, um aluno (5,9%) manifestou ter conhecimento prévio suficiente sobre o exemplo de dilatação do tempo, cinco (29,4%) disseram conhecer, mas que aprenderam mais detalhes e onze (64,7%) confirmaram que foi uma informação praticamente nova.

Sobre a última afirmação, dez alunos (55,5%) manifestaram concordar com a ancoragem da dilatação do tempo com a contração do espaço. Se forem consideradas as ressalvas de A06 e, conforme análise da questão 6, também de A02, B06 e B10, tem-se dez de catorze (71,4%) alunos corroborando a ancoragem.

Questão 8.

▪ Objetivos:

- Evidenciação de indícios de aprendizagem significativa sobre a dessincronização;
- Identificar interpretação incorreta da teoria (na primeira afirmação);

- Identificar (na última afirmação) se, na opinião dos alunos, fica evidente que o conhecimento da dessincronização pode ser fundamental para se aprender significativamente s transformações de Lorentz, segundo a interpretação de Ausubel (somente para a turma A).

- Identificação de conhecimentos prévios antes do início do curso e formação de produtos interacionais (segunda, terceira e quarta afirmações).

- Resposta esperada (sequência):

- Turma A: F, X, X, X, V, onde as três afirmações com X podem ser V (verdadeira) ou F (falsa), pois não é esperada uma das respostas como adequada. Espera-se, no entanto, que apenas uma das três seja marcada, pois se excluem.

- Turma B: F, X, X, X, onde as três afirmações com X podem ser V (verdadeira) ou F (falsa), pois não é esperada uma das respostas como adequada. Espera-se, no entanto, que apenas uma das três seja marcada, pois se excluem.

- Resultados:

Tabela 27: Respostas dadas para questão 8 (Questionário 2).

Aluno	8		Aluno	8
A01	F, F, V, F, V		B01	F, F, F, V
A02	F, F, F, V, F		B02	F, F, F, V
A03	F, F, F, V, V		B03	F, F, V, F
A04	F, F, F, V, V		B04	F, F, F, V
A05	F, F, F, V, F		B05	F, F, F, V
A06	F, F, F, V, V		B06	F, F, F, F
A07	F, F, F, V, V		B07	F, F, F, V
A08	F, F, F, V, V		B08	F, F, F, V
			B09	F, F, F, V
			B10	F, F, F, V

Antes de tudo, é preciso ressaltar que a quinta afirmação, por um erro de procedimento, foi impressa para a turma B, que não chegou a estudar as transformações de Lorentz no curso. As respostas atribuídas, portanto, foram excluídas desta análise. A ressalva apresentada na questão 6, no entanto, leva em conta que os alunos B06 e B10 atribuíram apenas uma afirmação como correta, incluindo a quinta afirmação.

Dito isso, todos os dezoito alunos (100%) confirmaram a dessincronização negando a primeira afirmação, percentual que não muda com as ressalvas supracitadas.

Novamente com exceção de B06, todos os alunos atribuíram apenas uma resposta das três seguintes, validando suas respostas.

Analisando a segunda, a terceira e a quarta afirmações sem considerar o aluno B06, nenhum aluno (0,0%) manifestou ter conhecimento prévio suficiente sobre o exemplo de dessincronização, dois (11,8%) disseram conhecer, mas que aprenderam mais detalhes e quinze (88,2%) confirmaram que foi uma informação praticamente nova.

Na quinta afirmação, seis dos oito alunos (75,0%) da turma A concordaram com a ancoragem da dessincronização com as transformações de Lorentz. Se considerada a ressalva para A02, tem-se seis de sete alunos (85,7%).

Questão 9 (Apenas turma A).

- Objetivos:

- Evidenciação de indícios de aprendizagem significativa sobre as transformações de Lorentz;
- Identificar interpretação incorreta da teoria (na primeira afirmação);
- Identificar (na última afirmação) se, na opinião dos alunos, fica evidente que o conhecimento das transformações de Lorentz pode promover reconciliação integrativa com tópicos anteriores, tais como dilatação do tempo, contração do espaço e/ou dessincronização, segundo a interpretação de Ausubel.
- Identificação de conhecimentos prévios antes do início do curso e formação de produtos interacionais (segunda, terceira e quarta afirmações).

- Resposta esperada (sequência):

- F, X, X, X, V, onde as três afirmações com X podem ser V (verdadeira) ou F (falsa), pois não é esperada uma das respostas como adequada. Espera-se, no entanto, que apenas uma das três seja marcada, pois se excluem.

- Resultados:

Tabela 28: Respostas dadas para questão 9 (Questionário 2).

Aluno	9
A01	F, F, V, F, V
A02	F, F, F, F, V
A03	F, F, F, V, V
A04	F, F, F, V, V
A05	F, F, F, V, V
A06	F, F, F, V, V
A07	F, F, F, V, F
A08	F, F, F, V, V

Apesar de nenhum aluno responder que as transformações de Lorentz tem algum erro, essa resposta era esperada e não deve ser considerada na análise em termos de aprendizagem significativa e, com exceção do aluno (A02), todos assinalaram apenas uma das três seguintes como correta, o que era esperado para a validação da questão.

Analisando a segunda, a terceira e a quarta afirmações sem considerar o aluno A02, nenhum dos sete (0,0%) manifestou ter conhecimento prévio suficiente sobre o exemplo de dilatação do tempo, apenas um (14,3%) disse conhecer, mas que aprendeu mais detalhes e seis (85,7%) confirmaram que foi uma informação praticamente nova.

Na quinta afirmação, seis dos sete alunos considerados (85,7%) concordaram com as transformações de Lorentz sendo importante para a retomada dos conceitos anteriores, o que indiretamente indica que eles vivenciaram prováveis elementos de reconciliação integrativa durante a última aula.

Questão 10.

- Objetivos:

- Permitir que os alunos manifestassem espontaneamente possíveis críticas ou elogios sobre o curso ministrado e seus métodos;
- Identificar possíveis elementos de aprendizagem significativa nas respostas;
- Identificar possíveis falhas no método ou nos procedimentos adotados.

- Resultados (transcrição):

Tabela 29: Transcrição da opinião dos alunos sobre a aplicação do material instrucional.

A01	Excelente ao desconstruir conceitos errôneos e difundir a ciência. As explicações, claras e completas, fizeram-me entender melhor aquilo que uma vez não consegui (as explicações do Observatório Nacional eram mais complexas). Creio que a proposta é relevante e interessante e agradeço pela oportunidade de participar e contribuir com a tese. Sucesso.
A02	Em minha opinião o curso foi excelente. Pude ter contato com uma parte da Física a qual nunca tinha ouvido falar e de forma bem didática.
A03	O curso foi excelente, tratando de um assunto complexo e conseguiu explicá-lo de forma simples, parte a parte, o que me fez entender o assunto. Há uma única ressalva, que é sobre a explicação das transformações de Lorentz, que, em minha opinião, foi explicado de forma um pouco confusa, mesmo que no final ainda tenha a compreendido.
A04	O curso foi muito bom, me acrescentou muitas informações e curiosidades novas, o conteúdo foi bem explicado pelo professor e pelo material entregue.
A05	Curso de ótima qualidade, superou minhas expectativas. Consegui entender o assunto muito bem. Deveria ter mais aulas.
A06	O curso foi muito proveitoso e bem planejado e com certeza, superou minhas expectativas. Foi positivamente surpreendente, porque eu pensei que não ia entender nada, o que não foi verdade. O material e o desenvolvimento contínuo foram muito bons para entender o assunto, apenas acho que, talvez, algum recurso audiovisual ajudaria a visualizar alguma coisa, em se tratando de ensino médio.
A07	Excelente curso; não sabia o que esperar por não saber, anteriormente, o que era, de fato, a relatividade (Era algo que eu estava ansioso para conhecer e, nesse sentido, atendeu sim as minhas expectativas). Sim, consegui aprender o assunto e recriar algumas fórmulas em casa, após as aulas, no entanto, acho que seria interessante se houvesse exercícios para fazer como dever de casa.
A08	Atendeu às minhas expectativas, o curso. Apesar de já ter lido, visto e ouvido falar sobre o assunto, as aulas puderam me ajudar a agregar mais informações e organizar melhor o meu conhecimento. Confesso que, pela abstração do conteúdo aprendido nas aulas, estou inseguro em afirmar que entendo totalmente a teoria da relatividade restrita , mas afirmo que tal experiência (ter assistido às aulas) despertou ainda mais meu interesse pelo conteúdo da teoria da relatividade.
B01	Senti que fiz um ótimo curso, realmente me acrescentou bastante sobre um assunto que me interessa bastante.
B02	Eu gostei muito do curso, pois é interessante entender como a natureza funciona.
B03	Em geral, o curso foi excelente, e me surpreendeu bastante. Eu já conhecia o assunto por meio de sites e vídeos na internet, mas com o curso eu pude aprender melhor sobre o assunto, visto que na internet há muitas informações não-verídicas sobre ele.
B04	Foi um curso em que aprendi bastante. Atendeu mais do que minhas expectativas e consegui entender sobre Teoria da Relatividade Restrita.
B05	Me surpreendeu pois trouxe informações que pareciam impossíveis, mas foram explicadas de maneira clara e provadas matematicamente.
B06	Gostei bastante do curso, apesar de não ser contida na minha área (humanas). Respondeu à várias perguntas que eu possuía. Um bom suporte.
B07	Muito bom, método muito fácil para aprender, surpreendente e entendi grande maioria.

B08	O curso é muito bom e gostei muito do que aprendi, apesar de algumas coisas terem me deixado confusa.
B09	Excelente curso. Atendeu as minhas expectativas e alem. Sim. Sim. Otimo texto, explicações e atividades, "fácil" entendimento
B10	Muito bom. Sim. Muito fácil de entender com o método apresentado.

Algumas críticas foram levantadas nas respostas. O aluno A03 se mostrou insatisfeito com apresentação das transformações de Lorentz, embora tenha dito que compreendeu. Já A06 sentiu falta de elementos diferentes de material impresso e quadro, sugerindo recursos audiovisuais. A07 alertou para possível quantidade insuficiente de exercícios, enquanto A08 mostrou estar inseguro quanto ao completo entendimento da teoria. Por fim, B08, assim como A03, também se sentiu algum tipo de “confusão” em determinado momento do curso.

Oito alunos (A01, A03, A04, A06, B05, B07, B09 e B10) elogiaram diretamente o método utilizado e/ou o material produzido e nenhum aluno se mostrou exclusivamente crítico.

Vale notar, por fim, que A01, B03 e B05 teceram comentários sobre outros veículos de divulgação de teoria da relatividade, que eventualmente apresentam informações distorcidas ou mesmo não condizentes com a ciência, sendo que eles manifestaram ser capazes de identificar esses “conceitos errôneos”, “informações não verídicas” e “informações que pareciam impossíveis” e discutir em sala de aula com colegas e professor.

Capítulo 6

Conclusões

Após todo o processo de pesquisa, desde o surgimento dos primeiros rascunhos sobre como abordar física moderna no ensino médio, até o fim das análises, passou-se por diversas etapas, mudanças de rumo e surpresas.

Foi decidido, inicialmente, que pesquisar ensino de física quântica e teoria da relatividade exigiria demasiado tempo, por isso optou-se por manter o foco nesta última. O tema central, aprendizagem significativa segundo Ausubel, foi escolhido ao invés de algum tópico da física em si. Isso levou à decisão de se restringir o trabalho à cinemática relativística, embora alguns pontos da dinâmica tenham sido trabalhados em sala de aula, em momentos de assimilação, e exaustivamente pesquisados, pois surgiu o desafio de tentar trazer a famosa equação de equivalência massa-energia ($E = m \cdot c^2$) para a linguagem do ensino médio, mostrando passo a passo toda a lógica que levou a comunidade científica a aceitá-la. Várias leis da dinâmica relativística, como momento linear, massa relativística e força, se encaixaram perfeitamente no modelo de ensino proposto. Já a ligação entre tal equação e a linguagem do ensino médio infelizmente não foi encontrada de forma completa, faltando apenas um pequeno detalhe matemático que exigiria cálculo de derivadas e integrais, o que, por princípio, não seria aceito na linha pesquisada. Seria conflituoso introduzir tal equação como nova informação e exigir que os alunos a aceitassem sem qualquer tipo de demonstração devidamente ancorada aos seus conhecimentos prévios consolidados.

Sendo assim, todo o tempo passou a ser investido na cinemática relativística. O objetivo seria chegar à dilatação do tempo e à contração do espaço, mas surpreendentemente a pesquisa avançou com o andamento do curso e foi possível trabalhar de forma razoável a dessincronização e uma das turmas (turma A, de 3º ano) teve contempladas as transformações de Lorentz, utilizando de ancoragem e assimilação com os tópicos do curso, chegando ao fim capazes de responder e discutir com propriedade questões básicas relacionadas. A turma A, na verdade, chegou a ter uma aula sobre dinâmica relativística, por uma demanda escolar, mas não no modelo de pesquisa e, portanto, isso foi desconsiderado na análise.

Não se pode deixar de evidenciar que o material instrucional deveria ter características de potencialmente significativo, apresentando as novas informações de maneira organizada e abrindo possibilidades para o professor fazer uma busca constante de pontos de ancoragem entre tal material e os conhecimentos dos seus alunos. Levou-se em conta, ainda, o desafio de produzir um material que possa ser utilizado por outros professores sem demandar a necessidade de que eles se tornem especialistas em aprendizagem significativa de Ausubel antes de iniciar seu trabalho. Mais do que isso, levou-se em conta que esses mesmos professores estudaram cinemática relativística possivelmente por processos não significativos de aprendizagem, então a escrita do texto foi feita de forma que também possa trazer algumas prováveis novidades e reflexões da forma mais completa e intuitiva possível, mesmo para conhecedores da teoria. Além disso, a matemática envolvida foi totalmente descrita da forma mais simples que foi encontrada em toda a literatura pesquisada e, nos casos em que os cálculos apresentados na bibliografia não foram considerados adequados, utilizou-se de lógica matemática, como a dedução das transformações de Lorentz com linguagem exclusivamente compatível com o ensino médio.

As aulas, então se iniciaram com a turma A de aproximadamente doze alunos de terceiro ano do ensino médio que, com algumas desistências ou faltas, permitiu a coleta de dados com oito deles. Devido ao sucesso do curso, alunos de 1º e 2º ano se manifestaram e lotaram uma sala com cinquenta cadeiras na aula inicial da turma B. A chegada da época de provas na escola e a não obrigatoriedade do curso, no entanto, foi um importante fator de desistências e faltas, sendo possível levar em consideração apenas os dados de dez alunos.

Depois de ministradas as aulas, esperava-se fazer a análise de dados essencialmente baseada em entrevistas e nas filmagens, além dos dois questionários aplicados, um antes e um após o término. A compilação das respostas dos questionários, porém, se mostrou muito rica e acabou se tornando o centro da obtenção de resultados, sendo que os vídeos e as entrevistas serviram de suporte para interpretar os questionários e não o contrário, como se imaginava inicialmente.

Diante dos resultados, percebeu-se que apenas um aluno (A01) mostrou conhecimento prévio de dilatação do tempo e contração do espaço, sendo coerente com todas as suas respostas. Os outros dezessete alunos mostraram várias incoerências nas respostas do questionário inicial, mas no questionário final, todos os subitens tiveram respostas esperadas acima de 80%, exceto apenas dois, que ficaram entre 70% e 80%. Também vale ressaltar que 100% das questões que abordaram o mesmo tipo de conhecimento nos dois questionários mostraram um aumento

porcentual de respostas adequadas, havendo forte indício de cumprimento dos objetivos da pesquisa.

O mais importante é que houve uma tentativa bem sucedida de utilizar todos os elementos da aprendizagem significativa, apresentados no capítulo 2, na construção do material instrucional e que esses mesmo elementos foram detectados na análise de dados. Foi possível identificar e trabalhar com nova informação, conhecimentos prévios, subsunçores, ancoragem, produto interacional, material potencialmente significativo, assimilação, diferenciação progressiva, reconciliação integrativa, organização sequencial e consolidação em todo o processo, como se esperava.

Por fim, a receptividade e os comentários dos alunos incentivando a realização de mais cursos com o mesmo método e elogiando a própria pesquisa demonstram o quão valiosa e construtiva pode ser a adoção da teoria de ensino e aprendizagem antes de montar um plano de aula.

Referências

- AUSUBEL, D. P. **A aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Moraes, 1982.
- BRASIL, **Parâmetros Curriculares Nacionais**. Brasília: MEC; SEMTEC, 1998.
- BRASIL, **PCNS+ E. Ensino médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais**. Brasília: MEC, SEMTEC, 2002.
- BOHM, D. **A Teoria da Relatividade Restrita**. 5a edição. São Paulo: Editora Unesp, 2014.
- DAMASIO, F.; PEDUZZI, L. O. Q. **Einstein usou resultados experimentais ao propor a relatividade?** Física na Escola. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, v.15, n. 1. p. 4-11, 2017.
- EINSTEIN, A. **Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Rio de Janeiro: Editora Contraponto, 1999.
- EINSTEIN, A. **Zue Elektrodynamik hewegter Körper**, Am. der Phys., 17, 891-921, 1905.
- GOBBI, L. H.; ALVARENGA, F. G. **Paradoxo dos Gêmeos: Uma abordagem dadilatação temporal segundo o Efeito Doppler com uma álgebra do Ensino Médio**. In: VII Encontro Científico de Física Aplicada, 2016, Espírito Santo. Blucher Physics Proceedings. São Paulo: Editora Blucher. v. 3. p. 5-9.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física, vol. 4: Óptica e Física Moderna**. 10a edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2016.
- MARTINS, R. de A. **Teoria da Relatividade Especial**. - 2 ed. - São Paulo: Editora Livraria da Física, 2012.
- MARTINS, R. de A. **A Origem Histórica da Relatividade Especial** - 2 ed. - São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.
- MICHELSON, A. A.; MORLEY, E. W. **On the relative motion of the earth and the luminiferous aether**, Phil. Mag., S5, 24, 449-463, 1887.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. - 2 ed. ampl. - São Paulo: EPU, 2011a.
- RESNICK, R. **Introdução à Relatividade Especial**. São Paulo: Editora Polígono, 1971.

Apêndice A - Material Instrucional - Parte 1



Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Programa de Pós Graduação em Ensino de Física - PPGEnFis



TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Parte 1

Aluno: _____

Turma: _____

Professor: Vinício Merçon Poltronieri

Orientador: Flávio Gimenes Alvarenga

APRESENTAÇÃO

Este material foi preparado com o conteúdo básico de teoria da relatividade restrita (TRR) e é destinado a alunos do ensino médio. A sequência proposta se baseia na teoria de Aprendizagem Significativa de Ausubel, a qual sugere que um conhecimento novo é assimilado agregando-o a conhecimentos já prévios na mente da pessoa.

Cada novo conhecimento será embasado com resultados experimentais e/ou cálculos, para evitar falácias no aprendizado. Após um ciclo de conhecimento, haverá uma lista de exercícios fundamental para a assimilação do conteúdo e para verificar se houve real aprendizado ou se concepções alternativas (“erros conceituais”) ainda estão presentes na mente do aluno.

O maior objetivo, aqui, é aperfeiçoar técnicas de ensino que permitam o correto entendimento do assunto, pois a teoria da relatividade é real e faz parte do nosso cotidiano, embora não a percebamos com facilidade. Também é importante mostrar que não há qualquer ficção, pois toda a teoria foi construída com base em experimentos e observações da natureza.

Se tratando de uma pesquisa, obviamente o trabalho aqui está sujeito a todo tipo de erros e é de suma importância a participação dos alunos, com sugestões e críticas, afinal o aluno é o grande alvo deste trabalho.

Sendo assim, o contato para tais sugestões é viniciomercon@yahoo.com.br.

“Algo só é impossível até que alguém duvide e prove o contrário.”

Albert Einstein

Vinício Merçon Poltronieri

Junho/2016

1 - INTRODUÇÃO:

“Em nosso cotidiano, estamos acostumados a conviver com o conceito de velocidade, que nos dá a ideia de movimento. Podemos facilmente imaginar o movimento de uma pessoa, um carro, um avião, uma bola de futebol, uma formiga, etc.

É importante ressaltar que o movimento é uma grandeza relativa, ou seja, um corpo se move em relação a um referencial (outro corpo, ou uma estrada, por exemplo).

A cinemática de Galileu Galilei (1564-1642) nos permite calcular com precisão deslocamentos, velocidades e tempos, em especial no Movimento Retilíneo e Uniforme (MRU). Assim, se motorista de um carro vê passar uma hora no seu relógio para chegar a uma cidade a 60 km de distância, fez o percurso com uma velocidade média de 60 km/h. Já um carro que se move numa estrada a 50 km/h num sentido e outro que se move a 40 km/h, no sentido oposto, se deslocam com a velocidade relativa de 90 km/h entre eles, ou seja, a soma dos módulos de suas velocidades”.

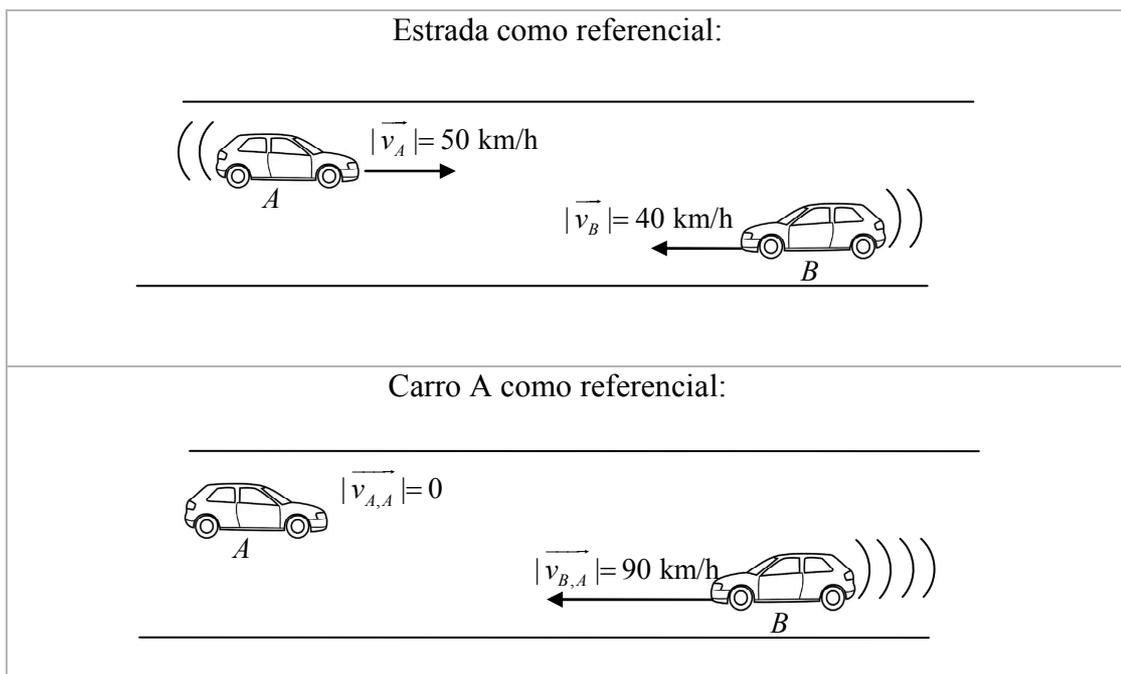


Figura 37: Velocidades medidas por movimento relativo.

“Agora, precisamos nos perguntar: Essas medidas são sempre tão precisas, quando tratamos de velocidades altíssimas, como de cometas, satélites, partículas emitidas por radioatividade, ventos solares, etc.?”

No final do século XIX e no início do século XX, grandes cientistas, como Albert Einstein (1879-1955) e Hendrik Lorentz (1853-1928) se depararam com sérios dilemas, ao notarem que a luz tinha um movimento muito peculiar, fugindo aos padrões cotidianos, o que os fez levantar

diversas hipóteses e imaginar que a cinemática galileana não daria resultados corretos para objetos com velocidades muito altas.

De fato, para corpos que se movem a 80% da velocidade da luz (ou $2,4 \cdot 10^8$ m/s), por exemplo, podemos ter erros da ordem de até 60% nas medidas de espaço, tempo e velocidade.

Antes de chegar a essas conclusões, precisamos entender melhor o movimento da luz.”.

2 - A VELOCIDADE DA LUZ:

“2.1. Velocidade da Luz no Vácuo:

A luz (onda eletromagnética visível), assim como qualquer onda eletromagnética, é um fenômeno da natureza com características tanto de partículas (fótons), quanto de ondas. No vácuo ela tem seu movimento praticamente desimpedido, o que a permite ter maior velocidade possível, que chamamos de c .

$$c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} .$$

Velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo.

Observação: na verdade a luz no vácuo tem a velocidade de 299 792 458 m/s por definição. No ar atmosférico a luz praticamente não encontra moléculas em seu caminho, devido à baixa densidade, tendo quase a mesma velocidade que tem no vácuo.

Pela cinemática de Galileu, podemos imaginar que, se um objeto se movesse, por exemplo, a $2 \cdot 10^8$ m/s para a direita e fosse iluminado por um raio de luz que se move para a esquerda, com $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, o objeto detectaria esse raio se movendo com velocidade relativa de $3 \cdot 10^8 + 2 \cdot 10^8 = 5 \cdot 10^8$ m/s (mais rápido do que a luz).

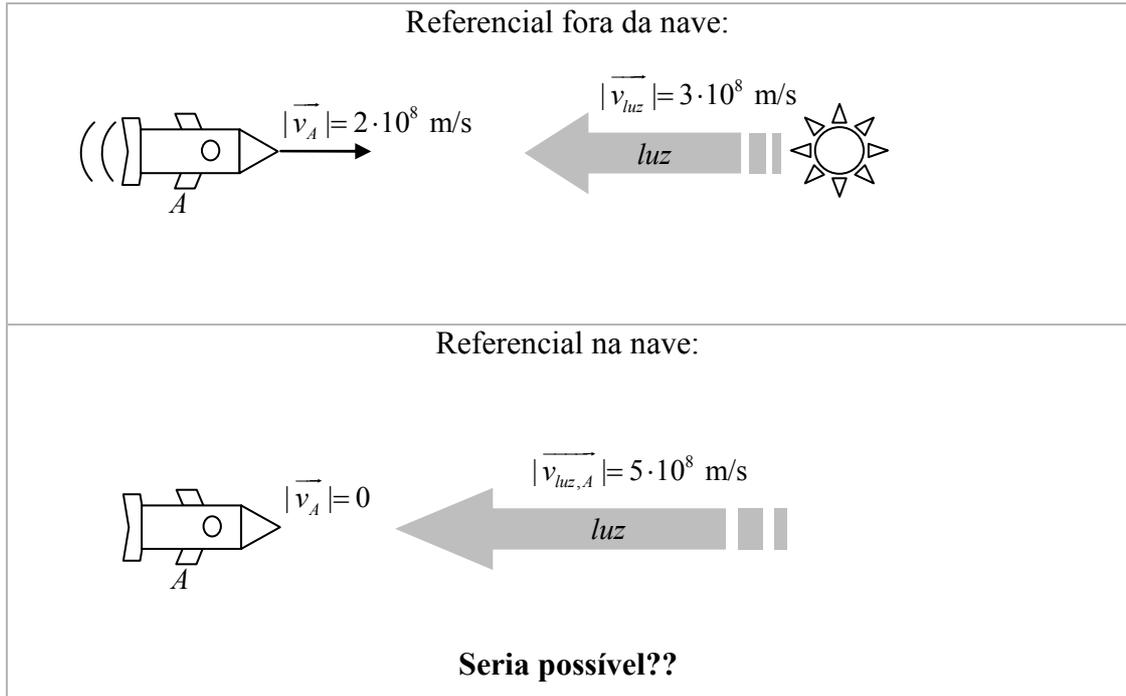


Figura 38: Movimento relativo para a luz.

Em 1887, no entanto, Albert Michelson (1852 - 1931) e Edward Morley (1838 - 1923) verificaram experimentalmente que isso é IMPOSSÍVEL!

2.2. O Experimento de Michelson-Morley (1887):

Defendia-se a ideia de que o éter (uma espécie de fluido) ocuparia todo o espaço, inclusive no vácuo (ausência de matéria). Dessa forma, a luz se moveria no éter com velocidade constante, como uma onda sonora se move em relação ao ar. Assim, considerando-se todos os movimentos da Terra (rotação, translação, etc), certamente ela se moveria em relação ao éter.

Dessa forma, o experimento de Michelson-Morley pretendia verificar que a luz teria velocidades diferentes, quando se movesse em diferentes direções na superfície da Terra (a favor do éter, contrária ao éter, ou mesmo perpendicularmente a ele). Hoje se sabe que a terra se move a cerca de 29,8 km/s em torno do Sol, velocidade grande o suficiente para comparar experimentalmente com os 300.000 km/s da velocidade da luz.

No experimento, um jogo de espelhos e um espelho semi-reflexivo imprimiu dois diferentes caminhos para um feixe de luz emitido por uma única fonte.

Aparato experimental:



Figura 39: Aparato experimental do interferômetro de Michelson-Morley.

Fonte: <http://fisica.fe.up.pt/luz/michelson.html>

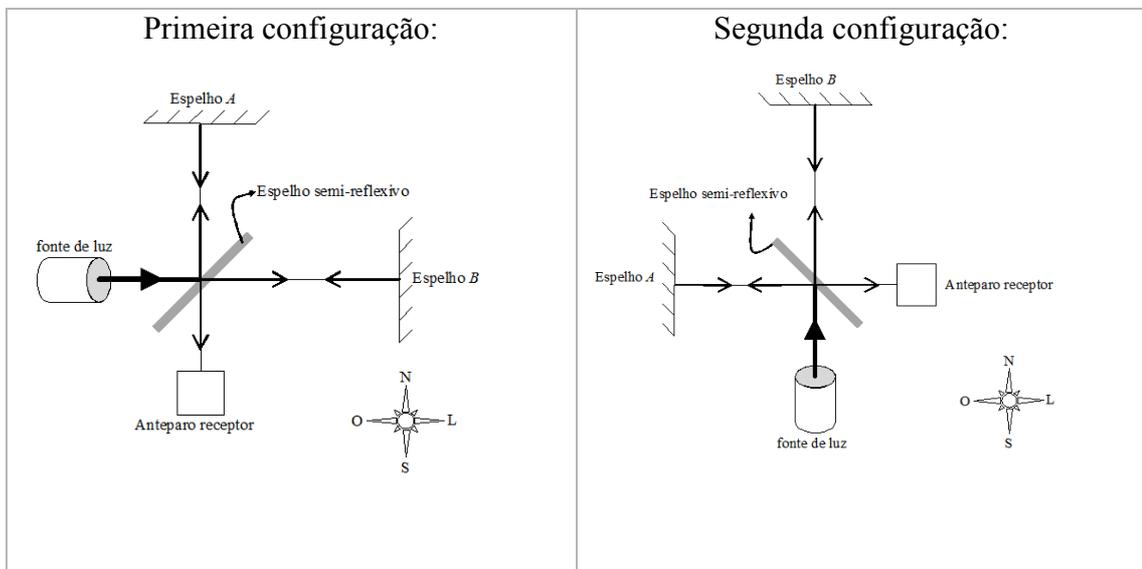


Figura 40: Esquema – medida da velocidade da luz.

Cada caminho (A e B) é feito em diferentes tempos, Δt_A e Δt_B . Ao se reencontrarem e seguirem para o anteparo receptor, as ondas luminosas criam um padrão de interferência bem definido, determinado por essa diferença entre os tempos.

Se o experimento for girado ou posto na posição vertical, as velocidades da luz nos dois caminhos sofreriam alterações, pois o suposto éter mantém seu movimento e, certamente, haveria mudanças tanto em Δt_A quanto em Δt_B , criando um novo padrão de interferência.

Para surpresa dos cientistas, os padrões não sofreram quaisquer alterações quando o aparato experimental foi girado, ou mesmo feito num plano vertical. Isso significaria futuramente que a teoria do éter cairia em desuso.

Mesmo diante de uma razoável hipótese de que a superfície da Terra “arrasta” o fluido éter e, por isso, não seria detectado seu movimento nas proximidades da superfície, a tecnologia espacial permitiu que o experimento de Michelson-Morley fosse reproduzido longe do planeta Terra, decretando o fim a qualquer dúvida sobre o assunto.

Uma nova ideia começou a surgir: A velocidade da luz não depende do movimento do referencial (Terra), do observador nem da fonte!

2.3. O decaimento de píons neutros (π^0):

Outra evidência da maneira peculiar como a luz e as outras ondas eletromagnéticas se propagam é a emissão de fótons por decaimento de píons.

Os mésons pi (píons) neutros, π^0 , são partículas subatômicas previstas na década de 1930 e detectadas em 1950. Seu tempo médio de vida é de poucos nanossegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$) e logo se transforma em raios gama (γ):

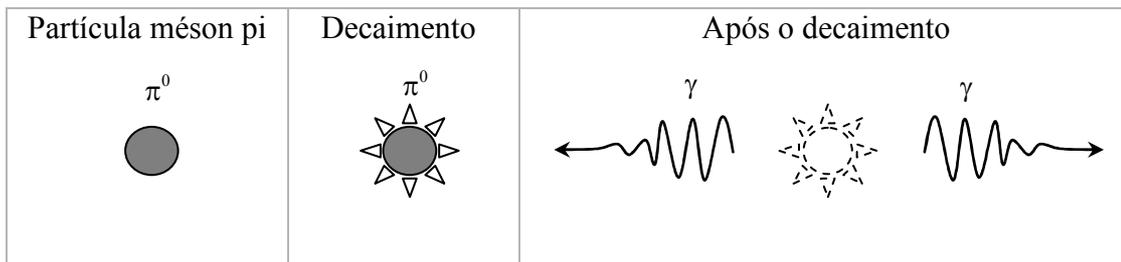
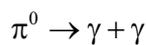


Figura 41: Esquema da emissão de fótons pelo decaimento de píons.

Em aceleradores de partículas, mesmo quando $v_{\pi^0} = 0,99975c$, a velocidade dos raios γ detectados é sempre igual àquela medida para o π^0 em repouso!

Isso reforça a ideia de que o movimento da fonte não interfere na velocidade da radiação eletromagnética emitida.

Observação: O brasileiro César Lattes (1924-2005), que foi professor da Unicamp-SP, participou da equipe que descobriu os primeiros mésons π .

2.4. Postulado* de Einstein para a Velocidade da Luz:

*Postulado: afirmação ou fato admitido sem necessidade de demonstração.

Einstein não foi o único autor, mas compilou teorias de outros autores sobre a relatividade, organizando de forma mais didática. Sem afirmar nem negar a teoria do éter, preferiu postular uma ideia equivalente a:

"A velocidade da luz no vácuo independe do movimento da fonte e do movimento do observador."

Em outras palavras, a velocidade da luz é uma grandeza absoluta (não relativa), ou seja, não depende do referencial onde ela é medida.

2.5. Exercícios:

REVISÃO DE CONHECIMENTOS PRÉVIOS:

2.5.1. Dois carros colidem frontalmente em uma estrada, que serve de referencial. Se o carro A se movia a 60 km/h e o carro B a -80 km/h, o impacto causado pela colisão, sentido pelo carro A é semelhante a A parado e B o atingindo a	a) 20 km/h. b) -20 km/h. c) 70 km/h. d) 140 km/h. e) -140 km/h.
--	---

2.5.2. Em um jogo de futebol americano, dois jogadores correm no mesmo sentido e o de trás lança a bola para o da frente. O de trás se move a 10 km/h, o da frente a 25 km/h. O jogador de trás lança a bola com uma velocidade de 90 km/h em relação ao seu próprio corpo. Qual a velocidade relativa da bola (em relação ao corpo) para o jogador que a recebe?	a) 90 km/h. b) 75 km/h. c) 85 km/h. d) 100 km/h. e) 125 km/h.
---	---

ASSIMILAÇÃO

2.5.3. Tendo a Terra como referencial, seja c a velocidade da luz. Uma nave espacial A a $0,6c$ se aproxima da nave B, a $-0,8c$. Qual a velocidade da luz emitida pelos faróis da nave B, quando medida por um detector <u>parado na Terra</u> ?	a) $2,4c$. b) $1,8c$. c) $1,6c$. d) $1,0c$. e) $0,4c$.
--	---

<p>2.5.4. Tendo a Terra como referencial, seja c a velocidade da luz. Uma nave espacial A a $0,6c$ se aproxima da nave B, a $-0,8c$. Qual a velocidade da luz emitida pelos faróis da nave B, quando medida por um detector <u>na nave A</u>?</p>	<p>a) $2,4c$. b) $1,8c$. c) $1,6c$. d) $1,0c$. e) $0,4c$.</p>
--	--

2.5.5. Suponha um interferômetro de Michelson-Morley, como na figura abaixo, em que as distâncias dos espelhos A e B ao espelho semi-reflexivo sejam iguais a d . Suponha, ainda, que o movimento da Terra, na ocasião, seja em direção a Leste, com velocidade v , e que c é a velocidade da luz em questão. A luz leva um tempo Δt_A para ir do espelho semi-reflexivo até o receptor quando refletida pelo espelho A e Δt_B pelo espelho B.

<p>Figura 42: Interferômetro de Michelson-Morley.</p>	<p><u>Numa abordagem relativística (e real), qual será a relação entre Δt_A e Δt_B?</u></p> <p>a) $\Delta t_A = \Delta t_B$.</p> <p>b) $\Delta t_A = (c - v) \cdot \Delta t_B$.</p> <p>c) $\Delta t_A = v \cdot \Delta t_B$.</p> <p>d) $\Delta t_A = \frac{c}{c - v} \cdot \Delta t_B$.</p> <p>e) $\Delta t_A = \sqrt{\frac{c^2 - v^2}{c^2}} \cdot \Delta t_B$.</p>
---	--

APROFUNDAMENTO:

2.5.6. Suponha um interferômetro de Michelson-Morley, como na figura abaixo, em que as distâncias dos espelhos A e B ao espelho semi-reflexivo sejam iguais a d . Suponha, ainda, que o movimento da Terra, na ocasião, seja em direção a Leste, com velocidade v , e que c é a velocidade da luz em questão. A luz leva um tempo Δt_A para ir do espelho semi-reflexivo até o receptor quando refletida pelo espelho A e Δt_B pelo espelho B. Se for usada uma abordagem clássica, com a luz se movendo com velocidade c em relação ao espaço, mas sua velocidade relativa ao aparato experimental sendo calculada somando ou subtraindo vetorialmente pela velocidade da Terra, qual deveria ser a relação entre Δt_A e Δt_B ? (Observe que a abordagem clássica não prevê corretamente o resultado experimental).

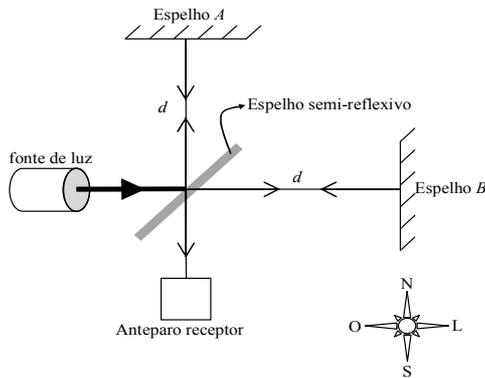


Figura 43: Interferômetro de Michelson-Morley.

- a) $\Delta t_A = \Delta t_B$.
- b) $\Delta t_A = (c - v) \cdot \Delta t_B$.
- c) $\Delta t_A = v \cdot \Delta t_B$.
- d) $\Delta t_A = \frac{c}{c - v} \cdot \Delta t_B$.
- e) $\Delta t_A = \sqrt{\frac{c^2}{c^2 - v^2}} \cdot \Delta t_B$.

2.5.7. Uma estrela se afasta radialmente da Terra. Detecta-se que a faixa da luz violeta emitida pelo hidrogênio contido na estrela chega à Terra com 410,4 nm de comprimento de onda. Sabendo que a faixa violeta do espectro do hidrogênio corresponde a 410,2 nm, calcule a velocidade aproximada da estrela em relação à Terra.

- a) $1,5 \cdot 10^3$ m/s.
- b) $1,5 \cdot 10^4$ m/s.
- c) $1,5 \cdot 10^5$ m/s.
- d) $1,5 \cdot 10^6$ m/s.
- e) $1,5 \cdot 10^7$ m/s.

3 - O LIMITE DA VELOCIDADE DOS CORPOS:

3.1. O "Experimento Mental* de Einstein"

* Um experimento mental consiste em imaginar um fenômeno sem colocá-lo em prática de fato, mas seguindo fielmente todas as teorias relevantes.

Aos 16 anos (muito antes do surgimento da teoria da relatividade), Einstein imaginou a seguinte situação: Se alguém puder perseguir, com velocidade c , um feixe de luz, o que ele observaria? Essa curiosidade o levou, posteriormente, a desenvolver muito sobre a teoria da relatividade. Baseado nesse experimento mental e na já conhecida limitação para o movimento da luz podemos imaginar outro experimento:

"Se um viajante em uma nave pudesse perseguir, com velocidade muito próxima à da luz, por exemplo, suponha $v_{luz} = 299\,790\,001$ m/s, $v_{nave} = 299\,790\,000$ m/s e seu rosto emite um feixe de luz para um espelho 1 m à sua frente, como ele veria a imagem?"

Para responder a isso, primeiramente já temos base para saber o que acontece no referencial da nave:

A luz que é refletida pela pessoa, atinge o espelho e é detectada por ela mesma, sempre se movendo com velocidade c em relação a ela. Assim, certamente essa luz voltará quase instantaneamente ao observador, após a reflexão no espelho, independentemente do movimento do referencial.

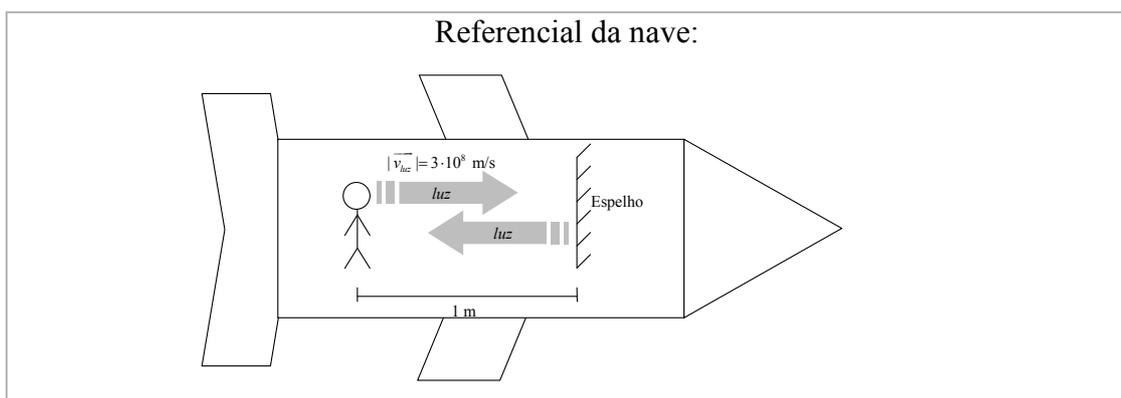


Figura 44: Observação de um feixe luminoso (referencial da nave).

Já para um observador parado fora da nave e vendo ela se mover, identificaria a luz se deslocando 299 790 001 m a cada segundo e a nave se movendo 299 790 000 m a cada segundo. De acordo com a cinemática de Galileu, ele detectaria a luz levando 1 segundo só para percorrer 1 m e atingir o espelho.

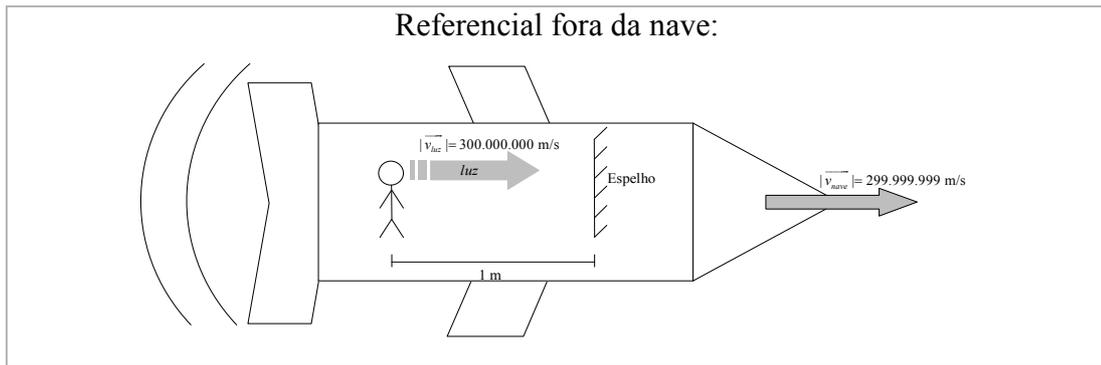


Figura 45: Observação de um feixe luminoso (referencial fora da nave).

Assim, o observador veria a sua imagem com um atraso considerável! Se a velocidade da nave se igualasse à velocidade da luz, então o observador nunca veria sua imagem! Pior ainda seria se ele ultrapassasse a velocidade da luz. Isso é absurdo, pois uma simples mudança de referencial do observador não pode interferir no evento (o fato de a pessoa da nave ver ou não a sua imagem no espelho).

Essas aparentes contradições começam a sugerir a essência da teoria da relatividade, pois cada observador, no seu referencial, detecta um mesmo fenômeno com características de tempo e distância bem diferentes, ou seja, a expressão “tudo é relativo”, nesse caso, se refere às noções de espaço e tempo. Futuramente ainda vamos mostrar que essa diferença de distâncias percorridas pela luz não é exatamente 1m e que os corpos não podem se mover com velocidade maior ou igual à da luz.

Como a explicação desse tipo de contradição só surge em capítulos posteriores, parece não haver ponto de ancoragem entre os conhecimentos prévios, incluindo a cinemática galileana e o movimento peculiar da luz, e a nova informação “paradoxo do viajante que vê com atraso ou não vê a sua imagem, dependendo de quem observa o fenômeno”. Sendo assim, não há um ciclo completo para verificar aprendizagem significativa neste capítulo, mas a tentativa de encontrar respostas não contraditórias para a situação do viajante na nave pode abrir um ponto de ancoragem para a nova informação, que será a descrição do trem de Einstein, apresentada no capítulo seguinte.

4 - A DILATAÇÃO DO TEMPO:

4.1. “Réguas e Relógios”:

Diante das novas descobertas, algumas aparentes contradições foram percebidas, necessitando de uma interpretação mais condizente com a realidade.

É importante salientar que nós temos instrumentos capazes de medir distâncias curtas (régua) e a passagem do tempo em locais bem próximos (relógios). Também é possível detectar a posição de um objeto longe em um determinado instante com o auxílio de um feixe de luz laser, medindo o tempo de ida e volta e calculando o caminho percorrido, baseado na velocidade da luz. Caso o objeto esteja em movimento, não se pode esquecer que ele não estará mais na posição detectada quando o aparelho receber a luz refletida.

Sendo assim, podemos realizar mais experimentos mentais, seguindo fielmente as possibilidades físicas de medição de posições (com “régua”) e durações de eventos, ou tempos (com “relógios”).

4.2. O "Trem de Einstein":

Existe um experimento mental chamado "O trem de Einstein":

Imagine um vagão de trem espacial que pode viajar em movimento retilíneo e uniforme (MRU) a uma velocidade v altíssima, próximo à velocidade da luz, passando perto da Terra:

Ao passar próximo à Terra, um viajante dentro do trem (observador O') realiza um experimento bem simples, colocando um emissor de luz no chão, um espelho no teto, a uma altura D e um receptor de luz no chão, bem próximo ao emissor:

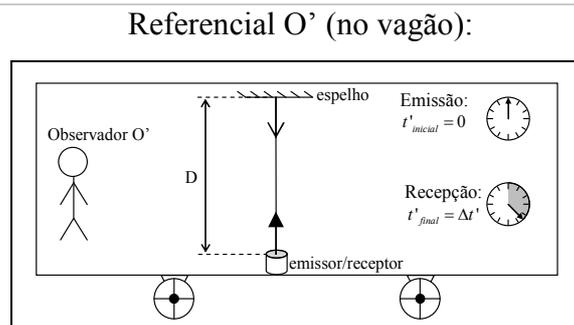


Figura 46: Emissão/recepção sob o ponto de vista do observador O' no vagão.

Um pulso de luz levará um determinado tempo $\Delta t'$ para ser emitido e posteriormente recebido, percorrendo a distância total $2D$, que pode ser medida com algum tipo de "régua". Esse tempo pode ser detectado por um “relógio” extremamente preciso. Pelo postulado de Einstein, a velocidade da luz medida pelo

viajante é c , então:
$$c = \frac{2D}{\Delta t'}$$

Já um observador O, na Terra, verá o vagão percorrer uma distância Δx , medida com algum tipo de “régua”, e o pulso de luz leva um tempo Δt (medido por um “relógio” na Terra) para percorrer uma trajetória como na figura a seguir:

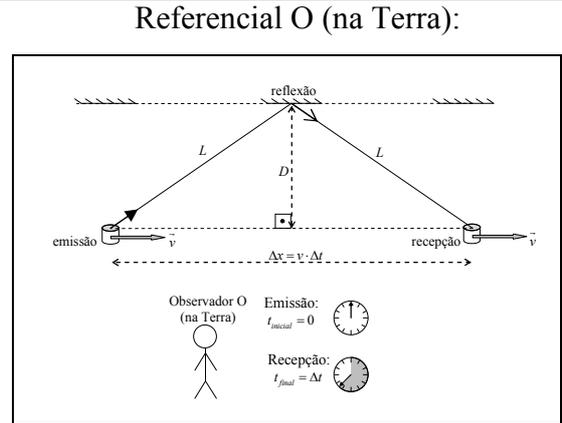


Figura 47: Emissão/recepção sob o ponto de vista do observador O na Terra.

O observador O detecta, em seu “relógio”, um tempo Δt para o movimento do pulso que, obviamente, percorreu uma distância maior, $2L$, que também pode ser medida com uma “régua”, então: $c = \frac{2L}{\Delta t}$.

Observe que $D < L$, pois a hipotenusa é maior que o cateto, então $2D < 2L$, que são as distâncias percorridas pela luz nos dois referenciais (vagão e Terra).

Vários experimentos e o postulado de Einstein, no entanto, já mostram que a luz percebida pelo observador na terra, se move também com velocidade c em relação a ele.

A mudança de referencial não é capaz de determinar uma nova velocidade para a luz. A situação também não pode cair em uma contradição física.

Dessa forma, chega-se à seguinte interpretação para o evento emissão/recepção do pulso:

Se os módulos das velocidades dos feixes de luz são iguais e as distâncias medidas são diferentes, certamente os relógios medirão tempos diferentes para o mesmo evento!

Sim, é isso o que acontece!

Perceba que $\Delta t' = \frac{2D}{c}$ e $\Delta t = \frac{2L}{c}$, mas com $D < L$, concluímos que $\Delta t' < \Delta t$.

De fato, aviões, satélites e aparelhos que viajam longas distâncias com alta velocidade, sofrem sistematicamente um pequeno atraso em seus relógios, por mais precisos que sejam, mesmo feitos de diversos materiais de altíssima tecnologia. Sendo assim, a velocidade é capaz de “retardar” o movimento natural dos átomos daquele relógio.

Ainda é possível discutir vários outros casos. Se uma pessoa estiver usando tal relógio na nave, ela não perceberá que está funcionando mais lentamente, pois todos os seus átomos terão exatamente o mesmo atraso no funcionamento e, portanto, a sua sensação de passagem do tempo será inalterada. Esse tipo de filosofia fica a cargo da imaginação do estudante.

Também seria válido supor que os relógios mediriam tempos iguais e, na verdade, as distâncias percorridas pelo feixe de luz nos dois referenciais seriam iguais, sendo que a altura D do vagão seria reduzida, como um “encolhimento”. Essa hipótese, porém, é facilmente descartada por vários experimentos reais ou mentais, como o atraso nos relógios de aeronaves e atraso no tempo de decaimento de partículas, como discutiremos mais adiante.

4.3. O Fator de Lorentz (γ):

Matematicamente, pode-se determinar, então, a relação entre as medidas de tempo Δt (na Terra) e $\Delta t'$ (no vagão) para o mesmo evento (ida e volta do pulso de luz).

No referencial da nave (O'):	No referencial da Terra (O):
$c = \frac{2D}{\Delta t'}$	Podemos isolar L e Δx :
Podemos isolar $\Delta t'$ e D :	$c = \frac{2L}{\Delta t} \Rightarrow L = \frac{c \cdot \Delta t}{2};$
$\Delta t' = \frac{2D}{c}, \quad (4.3.1)$	$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v \cdot \Delta t. \quad (4.3.3)$
$D = \frac{c \cdot \Delta t'}{2}. \quad (4.3.2)$	Aplicando o Teorema de Pitágoras em um dos triângulos retângulos:
	$(L)^2 = \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2 + D^2.$
	$\left(\frac{c \cdot \Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2 + D^2. \quad (4.3.4)$
	Podemos isolar Δt :
	$\Delta t = \frac{2\sqrt{D^2 + (\Delta x)^2}}{c}. \quad (4.3.5)$

Podemos, ainda, substituir (4.3.2): e (4.3.3) em (4.3.4):

$$\left(\frac{c \cdot \Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v \cdot \Delta t}{2}\right)^2 + \left(\frac{c \cdot \Delta t'}{2}\right)^2.$$

Isolando Δt :

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t' . \quad (4.3.6)$$

Definimos então o fator γ de Lorentz:

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

4.4. Tempo Próprio:

Comparando as equações (4.3.1) $\Delta t' = \frac{2D}{c}$ e (4.3.5) $\Delta t = \frac{2\sqrt{D^2 + (\Delta x)^2}}{c}$, observa-se que:

$$\Delta t > \Delta t' . \quad (4.4.1)$$

Isso significa que no referencial que não se move em relação ao evento (ida e volta do pulso), ou seja, no vagão, o tempo medido é o menor possível. Chamamos esse tempo de tempo próprio.

“Tempo próprio”
É a duração do evento, quando medida em um referencial em repouso em relação ao evento – o “referencial próprio”.

Também concluímos que

$$\gamma > 1 \text{ para qualquer objeto!}$$

A expressão "dilatação do tempo" significa, portanto, que um evento em seu referencial próprio (em repouso) tem um tempo medido menor possível e se o evento se move em relação a outro referencial, qualquer medida de tempo de duração do evento feita em tal referencial terá como resultado uma duração maior, dependendo da sua velocidade, como se o tempo sofresse uma dilatação.

Vale destacar que se, por exemplo, um evento ocorresse na Terra e tivesse uma duração com medida Δt (portanto, seu tempo próprio), um observador O' no vagão do trem de Einstein detectaria esse mesmo evento com um tempo $\Delta t' > \Delta t$, pois o evento “se movendo” tem seu tempo dilatado, como se os átomos funcionassem mais lentamente, vistos pelo observador O' no vagão. Assim, a relação entre essas medidas seria $\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t$ ao invés de $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$. É de extrema importância que saibamos diferenciar esses dois casos, pois é uma questão de referencial, sendo a essência da teoria da relatividade.

Comparando-se relógios:

“Um relógio se movendo sempre medirá a passagem do tempo mais lentamente, para o observador parado”.

4.5. Dilatação do Tempo:

Da equação (4.3.6) e do fator de Lorentz, temos:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'.$$

(equação da dilatação do tempo!)

Vale quando o evento ocorre no referencial O' ($\Delta t'$ é o tempo próprio do evento) e é observado (medido por relógios) tanto no referencial O' quanto no referencial O.

4.6. Velocidade dos Corpos e a Velocidade da Luz:

Da equação (4.3.6), temos:

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

Logo:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ é um número real.}$$

Assim, o denominador $1 - \frac{v^2}{c^2} > 0$.

Daí:

$$\frac{v^2}{c^2} < 1.$$

Como v e c são positivos, então:

$$v < c.$$

- Lembrando que v é a velocidade do vagão, isso significa que:

“Nenhum objeto se move com velocidade em módulo acima ou igual à da luz no vácuo!”

Curiosidade: Algumas histórias de ficção dizem que quando um objeto se move acima da velocidade da luz, esse objeto ou o observador pode "voltar no tempo".

Interpretamos fisicamente isso como comparar dois relógios quaisquer medindo Δt e $\Delta t'$, de forma que um deles tenha medida negativa em relação ao outro, ou seja, seus sinais são opostos e o fator γ de Lorentz seria negativo.

Matematicamente, isso é uma falácia, pois se $v > c$, não temos $\gamma < 0$, mas (lembrando que c é positivo e v é não negativo):

$$v > c \Leftrightarrow v^2 > c^2 \Leftrightarrow \frac{v^2}{c^2} > 1 \Leftrightarrow 1 - \frac{v^2}{c^2} < 0,$$

$$\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 0.$$

Como $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, então o resultado disso é:

“ γ é um número complexo” e não “ $\gamma < 0$ ”

Fisicamente, até o momento, não temos uma interpretação clara do que seria esse γ complexo, então não podemos dizer que essa "viagem ao passado" é possível. O mesmo vale para um objeto se movendo com $v = c$, pois teríamos um denominador nulo, também absurdo matematicamente e de interpretação física duvidosa.

4.7. Exercícios:

ASSIMILAÇÃO:

<p>4.7.1. Uma nave A se move com 60% da velocidade da luz e uma nave B se move com 80% da velocidade da luz. Quais os fatores de Lorentz correspondentes?</p>	<p>a) $\gamma_A = \frac{5}{4}$ e $\gamma_B = \frac{5}{3}$. b) $\gamma_A = \frac{4}{5}$ e $\gamma_B = \frac{5}{3}$.</p> <p>c) $\gamma_A = \frac{5}{4}$ e $\gamma_B = \frac{3}{5}$. d) $\gamma_A = \frac{4}{5}$ e $\gamma_B = \frac{3}{5}$.</p> <p>e) $\gamma_A = \frac{5}{3}$ e $\gamma_B = \frac{5}{4}$.</p>
---	--

<p>4.7.2. Os aviões supersônicos mais modernos dificilmente ultrapassam a velocidade de 1000m/s. Essa velocidade é muito mais baixa que a velocidade da luz. Qual o valor mais próximo do fator de Lorentz para o avião nessa velocidade?</p>	<p>a) $\gamma_A \approx 0$. b) $\gamma_A \approx 1$. c) $\gamma_A \approx 10^{10}$. d) $\gamma_A \approx 10^{-10}$. e) $\gamma_A \approx 10^5$.</p>
---	--

<p>4.7.3. Um avião a 1000m/s sobrevoa a superfície de uma cidade. No relógio de um homem parado no solo, o tempo para atravessar um bairro é de 1s. Quanto tempo, aproximadamente, se passou no relógio do piloto do avião para atravessar a cidade?</p>	<p>a) 0 s. b) 1 s. c) $1 \cdot 10^{10}$ s. d) $1 \cdot 10^{-10}$ s. e) $1 \cdot 10^5$ s.</p>
--	---

<p>4.7.4. Uma nave se move a 0,6c em relação à Terra. Um observador <u>na Terra mede 2,00 s</u> para a nave ir da Terra à Lua. Quanto tempo se passou no relógio de um tripulante da nave para ir da Terra à lua? (Dica: o relógio em movimento sempre está mais lento)</p>	<p>a) 1,00 s. b) 1,28 s. c) 1,60 s. d) 2,00 s. e) 2,5 s.</p>
---	--

<p>4.7.5. Uma nave se move a 0,6c em relação à Terra. Um observador <u>na nave mede 1,60 s</u> para a nave ir da Terra à Lua. Quanto tempo se passou no relógio de uma pessoa na Terra, vista pelo tripulante na nave? (Dica: o relógio em movimento sempre está mais lento)</p>	<p>a) 1,00 s. b) 1,28 s. c) 1,60 s. d) 2,00 s. e) 2,5 s.</p>
--	--

5 - A CONTRAÇÃO DO ESPAÇO:

5.1. Experimento Mental:

Consolidada a dilatação do tempo, novamente algumas aparentes contradições podem ser discutidas. Se, por exemplo, uma nave se move em relação à Terra, então a Terra se move com a mesma velocidade em relação à nave, em sentido contrário. Assim, um observador na Terra vê o relógio da nave funcionar mais lento e o observador da nave vê um relógio na Terra também ser mais lento. Qual dos dois está correto?

Ambos estão corretos! Mais à frente entenderemos melhor como isso acontece, mas precisamos entender, além da dilatação do tempo, o que acontece com o espaço em altas velocidades. Seguindo a mesma lógica do “trem de Einstein”, podemos imaginar que a fonte emissora e o detector estão na parte traseira do vagão e o espelho na parte dianteira:

Ao passar próximo à Terra, um viajante dentro do trem (observador O') realiza um experimento, colocando um emissor de luz na parte traseira de um vagão, um espelho na parte dianteira, a uma distância L' e um receptor de luz na parte traseira, bem próximo ao emissor:

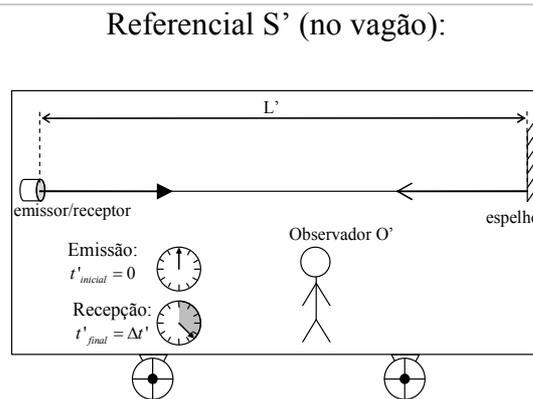


Figura 48: Emissão/recepção observado no referencial S' (no vagão).

O pulso de luz levará um tempo $\Delta t'$ para ser emitido e recebido, percorrendo a distância total $2L'$

Pelo postulado de Einstein, a velocidade da luz medida pelo viajante é c , então:

$$c = \frac{2L'}{\Delta t'}$$

Logo:

$$\Delta t' = \frac{2L'}{c} \tag{5.1.1}$$

Já um observador O, na Terra, verá o vagão com um comprimento L percorrer uma distância $v \cdot \Delta t_1$ até o pulso de luz chegar ao espelho e $v \cdot \Delta t_2$ para ele sair do espelho e chegar ao receptor:

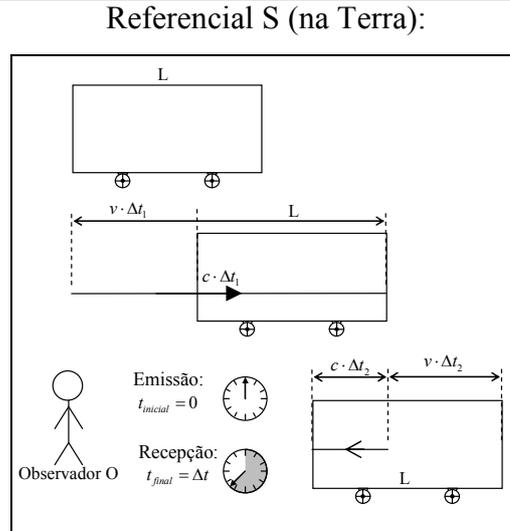


Figura 49: Emissão/recepção observado no referencial S (na Terra).

A luz percorre, nas duas etapas, as distâncias de $c \cdot \Delta t_1$ e $c \cdot \Delta t_2$, respectivamente.

O tempo total será $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$

Pela figura, observamos que:

$$c \cdot \Delta t_1 = v \cdot \Delta t_1 + L . \tag{5.1.2}$$

$$c \cdot \Delta t_2 + v \cdot \Delta t_2 = L . \tag{5.1.3}$$

Utilizaremos um pouco de álgebra, para concluir algo importante!

Somando e subtraindo (5.1.2) e (5.1.3), temos, respectivamente:

$$c \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2) = 2L + v \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_2) , \tag{5.1.4}$$

$$(\Delta t_1 - \Delta t_2) = \frac{v}{c} (\Delta t_1 + \Delta t_2) . \tag{5.1.5}$$

Substituindo (5.1.5) em (5.1.4) e considerando $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ e $\frac{1}{\gamma^2} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$:

$$c \cdot \Delta t = 2L + v \cdot \frac{v}{c} \Delta t ,$$

$$2L = \Delta t \left(c - \frac{v^2}{c} \right) ,$$

$$2L = \Delta t \cdot c \cdot \left(\frac{c^2 - v^2}{c^2} \right) ,$$

$$2L = \Delta t \cdot c \cdot \frac{1}{\gamma^2}.$$

Incluindo a dilatação do tempo, $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$:

$$2L = \gamma \cdot \Delta t' \cdot c \cdot \frac{1}{\gamma^2}.$$

Finalmente, substituindo (5.1.1):

$$2L = \gamma \cdot \frac{2L'}{c} \cdot c \cdot \frac{1}{\gamma^2}.$$

Daí:

$$L' = \gamma \cdot L.$$

(equação da contração do espaço.)

Vale quando o evento ocorre no referencial O' (L' é o comprimento próprio) e é observado (medido) tanto no referencial O' quanto no referencial O.

Sim! Qualquer objeto com uma velocidade suficientemente alta sofre uma contração no seu comprimento. Se medimos o espaço com réguas e essas réguas se contraem, podemos dizer que o próprio espaço se contrai!

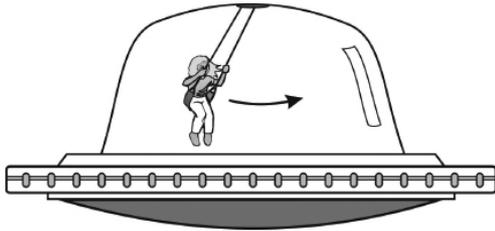
5.2. Exercícios:

ASSIMILAÇÃO:

<p>5.2.1. Uma nave se move a $0,6c$ em relação à Terra. Originalmente ela foi construída com 10,0 m de comprimento. Qual o comprimento da nave, se medido por radares na Terra?</p>	<p>a) 8,0 m. b) 10,0 m. c) 12,0 m. d) 12,5 m. e) 15,0 m.</p>
--	--

<p>5.2.2. Duas naves idênticas são fabricadas no mesmo local, na Terra, tendo 10 m de comprimento, cada. Se uma das naves decola e passa perto da Terra, se movendo a $0,6c$, qual o comprimento da nave do solo, medida pelos radares da nave que viaja?</p>	<p>a) 8,0 m. b) 10,0 m. c) 12,0 m. d) 12,5 m. e) 15,0 m.</p>
--	--

<p>5.2.3. A Terra, junto com o sistema solar, se desloca a uma velocidade de 240 km/s em relação ao centro da galáxia. Em termos relativísticos, parece pouco, se considerarmos que a essa velocidade, corresponde um fator de Lorentz $\gamma \cong 1,0000005$. Mas se em algum planeta próximo ao centro da galáxia alguém medir o diâmetro da Terra, encontrará um valor diferente do que nós medimos aqui (12742 km). Qual é a diferença entre as medidas de tal diâmetro, aproximadamente?</p>	<p>a) 6 cm. b) 60 cm. c) 6 m. d) 60 m. e) 6000m.</p>
--	--

<p>5.2.4. (AFA 2014) Uma garota de nome Julieta se encontra em uma nave espacial brincando em um balanço que oscila com período constante igual a T_0, medido no interior da nave, como mostra a figura abaixo.</p>  <p>Figura 50: Garota brincando numa nave espacial.</p> <p>A nave de Julieta passa paralelamente com velocidade $0,5 c$, em que c é a velocidade da luz, por uma plataforma espacial, em relação à qual, o astronauta Romeu se encontra parado. Durante essa passagem, Romeu mede o período de oscilação do balanço como sendo T e o comprimento da nave, na direção do movimento, como sendo L. Nessas condições, o período T, medido por Romeu, e o comprimento da nave, medido por Julieta, são respectivamente</p>	<p>a) $2T_0\sqrt{3}/3$ e $2L\sqrt{3}/3$. b) $2T_0\sqrt{3}/3$ e $L\sqrt{3}/2$. c) $T_0\sqrt{3}/2$ e $2L\sqrt{3}/3$. d) $T_0\sqrt{3}/2$ e $L\sqrt{3}/2$.</p>
---	--

APROFUNDAMENTO:

5.2.5. (UFES 2010) Os mésons mu ou múons são partículas instáveis com tempo médio de vida de 2 μ s. Os múons são produzidos na alta atmosfera, milhares de km acima do nível do mar. A velocidade típica desses múons é de 0,998c (c = 300.000 km/s é a velocidade da luz no vácuo).

A) Em uma abordagem não relativista, calcule a distância média percorrida pelos múons.

B) Em uma abordagem relativista, sabendo que o fator de Lorentz é $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-0,998^2}} \cong 15$, calcule a distância média percorrida pelos múons do ponto de vista de um observador em repouso na Terra.

C) Do ponto de vista do múon, explique, usando novamente uma abordagem relativista, como muitos múons podem atingir o nível do mar, apesar de isso ser impossível em uma abordagem não relativista.

6 – RESPOSTAS DOS EXERCÍCIOS:

3.5.1 e	4.7.1 a	5.2.1 a	5.2.5
3.5.2 b	4.7.2 b	5.2.2 a	A) $\Delta y = 598,8$ m.
3.5.3 d	4.7.3 b	5.2.3 e	B) $\Delta y = 8982$ m.
3.5.4 d	4.7.4 c	5.2.4 a	C) Do ponto de vista de um observador no referencial do múon há uma contração do espaço, $\Delta y'' = \frac{\Delta y'}{\gamma} = \Delta y$, tal que
3.5.5 a	4.7.5 b		uma distância de 8982 m no referencial de um observador no
3.5.6 e			solo para o múon é de apenas 598,8 m.
3.5.7 c			

Apêndice B - Material Instrucional - Parte 2



Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Programa de Pós Graduação em Ensino de Física - PPGEnFis



TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Parte 2

Aluno: _____

Turma: _____

Professor: Vinício Merçon Poltronieri

Orientador: Flávio Gimenes Alvarenga

1 – DESSINCRONIZAÇÃO:

1.1. Simultaneidade:

Dois eventos são simultâneos se ocorrem ao mesmo tempo. Em um referencial inercial (que não sofre aceleração, nem efeitos gravitacionais), para verificar a simultaneidade de dois eventos A e B , distantes entre si, é suficiente que um pulso de luz emitido por cada evento seja detectado simultaneamente em algum ponto equidistante de A e B .

1.2. Sincronização:

Dois relógios estão sincronizados se todas as suas medidas de tempo coincidem simultaneamente. Observe que a sincronização envolve a passagem do tempo e não apenas um instante (o que define simultaneidade e não sincronização). Observe também que entre dois referenciais relativísticos, a sincronização não pode acontecer, devido à dilatação do tempo. Já entre dois relógios no mesmo referencial inercial, pode-se verificar se há sincronização por meio da própria luz, mesmo que seja necessário calcular o tempo de viagem da luz do relógio até o detector.

Podemos entender isso na astronomia, naturalmente, pois sabemos que a luz recebida de fenômenos simultâneos em estrelas diferentes é detectada na Terra em diferentes épocas, devido às enormes distâncias envolvidas (da ordem de anos-luz).

Assim, tendo dois relógios sincronizados em repouso, ao mudarmos um deles para um referencial com grande velocidade, a sincronização se desfaz.

Agora, será que num mesmo referencial dois (ou mais) relógios uma vez sincronizados, sempre marcarão as mesmas medidas?

1.3. Experimento Mental:

Imagine uma nave (Referencial R') que se move no sistema solar (referencial R) com velocidade $v = 0,6c$ ($\gamma = 1,25$). Ela passa muito próxima de um planeta A e, em seguida, pelo seu satélite B , sendo detectado o tempo de 1,00s na Terra para esse evento. Podemos supor, ainda, cronômetros no planeta A e no satélite B , sincronizados entre si. Para melhor compreensão, considere que os cronômetros do sistema solar marcam zero quando a nave passa por A e, nesse instante, o piloto zera o cronômetro da nave. Surgem algumas perguntas:

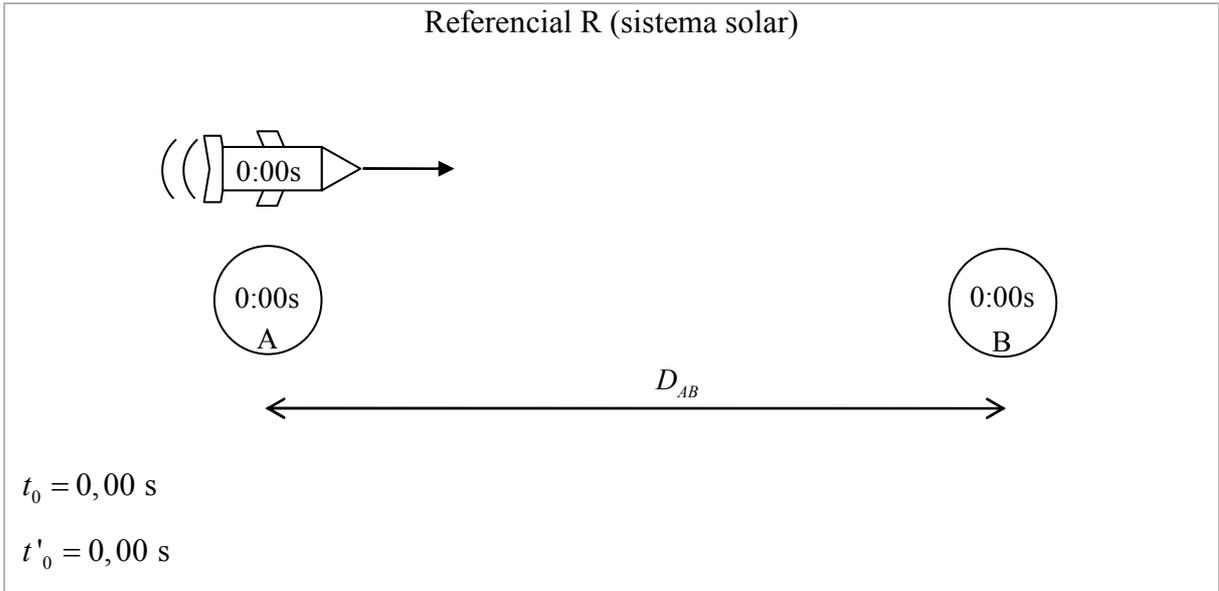


Figura 51: Nave em movimento (inicial).

- Quanto tempo foi detectado para o evento no relógio da nave?
- Qual a distância entre A e B, no referencial R?
- Visto pelo piloto da nave, quanto tempo se passou num relógio no planeta A? E no satélite B? Esses valores são contraditórios com a medida de 1,0s?
- Qual a distância entre A e B, no referencial R'?
- Quando a nave passa por B, quanto tempo marca o cronômetro na nave? E em A e B?

DESENVOLVIMENTO:

- Dilatação do tempo (R parado e R' em movimento, logo $\Delta t > \Delta t'$):

$$\Delta t = 1,00 \text{ s e } \gamma = 1,25;$$

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'.$$

Daí: $1,00 = 1,25 \cdot \Delta t'$

$$\Delta t' = 0,80 \text{ s}.$$

Pela sincronização de A com B, observe que $\Delta t_A = \Delta t_B = 1,00 \text{ s}$:

- No referencial R:

$$v = 0,6c = 0,6 \cdot 3 \cdot 10^8 = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m/s};$$

$$v = \frac{D_{AB}}{\Delta t} \rightarrow 1,8 \cdot 10^8 = \frac{D_{AB}}{1,00} \Rightarrow D_{AB} = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m},$$

que é a distância própria entre A e B!

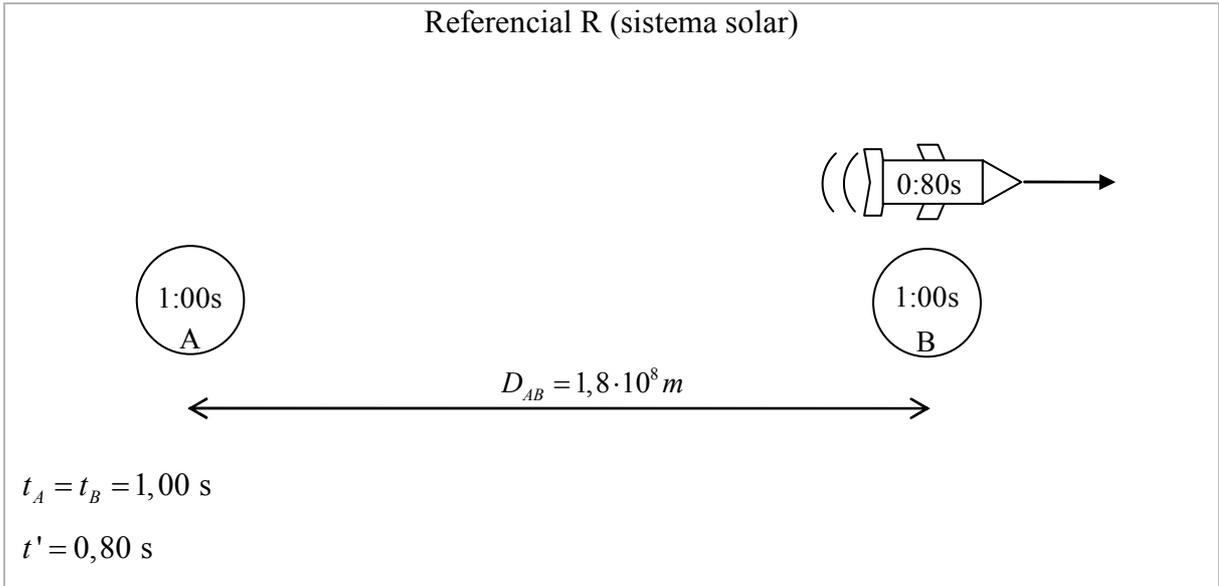


Figura 52: Nave em movimento (final).

c) Dilatação do tempo (R' parado e R em movimento, com velocidade $-0,6c$, logo $\Delta t < \Delta t'$):

$$\Delta t' = 0,8 \text{ s e } \gamma = 1,25;$$

$$\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t.$$

$$\text{Daí: } 0,80 = 1,25 \cdot \Delta t,$$

$$\Delta t = 0,64 \text{ s}.$$

Aparentemente há uma contradição! Vamos continuar descrevendo toda a situação para verificar que não há contradições.

d) A O piloto da nave vê A e B passando por ele num intervalo de 0,80s, com velocidades $0,6c$ (em módulo), logo:

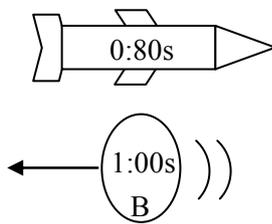
$$|v_A'| = |v_B'| = 0,6c = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m/s};$$

$$|v_A'| = \frac{D'_{AB}}{\Delta t'} \rightarrow 1,8 \cdot 10^8 = \frac{D'_{AB}}{0,80} \Rightarrow D'_{AB} = 1,44 \cdot 10^8 \text{ m}.$$

Contração do espaço! Menor distância entre os planetas, que também parecem “achatados”, com 80% do seu comprimento:

e) Referencial R:

Pela figura do item b), os tempos marcados são $t_A = 1,00 \text{ s}$, $t_B = 1,00 \text{ s}$ e $t' = 0,80 \text{ s}$.

<p>Referencial R':</p> <p>A situação em B deve ser idêntica, ou seja, o piloto vê seu cronômetro marcar 0,80s e pode ver também o satélite B marcando 1,00s. Um observador em B veria exatamente a mesma coisa. Mas, para o piloto, a nave tem seu comprimento máximo (comprimento próprio) e o planeta está contraído:</p>	 <p>Figura 53: B Satélite B passando pela nave, que está em repouso.</p>
---	--

Pela dilatação do tempo, se na nave se passou $\Delta t' = 0,80 \text{ s}$, em A se passou $\Delta t_A = 0,64 \text{ s}$.

Logo, acontece a seguinte situação:

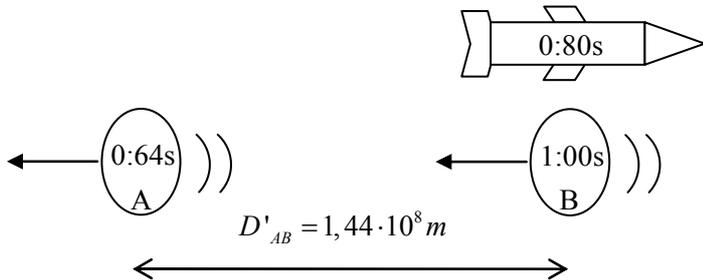
Referencial R' (nave)	
	
$t_A = 0,64 \text{ s}$ $t_B = 1,00 \text{ s}$ $t' = 0,80 \text{ s}$	

Figura 54: Nave em repouso (final).

É importantíssimo observar que, para o piloto, o cronômetro de B mediu $\Delta t_B = 0,64 \text{ s}$ e $t_B = 1:00 \text{ s}$, ou seja:

$$t_B - t_{0B} = \Delta t_B \rightarrow 1,00 - t_{0B} = 0,64,$$

$$t_{0B} = 0,36 \text{ s}.$$

Claramente a sincronização entre A e B não vale no referencial R', ou seja, a sincronização é relativa (depende do referencial)!

Para A:

$$t_A - t_{0A} = \Delta t_A \rightarrow t_A - 0 = 0,64,$$

$$t_A = 0,64 \text{ s}.$$

Conclusão: Esse evento não se iniciou quando B marcava 0,00 s (e sim $t_{0B} = 0,36$ s)! Esse evento não se finalizou quando A marcava 1,00s (e sim $t_A = 0,64$ s)! Nesse evento, um objeto (A ou B) a 0,6c não se deslocou por 1,00 s (e sim 0,80 s) e não percorreu $1,8 \cdot 10^8$ m (e sim $1,44 \cdot 10^8$ m).

Sendo assim, não há contradição de $\Delta t_A = \Delta t_B = 0,64$ s encontrados aqui com os valores medidos de $\Delta t_A = \Delta t_B = 1,00$ s, como descrito no enunciado, pois simplesmente são dois eventos diferentes!

Veja a sequência de situações para os dois eventos:

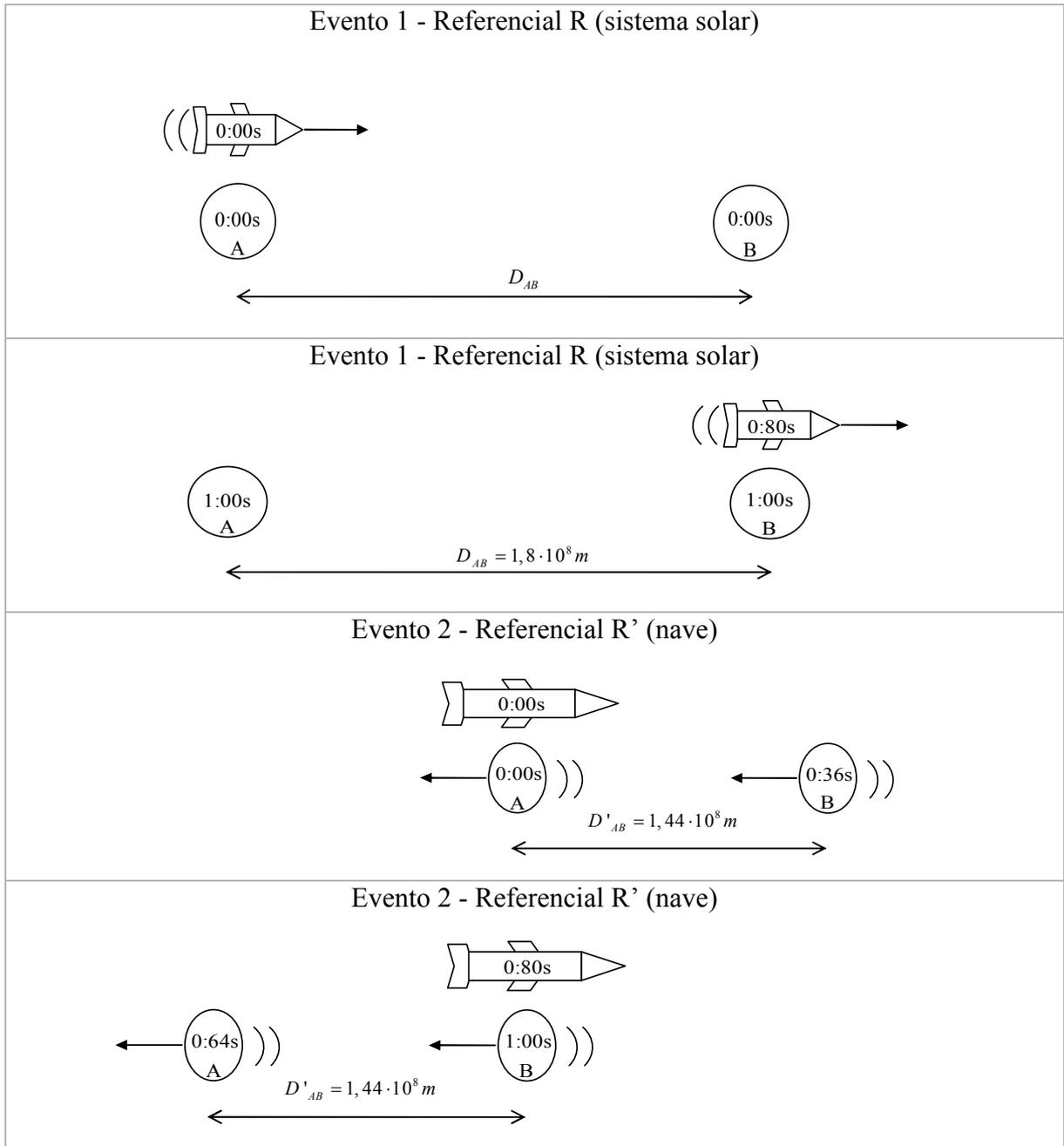


Figura 55: Sequências de eventos nos dois referenciais, R(sistema solar) e R' (nave).

Apêndice C - Material Instrucional - Parte 3



Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Programa de Pós Graduação em Ensino de Física - PPGEnFis



TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Parte 3

Aluno: _____

Turma: _____

Professor: Vinício Merçon Poltronieri

Orientador: Flávio Gimenes Alvarenga

1 – TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ

1.1. O que vamos calcular?

A) Situação:

- Dois referenciais O e O' , um com velocidade v em relação ao outro.
- Uma partícula com velocidade u ou u'
- Estudaremos o caso em que em algum instante ficam muito próximos:

i) a partícula;

ii) O ponto $x = 0$

iii) O ponto $x' = 0$

- Em outro momento, a partícula se deslocou, assim como os referenciais, um em relação ao outro.

B) Sistema de referenciais:

- Utilizaremos as “réguas” x e x' e os “relógios” t e t' :
- Lembre-se: “Tudo é relativo!!” – Estudaremos sob o ponto de vista de um referencial de cada vez.

Referencial parado O :

Antes:

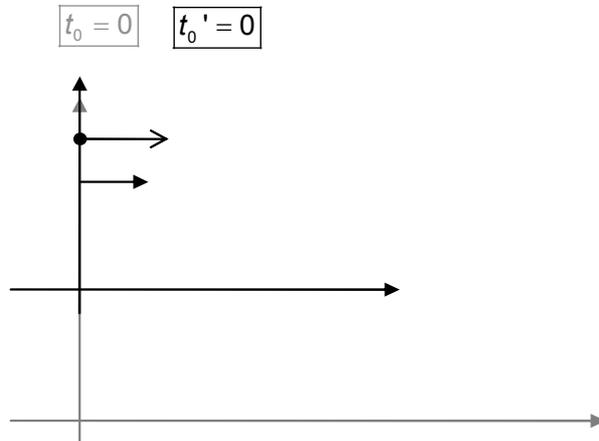


Figura 56: Referencial O (antes).

Depois:

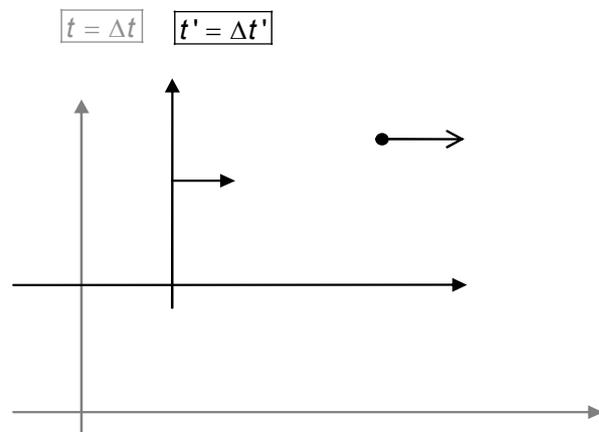


Figura 57: Referencial O (depois).

Referencial parado O' :

Antes:

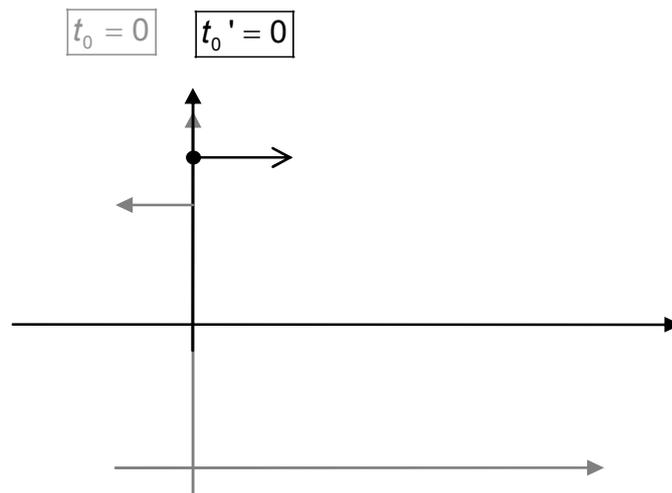


Figura 58: Referencial O' (antes).

Depois:

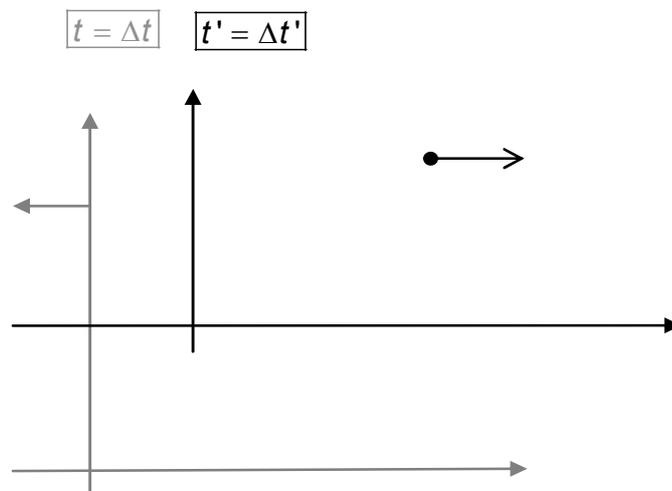


Figura 59: Referencial O' (depois).

C) Deduza as transformações de Lorentz para o tempo Δt e $\Delta t'$:

- Medidas feitas em O :

$$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{v}{c^2} \Delta x \right).$$

- Medidas feitas em O' :

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

D) Deduza as transformações de Lorentz para a velocidade u e u' :

- Medidas feitas em O :

$$u' = \frac{u - v}{1 - u(v/c^2)}.$$

- Medidas feitas em O' :

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'(v/c^2)}.$$

1.2. Exercícios

Duas partículas A e B se aproximam. A tem velocidade $0,8c$ e B tem velocidade $-0,8c$.

- Qual a velocidade de B em relação a A?

- Qual a velocidade de A em relação a B?

Respostas:

Referencial em A: $u'_B = -\frac{1,6c}{1,64} \cong -0,98c$.

Referencial em B: $u'_A = \frac{1,6c}{1,64} \cong +0,98c$.

Apêndice D - Questionário Aula 1

QUESTIONÁRIO - AULA 01:

Aluno: _____

Este questionário visa exclusivamente acompanhar o processo de aprendizagem de cada aluno e, de forma alguma, fazer qualquer tipo de avaliação.

É importante que as respostas sejam sinceras, para evitar distorções na análise de dados da pesquisa.

1. Um carro A se move numa estrada retilínea a 50 km/h. Um carro B se move na mesma estrada, a 60 km/h no mesmo sentido.

a) Qual a velocidade relativa do carro B em relação ao carro A?

b) Qual a velocidade relativa do carro A em relação ao carro B?

c) Se B se movesse em sentido oposto a A, qual seria a velocidade relativa do carro A em relação ao carro B?

2. Estime a velocidade mais aproximada de alguns elementos cotidianos, seguindo os códigos abaixo:

1 – 0,1 mm/s	a) () Pessoa caminhando
2 – 1 cm/s	b) () Formiga
3 – 1 m/s	c) () Carro
4 – 10 m/s	d) () Avião
5 – 100 m/s	e) () Bactéria
6 – 1 km/s	f) () Meteorito
7 – 10 km/s	g) () Terra em torno do Sol
8 – 100 km/s	h) () Raio X proveniente do sol, chegando à Terra.
9 – 1000 km/s	
10 – 10000 km/s	
11 – 100000 km/s	

3. De acordo com os sua opinião e com os seus conhecimentos, classifique de 1 a 5 o quanto cada um dos fenômenos a seguir se parecem com ficção ou com realidade física:

1. Certamente ficção
2. Provavelmente ficção
3. Indefinido
4. Provavelmente realidade
5. Certamente realidade

a) () Uma bola de tênis arremessada contra uma parede, ao se chocar com ela, a atravessa, chegando ao outro lado, sem que em momento algum ocupasse o interior da parede.

b) () Um elétron de um lado do núcleo de um átomo o atravessa, chegando ao outro lado, sem que em momento algum ocupasse o interior do núcleo.

c) () Se um relógio for acelerado a uma velocidade acima da velocidade da luz no vácuo, este relógio poderá marcar um horário anterior à sua marcação inicial, assim como uma pessoa que viajar com velocidade superior à da luz pode voltar no tempo.

d) () Se um relógio for congelado, seu funcionamento pode ficar mais lento e ele sofrer um atraso em relação a outro relógio idêntico feito de mesmo material.

e) () Se um relógio adquire alta velocidade (não superior à da luz), ele pode sofrer um atraso em relação a outro relógio idêntico feito de mesmo material.

f) () Ondas cerebrais podem provocar movimento em átomos, sendo possível então mover objetos, como uma cadeira, apenas com o poder da mente.

g) () Uma barra de metal de 10 m pode encolher para cerca de 9,99 m se for resfriada.

h) () Uma barra de metal de 10 m pode passar a ter cerca de 9,99 m se for acelerada a uma alta velocidade.

4. Diga brevemente sobre o que você imagina que vai aprender nesse curso (ex: buraco negro, anti-matéria, teoria de cordas, etc.):

Apêndice E - Questionário Aulas 4 e 5

QUESTIONÁRIO – AULAS 04 e 05:

Aluno: _____

Este questionário visa exclusivamente acompanhar o processo de aprendizagem de cada aluno e, de forma alguma, fazer qualquer tipo de avaliação.

É importante que as respostas sejam sinceras, para evitar distorções na análise de dados da pesquisa.

1. () Você se convenceu de que a luz tem velocidade constante em qualquer referencial apenas lendo o texto?

- 1 – Não me convenci
- 2 – Pensei no assunto, mas não me convenci
- 3 – Não me senti influenciado
- 4 – Me convenci parcialmente
- 5 – Me convenci.

2. () Você se convenceu de que Einstein postulou as regras de movimento da luz baseado em fatos experimentais, cálculos e no trabalho de outros cientistas (e não por pura genialidade)?

- 1 – Não me convenci
- 2 – Pensei no assunto, mas não me convenci
- 3 – Não me senti influenciado
- 4 – Me convenci parcialmente
- 5 – Me convenci.

3. () O quão suficiente lhe parece o texto para ensinar a teoria?

- 1 – Muito insuficiente
- 2 – Razoavelmente insuficiente
- 3 – Indiferente
- 4 – Razoavelmente suficiente
- 5 – Muito suficiente

4. De acordo com os sua opinião e com os seus conhecimentos, classifique de 1 a 5 o quanto cada um dos fenômenos a seguir se parecem com ficção ou com realidade física:

1. Certamente ficção
2. Provavelmente ficção
3. Indefinido
4. Provavelmente realidade
5. Certamente realidade

a) () Se um relógio for acelerado a uma velocidade acima da velocidade da luz no vácuo, este relógio poderá marcar um horário anterior à sua marcação inicial, assim como uma pessoa que viajar com velocidade superior à da luz pode voltar no tempo.

b) () Se um relógio for congelado, seu funcionamento pode ficar mais lento e ele sofrer um atraso em relação a outro relógio idêntico feito de mesmo material.

c) () Se um relógio adquire alta velocidade (não superior à da luz), ele pode sofrer um atraso em relação a outro relógio idêntico feito de mesmo material.

d) () Uma barra de metal de 10 m pode encolher para cerca de 9,99 m se for resfriada.

e) () Uma barra de metal de 10 m pode passar a ter cerca de 9,99 m se for acelerada a uma alta velocidade.

5. Você está convicto de que dois relógios podem medir tempos diferentes para um mesmo evento?

- 1 – Não me convenci
- 2 – Pensei no assunto, mas não me convenci
- 3 – Não me senti influenciado
- 4 – Me convenci parcialmente
- 5 – Me convenci.

6. Sobre a informação “a velocidade da luz é absoluta, não dependendo do referencial”, qual (quais) das alternativas, na sua opinião, é(são) mais adequada(s):

- Não é totalmente verdade, possui erros;
- Eu já sabia e, após as aulas, apenas confirmei meu conhecimento.
- Eu sabia, mas aprendi, durante o curso, que eu ainda não tinha conhecimento sobre alguns detalhes.
- Foi uma informação praticamente nova e descobri fatos históricos, matemáticos e/ou experimentais que me fizeram entender melhor.
- Sem essa informação acho que seria praticamente impossível entender a dilatação do tempo.

7. Sobre a informação “a medida de tempo em por um relógio em um determinado referencial sempre será maior do que a medida observada em um relógio em movimento”, qual (quais) das alternativas, na sua opinião, é(são) mais adequada(s):

- Não é totalmente verdade, possui erros;
- Eu já sabia e, após as aulas, apenas confirmei meu conhecimento.
- Eu sabia, mas aprendi, durante o curso, que eu ainda não tinha conhecimento sobre alguns detalhes.
- Foi uma informação praticamente nova e descobri fatos históricos, matemáticos e/ou experimentais que me fizeram entender melhor.
- Sem essa informação acho que seria praticamente impossível entender a contração do espaço.

8. Sobre a informação “dois relógio sincronizados em um determinado referencial podem ser vistos dessincronizados por um observador em movimento”, qual (quais) das alternativas, na sua opinião, é(são) mais adequada(s):

- Não é totalmente verdade, possui erros;
- Eu já sabia e, após as aulas, apenas confirmei meu conhecimento.
- Eu sabia, mas aprendi, durante o curso, que eu ainda não tinha conhecimento sobre alguns detalhes.
- Foi uma informação praticamente nova e descobri fatos históricos, matemáticos e/ou experimentais que me fizeram entender melhor.
- Sem essa informação acho que seria praticamente impossível entender as transformações de Lorentz.

9. Sobre o assunto “*transformações de Lorentz*”, qual (quais) das alternativas, na sua opinião, é(são) mais adequada(s):

- () Não é totalmente verdade, possui erros;
- () Eu já sabia e, após as aulas, apenas confirmei meu conhecimento.
- () Eu sabia, mas aprendi, durante o curso, que eu ainda não tinha conhecimento sobre alguns detalhes.
- () Foi uma informação praticamente nova e descobri fatos históricos, matemáticos e/ou experimentais que me fizeram entender melhor.
- () me ajudou a entender melhor dilatação do tempo, contração do espaço e/ou dessincronização.

10. Qual sua opinião geral sobre o curso? Atendeu às suas expectativas? Te surpreendeu? Conseguiu entender o assunto? O que tem a dizer?
