



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

ADRIEL DE OLIVEIRA AQUINO

**O ENSINO DE RELATIVIDADE COMO INCENTIVO PARA O APRENDIZADO DE
FÍSICA: UMA PROPOSTA**

FORTALEZA
2020

ADRIEL DE OLIVEIRA AQUINO

O ENSINO DE RELATIVIDADE COMO INCENTIVO PARA O APRENDIZADO DE
FÍSICA: UMA PROPOSTA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentada à Coordenação da Graduação do
Curso de Física, da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para a obtenção
do Título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Andrey Chaves.

FORTALEZA
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

- S185r O. Aquino, Adriel .
O ensino de relatividade como incentivo para o aprendizado de física: Uma proposta /
Adriel de Oliveira Aquino. - 2020.
72 f. : il.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Ceará, Centro
de Ciências, Curso de Física, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Andrey Chaves.
1. Ensino de Física. 2. Mecânica Clássica. 3. Relatividade. 4. Projeto ROSE. 5. O
ensino de relatividade como incentivo para o aprendizado de física: Uma proposta I. Título.

CDD 530

ADRIEL DE OLIVEIRA AQUINO

O ENSINO DE RELATIVIDADE COMO INCENTIVO PARA O APRENDIZADO DE
FÍSICA: UMA PROPOSTA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentada à Coordenação da Graduação do
Curso de Física, da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para a obtenção
do Título de Licenciado em Física.

Aprovada em 26/10/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Andrey Chaves (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Ramos Gonçalves
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcos Antônio Araujo Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A minha família

”Todas as pessoas grandes foram um dia crianças (mas poucas se lembram disso).”
Antoine de Saint-Exupéry em ”O pequeno príncipe”.

AGRADECIMENTOS

- A toda minha família, pelo apoio, carinho, paciência, conselhos e educação que recebi durante meu percurso até o presente momento;
- A minha namorada, Laura, pelo apoio, pelas inúmeras vezes que me escutou e me ajudou em momentos de dificuldade;
- Aos amigos que fiz durante o curso, pelos bons e maus momentos que estivemos juntos no curso, ajudando uns aos outros. Foi ótimo contar com vocês;
- Ao departamento de Física da UFC e seus professores, muito obrigado pelo acolhimento, ensinamentos e experiências proporcionadas durante o curso;
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Andrey Chaves, muito obrigado pela ajuda, orientação e ensinamentos. Por me receber em sua sala sempre disposto a ajudar, tirando dúvidas e me incentivando a continuar;
- Ao Prof. Dr. José Ramos Gonçalves, muito obrigado pelo conhecimento passado durante as aulas ministradas, pela competência e por ser um exemplo a ser seguido como professor;
- Ao Prof. Dr. Marcos Antônio Araujo Silva, muito obrigado por todo o apoio no período que estive como coordenador do curso de licenciatura em Física e na coordenação do PIBID-Física;
- Ao PIBID-Física, seus participantes e orientadores, obrigado pela oportunidade de viver experiências que ajudaram tanto no perfil profissional, bem como na realização deste trabalho;
- Ao Prof. Me. Antonio Tavares Bittencourt (*in memoriam*), por seus ensinamentos e sua dedicação aos alunos do PIBID;
- Ao colégio estadual Liceu do Ceará, pelo acolhimento durante o PIBID, estágio e pelas experiências profissionais que me foram proporcionadas;
- A CAPES, pelo apoio financeiro.

RESUMO

O ensino brasileiro enfrenta muitos desafios devido a vários problemas ainda existentes na estrutura social. Dessa maneira, a disciplina de Física, assim como outras, é vista, muitas vezes, pela maioria dos alunos, como algo “chato” e “sem utilidade prática” e, conseqüentemente, poucos jovens optam por uma carreira científica no país. Este trabalho busca trazer uma maneira alternativa de despertar um maior interesse dos alunos, tanto para aprender Física no colégio, bem como para incentivá-los a seguir em carreiras científicas. O trabalho foi montado levando em consideração as idéias do projeto ROSE, que consiste em considerar as opiniões e preferências dos alunos, e com isso ter-se uma maior chance de se obter sucesso no processo de aprendizado. A proposta apresentada no texto é referente ao ensino de relatividade especial para o ensino médio, porém, sempre remetendo-nos a conceitos que são ensinados em mecânica clássica. Com isso, pretende-se mostrar ao aluno que para aprender aquilo que se classifica como “interessante” e “extraordinário”, é necessário que aprendam-se primeiro os conceitos básicos que são ensinados nas aulas do curso regular de Física das escolas.

Palavras-chave: Ensino de Física. Mecânica Clássica. Relatividade. Projeto ROSE. O ensino de relatividade como incentivo para o aprendizado de física: Uma proposta

ABSTRACT

Brazilian education faces many challenges due to several problems that still exist in the social structure, thus, the discipline of Physics, as well as others, is seen by most students as something "boring" and "without practical use", and consequently, few young people choose a scientific career in the country. This work seeks to bring an alternative way to arouse the interest of students, both to learn Physics in high school, as well as to encourage them to pursue scientific careers. The work was assembled taking into account the ideas of the ROSE project, which consists in, when students' opinions and preferences are considered, there is a greater chance of success in the learning process. More specifically, the proposal presented in the text refers to the teaching of special relativity for high school, however, always referring to concepts that are taught in classical mechanics, and with this, show that to learn what is classified as "interesting" and "Extraordinary", it is necessary to first learn the basic concepts that are taught in the classes of the regular Physics course in schools.

Keywords: Physics Teaching. Classical Mechanics. Relativity. ROSE Project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ranking e média PISA 2018 em ciências	17
Figura 2 – Temas considerados mais interessantes pelos alunos de São Caetano do Sul, SP	19
Figura 3 – Temas considerados mais interessantes pelos alunos de Tangará da Serra, MT	20
Figura 4 – Esquema de Aulas do curso de relatividade para o ensino médio proposto nesta monografia	21
Figura 5 – Referências com velocidade relativa entre eles	24
Figura 6 – Esquematização do experimento de Michelson e Morley para provar que a transformação de Galileu funcionaria para o eletromagnetismo	28
Figura 7 – Esquema do relógio de luz para um observador em S e S' respectivamente . .	31
Figura 8 – Esquema de um chuveiro atmosférico extenso na atmosfera terrestre.	34
Figura 9 – Efeito Doppler com ondas sonoras	41
Figura 10 – Esquema unidimensional da colisão entre duas partículas	43
Figura 11 – Esquema de colisão entre duas partículas	44
Figura 12 – Ilustração do espalhamento Compton	53

SUMÁRIO

1	O ENSINO DE FÍSICA NO CONTEXTO DA HISTÓRIA DA EDUCAÇÃO BRASILEIRA	12
1.1	Período colonial	12
1.2	Império Brasileiro	13
1.3	República Brasileira no século XIX	14
1.4	República brasileira no século XX	15
1.5	República brasileira século XXI	16
2	O ENSINO DE FÍSICA NO BRASIL	17
2.1	O ensino do Brasil em comparação ao mundo	17
2.2	A estrutura do ensino no Brasil	18
2.3	O projeto ROSE no Brasil	19
2.4	Uma proposta de intervenção	21
3	BASES DO CONTEÚDO ABORDADO	23
3.1	Bases da mecânica clássica	23
3.2	O princípio da relatividade de Galileu Galilei	24
3.3	Eletromagnetismo de Maxwell	25
3.4	Experimento de Michelson e Morley	26
4	MECÂNICA RELATIVÍSTICA	30
4.1	Simultaneidade	30
4.1.1	Dilatação temporal	30
4.1.2	Contração do comprimento	33
4.1.3	Dilatação do tempo e contração do comprimento em Física de partículas	33
4.1.3.1	Visão da mecânica clássica	36
4.1.3.2	Visão da mecânica relativística	36
4.1.3.3	Contração espacial	37
4.2	Os postulados de Einstein	38
4.3	Transformação de Lorentz	38
4.4	Transformação das velocidades	40
4.5	Efeito Doppler	41
4.6	Conservação do momento	43
4.6.1	Massa relativística	47
4.7	Energia	47

4.7.1	Equivalência massa-energia	49
4.7.2	O fóton	51
4.8	Espalhamento Compton	52
5	APLICAÇÃO DA PROPOSTA	55
5.1	Preparação	55
5.2	As aulas conceituais	55
5.3	As aulas de exercícios	56
5.4	Uma alternativa para avaliação	57
5.5	Finalização	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
6.1	Conclusão	58
6.2	Trabalhos Futuros	58
	Referências	59
	APÊNDICE A – PLANOS DE AULA	61
	APÊNDICE B – QUESTIONÁRIOS	69

1 O ENSINO DE FÍSICA NO CONTEXTO DA HISTÓRIA DA EDUCAÇÃO BRASILEIRA

1.1 Período colonial

A educação brasileira pode ser inicialmente discutida no período em que encontrava-se na condição de colônia portuguesa. Sendo Portugal um dos países mais católicos da Europa, o rei português Dom João III permitiu que a igreja enviasse membros da companhia de Jesus (os jesuítas), para tornar os nativos da região fiéis ao catolicismo por meio da catequese. Durante muito tempo, a educação no território brasileiro permaneceu sob tutela da igreja católica, que fundou as primeiras escolas, as quais alfabetizavam, catequizavam e ensinavam as ciências experimentais aos nativos [1], sendo esse um grande interesse da coroa portuguesa, pois a partir disso era introduzido o contexto para o trabalho indígena. A educação implantada pelos jesuítas seguia os moldes da metrópole, que tinha como objetivo alfabetizar e doutrinar seus alunos, que no caso de Portugal, eram os filhos dos nobres. O interesse da igreja católica na catequização era aumentar o número de fiéis, pois havia perdido muitos devido à reforma protestante que ocorria na Europa.

A produção científica no Brasil era quase inexistente devido ao pouco interesse do desenvolvimento da região, que deve-se ao fato de ter sido uma colônia de exploração[1]. Os poucos estudos e pesquisas que havia eram executados por estrangeiros interessados na população e nos recursos naturais existentes no país. Houve uma mudança temporária na invasão holandesa no território brasileiro, especialmente em Pernambuco, quando iniciou-se um período de bastante atividade científica na área das ciências naturais, como medicina e botânica [1]. Utilizando-se de um observatório construído a mando de Maurício de Nassau, o físico alemão George Marcgrave começou seus trabalhos com observações dos astros e descrição da geografia e clima da região nordeste do Brasil [1]. Mas com os holandeses expulsos pelos portugueses em 1644, os trabalhos científicos incentivados pelos holandeses foram perdidos e mais uma vez a educação voltou para o modelo português para as colônias, que priorizava a alfabetização e a catequização. Depois dos holandeses, a maior mudança houve quando o imperador Dom João VI fugiu para o Brasil em 1808 e instalou-se no Rio de Janeiro, trazendo com ele a corte portuguesa, intelectuais, livros e ouro que mudaram a realidade da cidade, pois ali seria a capital do império português. Dali em diante, então deveria-se fazer jus às necessidades da realeza. Desta maneira, os portos foram abertos a outras nações, o que possibilitou mais contato com outras pessoas e, conseqüentemente, conhecimento, e no que tange à educação, foram construídas escolas técnicas, bibliotecas e centros de pesquisa para seus intelectuais. Assim fundaram-se as

três primeiras faculdades do Brasil, a saber: Engenharia, Medicina e Direito no Rio de Janeiro e a Escola de Cirurgias na Bahia.

Apesar do ocorrido com a vinda da família real, no que diz respeito a Física, não houve mudanças, pois não havia brasileiros com vontade de dedicar-se a essa área do conhecimento, pelo provável pouco interesse ou condição de uma parcela da sociedade que residia no Brasil naquela época, pois, a grande maioria era composta por escravos e latifundiários. Mais tarde, em 1821, o naturalista e futuro patrono da independência brasileira, José Bonifácio de Andrada e Silva, sugeriu ao rei uma reforma no ensino secundário, para que as ciências naturais, físicas e matemáticas, puras e aplicadas, pudessem ser tomadas como obrigatórias no currículo nacional, e a construção de uma universidade em São Paulo, com a implantação de uma Faculdade de Filosofia para iniciar-se o estudo dessas ciências. Mas, nas palavras de Fernando de Azevedo,

...a verdade é que o gosto dos fatos, o espírito crítico e investigador e o entusiasmo pelo método experimental podiam desenvolver-se entre nós por toda parte; e a causa principal desse desinteresse do brasileiro (...) é antes o tipo de ensino quase exclusivamente literário, livresco e retórico, que se implantou no Brasil desde a colônia até o fim do império.[1]

1.2 Império Brasileiro

Com a proclamação da independência e a instauração do império brasileiro, houve uma reforma na política educacional nacional para o ensino, visto que a própria política do império mudaria. O novo modelo de escolas para os filhos da nobreza era inspirado nas escolas francesas pós-revolução, que consistia em um ensino seriado com duração de seis a oito anos e lecionava disciplinas como: Latim, grego, francês, inglês, gramática nacional, retórica, história, geografia, ciências Físicas e naturais, matemática, música vocal e desenho [1]. Porém, apesar de que ciências Físicas e naturais e matemática estivessem dentro do currículo obrigatório, não significava uma grande ruptura com a tradição no ensino brasileiro em ser preferencialmente humanístico e literário.

Apesar dessa decisão, as lições de Física não excediam duas por semana e concentravam-se nos anos finais, diferente de disciplinas como as línguas, que desde o começo dos estudos estavam presentes, e da disciplina de retórica que apesar de não contar com a mesma presença de línguas, possuía dez lições semanais apenas para ela, como mostrado em Almeida Junior (1979, p.52-53). Quando Dom Pedro II foi coroado imperador do Brasil, havia um certo otimismo no que diz respeito à melhora do ensino de ciências, pois era notório o entusiasmo do imperador com o assunto, afinal, tinha fama de ser muito estudioso desde criança e era visto como um

intelectual pela sociedade brasileira. Mas não houve mudanças expressivas, pois apenas foram criadas escolas com ensino avançado como o colégio Pedro II, inspirado nas "realschulen" que eram escolas alemãs no século XIX que possuíam cursos com seis anos de duração e permitiam que seus alunos estudassem em cursos mais avançados posteriormente.

Uma nova reforma foi feita em 1876 por José Bento de Cunha Figueiredo, a qual determinava que qualquer estudante poderia ingressar em qualquer academia do império com apenas cinco anos de estudo, sem a necessidade de cursar as disciplinas de Física, que encontravam-se nos últimos anos de estudo do ensino secundário, o que novamente reforçava a negligência da disciplina de Física. De maneira geral, durante o período imperial, não houve mudanças expressivas no ensino de Física, pois mesmo que obrigatório, acabava por ser banalizado devido aos costumes da sociedade brasileira, uma possível influência do ensino quase que exclusivamente literário implantado.

1.3 República Brasileira no século XIX

Com a proclamação da república, os fatores sociológicos do Brasil mudaram novamente, dessa vez, ficando mais numerosos e mais intensos como: a experiência de uma nova organização política nacional, o recente fim da escravidão no país, o primeiro surto de construção de indústrias e conseqüentemente uma entrada considerável de imigrantes. Influenciado pelas idéias de Auguste Comte, o ministro da educação Benjamin Constant, em 1890, realizou uma reforma no ensino público em todas as suas esferas, de maneira que a partir daquele momento, além dos estudos que eram obrigatórios, seria adicionada ao currículo uma base científica mais sólida que a anterior, rompendo a tradição humanística e literária[1].

Almeida Junior[1], em seu trabalho, fez três críticas ao ensino de Física no modelo proposto em 1890: (i) a grande diversidade do currículo atrapalhava o ensino das ciências exatas, pois a considerar que nenhuma disciplina anteriormente lecionada fora abandonada, havia um total de trinta e seis disciplinas obrigatórias; (ii) a idade dos alunos, pois alguns conteúdos abordados nas aulas de ciências exatas exigiam habilidades que ainda não haviam sido desenvolvidas devido a juventude dos alunos; (iii) e a maneira como o ensino era realizado, focando apenas em cálculos matemáticos ao invés de conceitos fundamentais, deixando de lado observações experimentais. Em 1891, foi criado o "exame de passagem", que nada mais era que o vestibular da época, então a partir ali, todos os alunos que almejassem uma vaga no ensino superior, deveriam ter aprovação nessa avaliação, que abordava todos os conteúdos estudados até então, em vez de estudar apenas os primeiros cinco anos do ensino secundário.

Para o ensino superior durante os primeiros anos da república, houve o surgimento

de novas escolas que abordavam a Física como obrigatória, mas nada exclusivo, pois eram escolas de engenharia, que muitas vezes eram cursadas para que os alunos obtivessem títulos, ocupassem cargos importantes e ascendessem socialmente, assim como seus pais, pois o ensino apesar de público, não era democrático. Assim, apenas membros da elite intelectual e financeira possuíam condições de estudar até o nível superior e ocupar altos cargos em empresas e no governo [1].

1.4 República brasileira no século XX

Um problema herdado do século XIX para o ensino de Física no Brasil do séculos XX foi a falta de preparo dos professores para o ensino, visto que não havia uma escola que formasse essencialmente físicos, apenas engenheiros, os quais não possuíam condições em sua formação de lecionar uma educação científica de qualidade. Em 1920, o ensino de ciências passou por uma nova mudança no governo de Washington Luís Pereira de Sousa[1], agora as aulas experimentais seriam obrigatórias. Nas escolas primárias, os alunos deveriam ter apenas noções básicas de ciências, muito pautadas em fenômenos facilmente observados na natureza; nas escolas normais e complementares, que compunham o ensino secundário, havia, respectivamente, seis e sete aulas semanais de ciências Físicas e naturais, mas vale ressaltar que as aulas de línguas permaneciam com um número de vinte e três semanais, e que o ensino de Física, especialmente no estado de São Paulo, era quase que completamente de interesse industrial, para acelerar o processo de desenvolvimento.

Em 1934, em uma iniciativa do governador do estado de São Paulo, Armando Sales de Oliveira, fundou a universidade de São Paulo com a união das faculdades já existentes na época, dentre elas, a faculdade de ciências e letras, que era destinada à pesquisa científica e formação de professores para o ensino secundário. Com a criação da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, houve uma importante mudança no ensino profissional de ciências, pois, pela primeira vez, havia uma união coerente entre teoria e prática, ambas supervisionadas por professores estrangeiros contratados pelo governo do estado e pela colaboração com as indústrias para uma formação técnica e científica dos universitários. Desde então, foram criadas faculdades de filosofia por todo o Brasil com dois objetivos: formar cientistas pesquisadores e professores para o ensino secundário.

Apesar das mudanças feitas e das faculdades de filosofia criadas, poucos alunos do curso de Física tinham interesse em lecionar, focando apenas na pesquisa científica, fazendo assim com que engenheiros fossem procurados para lecionar a disciplina de Física nas escolas de ensino secundário [1]. No começo da década de 1970, vários professores começaram a mostrar sua insatisfação com o sistema educacional e buscaram melhorias para o mesmo. Em 26 de

janeiro de 1970, ocorre o I Simpósio Nacional do Ensino de Física, realizado por professores preocupados com o rumo que tomava o ensino de Física no país e começaram a utilizar novas metodologias em suas aulas.[1]

Depois deste simpósio, houve vários trabalhos e discussões sobre o tema que se estendem até os dias de hoje. Durante a década de 1970, houve mais dois simpósios em que o tema do ensino de Física foi discutido. Teses e dissertações sobre o tema começaram a surgir e em 1979 foi criada a primeira revista especializada no ensino de Física, que desde 1992 é conhecida como Revista Brasileira de Ensino de Física, e desde então foram criadas cada vez mais revistas sobre o assunto, como o Caderno Brasileiro de Ensino de Física em 2002 e a Revista Ciência & Educação.

1.5 República brasileira século XXI

O debate sobre ensino de Física no Brasil continua em vigor, sempre buscando novas maneiras de se otimizar o ensino dessa disciplina, que tardiamente obteve sua devida importância no currículo básico. Desde o ano 2000 até os dias de hoje, a disciplina de Física permanece obrigatória, com todos os conteúdos que dizem respeito a Física clássica e parte da Física moderna, apesar de que muitas vezes as aulas experimentais e de Física moderna são deixadas de lado, devido ao que é exigido pelos vestibulares e pelo Exame Nacional de Ensino Médio (ENEM), que na minha percepção, devido ao fato de ter feito a prova 3 vezes quando era estudante, e agora como professor, devido aos estágios realizados durante a graduação, torna, o ensino, não apenas de Física, mas como um todo, mecânico, repetitivo e comercial.

No ensino superior, apesar de existirem cursos e estudos exclusivos para a formação de Físicos e professores de física para o ensino médio, a procura destes cursos ainda não é comparável a procura aos cursos de engenharia, cursos da área de humanas ou área da saúde. Isso ocorre devido a falta de incentivo por parte das escolas, e tem como consequência a falta de interesse que, aliada a nossa estrutura social, reflete muito sobre os primeiros modelos de ensino utilizados no Brasil e faz com que a disciplina de Física seja vista como muito difícil e destinada apenas a um grupo seleto de pessoas que possuem habilidade para tais estudos.

2 O ENSINO DE FÍSICA NO BRASIL

2.1 O ensino do Brasil em comparação ao mundo

A educação brasileira no século XXI possui um cenário complicado, pois existem muitos desafios que ainda não foram superados. Um deles, por exemplo é a taxa de analfabetismo, pois segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2019 registrou-se que, para pessoas de 15 anos ou mais, 6,6% [13] são analfabetos funcionais, sendo 6,5% a meta para 2015 [14]. Além do analfabetismo funcional, também há o analfabetismo científico, os jovens brasileiros não possuem grande interesse por disciplinas como matemática e Física normalmente ministradas nas aulas cotidianas das escolas regulares. Assim, quando testados em exames internacionais, como o Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA), o Brasil recorrentemente ocupa posições que indicam baixo rendimento dos estudantes como mostra a figura 1.

Figura 1: Ranking e média PISA 2018 em ciências

PAÍS	RANKING ¹	MÉDIA
Finlândia	5-9	522
Coreia	6-10	519
Canadá	6-10	518
Estados Unidos	12-23	502
Portugal	21-29	492
Média OCDE	-	489
Espanha	29-32	483
Chile	44-47	444
Uruguai	51-57	426
México	55-62	419
Costa Rica	56-63	416
Colômbia	58-64	413
Peru	63-67	404
Argentina	63-68	404
Brasil	64-67	404
Panamá	75-77	365
República Dominicana	78-78	336

Fonte: Inep, com base em OCDE

É possível perceber através da figura 1 que, quando comparado à média OCDE, o Brasil encontra-se muito abaixo, o que evidencia o baixo rendimento dos alunos em ciências e consequentemente, em Física.

2.2 A estrutura do ensino no Brasil

A metodologia da educação brasileira por si não ajuda a despertar os jovens para a ciência, pois sua estrutura de ensino é tradicionalista e assim, não ajuda o aluno a enxergar a real utilidade do que aprende. Assim uma disciplina como a Física passa a ser puramente algo que deve ser aprendido momentaneamente para uma avaliação e mais nada. Durante várias conversas com os alunos de escolas públicas durante meu período de estágio e de bolsista do PIBID, os próprios alunos falam que a falta de uma maior divulgação científica dentro da própria sala de aula contribui para essa realidade, pois, nas palavras deles, "Às vezes não entendemos o sentido de estudar determinadas coisas". De acordo com o inciso 5º do parágrafo IV do artigo 35 da lei federal N° 9.394 de 20 de dezembro de 1996, editado em 2017;

A carga horária destinada ao cumprimento da Base Nacional Comum Curricular não poderá ser superior a mil e oitocentas horas do total da carga horária do ensino médio, de acordo com a definição dos sistemas de ensino. (Brasil, 1996)

Ao levar em consideração a carga horária de mil e oitocentas horas para duzentos dias letivos em um ano, tem-se uma carga horária de nove horas por dia que o aluno deverá estar presente na escola cumprindo a Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Com uma carga horária tão grande, comparável ao expediente de um trabalhador da classe operária, era de se esperar que o rendimento estudantil alcançasse melhores resultados em comparação aos que foram mostrados no PISA 2018. A falta do interesse nas aulas reflete na carreira que os alunos escolhem ao sair da escola, pois, os jovens dificilmente optam por uma carreira científica no Brasil, até mesmo os alunos que gostam do assunto. [15]

Pensando em estimular a educação científica, o projeto ROSE (The Relevance of Science Education) foi criado a partir de uma colaboração internacional baseada nos estudos de pesquisadores noruegueses a partir do princípio de se estudar a relevância de temas da ciência e tecnologia do ponto de vista dos jovens. O projeto é aplicado por meio de um extenso questionário sobre vários temas da ciência e tecnologia e matemática em que as perguntas são voltadas à ideia de "o que eu gostaria de aprender?". Os jovens respondem cada tema com uma múltipla escolha graduada entre "não interessado" e "muito interessado". Com os resultados, é possível formar uma estratégia de uma nova base curricular científica, levando em consideração o interesse dos jovens e assim tornar a educação científica mais atrativa.

2.3 O projeto ROSE no Brasil

O projeto ROSE também foi aplicado no Brasil, no ano de 2007, pelo doutorando Luiz Caldeira Brant de Tolentino Neto, na Universidade de São Paulo (USP), sob a orientação do Prof. Dr. Nelio Marco Vincenzo Bizzo, com o objetivo de levantar discussões acerca de como melhorar a educação científica no país [2]. O questionário foi aplicado em duas cidades, São Caetano do Sul, no estado de São Paulo, em um contexto urbano e industrial, e Tangará da Serra, no estado de Mato Grosso, em um contexto rural. Os resultados do projeto ROSE aplicado no Brasil estão apresentados na Figura 2 e na Figura 3

Figura 2: Temas considerados mais interessantes pelos alunos de São Caetano do Sul, SP

São Caetano do Sul/SP				
Posição	Meninas		Meninos	
	Questão	Média	Questão	Média
1	Porque sonhamos e qual o significado dos nossos sonhos	3,50	Como funciona a bomba atômica	3,32
2	Como prestar primeiros socorros	3,34	Os fenômenos que os cientistas ainda não conseguem explicar	3,22
3	O câncer, o que sabemos e como podemos tratá-lo	3,34	Como os computadores funcionam	3,20
4	O que sabemos sobre HIV/AIDS e como controlá-la	3,30	Como os meteoritos, os cometas e os asteróides podem causar catástrofes na Terra	3,14
5	A vida, a morte e a alma humana	3,27	Os buracos negros, as supernovas e outros objetos do espaço	3,14
6	As doenças sexualmente transmissíveis e como se proteger delas	3,23	Como as fitas, gravadores de CD e DVD armazenam e reproduzem sons e música	3,13
7	Como as diferentes drogas proibidas podem afetar o nosso corpo	3,23	As armas biológicas e químicas e o que fazem ao corpo humano	3,11
8	Como a tecnologia genética pode evitar doenças	3,21	As invenções e os descobrimentos muito recentes da ciência e da tecnologia	3,09
9	Como o álcool e o tabaco podem afetar o corpo humano	3,17	Como prestar primeiros socorros	3,07
10	Como controlar epidemias e doenças	3,16	O uso do raio laser para efeitos técnicos (gravadores de CDs, leitores de códigos de barra, etc.)	3,06

Fonte: TOLENTINO NETO, Luiz Caldeira Brant de. Os interesses e posturas de jovens alunos frente às ciências: resultados do Projeto ROSE aplicado no Brasil interesses e posturas de jovens alunos frente às ciências[2]

Figura 3: Temas considerados mais interessantes pelos alunos de Tangará da Serra, MT

Tangará da Serra/MT				
Posição	Meninas		Meninos	
	Questão	Média	Questão	Média
1	Como prestar primeiros socorros	3,42	Como as fitas, gravadores de CD e DVD armazenam e reproduzem sons e música	3,26
2	As doenças sexualmente transmissíveis e como se proteger delas	3,38	A possibilidade de vida fora do planeta Terra	3,24
3	O que sabemos sobre HIV/AIDS e como controlá-la	3,29	Como os computadores funcionam	3,22
4	O câncer, o que sabemos e como podemos tratá-lo	3,28	O uso do raio laser para efeitos técnicos (gravadores de CDs, leitores de códigos de barra, etc.)	3,21
5	As epidemias e as doenças que causam muitas mortes	3,25	Os animais de diversas partes do mundo	3,20
6	Como controlar epidemias e doenças	3,23	Como prestar primeiros socorros	3,13
7	Como o corpo humano é feito e como funciona	3,21	Como funcionam os motores diesel, álcool, gás e gasolina	3,12
8	As perturbações alimentares como anorexia e bulimia	3,19	Os animais perigosos e venenosos	3,11
9	O que comer para nos mantermos saudáveis e em boa forma física	3,16	Como funcionam coisas como a rádio e a televisão	3,11
10	Como as diferentes drogas proibidas podem afetar o nosso corpo	3,16	As doenças sexualmente transmissíveis e como se proteger delas	3,09

Fonte: TOLENTINO NETO, Luiz Caldeira Brant de. Os interesses e posturas de jovens alunos frente às ciências: resultados do Projeto ROSE aplicado no Brasil interesses e posturas de jovens alunos frente às ciências[2]

Ao analisar os resultados obtidos pelo questionário do projeto, é possível perceber um certo interesse dos jovens por temas científicos relacionados à Física, especialmente os meninos da cidade de São Caetano do Sul. Meninas de ambas as cidades escolheram temas de maior interesse relacionados, em geral, à área da saúde. A partir das respostas, uma reflexão pode ser aberta: por que a Física não aparece com tanta frequência, especialmente para as meninas? Será que esses alunos de uma maneira geral já ouviram falar de assuntos mais complexos da Física como mecânica quântica e relatividade?

Em países com o sistema educacional mais desenvolvido, é possível perceber a diferença das respostas relacionadas à Física: na Inglaterra, por exemplo, dentre os dez temas considerados mais interessantes pelos meninos, alguns foram, "Qual a sensação de viver sem peso no espaço?", "Buracos negros, supernovas e outros objetos do espaço", "Como meteoritos, asteróides e cometas podem causar catástrofes na terra" e "A possibilidade de vida fora do planeta terra". As meninas optaram por outros temas, mas temas relacionados à Física também apareciam, especialmente "Buracos negros, supernovas e outros objetos do espaço".[3]

2.4 Uma proposta de intervenção

Por várias vezes, em minhas oportunidades de monitoria em escolas públicas, enquanto fui bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação a Docência (PIBID), alunos que não mostravam tanto interesse nas aulas convencionais de Física, ao me observarem lendo algum livro relacionado a assuntos como relatividade e mecânica quântica, faziam perguntas e mostravam-se interessados no assunto. Essa situação sempre me deixava intrigado, visto que, para realmente entender esses tópicos, é necessário que haja toda uma base sólida de Física clássica, que é explicada ainda que superficialmente nas aulas convencionas de Física da escola durante o ensino médio.

Devido a essas experiências pessoais, os dados expostos anteriormente, a tradição humanística na educação brasileira exposta no capítulo 1 e a inspiração dada pelo projeto ROSE, nasceu a ideia de unir o interesse dos alunos com a necessidade de aprendizado, tudo isso por meio de um curso de relatividade restrita com intuito de estimular alunos de ensino médio a adquirirem mais interesse em aprender Física básica e até mesmo buscar uma carreira científica se for de interesse dos mesmos. O curso consiste em ensinar os principais tópicos de relatividade restrita, com a matemática adaptada ao que se é estudado no ensino médio, mas sempre fazendo com que os alunos tenham que lembrar do que estudam em Física básica, como problemas de colisões, conservação da energia, conservação do momento, etc.

O curso seria organizado com um questionário prévio acerca das perspectivas dos estudantes sobre a sua escola e as suas aulas de Física, e oito aulas em contraturno, com duração de duas horas cada, com intervalo de quinze minutos entre cada hora de aula, para que não torne-se tão cansativo para os alunos, de preferência duas vezes na semana, para que o conteúdo possa ser absorvido de maneira sólida. Na última aula, seria aplicado um questionário com perguntas acerca da opinião do aluno sobre o curso e se isso o ajudou a mudar sua visão sobre aprender Física, para avaliar a eficácia do método. O esquema de que conteúdo será tratado em cada aula está ilustrado na figura 4. Os planos de aula e os questionários estarão dispostos nos apêndices.

Figura 4: Esquema de Aulas do curso de relatividade para o ensino médio proposto nesta monografia

Primeira aula	Segunda aula	Terceira aula	Quarta aula	Quinta aula	Sexta aula	Sétima aula	Oitava aula
Princípio da relatividade de Galileu	Postulados de Einstein	Aula de exercícios	Transformação de Lorentz	Aula de exercícios	Conservação do momento	Aula de exercícios	Aplicação do questionário
Eletromagnetismo de Maxwell (apenas qualitativo)	Simultaneidade		Transformação de velocidades		Energia		
Experimento de Michelson-Morley	Dilatação do tempo e contração do comprimento		Efeito Doppler		Espalhamento Compton		

Todo o planejamento detalhado do curso será melhor explicado adiante, no Capítulo 5. Mas antes, é preciso explicar de onde vem, do que se trata, e o motivo da relatividade possuir uma conexão com a mecânica clássica a ponto de fazer essa proposta dar certo, o que será abordado nos dois Capítulos que seguem.

3 BASES DO CONTEÚDO ABORDADO

3.1 Bases da mecânica clássica

O que conhecemos como mecânica clássica foi desenvolvida por cientistas entre os séculos XVI e XVIII, dentre eles, Galileu Galilei, Isaac Newton, Joseph-Louis Lagrange e William Rowan Hamilton. O livro *Princípios matemáticos da filosofia natural* (*Philosophie naturalis principia mathematica-1687*) de Isaac Newton possui até hoje um grande destaque na formulação da mecânica como é conhecida. Este livro foi inspirado nos trabalhos de outros cientistas anteriores a Isaac Newton, como Johannes Kepler, René Descartes, Pierre de Fermat e especialmente Galileu Galilei. Para que tudo pudesse estar de acordo com o que era observado na natureza, alguns princípios foram pressupostos:

1. O tempo é absoluto e homogêneo. Ou seja o tempo é invariante e flui da mesma maneira, independente do referencial adotado, pois na mecânica clássica só existe uma maneira possível para o sentido que o tempo flui, que é do passado para o futuro. Nas palavras de Newton "O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa".
2. O espaço é absoluto, homogêneo e euclidiano. Isso implica que independente das condições, dois quaisquer pontos do espaço devem apresentar as mesmas propriedades e a métrica utilizada para descreve-lo seria a da geometria euclidiana. Nas palavras de Newton "O espaço absoluto, por sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel".

Outro ponto muito importante e fundamental para determinar o estado de um corpo no espaço é a definição de referenciais. Um referencial pode ser, por exemplo, um sistema de coordenadas que é adotado inicialmente para observar e descrever um corpo ou fenômeno. Outro exemplo, pode ser a situação de dois corpos que estão em repouso ou em movimento um em relação ao outro. A partir do momento que você observa e analisa um fenômeno físico do ponto de vista de um desses corpos, você automaticamente está tomando um referencial. Devido às propriedades do espaço citadas anteriormente, como a métrica utilizada é a euclidiana, podemos afirmar que o teorema de pitágoras é válido, a origem pode ser escolhida arbitrariamente e devido ao tempo ser absoluto e homogêneo, qualquer fenômeno de natureza periódica pode ser adotado como relógio.

3.2 O princípio da relatividade de Galileu Galilei

Como foi dito anteriormente, o espaço e o tempo são absolutos e homogêneos, mas as leis da Física também são invariantes a uma mudança de referencial? Se considerarmos um referencial $S(x,y,z)$ e um referencial $S'(x',y',z')$, que inicialmente encontram-se na origem do sistema de coordenadas cartesianas, a partir do momento em que o referencial S' começar a movimentar-se ao longo do eixo x com velocidade constante em relação ao referencial S , qualquer fenômeno que ocorrer em um ponto qualquer do espaço no referencial S em um instante de tempo será chamado de evento e será representado por (x,y,z,t) .

Se a origem dos dois referenciais coincidiam, no instante antes do referencial S' começar a mover-se $t = t' = 0$, assim como $(x,y,z) = (x',y',z')$. Como o movimento ocorre apenas ao longo do eixo x , quando o referencial S' move-se, temos que:

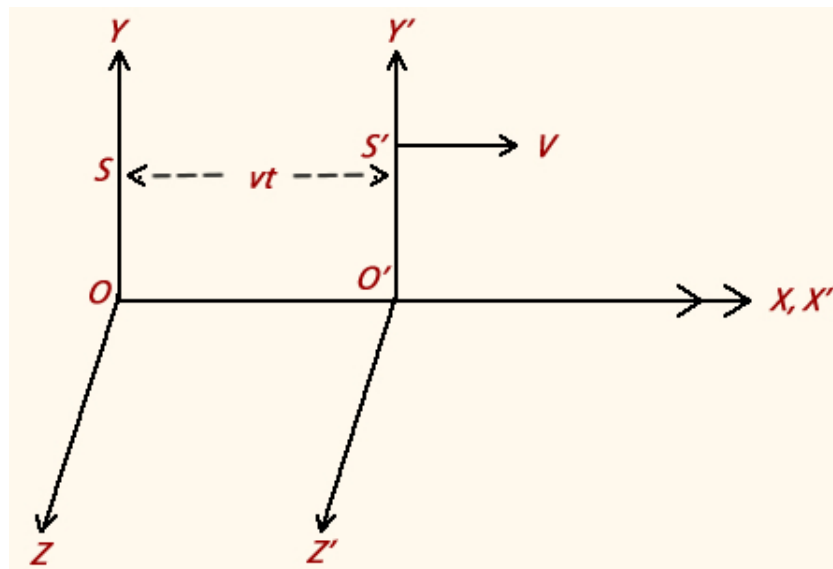
$$x = x' + ut \quad (3.1)$$

$$y' = y \quad (3.2)$$

$$z' = z, \quad (3.3)$$

sendo u , a velocidade em que S' move-se em relação a S como ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Referenciais com velocidade relativa entre eles



fonte:Moodle UFSC

As mesmas expressões são válidas para o caso de variações, normalmente conhecidas por Δx ; então, podemos escrever que:

$$\Delta x = \Delta x' + ut. \quad (3.4)$$

Assim, é fácil visualizar que, se essa variação ocorre em um dado intervalo de tempo Δt , a transformação de velocidade será dada por:

$$v_x = v'_x + u \quad (3.5)$$

Sendo v_x a velocidade que o referencial S move-se, v'_x a velocidade que o referencial S' move-se e u a velocidade relativa entre os dois referenciais.

Exemplificando de maneira mais prática, seria como um pedestre andando na calçada de uma rua, observa uma criança dentro de um carro que passa ao seu lado. Com as equações mostradas acima, é possível calcular a distância do pedestre a criança dentro do carro e a velocidade relativa entre eles.

Galileu verificou essas hipóteses por meio de experimentos que realizava. De acordo com o observado, as leis da mecânica mantêm-se as mesmas quando trocamos de referencial. Ele exemplificou isso da seguinte maneira: Se fizermos experiências de mecânica no interior de um navio que desloca-se uniformemente em um lago tranquilo, não há como determinar se o navio está em repouso ou em movimento. Esta afirmação, como resultado de suas observações empíricas, é chamado de princípio da relatividade de Galileu.

3.3 Eletromagnetismo de Maxwell

A mecânica clássica proposta por Newton e do princípio da relatividade de Galileu por muito tempo foram considerados como sucessos absolutos até 1862, pois toda a Física desenvolvida até então encaixava-se nas leis da mecânica. Mas neste mesmo ano houve mudanças quanto a essa forma de pensar, pois o físico e matemático britânico James Clerk Maxwell inspirado principalmente nos trabalhos do físico britânico Michael Faraday, propôs uma teoria de unificação dos fenômenos elétricos e magnéticos em quatro equações:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.9)$$

Essas equações são conhecidas até hoje como equações de Maxwell. A partir delas, em 1862 foi possível descrever todos os fenômenos elétricos e magnéticos conhecidos até então. Além da eletricidade e do magnetismo, Maxwell também abrangeu a ótica em sua teoria, pois ao

tentar escrever equações independentes para o campo elétrico E e o campo magnético B , é possível encontrar como resultado uma equação de onda em que o termo de velocidade da onda aproxima-se bastante da velocidade da luz. Assim como toda nova teoria, as equações propostas por Maxwell tentaram ser aplicadas de acordo com as leis da mecânica a fim de uma verificação de veracidade nos parâmetros do século XIX e houve incoerências, pois as equações não são invariantes no princípio da relatividade de Galileu, como você verá a seguir.

Considere duas cargas elétricas de mesmo sinal q_1 e q_2 em repouso em um referencial S . Um observador qualquer no referencial S pode medir a força repulsiva F_{el} que está atuando sobre as cargas. Já o referencial S' , com os eixos paralelos ao referencial S , está em movimento com uma velocidade constante u ao longo do eixo x para a direita. Um observador que esteja situado no referencial S' , verá as cargas moverem-se para a esquerda com velocidade u , com isso ele poderá observar uma força magnética de atração F entre as cargas além da força de repulsão F_{el} de natureza eletrostática.

Analisando o diagrama de forças nos dois referenciais dada a equação (3.6) para o movimento da carga q_2 , podemos perceber que:

$$F_{el} = F'_{el} + F'_{mag} \quad (3.10)$$

Porém, F'_{el} e F'_{mag} têm sentidos opostos de acordo com a regra da mão direita e $F_{el} \downarrow, F_{mag}$, ou seja $q_2 E' > q_2 E$. Como a carga de q_2 é um escalar, então ela é invariante sob transformações, seu valor não muda de acordo com o referencial que é observada, com isso podemos afirmar que $E' > E$.

Com isso, podemos afirmar que:

$$\nabla \cdot \mathbf{E}' > \nabla \cdot \mathbf{E} \quad (3.11)$$

Dada essa reflexão, é possível perceber uma inconsistência, pois em ambos os referenciais o meio é o mesmo, logo o valor de $\frac{\rho}{\epsilon_0}$ deverá ser sempre o mesmo independente do referencial que se observa. Dessa forma podemos afirmar que a transformação de Galileu, o princípio da relatividade de Galileu e as equações de Maxwell são incompatíveis

3.4 Experimento de Michelson e Morley

Ao utilizar as equações (3.6), (3.7), (3.8) e (3.9) com uma simples manipulação matemática envolvendo derivadas[8] para encontrar uma equação independente para cada campo, é possível chegar ao seguinte resultado para o campo elétrico:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.12)$$

E para o campo magnético:

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.13)$$

Pode-se observar que (3.12) e (3.13) são equações de onda, sendo $\mu_0 \epsilon_0$ o inverso na velocidade da luz,

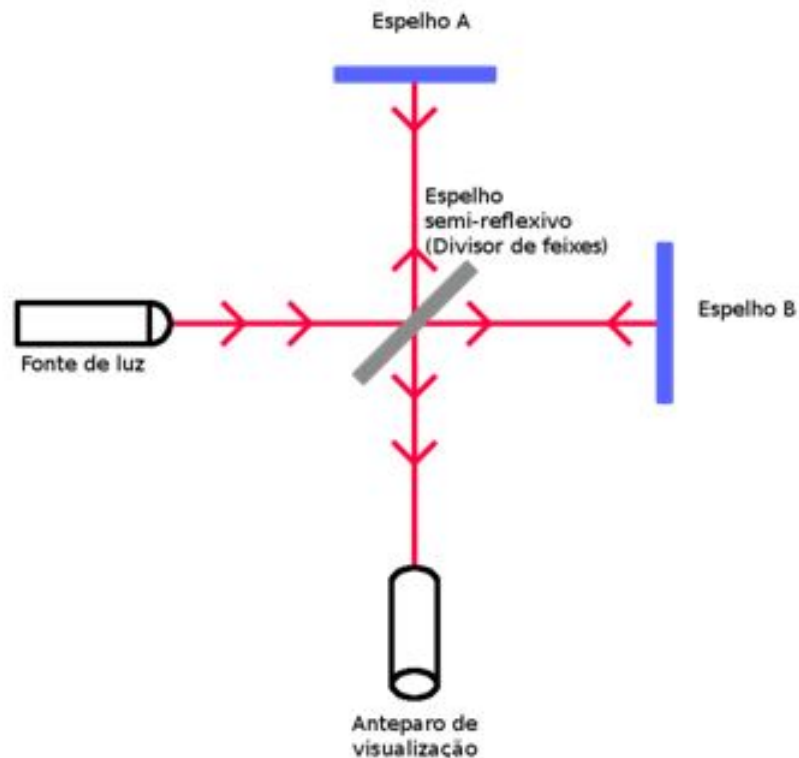
$$\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{v^2}, \quad (3.14)$$

e v a velocidade com qual onda propaga-se no meio, pois μ e ϵ são constantes que dependem do meio de que se está trabalhando. A surpreendente proximidade entre o valor encontrado em (3.14) e o valor da velocidade da luz (c) no vácuo, fez com que Maxwell sugerisse que a luz é uma onda eletromagnética. Mas, em qual referencial deveria ser medido c , uma vez que as equações que unificam o eletromagnetismo estão corretas quando postas neste referencial? Pois era difícil para os cientistas da época pensarem em uma onda de campos que suporta a si mesma e a resposta de Maxwell para esta pergunta foi que c deveria ser medido em relação ao éter.

O éter era uma teoria utilizada no final do século XIX, a qual tinha como objetivo trazer mais coerência às teorias físicas da época. Essa teoria dizia que por todo o espaço havia uma substância que servia como meio de transmissão para interações do tipo eletromagnéticas e gravitacionais, pois os cientistas não acreditavam na possibilidade de que uma perturbação ou interação pudesse ocorrer no vácuo sem qualquer tipo de matéria conectando um corpo ao outro. Além de preencher todo o espaço, inclusive corpos materiais, esse éter não poderia ter massa, deveria ser infinitamente elástico e estar em repouso em relação ao espaço absoluto.

A busca pelo referencial absoluto ou referencial do éter, devia-se ao fato do medo dos cientistas em assumir que a transformação de Galileu não era válida ou que o eletromagnetismo de Maxwell estava incorreto e esta foi uma tentativa de mostrar que tudo se encaixava, pois, para o caso do eletromagnetismo, a transformação de Galileu funcionaria para um referencial especial. Na tentativa de descobrir este referencial Albert Michelson e Edward Morley montaram um experimento, ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Esquemática do experimento de Michelson e Morley para provar que a transformação de Galileu funcionaria para o eletromagnetismo



fonte:Infoescola

Essa tentativa baseava-se na idéia de que poderiam descobrir qual a velocidade com que o planeta terra se move em relação a esse referencial especial: para isso, a velocidade orbital da terra foi tomada como base. O experimento consiste em um interferômetro onde um raio de luz produzido pela fonte separa-se em dois feixes quando atravessa o espelho semi-transparente: um feixe devido a luz que atravessa para o espelho B e outro devido à luz que reflete para o espelho A. Considerando que o movimento da terra em relação ao éter dá-se da esquerda para a direita na figura 6, e que cada braço do interferômetro tem comprimento L , é possível visualizar que o tempo que o feixe que sai do espelho semi transparente e vai até o espelho B e volta para o espelho semi-transparente, paralelo ao movimento da terra é:

$$t = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} \quad (3.15)$$

$$t = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} \quad (3.16)$$

$$t = \frac{2L \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}}{c} \quad (3.17)$$

O feixe que sai do espelho semi-transparente e vai até o espelho A está perpendicular ao movimento da terra, então, de acordo com a mecânica clássica, este feixe não seria afetado pela velocidade da terra. Como a experiência trata-se de um interferômetro, era esperado que ao fazer o experimento em várias épocas diferentes do mesmo ano, com o mesmo material e no mesmo local, o padrão de interferência apresentado no anteparo seria diferente a cada vez que o experimento fosse realizado, pois com essa mudança de velocidade devido ao movimento da terra com relação ao éter e a transformação de Galileu, as ondas luminosas não seriam mais iguais do que saíram da fonte.

O que foi observado contrariava completamente as expectativas, pois em todas as vezes que a experiência foi realizada, o padrão de interferência sempre era o mesmo, fazendo com que alguns pensassem que a ideia proposta pelo experimento era falha, porém, também serviu para que outros começassem a considerar a não existência do éter.

4 MECÂNICA RELATIVÍSTICA

4.1 Simultaneidade

Um conceito muito importante para o estudo da relatividade é o da simultaneidade pois tudo que é medido com tempo tem como referência uma verificação de simultaneidade. Pense por exemplo, na frase "Meu irmão chegou em casa duas horas e meia atrás": essa afirmação de duas horas e meia tem como referência o tempo marcado por um relógio que, possui uma certa marcação para que possamos identificar quanto tempo passou. De acordo com essa noção de tempo mostrada anteriormente, é possível afirmar que para haver uma sincronização entre relógios, é preciso que sejam determinados previamente em que instante ocorrem dois eventos. Podemos utilizar também uma corrida de cavalos como exemplo: os dois eventos previamente estabelecidos para a sincronização dos relógios seria a largada e a chegada, pois os dois relógios devem começar e parar de marcar o tempo nesses respectivos eventos.

Considere agora o resultado do experimento de Michelson e Morley. A velocidade da luz não apresenta diferença, independentemente do sentido em que se propaga. Ao considerar isso como uma verdade, se uma fonte luminosa for posicionada no centro de um eixo com duas placas foto-sensoras equidistantes e no mesmo eixo da fonte luminosa, no momento em que a fonte emitir um flash luminoso, se a velocidade da luz é a mesma independente do trajeto e direção, um observador situado em um referencial em repouso em relação ao sistema verá que as placas detectaram o feixe de luz no mesmo instante. Caso este observador queira marcar o tempo que o feixe levou para chegar nas placas com um relógio para cada placa, ainda verá que ambas detectaram os feixes ao mesmo tempo.

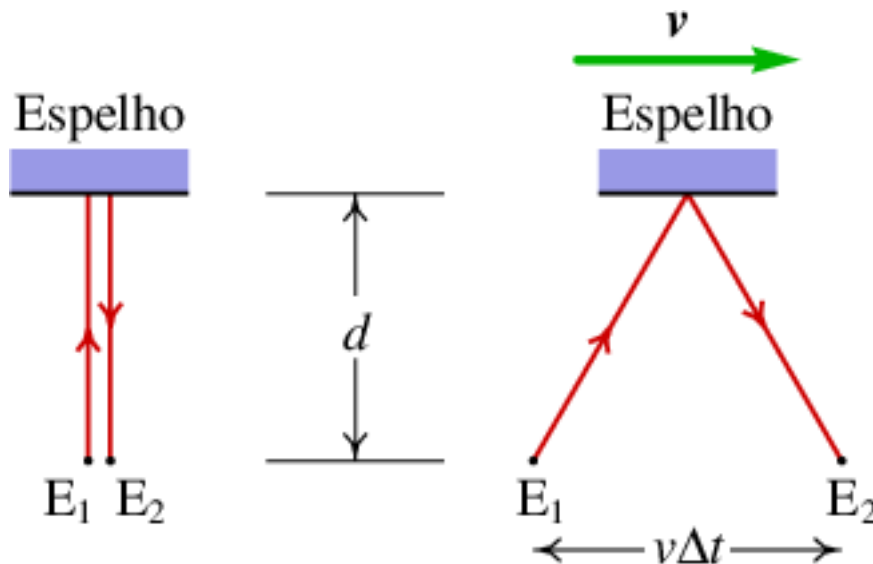
Isso leva a crer que, se em um referencial, dois eventos são simultâneos para um observador em repouso em relação a esse referencial, qualquer outro observador em repouso em relação ao mesmo referencial também verá estes eventos como simultâneos. A partir desse conceito de simultaneidade, do resultado encontrado por Michelson e Morley e de outros que serão apresentados em breve, podemos concluir a existência de dois fenômenos: a dilatação temporal e a contração do comprimento.

4.1.1 Dilatação temporal

Para estudar melhor esse evento, teremos que considerar um marcador de tempo imaginário chamado "relógio de luz", que consiste em uma fonte de luz E_1 e uma célula fotoelétrica E_2 lado a lado e a uma distância d de um espelho. já que se sabe como dois eventos

simultâneos ocorrem para um observador no mesmo referencial que os eventos ocorrem, mas e se o observador estiver em outro referencial? Esse dispositivo imaginário ajudará a entender como funciona essa situação. O relógio de luz está situado em um referencial S, portanto, qualquer observador também situado no referencial S' verá o feixe de luz propagando-se normalmente em linha reta tanto da fonte para o espelho, como do espelho para a célula. Porém, um observador que esteja situado em um referencial S com uma velocidade v relativa a S' verá de uma forma diferente, pois o feixe irá propagar-se em linha reta, mas na diagonal, como mostra a Figura 7.

Figura 7: Esquema do relógio de luz para um observador em S e S' respectivamente



Fonte: Física FEUP

Para calcular o tempo que a luz precisa para ir de E_1 para E_2 no caso em que o observador está no mesmo referencial que o relógio é simples, basta perceber que a distância percorrida é de $2d$, então:

$$\Delta t' = \frac{2d}{c} \quad (4.1)$$

Sendo c a velocidade da luz, este tempo medido por um observador em repouso ao referencial do evento, chamaremos de tempo próprio. Para a situação em que o observador encontra-se em um referencial que movimenta-se com relação ao referencial do relógio, teremos o seguinte:

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + d^2 \quad (4.2)$$

$$\Delta t^2 = \frac{4d^2}{c^2 - v^2} \quad (4.3)$$

$$\Delta t = \frac{2d}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.4)$$

Então, podemos afirmar que:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.5)$$

Se chamarmos o termo de $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ de γ

$$\Delta t = \gamma \Delta t' \quad (4.6)$$

Chegamos então a conclusão de que γ é o fator de transformação de referencial. Se a velocidade relativa v for muito menor que a velocidade da luz, pois o valor do dividendo será menor que 1, então:

$$\Delta t > \Delta t' \quad (4.7)$$

Chamamos esse fenômeno de dilatação do tempo, pois para mesma velocidade e distância, temos intervalos de tempo diferentes de acordo com o referencial em que o observador está localizado. Um exemplo muito interessante para entender a dilatação temporal foi elaborado pelo físico norte-americano Brian Greene em seu livro *O universo elegante*.

...Crispim, que gastou toda sua poupança para comprar um carrão, vai com seu irmão Joaquim a uma pista de corridas para fazer um teste não recomendado nem pelo fabricante, nem pelo revendedor. Crispim leva o motor a uma rotação de oito mil rotações, solta a embreagem e chega a 180km/h, enquanto Joaquim fica na beira da estrada para cronometrar. Crispim também possui um cronômetro para obter a confirmação independente do tempo que leva para completar o circuito. Antes de Einstein, ninguém teria dúvida de que se os cronômetros dos dois irmãos estivessem em bom estado, ambos mediriam o mesmo tempo. Mas de acordo com a relatividade especial, se Joaquim cronometrar um tempo de trinta segundos, o relógio de Crispim marcará 29,99999999999952 segundos...[5]

No exemplo do livro, cada um dos irmãos mediu um intervalo de tempo diferente, mesmo que ligeiramente. Isso ajuda a visualizar o conceito de tempo próprio e tempo dilatado, pois, entendemos como tempo próprio, o tempo medido pelo observador situado no referencial que não foi submetido a acelerações ou desacelerações durante o intervalo entre os dois eventos. Tomando como eventos os dois momentos em que o botão do cronômetro de cada um dos irmãos é pressionado, podemos afirmar que inicialmente estavam iguais, mas, devido ao movimento de um dos irmãos em relação ao outro, o intervalo de tempo foi ligeiramente dilatado para quem estava em movimento. Quando os botões foram pressionados novamente, Joaquim mediu o

tempo próprio e Crispim mediu o tempo dilatado.

4.1.2 Contração do comprimento

Considere um bastão situado na horizontal paralelo ao eixo x em repouso em um referencial S . Se o observador também situado no referencial S fizer a medida do comprimento deste bastão, basta verificar a distância do ponto em que ele começa, até o ponto em que ele acaba, logo, $L = x_f - x_i$, se x_0 : estiver na origem e x_f estiver na marcação um metro, por exemplo, então esse bastão possui um metro de comprimento. O comprimento de um objeto medido por um observador em repouso em relação ao referencial em que o objeto se encontra, chamaremos de comprimento próprio. Para a situação em que o observador está situado em um referencial S' com velocidade relativa v ao referencial S , primeiro ele verá uma ponta do bastão passar e algum tempo depois a outra. A partir do momento em que ele vê a primeira ponta, o observador começa a marcar o tempo e para apenas quando passa pela outra ponta, assim, marcando em um intervalo de tempo $\Delta t'$.

O comprimento próprio do bastão pode ser calculado com o tempo próprio que um observador no mesmo referencial S do bastão levar para atravessá-lo de forma que $L = v \cdot \Delta t$. Mas, no referencial S' , o comprimento medido é de $L' = v \Delta t'$. Porém, vimos anteriormente que $\Delta t' = \gamma \Delta t$, então afirmamos que:

$$L' = v \frac{\Delta t}{\gamma} \quad (4.8)$$

$$L' = \frac{L}{\gamma} \quad (4.9)$$

4.1.3 Dilatação do tempo e contração do comprimento em Física de partículas

O estudo sobre radiações cósmicas iniciou-se a partir estudos do final do século XIX, em que se observava a condutividade de gases, pois acreditava-se que na ausência total de radiação, um gás poderia ser considerado um meio não condutor, porém, observava-se que mesmo isolado de fontes de radiação, o gás possuía uma ionização residual, de maneira que os cientistas da época não conseguiam explicar o motivo. Esse fenômeno começou a ser observado pelo físico alemão Theodor Wulf no início do século XX e os chamou de "raios de grandes altitudes", pois ele afirmava que essa radiação vinha de fora da terra. O nome "raios cósmicos" decorrem dos estudos realizados pelo físico Austríaco Victor Hess poucos anos depois. O experimento consistia em colocar eletroscópios em um balão atmosférico para fazer observações e conseguiu detectar uma radiação com alta penetração e muito energética, proveniente de fora da terra.

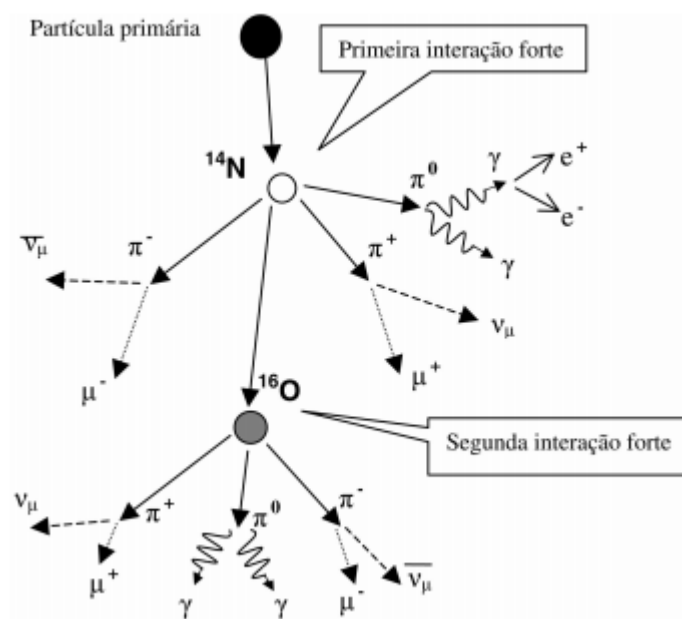
O estudo da radiação proveniente do espaço foi ramificado em diferentes tópicos,

e um dos ramos está no estudo da Física de partículas, pois esses raios são compostos por partículas com energia elevada, que decaem ao colidirem com os átomos e moléculas existentes na atmosfera terrestre, assim, dando início a uma série de interações nucleares e eletromagnéticas que resultam em um esquema semelhante ao de uma "chuva" ou "cascata" de partículas, nomeado de Chuveiro Atmosférico Extenso (CAE) [16]. O número de partículas vai depender da energia do raio primário E_0 , que se for superior à ordem de 10^2 eV, é grande o suficiente para realizar observações precisas do CAE [16]. As observações desses raios são muito importantes para o desenvolvimento desta área da Física, pois as partículas primárias contidas nos raios podem trazer informações da sua origem e qual o meio utilizado para entrar em movimento no espaço, ou seja, contribuem para o estudo de fenômenos astrofísicos em regiões do universo que estão muito longe da terra [17].

Um CAE é formado por partículas diferentes em proporções diferentes, aproximadamente 90% de elétrons, pósitrons e fótons, 9% de múons e apenas 1% de partículas hadrônicas [16]. Dentre esses hádrons, encontramos um tipo de partícula que chamamos de mésons- π neutros (π^0) e carregados (π^+ e π^-). Quando o raio começa a colidir com as moléculas da atmosfera, mésons- π são liberados como produtos dessas colisões, porém, mésons- π não possuem um grande tempo de vida quando estão sozinhos (aproximadamente 10^{-8} s). Posteriormente os mésons- π decaem em outras partículas que conhecemos como múons (μ), neutrinos e anti neutrinos, como mostrado na Figura 8.

Na figura 8, os termos π^0 , π^+ e π^- são respectivamente as representações de mésons- π neu-

Figura 8: Esquema de um chuveiro atmosférico extenso na atmosfera terrestre.



Fonte: Ref. 16

tros, carregados positivamente e negativamente, μ^+ e μ^- são múons carregados, γ são fótons, e^- são elétrons, e^+ são pósitrons, ν_μ são os neutrinos do múon e $\bar{\nu}_\mu$ o anti-neutrino do múon. Estes múons são partículas instáveis quando estão sozinhas e logo decaem espontaneamente, pois possuem um tempo de vida de aproximadamente $2,197 \mu\text{s}$ [16]. O decaimento espontâneo dos múons são representados assim:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (4.10)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (4.11)$$

de modo que ν_e , $\bar{\nu}_e$ são respectivamente o neutrino do elétron e o anti-neutrino do elétron (μ^- é o múon e μ^+ é o anti múon). Mas por qual razão estudar os múons? A resposta, é que de todas as partículas elementares carregadas encontradas na superfície da terra, múon é a mais abundante, além de possuir uma trajetória retilínea, ela não é regida pela interação forte (para o caso de interações nucleares) e possui altas energias. Somando-se tudo isso, essa partícula torna-se um excelente objeto para visualizar fenômenos relativísticos.

Como dito anteriormente, o múon possui um tempo de vida de aproximadamente $2,197\mu\text{s}$ e depois decai, gerando outras partículas, de acordo com a equação de decaimento:

$$N = N_0 \cdot e^{\frac{-\xi}{t_\mu}} \quad (4.12)$$

em que N é o número de múons, N_0 é o número máximo de múons gerados pelo decaimento dos mésons- π em uma determinada altura com relação ao nível do mar, ξ é o tempo decorrido relativo a altitude em que tínhamos N_0 , t_μ é o tempo de vida do múon antes de decair, e N é o número restantes de múons que não decaíram no momento em que o cálculo é realizado. No momento em que estamos na altitude com o número N_0 de múons, consideramos $\xi = 0$, e assim $N = N_0$.

Agora faremos um comparativo entre a mecânica clássica e a mecânica relativística para o caso dos múons provenientes de raios cósmicos, pois, essas partículas chegam na su-

perfcie terrestre com uma velocidade semelhante à da luz, e conseqüentemente estarão sujeitas a efeitos relativísticos, então é interessante analisar a diferença entre cada uma das teorias para o mesmo fenômeno.

4.1.3.1 Visão da mecânica clássica

A velocidade que os múons chegam na terra é de aproximadamente $0,998c$ [16], sendo c a velocidade da luz, levando em consideração a distância de 20km de atmosfera percorridos até o nível do mar com essa velocidade, teremos que o tempo ξ tal que:

$$\xi = \frac{20000m}{(0,998)(3.10^8m/s)} \cong 6,68.10^{-5}s \cong 66,8\mu s \quad (4.13)$$

O tempo ξ encontrado, podemos dizer que é igual a $30,40t_\mu$ se dividirmos pelo valor do tempo de vida do múon. Para encontrar o número de múons N em comparação com o número de múons produzidos na atmosfera N_0 , basta calcular:

$$\frac{N}{N_0} = e^{\frac{-30,4t_\mu}{t_\mu}} = 6,27.10^{-14} \quad (4.14)$$

Podemos ver que sob o ponto de vista da mecânica clássica, um percentual extremamente pequeno de múons chega ao nível do mar sem decair.

4.1.3.2 Visão da mecânica relativística

Olhando para o mesmo fenômeno, com os mesmos parâmetros, veremos o que diz a mecânica relativística. Para isso, iremos considerar a dilatação do tempo e contração espacial explicadas anteriormente, e a invariância da velocidade da luz, que será melhor abordado posteriormente.

Para a dilatação temporal, iremos usar a equação (4.6) adaptada à nossa situação, considerando o tempo no referencial do observador Δt como sendo Δt_μ , e o tempo próprio do múon $\Delta t'$ como sendo $\Delta t'_\mu$.

$$\Delta t'_\mu = \gamma \Delta t_\mu \quad (4.15)$$

Calculando γ para os múons com velocidade $0,998c$, obtemos

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{0,998}{1})^2}} \cong 15,82 \quad (4.16)$$

é fácil observar que, tal qual a relação (4.7)

$$\Delta t'_\mu > \Delta t_\mu \quad (4.17)$$

Aplicando na equação do decaimento, tal como foi feito para o caso da mecânica clássica, ainda levando em conta que $\xi = 30,40t_\mu$.

$$\frac{N}{N_0} = e^{\frac{-30,40t_\mu}{15,82t_\mu}} = e^{-1,92} \cong 0,14 \quad (4.18)$$

Ao comparar os resultados percentuais calculados nos dois pontos de vista, é notório que ao aplicarmos as devidas equações quando estamos lidando com fenômenos relativísticos, faz toda a diferença. A diferença entre os resultados está no fato de que o tempo estará dilatado, apesar de que para o múon que estará em uma velocidade próxima a da luz, não irá perceber essa dilatação e entenderá que o seu tempo de vida ainda não chegou ao fim, mesmo sendo muito pequeno.

4.1.3.3 Contração espacial

Para verificar a existência da contração espacial, calcularemos novamente o percentual de múons produzidos em uma altitude de 20 km e que alcançam o nível do mar, porém, a partir da equação (4.9), onde L será o comprimento espacial próprio, e L' o comprimento espacial comprimido. Aplicando os valores na equação, teremos

$$L' = \frac{20000m}{15,82} = 1264,22m \quad (4.19)$$

que será o espaço comprimido no referencial do múon, devido aos efeitos relativísticos. Agora que sabemos a distância que o múon irá percorrer, podemos descobrir o tempo que ele irá levar para percorre-la, com a mesma velocidade do exemplo anterior.

$$t = \frac{1264,22}{(0,998).(3.10^8)} = 4,26\mu s = 1,94t_\mu \quad (4.20)$$

Agora, aplicamos na equação de decaimento esse tempo de percurso que encontramos. Para provar que realmente há uma contração espacial, o resultado deverá ser igual ao que encontramos para a dilatação, então temporal.

$$\frac{N}{N_0} = e^{\frac{-1,94t\mu}{t\mu}} = e^{-1,94} \cong 0,14 \quad (4.21)$$

tal qual queríamos encontrar.

4.2 Os postulados de Einstein

Os eventos mostrados acima como dilatação do tempo e contração do comprimento não são consequências exatamente dos resultados de Michelson e Morley, e sim dos postulados propostos pelo físico alemão Albert Einstein em 1905, quando divulgou sua teoria da relatividade especial decorrente do que se observou neste experimento. Esses postulados eram base para seu trabalho e diziam o seguinte:

1. As leis da Física possuem a mesma forma em todos os referenciais inerciais
2. A velocidade da luz é independente do movimento de sua fonte.

O que podemos concluir a partir destes postulados é que a velocidade da luz é sempre constante para um mesmo meio e que as leis da Física precisam ser invariantes sobre transformações de referencial. Estes postulados e essas conclusões serão a base para qualquer resolução de problema ou nova formulação que virá a partir daqui.

4.3 Transformação de Lorentz

A transformação de Lorentz foi sem dúvida uma das bases para que Einstein formulasse sua teoria da relatividade especial, pois nela, o físico neerlandês Hendrik Lorentz contemplava a ideia de tempo local e a invariância da velocidade da luz perante vários referenciais.

Para formular seu trabalho, Lorentz utilizou o conceito de tempo local explicado anteriormente e foi adiante. Para definir as transformações de Lorentz, imagine novamente dois referenciais S e S' em que as origens coincidem ($O = O'$) no instante $t = t' = 0$. O referencial S' começa a mover-se ao longo do eixo x com velocidade u relativa ao referencial S. Uma lâmpada situada no referencial S emite um flash no instante $t = 0$. O observador situado no referencial S' verá uma frente de onda esférica propagando-se a partir da origem O' com raio calculado por ct' , pois como já se sabe, a medida de tempo de um referencial não é a mesma que de outro

referencial. Para descrever a propagação dessa frente de onda esférica, temos para o referencial S:

$$x^2 + y^2 + z^2 = (ct)^2 \quad (4.22)$$

e para o referencial S':

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = (ct')^2 \quad (4.23)$$

Ao aplicar a transformação de Galileu, na equação (4.22), obtemos

$$x^2 - 2xut + u^2t^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2 \quad (4.24)$$

Essa nova transformação a ser encontrada deveria obedecer duas premissas:

1. O tempo não seria mais absoluto, pois o conceito de tempo local deve ser inserido.
2. A transformação de Galileu deveria ser um caso específico da nova transformação, quando $u/c \rightarrow 0$, sendo c a velocidade da luz e u a velocidade relativa entre observador e evento.
3. As leis físicas deveriam ser invariantes perante a ela.

Para atender esses requisitos, sugere-se a seguinte transformação:

$$x' = x - ut \quad (4.25)$$

$$y' = y \quad (4.26)$$

$$z' = z \quad (4.27)$$

$$t' = t + kx \quad (4.28)$$

Em que k é uma constante a ser encontrada posteriormente. Utilizando essa nova transformação do referencial S para o referencial S' temos que:

$$x^2 - 2xut + u^2t^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2 + 2c^2ktx + c^2k^2x^2 \quad (4.29)$$

Se presumirmos puramente a fins de facilitar os calculos que $k = -u/c^2$, os temos que contém xt cancelam-se e temos que:

$$x^2\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right) + y^2 + z^2 = c^2t^2\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right) \quad (4.30)$$

Para eliminar os temos $(1 - u^2/c^2)$, basta substituir as transformações (4.13), (4.14), (4.15) e (4.16) nas seguintes transformações:

$$x' = \gamma(x - ut) \quad (4.31)$$

$$y' = y \quad (4.32)$$

$$z' = z \quad (4.33)$$

$$t' = \gamma(t - \frac{u}{c^2}x) \quad (4.34)$$

Lembrando que $\gamma = (1 - \frac{u^2}{c^2})^{-1/2}$ como já estabelecido anteriormente. Assim obtemos:

$$x^2 = y^2 + z^2 = c^2 t^2 \quad (4.35)$$

Igual o ponto de partida, ou seja, é invariante. Vale lembrar que as equações foram encontradas para um corpo que move-se com velocidade constante ao longo do eixo x.

4.4 Transformação das velocidades

Se em um sistema, um corpo varia sua posição ao longo do tempo, o conceito de velocidade surge naturalmente, pois apesar de estarmos trabalhando com um corpo que desloca-se de maneira uniforme, é interessante que saibamos qual a taxa de variação dessa posição no decorrer do tempo. Para isso, é preciso lembrar do conceito básico de velocidade: A variação da posição em um dado intervalo de tempo. Ao trabalhar com variações, é normal falar em derivadas, então de maneira formal teremos:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (4.36)$$

Ao aplicar (4.24) em (4.19), veremos que para um referencial S.

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{\gamma(dx - udt)}{\gamma(dt - \frac{u}{c^2}dx)} \quad (4.37)$$

Ao multiplicar por $\frac{\Delta t}{\Delta t}$ teremos.

$$v'_x = \frac{\frac{dx}{dt} - u}{1 - \frac{u}{c^2} \frac{dx}{dt}} = \frac{v_x - u}{1 - \frac{u}{c^2} v_x} \quad (4.38)$$

Para o eixo y teremos.

$$v'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{\gamma(dt - \frac{u}{c^2}dx)} = \frac{v_y}{\gamma(1 - \frac{u}{c^2}v_x)} \quad (4.39)$$

Se o eixo z, de acordo com a transformação de Lorentz, varia da mesma maneira que y, logo.

$$v'_z = \frac{v_z}{\gamma(1 - \frac{u}{c^2}v_x)} \quad (4.40)$$

4.5 Efeito Doppler

Certamente para quem já estudou as perturbações no espaço, denominadas de ondas, já possui uma noção, mesmo que superficial, do que é o efeito doppler. Para explicar de maneira introdutória do que se trata esse fenômeno, basta imaginar um carro de polícia com sua sirene ligada a caminho de um chamado urgente. Nessa situação o carro é a fonte de ondas sonoras que libera perturbações para todas as direções e está em movimento, a medida que o veículo acelera, este está cada vez mais próximo da velocidade do som, logo, as ondas liberadas na mesma direção do movimento do veículo tendem-se a agrupar-se na frente do mesmo como é mostrado na Figura 9.

Figura 9: Efeito Doppler com ondas sonoras



Fonte: Áreas exatas/WordPress

Dessa maneira, como pôde ser observado na ilustração anterior, haverá uma diferença na frequência que cada observador escutará, pois o observador B estará escutando uma frequência muito mais alta comparado o observador A.

Se o efeito Doppler é um fenômeno atrelado aos estudo de ondas, e de acordo com as equações de Maxwell, a luz também é uma onda, então ela também deve estar sujeita a esse fenômeno, porém, de maneira diferente da luz, pois como tem sido observado, quando tratamos de velocidades muito próximas a da luz, precisamos de equações relativísticas para descrever a natureza. Considere novamente dois referenciais, o observador encontra-se no referencial S e a fonte de luz no referencial S', no instante $t = t' = 0$, as origens dos referenciais coincidem, ou seja $x = x' = 0$. A fonte de luz é acionada assim que o referencial S' começa seu movimento a velocidade constante e libera sinais luminosos para todas as direções, enquanto o observador no referencial S mantém-se em repouso, é possível relacionar a posição e o tempo de S e S' utilizando a transformação de Lorentz no instante inicial de forma que:

$$x = \gamma(x' + ut') = \gamma ut' \quad (4.41)$$

$$t = \gamma(t' + \frac{u}{c^2}x') = \gamma t' \quad (4.42)$$

O tempo gasto pela frente de onda para chegar no observador é:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{c} = \frac{ut}{c} = \frac{\gamma ut'}{c} \quad (4.43)$$

Porém, o relógio do observador situado em S, irá marcar que o tempo necessário para a frente de onda partir de S' e chegar em S será a soma de t e de Δt .

$$t + \Delta t = \gamma t' + \gamma \frac{ut}{c} \quad (4.44)$$

$$t + \Delta t = \gamma t' \left(1 + \frac{u}{c}\right) \quad (4.45)$$

Lembrando que $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$ temos como resultado:

$$t + \Delta t = t' \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \quad (4.46)$$

Sendo $\beta = \frac{u}{c}$ na equação (4.46).

Quando trabalha-se com ondas, uma das grandezas buscadas para descreve-la é a sua frequência, geralmente representada pela letra grega ν . A definição de frequência é o inverso do período, ou seja.

$$\nu = \frac{1}{\Delta t} \quad (4.47)$$

Sendo o período, o tempo necessário para a onda ou movimento oscilatório realizar um ciclo. Para o efeito Doppler, temos que a frequência é dada por:

$$\nu = \frac{1}{t + \Delta t} = \frac{1}{t' \left(\sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}\right)} \quad (4.48)$$

$$\nu = \nu' \left(\sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}\right) \quad (4.49)$$

A equação (4.49) é o resultado do efeito Doppler em um regime relativístico e é importante observar o fato de que para encontrar a frequência observada em S e S', depende apenas da velocidade relativa entre os referenciais, pois c é um valor constante.

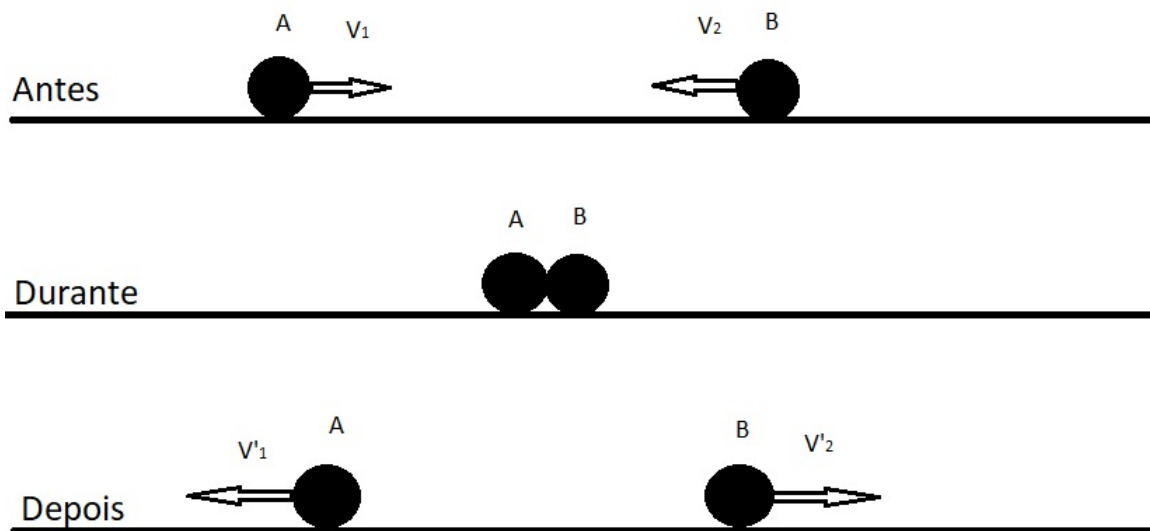
4.6 Conservação do momento

Momento é uma das grandezas mais importantes quando se está trabalhando com mecânica de uma maneira geral, na abordagem da mecânica clássica Hamiltoniana por exemplo, o estado de uma partícula pode ser descrito apenas pela sua posição e seu momento. Além da sua importância na descrição de um corpo, essa grandeza está diretamente relacionada com uma das bases de toda a Física, a lei da conservação do momento que diz:

Se a resultante das forças externas sobre um sistema de N partículas for zero, o momento mecânico total do sistema é constante. [7]

Essa lei é muito utilizada por exemplo, quando é preciso resolver um problema de colisão entre duas ou mais partículas em que pelo menos uma está em movimento como mostra a Figura 10.

Figura 10: Esquema unidimensional da colisão entre duas partículas



Fonte: Autoria própria.

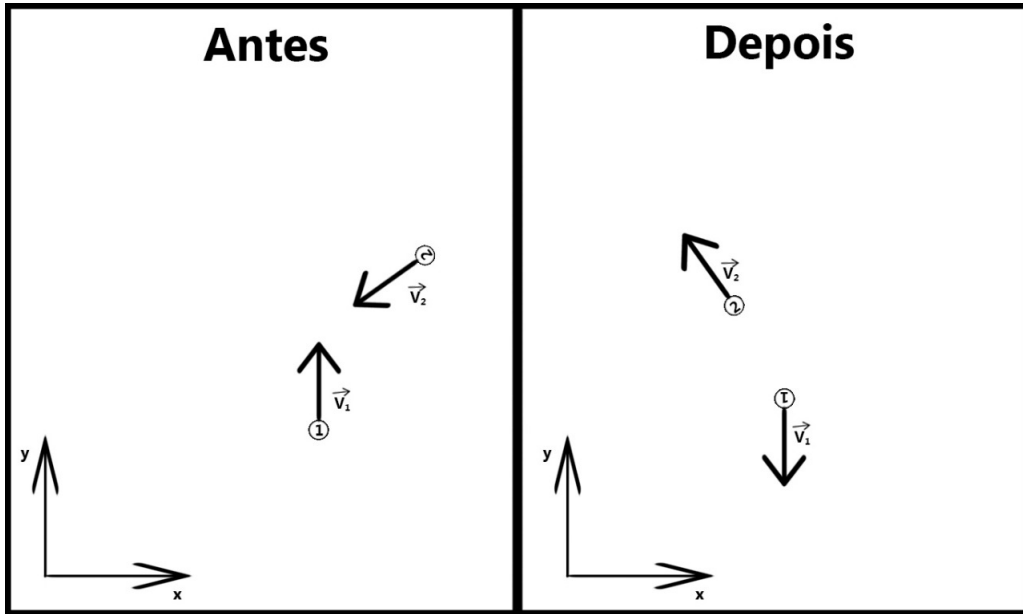
Na mecânica clássica é possível quantizar essa grandeza a partir do produto entre a massa do corpo e a velocidade em que ele possui.

$$P = m.v \quad (4.50)$$

Para verificarmos a validade da equação (4.50) em um regime relativístico, considere então a situação ilustrada na Figura 11 em que ocorre uma colisão entre duas partículas de mesma massa, podemos afirmar que a partícula 1 possui uma velocidade formada por uma componente em x e uma componente em y , e a partícula 2 possui velocidade apenas em y . Se a colisão

ocorre em um referencial S e há um observador em S' que move-se com uma velocidade v_x com relação a S.

Figura 11: Esquema de colisão entre duas partículas



Fonte: Autoria própria.

Esse observador medirá a velocidade da partícula 1 antes da colisão:

$$v'_{1x} = \frac{-2u}{1 + \left(\frac{u^2}{c^2}\right)} \quad (4.51)$$

$$v'_{1y} = \frac{-v_y}{\gamma\left(1 + \frac{u^2}{c^2}\right)} \quad (4.52)$$

Para a partícula 2, haverá velocidade apenas na componente y.

$$v'_{2x} = 0 \quad (4.53)$$

$$v'_{2y} = \frac{v_y}{\gamma\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)} \quad (4.54)$$

Depois que a colisão ocorre, o observador medirá novamente a velocidades das partículas. Para a partícula 1 teremos:

$$v'_{1x} = \frac{-2u}{1 + \frac{u^2}{c^2}} \quad (4.55)$$

$$v'_{1y} = \frac{v_y}{\gamma(1 + \frac{u^2}{c^2})} \quad (4.56)$$

Para a partícula 2 teremos:

$$v'_{2x} = 0 \quad (4.57)$$

$$v'_{2y} = \frac{-v_y}{\gamma(1 - \frac{u^2}{c^2})} \quad (4.58)$$

Com as velocidades medidas e lembrando que as partículas possuem massas iguais, para verificar a conservação do momento no regime relativístico, a seguinte exigência deverá ser atendida.

$$\sum P_{antes} = \sum P_{depois} \quad (4.59)$$

É possível observar que essa exigência é satisfeita para o eixo x, pois a partícula 1 não altera sua velocidade nessa componente e a partícula 2 não possui velocidade nessa direção. Para o eixo y, há uma inconsistência.

$$\frac{-v_{1y}}{\gamma(1 + \frac{u^2}{c^2})} + \frac{v_{2y}}{\gamma(1 - \frac{u^2}{c^2})} = \frac{v_{1y}}{\gamma(1 + \frac{u^2}{c^2})} + \frac{-v_{2y}}{\gamma(1 - \frac{u^2}{c^2})} \quad (4.60)$$

$$\frac{-2v_{1y}}{\gamma(1 + \frac{u^2}{c^2})} = \frac{-2v_{2y}}{\gamma(1 - \frac{u^2}{c^2})} \quad (4.61)$$

Logo, se as duas partículas possuírem a mesma velocidade na componente y, é notório que ao utilizar a equação (4.50) para um caso relativístico, o momento linear não é conservado, ou seja.

$$\sum P_{antes} \neq \sum P_{depois} \quad (4.62)$$

Para construir uma equação válida tanto para o regime relativístico, como para o regime clássico, deve-se atender dois requisitos:

1. Ser invariante perante as transformações de Lorentz.
2. Na situação em que $u \ll c$, essa nova expressão deverá se resumir a equação (4.50).

Visto que a inconsistência foi encontrada no eixo y , trabalharemos com ele para encontrar uma maneira que ele seja conservado. Para isso devemos considerar a equação (4.50) apenas para y .

$$P_y = mv_y \quad (4.63)$$

Que também pode ser escrita como.

$$P_y = m \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (4.64)$$

Como já mostrado anteriormente pela equação (4.26), Δy em (4.64) é invariante na transformação de Lorentz, porém, o intervalo de tempo utilizado na equação (4.64) pode ser diferente dependendo do referencial que ele é medido, tal como foi exemplificado anteriormente, por isso, passaremos a considerar que o tempo próprio t_0 da partícula. A expressão $\Delta y/\Delta t_0$ é invariante sob a transformação de Lorentz, por isso partiremos dela.

$$\frac{\Delta y}{\Delta t_0} = \frac{\Delta y}{\Delta t} \frac{\Delta t}{\Delta t_0} \quad (4.65)$$

Se utilizarmos a equação (4.6) em (4.65).

$$\frac{\Delta y}{\Delta t_0} = \gamma v_y \quad (4.66)$$

Então, para obter a equação do momento no âmbito relativístico de maneira que atenda aos requisitos listados acima, basta multiplicar pela massa da partícula, então teremos.

$$P_y = \gamma m v_y \quad (4.67)$$

Se a equação (4.67) é invariante sob a transformação de Lorentz, então podemos afirmar que para a velocidade em três dimensões será.

$$P = \gamma m v \quad (4.68)$$

Perceba que ao abrir a equação (4.68) obteremos.

$$P = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (4.69)$$

Observe que se $u \ll c$, a equação (4.69) resume-se apenas a $P = mv$, assim como na mecânica

clássica.

4.6.1 Massa relativística

Na equação (4.68) aparece o termo γm , esse termo deve-se ao que chamamos de massa relativística $m(v)$ dada pela expressão.

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.70)$$

O termo de massa m utilizado para dedução do momento relativístico vem da mecânica clássica, que chamamos de massa de repouso m_0 , que é a mesma para todos os referenciais, logo, chamamos de invariante de Lorentz. De acordo com a equação (4.69), ao analisar o que ocorre com o momento de uma partícula quando a sua velocidade tende a c , é fácil perceber que o momento tende a ser infinito. Diante disso, podemos concluir, então, que nenhum corpo que possui massa pode alcançar a velocidade da luz, pois um momento infinito não faz sentido fisicamente, pois um momento infinito teria como consequência uma energia infinita.

O postulado de Einstein de que a velocidade da luz deve parecer a mesma para todos sugeria que nada podia se mover mais rápido que a luz. O que acontece quando alguém usa energia para acelerar qualquer coisa, seja uma partícula ou nave espacial, a massa do objeto aumenta, fazendo com que passe a ser mais difícil acelerá-lo ainda mais. Acelerar uma partícula a velocidade da luz seria impossível, pois exigiria uma quantidade infinita de energia. [6]

4.7 Energia

Energia é uma grandeza fundamental em toda a Física e na mecânica não poderia ser diferente, essa grandeza está presente em todas as abordagens da mecânica clássica e está relacionada diretamente a um dos maiores pilares da Física, a conservação da energia, juntamente a conservação do momento citada anteriormente. Para falar de energia, é importante citar a famosa equação da segunda lei de Newton.

$$F = m.a \quad (4.71)$$

A equação (4.69) não pode estar correta no regime relativístico de acordo com o segundo postulado de Einstein, pois supondo que um corpo com massa possa alcançar a velocidade da luz, o

que aconteceria com um corpo massivo sujeito a uma força constante quando o mesmo alcançar a velocidade da luz, visto que ele não poderia mais acelerar ? Para responder essa pergunta, escreveremos a equação (4.70) de outra maneira, afim de introduzir o momento relativístico descrito anteriormente.

$$F = \frac{dP}{dt} \quad (4.72)$$

Visto que a relatividade trabalha com partículas ou corpos movendo-se muito rápido, nada melhor para analisar as consequências do momento relativístico do que analisar o comportamento da energia cinética nesse âmbito. Uma maneira inteligente para encontrar tal comportamento é através do princípio de conservação da energia e do teorema trabalho-energia da mecânica clássica.

A energia total de um sistema na ausência de forças dissipativas mantém-se constante.

$$\sum E_{antes} = \sum E_{depois} \quad (4.73)$$

O trabalho realizado sobre um corpo por uma dada força F é igual a variação da energia cinética.[7]

Em termos matemáticos para o teorema teremos a seguinte equação.

$$W = \Delta K \quad (4.74)$$

Porém, sabendo que trabalho é energia, podemos afirmar que.

$$E_c = \int F.ds = \int \frac{dP}{dt} ds = \int v.d(\gamma mv) \quad (4.75)$$

Para prosseguir, é necessário abrir o termo $d(\gamma mv)$.

$$d(\gamma mv) = m.d(\gamma v) = m.d \left[v \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} \right] = m \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} dv \quad (4.76)$$

Aplicando na equação (4.73), obteremos o seguinte resultado.

$$E_c = \int_0^v vm \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} dv \quad (4.77)$$

$$E_c = mc^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = \gamma mc^2 \quad (4.78)$$

É preciso cuidado ao escrever o termo γ na equação (4.73), pois para essa situação em que consideramos o momento relativístico, a velocidade v dentro do mesmo refere-se a velocidade que a partícula se move ao invés da velocidade relativa entre dois referenciais inerciais. Para utilizar γ no sentido de velocidade relativa entre referenciais, devemos utilizar a seguinte expressão.

$$E_c = \gamma mc^2 - m_0c^2 \quad (4.79)$$

$$E_c = mc^2(\gamma - 1) \quad (4.80)$$

Expandindo o termo $\gamma - 1$ em séries de Taylor teremos uma aproximação do valor final.

$$E_c = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \cong mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots - 1 \right) \quad (4.81)$$

$$E_c \cong \frac{1}{2} m_0 v^2 \quad (4.82)$$

Sendo a equação (4.82) a energia cinética de acordo com a mecânica clássica, tal como exige a nova formulação da mecânica. A escolha de considerar apenas o primeiro termo da expansão deve-se ao fato de que a partir do segundo termo os valores seriam suficientemente pequenos para tornarem-se desprezíveis

4.7.1 Equivalência massa-energia

De acordo com a equação (4.79) encontrada anteriormente, a energia cinética de uma partícula pode ser descrita a partir de dois termos semelhantes, por isso é interessante nomeá-los, visto que eles possuem as diferentes massas da mesma partícula. O termo γmc^2 é chamado de energia total da partícula e o termo m_0c^2 é chamado de energia de repouso da mesma, por isso convém escrever da seguinte maneira.

$$\gamma mc^2 = m_0c^2 + E_c \quad (4.83)$$

A escolha desses nomes vai além da simples conveniência pelas massas de cada termo, pois de acordo com Einstein, massa e energia são equivalentes para o mesmo corpo. Pelo ponto de vista da mecânica clássica, é realmente complicado imaginar que um corpo em total repouso possua uma energia cinética atrelado a ele, mas de acordo com esse princípio, a energia armazenada em um corpo deve-se a sua massa de repouso m_0 .

Suponha, por exemplo, duas partículas ligadas por uma mola. Se a mola é comprimida, de forma que o sistema armazene uma energia potencial U , a massa do sistema aumenta $\Delta m = U/c^2$ em relação a soma das massa das partículas da mola estendida.[4]

De acordo com o resultado encontrado na equação (4.79)

$$E = m_0 c^2. \quad (4.84)$$

A famosa equação (4.84) nos diz que a medida de energia armazenada em um corpo massivo deve-se a sua massa de repouso. Agora que a o momento e a energia para a mecânica relativística estão definidas e de acordo com as exigências, qual seria a relação entre elas visto que ambas são grandezas de um corpo que está em movimento com velocidade próxima da velocidade da luz? Para responder essa pergunta precisamos elevar ao quadrado as equações (4.79) e (4.80), então obteremos para a energia

$$E^2 = \frac{m^2 c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (4.85)$$

e para o momento

$$P^2 = \frac{m^2 v^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (4.86)$$

Ao eliminarmos em ambas o termo v^2 teremo o seguinte resultado:

$$E^2 = P^2 c^2 + (m c^2)^2. \quad (4.87)$$

A equação (4.87) é de extrema importância para a solução de problemas que envolvam partículas ou corpos movendo-se com velocidades próximas a da luz, pois nela temos a relação entre as grandezas momento e energia. Vale ressaltar que para partículas que não possuam uma massa

de repouso a equação resume-se apenas a relação a seguir.

$$E = Pc \quad (4.88)$$

4.7.2 O fóton

Para que a discussão possa prosseguir, é inevitável falar do fóton, e consequentemente de mecânica quântica. A natureza possui quatro forças fundamentais, são elas a força nuclear forte, a força nuclear fraca, a força eletromagnética e a força gravitacional. Essas forças explicam como as interações mais básicas da natureza funcionam. Para que cada uma dessas interações ocorra são necessárias três partículas, duas delas são as partículas que irão interagir e uma partícula denominada de bóson responsável pela mediação dessa interação.

Esses bósons são diferentes para cada interação, os glúons são responsáveis pela força nuclear forte, os bósons W^+, W^- e Z para a força nuclear fraca, o gráviton para a força gravitacional e os fótons para a força eletromagnética. O caso do gráviton ainda é um problema em aberto, pois de todos os bósons citados anteriormente, apenas ele ainda não foi detectado para que sua existência possa ser comprovada

Foi citado anteriormente que a teoria eletromagnética de Maxwell não explicava somente fenômenos elétricos e magnéticos, mas também a ótica com uma equação de onda, o que leva a afirmar que a luz é uma onda eletromagnética. Então, seria o fóton uma partícula de luz? Para responder essa pergunta é preciso lembrar dos trabalhos do físico alemão Max Planck que em 1901 publicou seus trabalhos como uma tentativa de solucionar o problema da emissão de energia por meio de radiação eletromagnética. Ao solucionar esse problema, mesmo sem saber, estava inaugurando uma nova área da Física, pois o fato da solução para o problema estar na quantização da energia trouxe para a ciência o que chamamos de mecânica quântica.

A famosa equação encontrada por Planck nos diz que a energia é liberada em pacotes, os quais teriam valor sempre de um múltiplo inteiro do produto de uma constante pela frequência da radiação emitida pelo corpo negro.

$$E = nh\nu \quad (4.89)$$

Sendo h a constante de Planck e ν a frequência da radiação emitida pelo corpo negro. Pelo fato dos pacotes serem múltiplos inteiros deste produto, o termo n apenas poderá ser representado por números do que chamamos de matemática discreta, ou seja ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Ao divulgar seus trabalhos, Einstein propôs que a luz, sendo ela uma radiação eletromagnética

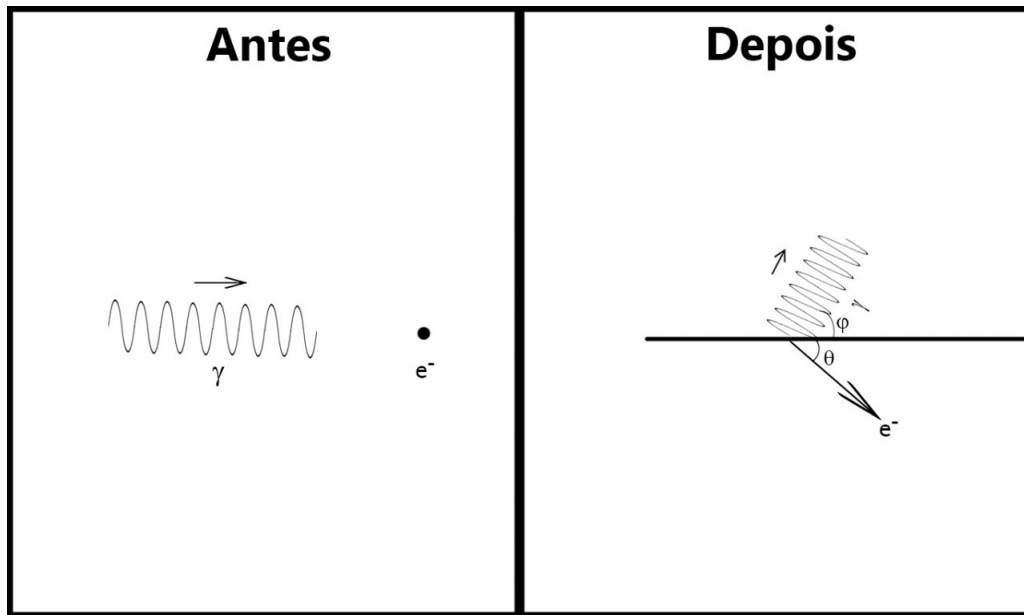
também é quantizada e que os pacotes de energia da luz são os fótons, que obedecem a teoria da quantização de Planck e que não possuem massa. Pensar em uma partícula que não possui massa é algo fora dos padrões dentro da realidade macroscópica que estamos inseridos, mas foi graças a proposta de existência do fóton que Einstein conseguiu explicar o efeito fotoelétrico que consiste na ideia de que as ligações dos elétrons das camadas mais externas com o núcleo dos átomos de uma superfície metálica possam ser rompidas cedendo uma certa quantidade de energia por meio da luz incidente (fótons) e assim fazer com que esse elétron arrancado entre no regime de partícula livre com uma certa energia cinética que depende de quanta energia foi cedida a ele por meio desses fótons.

4.8 Espalhamento Compton

O espalhamento Compton é uma aplicação direta de tudo que foi explicado até agora, pois trata-se de um problema de colisão entre um fóton e um elétron, que pode ser comparado com a colisão entre duas bolas de bilhar, porém com um tamanho muito menor e na velocidade da luz. O espalhamento ou efeito Compton foi descoberto a partir dos estudos de raios x, sendo esta radiação eletromagnética de alta frequência e baixo comprimento de onda, possui esse nome em homenagem ao físico estadunidense Arthur Holly Compton que ganhou o prêmio nobel em 1927 por sua descoberta.

O espalhamento Compton é um problema de colisão em que há elétrons livres ou na camada de valência de um átomo que são bombardeados com raios x de uma dada frequência λ incidente. Ao considerar as ideias de Einstein sobre o fóton, Compton acreditava que poderia determinar o comprimento de onda da radiação gerada pelo movimento do elétron. Considere a situação ilustrada na figura 12

Figura 12: Ilustração do espalhamento Compton



Fonte: Autoria própria.

Apesar de estar trabalhando com escalas bem menores, para resolver um problema de colisão ainda é necessário usar os conceitos de conservação da energia e do momento, mas com variáveis diferentes da mecânica clássica. Foi explicado anteriormente que o fóton é o pacote de energia das interações eletromagnéticas, então a energia de um fóton pode ser determinada pela equação (4.89) com $n = 1$, então pela equação (4.88) temos que o momento do fóton é dado por $P = h \nu / c$ para antes da colisão e $P' = h \nu' / c$ para depois da colisão, visto que parte do momento do fóton será transmitido para o elétron. sabendo que o elétron possui uma massa de repouso e conseqüentemente energia mesmo estando parado, ao descrevermos a conservação da energia para todo o sistema teremos.

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + E_c \quad (4.90)$$

Onde m_e é a massa do elétron e E_c é a energia cinética do elétron depois da colisão. A conservação do momento do sistema é dada por.

$$\frac{h\nu'}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \phi + P_e \cos \theta \quad (4.91)$$

No eixo y, sendo P_e o momento do elétron adquirido após a colisão.

$$\frac{h\nu'}{c} \sin \phi + P_e \sin \theta = 0 \quad (4.92)$$

Isolando os termos com θ das equações (4.91) e (4.92).

$$\frac{h^2 v^2}{c^2} - \frac{2h^2 v v'}{c^2} \cos \phi + \frac{h^2 v'}{c^2} = P_e^2 \quad (4.93)$$

$$h^2(v - v')^2 + 2h^2 v v'^2(1 - \cos \phi) = P_e^2 c^2 \quad (4.94)$$

Utilizando a equação (4.87) e substituindo o termo $P_e^2 c^2$ teremos.

$$2h(v - v')mc^2 = 2h^2 v v'(1 - \cos \phi) \quad (4.95)$$

$$\frac{v - v'}{v v'} c = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi) \quad (4.96)$$

Ao fazer a análise dimensional da equação (4.96) é possível chegar a conclusão de que.

$$\frac{v - v'}{v v'} c = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi) = \Delta \lambda \quad (4.97)$$

Em que o termo $\Delta \lambda$ é referênte a mudança do comprimento de onda do fóton após o choque com o elétron. A equação (4.77) mostra que a variação do comprimento de onda depende do ângulo de espalhamento do fóton, conseqüentemente, dentro dos valores possíveis para a função cosseno, para a situação em que houver uma colisão frontal com um elétron que também possui uma velocidade, tem-se o que chamamos de retroespalhamento em que $\cos \phi = -1$.

5 APLICAÇÃO DA PROPOSTA

Como podemos ver anteriormente, a relatividade especial possui uma forte conexão com a mecânica clássica, pois como foi explicado, uma das condições para as equações relativísticas é que: Ao trabalhar com velocidades pequenas comparadas a da luz, as equações devem resumir-se, as equações clássicas elaboradas na mecânica newtoniana. Também foi mostrado e resolvido o espalhamento Compton, que por um olhar mais geral, seria um problema de colisão com equações diferentes, mas com os mesmos princípios que usamos para resolver problemas de partículas colidindo na mecânica clássica. Desta maneira, pode tornar-se viável incentivar o aprendizado de mecânica clássica por meio da relatividade especial.

5.1 Preparação

Devido a este projeto apresentar uma proposta de ensino para uma possível aplicação futura, é de grande importância que anteriormente à aplicação, seja feito um estudo sobre a opinião dos alunos acerca do que pensam sobre suas aulas de Física e o conteúdo contido nas mesmas. Para que isso possa ser observado, deverá ser aplicado um questionário inspirado no do projeto ROSE, de preferência em mais de uma escola, para que os resultados sejam mais gerais, sem que uma realidade particular de uma escola específica influencie tanto nos resultados finais. O questionário deverá ser aos moldes de uma simples pesquisa de opinião, até mesmo por uma questão de uma maior inserção do aluno na sua pesquisa, uma vez que é perceptível que os alunos tendem a se sentir mais confortáveis com menos formalidades.

5.2 As aulas conceituais

Da mesma maneira que no questionário inicial, devem seguir-se as aulas de maneira simples e bem dialogada com perguntas geradoras de reflexões a ponto que o aluno sintase confortável o suficiente para participar sem medo de errar. O ponto central das aulas está em ensinar mecânica sem que seja perceptível a eles, pois teoricamente esse conteúdo, quando exposto em sala de aula, acaba sendo negligenciado pelos próprios alunos, pois é considerado difícil e entediante devido a todas as questões em torno do ensino de Física apresentadas anteriormente.

As aulas deverão ser moldadas de acordo com os resultados do primeiro questionário, pois a partir dele é que se obtém as informações do que os alunos pensam, do que esperam daquela

disciplina e até mesmo se seria efetivo aplicar naquela escola em questão. Afinal, para que o objetivo do curso seja alcançado, de nada adianta se a escola não possuir uma base no mínimo curiosa sobre o assunto. Também vale ressaltar que mais aulas podem ser incluídas no curso dependendo do rendimento da turma, pois, o tempo de aprendizado deverá ser respeitado. Depois que o curso for aplicado em uma escola, dependendo dos resultados obtidos, mais alunos de mais escolas podem vir a sentir interesse em participar, talvez, inicialmente como um meio de obter melhores notas, mas não está completamente descartada a possibilidade de mudança a ponto que o aluno sinta vontade de seguir uma carreira científica.

Como dito anteriormente, a aula deve ocorrer da maneira mais natural possível, e para isso o ambiente tem uma enorme influência, sugere-se dispor as cadeiras em formato de U para facilitar a conversa entre professor e alunos e entre alunos, formando uma aula interativa, fugindo do tradicional e fazendo com que o aluno também seja protagonista na construção do conhecimento. Desta forma, o professor toma o lugar de mediador e auxiliador do processo de aprendizagem. O que é esperado dos alunos quanto a suas respostas e suposições durante a aula é que eles estejam diretamente atreladas ao conhecimento popular e observação do cotidiano, o que os levará a refletir e responder com base na mecânica clássica, fazendo assim com que os conceitos sejam melhor fixados, aprendam sobre aquilo que julgam ser "chato" e construam uma base para entender os conceitos de relatividade que virão a seguir, sendo assim um método inspirado na aprendizagem significativa [10].

5.3 As aulas de exercícios

As aulas de exercícios não deverão necessariamente ser focadas em problemas de livros ou sistema de ensino em específico, mas devem ter conexão com o intuito do curso e com o progresso da turma, sendo este um ponto a ser analisado durante as aulas. Vale ressaltar que uma preferência por problemas conceituais e reflexivos pode ser um ponto positivo no que diz respeito à visão que os estudantes terão do conteúdo. Mas é claro que quando o assunto é Física, especialmente no ensino brasileiro, é normal que haja uma imediata associação com a matemática, que de maneira nenhuma deve ser deixada completamente de lado. Porém, um conjunto de exercícios que em sua maioria seja conceitual pode servir como estímulo para o interesse e conseqüentemente para uma busca por aprofundamento por parte dos próprios alunos.

5.4 Uma alternativa para avaliação

Avaliações são necessárias, sem dúvida, mas os alunos não precisam ser necessariamente avaliados por meio de provas escritas para este curso em si (Isso fica a critério de cada professor). Os participantes do curso podem ser avaliados sem ter consciência disso. Uma maneira de fazer tal avaliação seria conversar com o professor de Física das turmas regulares e perguntar sobre alguma mudança de comportamento durante as aulas, como: mais interesse em resolver as atividades, uma maior participação e o que houve com as notas das provas desde que o curso começou, tal como uma avaliação continuada.

5.5 Finalização

Para concluir o curso, faz-se necessário que outro questionário seja aplicado aos alunos que estiveram até o final. Assim como o primeiro, deverá ser simples e sucinto, com perguntas sobre a perspectiva dos alunos sobre o curso, sobre sua nova visão perante a Física (se houver mudado), dentre outras perguntas que no geral, informem se o curso cumpriu seus objetivos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à pandemia causada pela COVID-19, não apenas o Brasil, muitos outros países entraram em uma quarentena. Devido a essa situação, nenhuma coleta de dados foi realizada, pois as escolas públicas e particulares encontravam-se fechadas, sem previsão de retorno presencial. A realização online também não pôde ser vista como solução, pois nem todos os alunos de escolas públicas possuem acesso a internet, o que tornaria a coleta de dados e realização do curso injusta, pois as oportunidades não seriam as mesmas para todos, o que, por fim, poderia influenciar no resultado.

6.1 Conclusão

A educação Brasileira enfrenta muitos problemas que atingem a todas as áreas, e quando falamos de ciências, mais problemas surgem, muitos deles por questões culturais e de investimento. Este trabalho apresentou um breve histórico da educação brasileira desde seu período colonial e como a disciplina de Física estava encaixada em cada contexto. Foi apresentado um panorama geral da educação brasileira no início do século XXI, com seus resultados em exames internacionais como o PISA e nível de analfabetismo. Introduziu a ideia do projeto ROSE e os resultados de sua aplicação no Brasil, e a elaboração de uma maneira alternativa de driblar alguns desses problemas e incentivar o aprendizado de um tema básico da Física por meio de um tema que, apesar de complexo muitas vezes é visto como interessante pelos alunos. Foi explicado o que seria ensinado no curso, de maneira mais formal do que seria passado em sala e aula, pois neste ambiente, seria utilizada um menor rigor matemático devido ao que é estudado pelos alunos do ensino médio na disciplina de matemática. Os principais pontos encontram-se no final do conteúdo, pois, problemas de colisões e energia é algo que se vê constantemente no ensino médio, especialmente no primeiro ano.

As inspirações para a elaboração deste trabalho vieram por meio de experiências pessoais durante estágios e períodos como bolsista do PIBID em escolas públicas no estado do Ceará, e a ciência sobre a existência do projeto ROSE e sua aplicação no Brasil, e tem como objetivo tentar incentivar o aprendizado de Física básica nos alunos do ensino médio e que sigam uma carreira científica se assim desejarem.

6.2 Trabalhos Futuros

Como plano para trabalhos futuros, pretendo aplicar todas as etapas da proposta exposta aqui e analisar os dados coletados para uma análise sobre a eficiência da proposta.

REFERÊNCIAS

- [1] ALMEIDA JÚNIOR, João Baptista de. A evolução do ensino de Física no Brasil. Revista de Ensino de Física, v. 1, n. 2, p. 45-73, out. 1979.
- [2] TOLENTINO NETO, Luiz Caldeira Brant de. Os interesses e posturas de jovens alunos frente as ciências: resultados Projeto ROSE aplicado no Brasil. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.
- [3] DELVAS FROÉS, André Luís, Astronomia, astrofísica e cosmologia para o ensino médio. Revista de Ensino de Física, v. 36, n. 3, ago. 2014.
- [4] GAZZINELLI, Ramayana. Teoria da relatividade especial.2.ed.São Paulo: Editora Blucher, 2009.
- [5] GREENE, Brian. O universo elegante: Supercordas, dimensões ocultas e a busca da teoria definitiva. São Paulo: Editora Schwarcz, 2001.
- [6] HAWKING, Stephen. O universo numa casca de noz. Rio de Janeiro: Editora Intrínseca, 2016.
- [7] TAYLOR, John R. Mecânica Clássica. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013.
- [8] BARCELOS NETO, João. Matemática para físicos com aplicações: Vetores, Tensores e Spinors, volume 1/João Barcelos Neto. - São Paulo: Editora Livraria da Física, 2010.
- [9] ROSSI, Amanda Ferraz. Teatro e ensino de física: uma proposta inovadora para integrar ciência e arte. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências e Matemática) - Faculdade de educação, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2014.
- [10] MOREIRA, M.A. (1999). Aprendizagem significativa. Brasília: Editora da UnB.
- [11]ASTOLFI,J.P., El error, un medio para enseñar. Diada Editora S.I. Sevilla, 1999
- [12] HAWKING, Stephen. Uma breve história do tempo. Rio de Janeiro: Editora Intrínseca, 2015.

[13] TAXA de analfabetismo em pessoas de 15 anos ou mais em 2019. IBGE, 2019. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18317-educacao>.

[14] Analfabetismo cai para 6,6%, mas Brasil ainda tem 11 milhões sem ler e escrever. Gauchazh, 2020. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/educacao-e-emprego/noticia/2020/07/analfabetismo-cai-para-66-mas-brasil-ainda-tem-11-milhoes-sem-ler-e-escrever-ckcnkntlw004y013gbye06ntj>.

[15] Pesquisa aponta desinteresse dos jovens pela carreira científica. Gauchazh, 2016. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/educacao-e-emprego/noticia/2016/06/pesquisa-aponta-desinteresse-dos-jovens-pela-carreira-cientifica-5866044>.

[16] A.C. Fauth, J.C. Penereiro, E. Kemp, W.C. Grizolli, D.M. Consalter e L.F.G. Gonzalez. Demonstração experimental da dilatação do tempo e da contração do espaço dos múons da radiação cósmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 4, p. 585-591, (2007)

[17] A.V. Olinto, 28th International Cosmic Ray Conference (Tsukuba, Japan, 2003), Universal Acad. Press 1, 1 (2003).

APÊNDICE A - PLANOS DE AULA

Neste apêndice encontram-se os planos de aula referentes às 4 aulas teóricas do curso de relatividade para o ensino médio, proposto nesta monografia.

Plano de aula

Adriel de Oliveira Aquino

Curso de relatividade como incentivo para o aprendizado física básica.

Aula 1

1 Tema

Tema geral: Introdução a relatividade especial.

Temas específicos: Princípio da relatividade de Galileu, Eletromagnetismo de Maxwell, Experimento de Michelson-Morley.

Nível: Ensino médio.

Duração da aula: Duas horas.

2 Objetivos

A nível de conhecimento: Introduzir aos alunos, a nível majoritariamente qualitativo, adequando à matemática do ensino médio o que for necessário, as primeiras ideias sobre princípio da relatividade e as descobertas do século XIX as quais foram motivações para a reformulação do princípio antes formulado por Galileu.

A nível de aplicação: Possibilitar que o aluno venha a entender a motivação e a necessidade da relatividade especial ser formulada.

3 Desenvolvimento do tema

A aula será iniciada com questionamentos sobre o movimento dos corpos, mais especificamente, sobre movimento relativo entre dois corpos. A partir das respostas e percepções dos alunos sobre as perguntas, por meio de debate, o professor tentará induzi-los a pensar se as respostas dadas anteriormente funcionariam para um corpo com velocidade muito grande, sendo a expectativa mais óbvia, que respondam de acordo com suas experiências cotidianas.

O professor pedirá para que os alunos guardem suas respostas e logo após começará uma explicação a nível qualitativo sobre o eletromagnetismo de Maxwell com exemplos para cada equação, sejam por materiais disponibilizados pela escola, experimentos de baixo custo ou demonstrações por vídeos. Após a explicação e demonstrações, o professor mostrará que as equações não se encaixam no princípio da relatividade de Galileu por meio de duas cargas iguais que movem-se em referenciais diferentes.

Por fim, o professor irá expor e explicar com seus devidos cálculos, o experimento de Michelson e Morley para que os alunos possam visualizar a não existência do éter.

4 Recursos didáticos

O material didático prático será : quadro branco, pincel, apagador, materiais para demonstrações experimentais e/ou slides.

O material didático teórico será: GAZZINELLI, Ramayana. Teoria da relatividade especial.2.ed.São Paulo: Editora Blucher, 2009.

Plano de aula

Adriel de Oliveira Aquino

Curso de relatividade como incentivo para o aprendizado física básica.

Aula 2

1 Tema

Tema geral: Conceitos básicos da relatividade especial.

Temas específicos: Postulados da relatividade especial, Simultaniedade, Dilatação temporal e Contração Temporal.

Nível: Ensino médio.

Duração da aula: Duas horas.

2 Objetivos

A nível de conhecimento: Compreensão dos alunos acerca dos postulados da relatividade especial e algumas de suas consequências.

A nível de aplicação: Possibilitar que o aluno entenda matematicamente a dilatação temporal e contração do comprimento como consequências dos postulados propostos por Einstein.

3 Desenvolvimento do tema

A aula iniciará com uma pequena recapitulação dos conceitos aprendidos na aula passada, e logo após uma breve contextualização histórica, o professor escreverá na lousa os dois postulados da relatividade especial, e será aberta um debate acerca do que os alunos pensam sobre eles e quais as suas consequências. O professor irá pedir para que os alunos guardem suas respostas e explicará o conceito de simultaneidade para dois eventos e logo após, aproveitando esse conceito, mostrará a dilatação temporal através do exemplo que envolve uma fonte luminosa, uma célula fotoelétrica e um espelho em movimento. A contração do comprimento será mostrada a partir de um bastão horizontal situado em um referencial diferente do observador que encontra-se em movimento. Em seguida será mostrado um exemplo de dilatação temporal e contração espacial a partir do decaimento de mésons-pi em raios cósmicos. Para finalizar, o professor abrirá um novo debate sobre o que os alunos pensam sobre o que foi exposto a eles durante a aula e responderá as perguntas que surgirem durante o debate.

4 Recursos didáticos

O material didático prático será : quadro branco, pincel, apagador.

O material didático teórico será: GAZZINELLI, Ramayana. Teoria da relatividade especial.2.ed.São Paulo: Editora Blucher, 2009.

A.C. Fauth, J.C. Penereiro, E. Kemp, W.C. Grizolli, D.M.Consalter e L.F.G. Gonzalez. Demonstração experimental da dilatação do tempo e da contração do espaço dos múons da radiação cósmica. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 4, p. 585-591, 2007.

Plano de aula

Adriel de Oliveira Aquino

Curso de relatividade como incentivo para o aprendizado física básica.

Aula 3

1 Tema

Tema geral: Transformações de Lorentz e seus desdobramentos.

Temas específicos: Transformações de Lorentz, transformação de velocidades e efeito Doppler relativístico.

Nível: Ensino médio.

Duração da aula: Duas horas.

2 Objetivos

A nível de conhecimento: O conhecimento do aluno acerca das transformações de Lorentz de maneira quantitativa e qualitativa, bem como suas consequências.

A nível de aplicação: Tornar possível a compreensão, pelo menos a nível qualitativo das implicações das transformações de Lorentz para velocidades e efeito Doppler.

3 Desenvolvimento do tema

A aula terá início com uma rápida revisão conceitual do que foi estudado até o momento, e logo em seguida, o professor abrirá uma discussão com os alunos perguntando-os sobre como eles pensam ser a formulação matemática por trás do que já estudaram até o momento. A partir das respostas dos alunos, o professor irá indicá-los gradualmente até que cheguem a resposta correta ou o mais próximo possível. Em seguida, será mostrado como surgem as transformações de Lorentz de maneira matemática para o caso de movimento retilíneo. No segundo momento da aula, e quando devidamente demonstradas, outra discussão será aberta, dessa vez, sobre o que os alunos pensam no que as fórmulas das transformações podem ter como consequência, com as respostas em "mãos" o professor deverá incentivá-los a chegar a questionar-se sobre como seria a velocidade para um movimento que não obedece as transformações de Galileu e mostrará como é formulada a transformação de velocidades. Por fim, será feita uma explicação/revisão sobre o que é efeito Doppler e como ele ocorre para a luz, visto que a luz possui comportamento ondulatório.

4 Recursos didáticos

O material didático prático será : quadro branco, pincel, apagador.

O material didático teórico será: GAZZINELLI, Ramayana. Teoria da relatividade especial.2.ed.São Paulo: Editora Blucher, 2009.

Plano de aula

Adriel de Oliveira Aquino

Curso de relatividade como incentivo para o aprendizado física básica.

Aula 4

1 Tema

Tema geral: dinâmica relativística.

Temas específicos: Momento relativístico, energia, equivalência massa-energia e espalhamento Compton.

Nível: Ensino médio.

Duração da aula: Duas horas.

2 Objetivos

A nível de conhecimento: Entender o que muda no que diz respeito ao momento linear e energia quando trabalha-se com efeitos relativísticos.

A nível de aplicação: Tornar possível para o aluno a compreensão qualitativa e quantitativa da dinâmica relativística, e sua comparação com a mecânica clássica.

3 Desenvolvimento do tema

O primeiro momento da aula será dedicado a explicar sobre como os conceitos de momento linear e energia são vistos pelo ponto de vista da mecânica clássica, e mostrando problemas de colisões entre partículas, aplicando os conceitos clássicos. No segundo momento da aula, será abordado como são as "aparências matemáticas" para o momento linear e para a energia no ponto de vista da relatividade, chegando até a equivalência massa-energia e equação da energia relativística, porém, em toda a explicação serão feitas comparações com o respectivo caso clássico para energia e momento. No terceiro e último momento será mostrado o espalhamento Compton, ao menos, a nível qualitativo das equações, pois a nível quantitativo poderá ser melhor abordado em uma aula de exercícios.

4 Recursos didáticos

O material didático prático será : quadro branco, pincel, apagador.

O material didático teórico será: GAZZINELLI, Ramayana. Teoria da relatividade especial.2.ed.São Paulo: Editora Blucher, 2009.

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIOS

Neste apêndice encontram-se os questionários que serão aplicados no início e no final do curso de relatividade para o ensino médio, proposto nesta monografia.

PESQUISA DE OPINIÃO DOS ALUNOS ACERCA DA ESCOLA E SUAS DISCIPLINAS DE FÍSICA

Dados de identificação

Escola : _____

Série : _____

Você é: Menino Menina

Sobre sua escola

1. O que você acha sobre a estrutura da sua escola?

- a) Muito boa b) Boa c) Mediana d) Ruim e) Muito ruim

2. Sua escola possui laboratório de ciências?

Sim Não

3. Caso sua escola possua laboratório de ciências, o que você acha da estrutura dele?

- a) Muito boa b) Boa c) Mediana d) Ruim e) Muito ruim

4. Caso sua escola possua laboratório de ciências, você tem aulas práticas de física?

Sim Não

Sobre suas aulas de física

1. Você gosta da disciplina de física?

- a) Sim
b) Mais ou menos
c) Não

2. Você gosta das suas aulas de física?

- a) Sim
- b) Mais ou menos
- c) Não

3. Porquê você gosta ou não da sua disciplina de física?

4. Você possui interesse na física apresentada em filmes, séries e documentários?

- a) Sim
- b) Mais ou menos
- c) Não

5. Você gostaria de ter aulas de física referentes à tópicos de física moderna como a teoria da relatividade?

Sim

Não

PESQUISA DE OPINIÃO DOS ALUNOS ACERCA DO CURSO DE RELATIVIDADE PARA O ENSINO MÉDIO

Dados de identificação

Escola : _____

Série : _____

Você é: Menino Menina

Sobre o curso

1. O curso de relatividade atendeu suas expectativas?

Sim

Não

2. Durante o andamento do curso, você sentiu a necessidade de usar conteúdos vistos anteriormente nas disciplinas de física? Em qual parte? Qual conteúdo?

3. O assunto estudado neste curso, na sua opinião, ajudou de alguma maneira nas disciplinas de física? Se sim, fale o motivo.

4. Qual a sua visão sobre a disciplina de física antes de depois deste curso?

5. Depois das aulas do curso de relatividade, você consideraria seguir uma carreira na área científica?

Sim

Não