

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS
EXATAS

BRUNO BIROLI NASSER

Uma introdução a Relatividade Especial utilizando materiais multimídias

SÃO CARLOS 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS
EXATAS

BRUNO BIROLI NASSER

Uma introdução a Relatividade Especial utilizando materiais multimídias

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Exatas da Universidade Federal de São Carlo, para obtenção do título de mestre em Ensino de Ciências Exatas, sob orientação do professor Doutor Adilson J. A. de Oliveira.

SÃO CARLOS 2010

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

N267ir

Nasser, Bruno Birolli.

Uma introdução a relatividade especial utilizando materiais multimídias / Bruno Birolli Nasser. -- São Carlos : UFSCar, 2010.

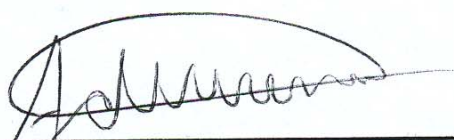
149 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2010.

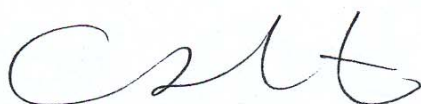
1. Física - estudo e ensino. 2. Ciências exatas. 3. Relatividade (Física). 4. Einstein, Albert, 1879-1955. I. Título.

CDD: 530.07 (20ª)

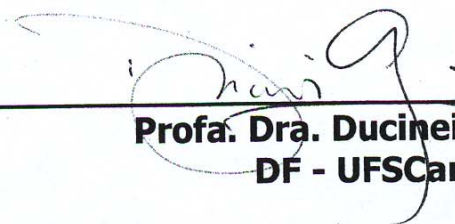
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Adilson Jesus Aparecido de Oliveira
DF - UFSCar



Profa. Dra. Cristina Leite
IF - USP



Profa. Dra. Ducinei Garcia
DF - UFSCar

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Adilson J. A. de Oliveira pela paciência e pelo ensinamento que contribuiu para a minha formação.

Agradeço aos coordenadores do programa, Prof. Dr. Nelson S. Filho e Prof. Dr. Pedro L. A. Malagutti pela oportunidade de cursar o mestrado profissional em ensino de ciências exatas da UFSCar.

Agradeço aos meus familiares pelo apoio e incentivo.

Agradeço aos professores e colegas do programa que foram companheiros durante o curso.

Agradeço a Universidade Camilo Castelo Branco pelo espaço cedido para a realização do curso.

Agradeço ao LABI por disponibilizar o espaço e o material adequado para o desenvolvimento das animações.

Agradeço a Universidade Federal de São Carlos pela oportunidade e pela formação que recebi.

Índice

INTRODUÇÃO.....	7
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA RELATIVIDADE SPECIAL.....	9
CAPÍTULO 2. PLANEJAMENTO DO CURSO E A ELABORAÇÃO DO MATERIAL.....	26
2.1 Apresentação de outros trabalhos.....	26
2.2 Planejamento do curso.....	30
2.3 Elaboração do produto	32
2.3.1 Material do aluno.....	32
2.3.2 Animações.....	49
2.3.3 Material do professor	54
CAPÍTULO 3. APLICAÇÃO DA PROPOSTA.....	55
CAPÍTULO 4. PLANEJAMENTO DO CURSO E A RELAÇÃO COM A TEORIA DE DAVID AUSUBEL.....	60
4.1 Aprendizagem por descoberta.....	60
4.2 Aprendizagem por Recepção.....	62
4.3 Aprendizagem automática.....	63
4.4 Aprendizagem Significativa.....	64
CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	69
5.1 Questionário pré-curso.....	69
5.2 Questionário pós-curso.....	75
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS.....	81
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE A.....	86
APÊNDICE B.....	129
APÊNDICE C.....	142
APÊNDICE D.....	144
APÊNDICE E.....	147

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um curso sobre o tema relatividade especial para o ensino médio, assim como os resultados obtidos com sua aplicação em sala de aula. Como material de apoio a este curso foi preparado um texto de apoio para o aluno, assim como um manual de apoio para o professor. Com a ajuda dos softwares PowerPoint e Isadora foram produzidos, também, materiais multimídias, como animações e simulações interativas com o objetivo de auxiliar no processo da aprendizagem significativa dos conceitos e fenômenos da teoria da relatividade especial.

ABSTRACT

This paper presents the development of a course on the subject of special relativity to high school, and the results obtained with its application in the classroom. As background material for this course was prepared a supporting text for the student, as well as a manual to support the teacher. With the help of the software PowerPoint and Isadora were produced, too, multimedia materials, such as animations and interactive simulations in order to make easier the process of meaningful learning of concepts and phenomena of the theory of special relativity.

INTRODUÇÃO

Vivemos em uma época de grandes desenvolvimentos científicos e tecnológicos e muitas vezes os alunos de ensino médio se interessam sobre temas da física relacionados a esses avanços. Esses temas geralmente estão relacionados a física moderna, como a mecânica quântica e a teoria da relatividade, que foram desenvolvidos por grandes cientistas a partir do início do século 20.

O computador é um grande exemplo de aplicação dessas teorias modernas da física. Dentro dessa máquina encontramos diversos componentes eletrônicos entre eles o chamado transistor, que só pode ser desenvolvido graças aos avanços da física quântica. Outro exemplo é o LHC (Grande Colisor de Hádrons). Esse grande acelerador de partículas está em destaque na mídia e seus princípios de funcionamento levam em conta muitas das teorias que abrangem a física moderna, como a relatividade especial. Outras tecnologias como vídeo games interativos, celulares que filmam e tocam música, e uma vasta opção de entretenimento que a internet oferece, são alguns exemplos que fazem parte do cotidiano dos jovens.

Dessa forma não é fácil para o professor de ensino fundamental ou médio conseguir chamar a atenção de seus alunos para o aprendizado utilizando apenas o giz e a lousa. Sem a motivação dos alunos, ensinar acaba sendo um ato desmotivante para o educador.

Outro fato importante a destacar é que com todo esse fomento tecnológico ao redor da sociedade que vivemos cabe a nós professores de ciências instruímos nossos alunos a alguns conceitos de física moderna que ajudam a compreender grandes ideias do século 21. É sabido que transmitir um conteúdo como física quântica para um aluno de nível de ensino médio não é tarefa fácil e que nem todo conteúdo de física moderna pode ser adaptado para esse nível de ensino. É para estes casos que devemos nos apoiar nas pesquisas em ensino de ciências. Nesses trabalhos há pesquisas, produção materiais e experiências que contribuem para a melhoria da qualidade de aula do professor e conseqüentemente o aprendizado do aluno.

A partir dessa motivação foi desenvolvido um trabalho referente ao tema relatividade especial. A escolha deste tema deve-se principalmente ao fato dele estar muito presente na mídia e que apesar disso não ser amplamente abordado no ensino médio. Assim, esse trabalho dedica-se ao desenvolvimento de materiais que auxiliará o professor a ensinar o conteúdo de relatividade especial. Esses produtos constituem em um material texto com exercícios para o aluno, para estudo de casa ou mesmo para o acompanhamento da aula do professor. Um material de orientação para o professor, que contenha sugestões de aula e de como utilizar as animações. Por fim, um conjunto de animações produzidas em PowerPoint e em um software chamado Isadora que auxiliam os alunos a compreenderem conceitos da relatividade especial, assim como, motivar esses alunos a se interessar pelo assunto.

Acredito que o tema relatividade especial, não é de fato um dos temas da física de maior facilidade de compreensão por parte dos alunos. Essa teoria envolve conceitos como a relatividade do tempo e do espaço que não fazem parte da realidade do estudante. Explicar, por exemplo, para esses estudantes que um passageiro a bordo de um trem mede um certo tempo “ X ” de viagem para ir de uma cidade A até uma cidade B igual ao tempo medido por uma segunda pessoa que observa a viagem fixa em uma das estações não é tão complicado, pois para o aluno esse fato faz parte do senso comum. Mas agora tentar explicar para o aluno que se este trem estiver a uma velocidade próxima a da luz os tempos medidos entre os dois observadores serão diferentes não é tarefa fácil para o professor, pois requer a construção de conceitos que vão de encontro com os já estabelecidos.

No capítulo 1 é apresentada uma introdução a alguns conceitos da teoria da relatividade especial em que o conteúdo do curso foi baseado. O capítulo 2 traz como foi planejado e elaborado o curso, em particular o material do aluno, as animações e o material do professor. No capítulo 3 é descrito como foi aplicado o curso, como foram apresentados os conceitos, as animações e como foram aplicados os exercícios. No capítulo 4 é feita uma relação com o a teoria de David Ausubel com o desenvolvimento do curso. Por fim no capítulo 5 foram apresentadas as respostas dos alunos em relação aos questionários aplicados antes e após a realização do curso. Neste capítulo foi realizado também análises e discussões referente as respostas dos alunos.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA RELATIVIDADE ESPECIAL

Transformações Galileanas

A relatividade é um fenômeno estudado há alguns séculos. Um dos primeiros grandes cientistas que desenvolveram um estudo sobre o assunto foi Galileu Galilei (Bassalo, 1997). Este elaborou equações matemáticas que relacionam as coordenadas, de um determinado evento, em diferentes referenciais inerciais.

Vamos imaginar o sistema de referencia S' , que se move com uma velocidade v em relação há um segundo sistema de referencia S e na direção do eixo x deste ultimo, como mostra a Figura 1:

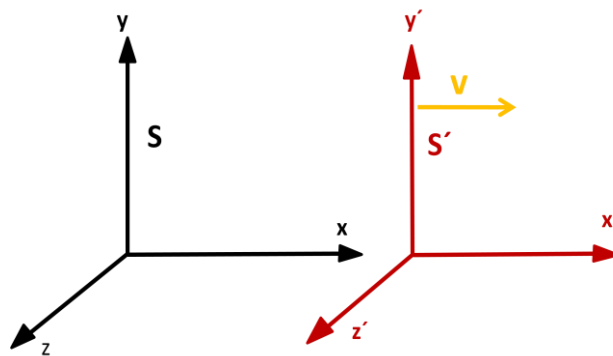


Figura 1: Movimento relativo entre os sistemas S e S' .

Consideremos, agora, que inicialmente para $t=0$ as origens dos sistemas coincidiam. Após certo tempo t , ocorreu um evento num ponto P que apresenta coordenadas x, y e z para o referencial S e $x', y',$ e z' para o referencial S' . A relação entre essas coordenadas é mostrada na Figura 2:

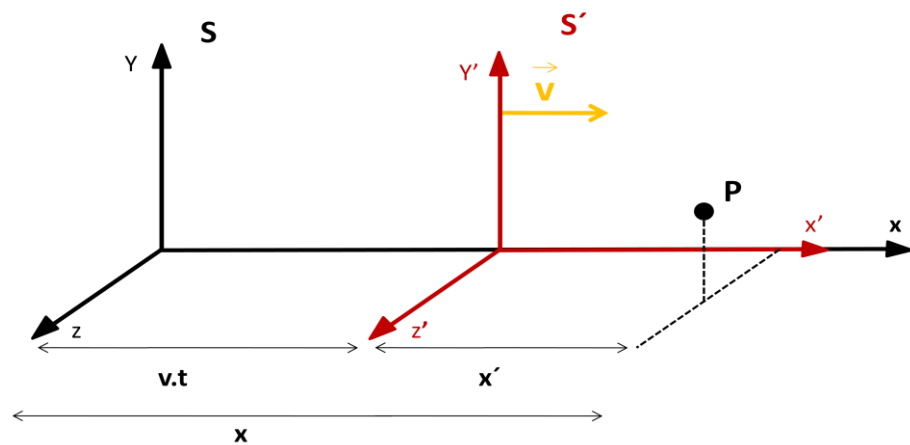


Figura 2: Relação de coordenadas entre o sistema S e S'.

Desta forma podemos escrever:

$$x' = x - vt \quad (1)$$

$$y = y' \quad (2)$$

$$z = z' \quad (3)$$

$$t = t' \quad (4)$$

Essas equações são conhecidas como transformações Galileanas (Resnick, 1971). Elas são válidas para a grande maioria das situações cotidianas. Uma de suas características principais é mostrada pela equação (4). Por ela podemos observar que os tempos medidos entre referências distintos são iguais. Isso porque Galileu afirmava que o tempo é uma grandeza absoluta, isto é, deve ser medido independentemente do referencial. Essas ideias foram mais tarde incorporadas por Isaac Newton em seus estudos.

Porém, em meados do século XIX começaram a surgir algumas incompatibilidades com uma área da física que estava em grande ascensão, o eletromagnetismo.

Equações de Maxwell e ondas eletromagnéticas

O físico e matemático James Clerk Maxwell (1831 – 1879) foi um dos grandes cientistas que contribuiu para o eletromagnetismo (Paulo, 2005). Maxwell unificou as leis do eletromagnetismo em equações conhecidas por equações de Maxwell, apresentadas abaixo na sua forma diferencial:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (8)$$

A primeira equação é a chamada lei de Gauss que determina o fluxo de campo elétrico numa superfície fechada para uma densidade de carga (ρ). A segunda é a lei de Gauss para o magnetismo, que mostra que o divergente do campo magnético é nulo devido ao fato de não existirem monopolos magnéticos. A terceira é a lei de Faraday que mostra que a variação do campo magnético no tempo gera um campo elétrico. Por fim, a quarta equação é conhecida por lei de Ampere-Maxwell. Esta mostra que a variação do campo elétrico no tempo e (ou) uma corrente elétrica produzem campos magnéticos.

Com essas equações podemos tirar algumas conclusões. Para isso, vamos considerar uma região do espaço onde não existam cargas elétricas livres ($\rho=0$) e nem corrente elétrica ($J=0$), como por exemplo, o vácuo. Assim, a equação (5) e a equação (8) tornam-se:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (9)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (10)$$

Tomando, agora, o rotacional na lei de Faraday (equação 7) temos:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B})$$

Em seguida aplicando a relação $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = -\nabla^2 \mathbf{A} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A})$, obtemos:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B})$$

Substituindo as equações (9) e (10) temos:

$$\boxed{\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E} = 0} \quad (11)$$

Analogamente, tomemos o rotacional para a equação (10):

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

Aplicando, agora, a relação $\nabla \times (\nabla \times A) = -\nabla^2 A + \nabla(\nabla \cdot A)$, obtemos:

$$-\nabla^2 B + \nabla(\nabla \cdot B) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times E)$$

Substituindo as equações (6) e (7) temos:

$$\boxed{\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} B - \nabla^2 B = 0} \quad (12)$$

Essas equações diferenciais (11) e (12) correspondem a equação de onda para uma dimensão (Paulo, 2005):

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} f - \frac{\partial^2}{\partial x^2} f = 0 \quad (13)$$

Comparando as equações (12) e (13) obtemos a relação:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (14)$$

Na qual se substituirmos os valores das constantes $\mu_0 \epsilon_0$ obtemos aproximadamente $v=3 \times 10^8$ m/s, que é o mesmo valor da velocidade da luz que se conhecia na época.

Assim, pelas equações de Maxwell, podemos concluir que a natureza da luz é uma onda eletromagnética, pois se obtêm equações diferenciais que mostram que campos elétricos e magnéticos se propagam no vácuo oscilando como uma onda e com uma velocidade igual a da luz. Esses fatos foram mais tarde comprovados experimentalmente por Heinrich Hertz (1857-1894). Este conseguiu provar que as ondas eletromagnéticas, como

rádio e microondas, apresentam propriedades iguais as da luz como reflexão, refração, interferência e difração.

Problemas entre o eletromagnetismo e a física clássica

Apesar dos avanços que a teoria de Maxwell proporcionou, surgiram também, algumas incompatibilidades entre essa teoria eletromagnética e teoria clássica. A primeira seria pelo fato da luz ser uma onda eletromagnética que pode se propagar no vácuo com uma velocidade invariante $v=3 \times 10^8$ m/s, ou seja, independente do referencial. Esse fato contradiz a relatividade galileana, que mostra que a velocidade não pode ser a mesma medida por observadores em diferentes referenciais.

O segundo problema era que, se aplicadas as transformadas de Galileu nas equações de onda (11) ou (12), obtidas pelas equações de Maxwell, para mudança de referencial, essas não se mantinham na forma original, ou seja, obtinha-se para referenciais diferentes efeitos eletromagnéticos diferentes.

Para visualizarmos esse segundo fato, vamos considerar uma equação de onda para o sistema de referência S, com coordenadas x, y, z e t, dada por:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} f + \frac{\partial^2}{\partial y^2} f + \frac{\partial^2}{\partial z^2} f - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} f = 0 \quad (15)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo.

O objetivo é chegar numa equação que dependa apenas de x' , y' , z' , e t' utilizando as transformadas de Galileu. Assim, vamos considerar “f” como sendo uma função $f(x', y', z', t')$ e tomando a sua derivada em função do tempo temos:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial y'} \frac{\partial y'}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial z'} \frac{\partial z'}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial t'} \frac{\partial t'}{\partial t} \quad (16)$$

De acordo com as equações (2) e (3) y' e z' não dependem do tempo logo a equação (16) fica dada por:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial t'} \frac{\partial t'}{\partial t} \quad (17)$$

Aplicando, agora, as equações (1) e (4) temos:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -v \frac{\partial f}{\partial x'} + \frac{\partial f}{\partial t'} \quad (18)$$

Derivando, novamente, em função do tempo, temos:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} - 2v \frac{\partial^2 f}{\partial x' \partial t'} + \frac{\partial^2 f}{\partial t'^2} \quad (19)$$

De acordo com as transformadas de Galileu podemos obter também:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 f}{\partial y'^2} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 f}{\partial z'^2} \end{aligned} \quad (20)$$

Com isso, substituindo as equações (20) e (19) em (15) obtemos:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z'^2} - \frac{v^2}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} + 2 \frac{v}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial x' \partial t'} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t'^2} = 0 \quad (21)$$

Se compararmos (15) com (21) podemos observar que a equação de onda não manteve a forma quando transformada de um sistema de referencial a outro. Isso significa que as transformadas de Galileu e o eletromagnetismo não são compatíveis.

Várias tentativas de explicar essa incompatibilidade surgiram no final do século XIX e início do século XX (Resnick, 1971). Uma das idéias foi postular um referencial absoluto que foi chamado de éter. Este seria um meio que permeia todo o universo e deveria apresentar densidade zero e transparência perfeita. Assim, propagação da luz com uma velocidade invariante “c” seria em relação a este meio. Michelson e Morley foram dois dos cientistas que tentaram detectar esses meio, porém este meio nunca foi detectado e a sua hipótese caiu por terra.

Um dos cientistas que obtiveram algum sucesso foi o físico Hendrik Lorentz (1853-1928). Este por sua vez, desenvolveu de maneira empírica, equações que são compatíveis com a teoria eletromagnética, que são conhecidas por transformações de Lorentz. Apesar dessas transformações encaixarem muito bem nas equações do eletromagnetismo para mudança de referencial, Lorentz não sabia dar uma interpretação física para elas. Com isso a dúvida ainda persistia na comunidade científica da época e só foi respondida por Albert Einstein (1879-1955) em 1905.

Os postulados da teoria da relatividade especial e suas consequências.

Albert Einstein tinha o costume de fazer experimentos mentais. Em um deles, como descrito no livro, Hawking 2005, Einstein considerou a ação eletrodinâmica recíproca entre um ímã e um condutor. Ele sabia que o fenômeno observável dependia somente do movimento relativo do condutor e do ímã e que o movimento dependia do ponto de vista do observador. De fato se o ímã está em movimento e o condutor em repouso, surgirá um campo elétrico, próximo ao ímã, que produzirá corrente elétrica no condutor. Se colocar agora o ímã

em repouso e o condutor em movimento, não surgirá um campo elétrico próximo ao ímã e conseqüentemente, não deveria aparecer uma corrente elétrica no condutor. Porém no condutor é medido sim uma corrente elétrica, de mesma intensidade e o mesmo percurso da descrita anteriormente.

Exemplos desse tipo intrigavam Albert Einstein e o levaram a desenvolver a teoria da relatividade especial.

Essa teoria teve início com a publicação de dois artigos por Albert Einstein em 1905, “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento” e “A Inércia de um corpo Depende do Seu Conteúdo Energético?” (Hawking, 2005). No primeiro deles Einstein enuncia dois postulados:

1. As leis da física são iguais em qualquer referencial inercial, não existe nenhum sistema preferencial;
2. A velocidade da luz no vácuo tem sempre o mesmo valor c , independentemente do movimento de sua fonte.

O primeiro postulado afirma que não pode haver leis da física ocorrendo de forma diferente para referenciais diferentes. Ele generaliza o princípio da relatividade de Galileu, que afirmava que as leis da mecânica devem ser iguais para qualquer referencial.

Com o segundo postulado, Einstein vem a afirmar que a luz é algo especial e que somente ela deverá apresentar uma velocidade invariante, ou seja, apresenta o mesmo valor c independente da velocidade da sua fonte. Por esse postulado podemos obter conseqüências interessantes como o fato do tempo e do espaço ser relativo, contrário do que afirmava Galileu.

Podemos demonstrar a relatividade dessas grandezas deduzindo as equações de transformações de Lorentz, expostas a seguir.

Vamos considerar um evento observado por um referencial $S(x, y, z, t)$ e por um segundo referencial $S'(x', y', z', t')$, tal que $x'=x'(x, y, z, t)$, $y'=y'(x, y, z, t)$, $z'=z'(x, y, z, t)$, $t'=t'(x, y, z, t)$. Assim, considerando a hipótese de homogeneidade temos as relações lineares:

$$x' = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14}t \quad (22)$$

$$y' = a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24}t \quad (23)$$

$$z' = a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z + a_{34}t \quad (24)$$

$$t' = a_{41}x + a_{42}y + a_{43}z + a_{44}t \quad (25)$$

Para simplificar a matemática vamos considerar que para $t=t'=0$ as origens dos sistemas S' e S se coincidam e que S' se move somente ao longo do eixo x de S , com uma velocidade v . Isso significa que as mudanças só vão ocorrer entre as coordenadas x e x' e t e t' . Assim, as equações (23) e (24) tornam-se

$$y' = y \quad (26)$$

$$z' = z \quad (27)$$

Para a equação (25) por simetria vamos considerar que t' não depende de y e z . Do contrário, relógios colocados simetricamente ao longo do plano y - z discordariam quando observados de S' . Portanto temos:

$$t' = a_{41}x + a_{44}t \quad (28)$$

Para x' sabemos que este se move em direção a x , tal que, quando $x'=0$ então $x=vt$. Assim uma solução correta é da forma:

$$x' = a_{11}(x - vt) \quad (29)$$

Resta agora determinarmos os coeficientes a_{11} , a_{41} e a_{44} . Para isso vamos imaginar uma onda eletromagnética esférica partindo da origem de S , na qual coincide com S'

neste momento. De acordo com o segundo postulado de Einstein, a onda propaga-se com uma velocidade c em todas as direções para os dois sistemas de referencia. Sua propagação é então descrita pelas equações abaixo:

$$x^2+y^2+z^2=ct^2 \quad (30)$$

$$x'^2+y'^2+z'^2=ct'^2 \quad (31)$$

Substituindo as equações (26), (27), (28) e (29) em (31) temos:

$$(a_{11}^2-c^2a_{41}^2)x^2+y^2+z^2-2(a_{11}v+c^2a_{41}a_{44})xt=(c^2a_{44}^2-a_{11}^2v^2)t^2 \quad (32)$$

Comparando (32) com (30) temos o sistema:

$$a_{11}^2-c^2a_{41}^2=1$$

$$a_{11}^2v+c^2a_{41}a_{44}=0$$

$$c^2a_{44}^2-a_{11}^2v^2=c^2$$

Resolvendo o sistema, encontramos:

$$a_{11} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$a_{44} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (33)$$

$$a_{41} = -\frac{v}{c^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Substituindo as equações (33) em (28) e (29) temos:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (34)$$

$$y' = y \quad (35)$$

$$z' = z \quad (36)$$

$$t' = \frac{t - \left(\frac{v}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (37)$$

Essas são as equações de transformação de Lorentz que generalizam as de Galileu. Se as analisarmos, para baixas velocidades $v \ll c$ essas equações de Lorentz se transformam nas de Galileu.

Por essas equações de transformação pode-se demonstrar que para as medidas de comprimento e intervalo de tempo são relativos para referenciais diferentes.

Imagine que um evento é observado pelo referencial S' em um instante de tempo t_1' . Para o referencial S o instante de tempo será t_1 , tal que a relação entre esses dois instantes de tempo é dado pela equação (37):

$$t_1' = \frac{t_1 - \left(\frac{v}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Imagine agora que ocorra um segundo evento em um instante de tempo t_2' para o referencial S' e t_2 para o referencial S , tal que a relação entre esse tempos também é dada pela equação (38):

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

Assim o intervalo de tempo ocorrido entre os eventos é dado por:

$$t_2' - t_1' = \frac{t_2 - \left(\frac{v}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{t_1 - \left(\frac{v}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Que nos fornece:

$$t_2' - t_1' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (t_2 - t_1)$$

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

$$\Delta t' = \gamma \Delta t \quad (38)$$

Esta equação relaciona o intervalo de tempo medido pelo referencial S' ($\Delta t'$) com o intervalo de tempo medido pelo referencial S (Δt).

O comprimento de um corpo quando medido por um referencial que observa este corpo em repouso é chamado de comprimento próprio. Para um segundo referencial que observa este corpo se movimentar com uma velocidade v , observará o corpo com um comprimento menor se comparado ao comprimento próprio. Para demonstrar essa relação

entre o comprimento medido por referenciais diferentes imagine, agora, uma barra deitada ao longo do eixo x' do referencial S' . Vamos considerar, também, que as extremidades da barra se encontram nas posições x_1' e x_2' e que esta se encontra em repouso em relação a esse sistema de referencia S' . Assim, $x_2' - x_1'$ é o comprimento próprio do corpo e será representado por L_0 . Para o referencial S que observa a barra com uma velocidade v medirá as extremidades da barra nas posições x_1 e x_2 . Assim, para este referencial o comprimento da barra será dado por $x_2 - x_1$ e representaremos por L .

Aplicando a equação (34) para cada posição temos:

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{x_1 - vt_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

O comprimento da barra no sistema S é a distancia das extremidades x_2 e x_1 da barra em movimento, medidas no mesmo instante naquele sistema. Assim, com $t_2=t_1$, obtemos:

$$x_2' - x_1' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (x_2 - x_1)$$

Substituindo L , L_0 e γ temos:

$$L = \frac{L_0}{\gamma} \quad (39)$$

Esta equação mostra que como γ é maior que 1 logo L é menor do que L_0 . Para esse fenômeno dá-se o nome de contração do espaço.

Essas correções relativísticas também são aplicadas para a inércia do corpo, conhecida como massa. Um corpo em repouso deve apresentar uma massa chamada de massa de repouso m_0 . Porém, se este corpo começa a se movimentar, a sua inércia passa a mudar de acordo com a expressão:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (40)$$

Onde m é conhecida por massa relativística. De acordo com esta equação a massa do corpo vai aumentando conforme aumenta-se a velocidade do corpo.

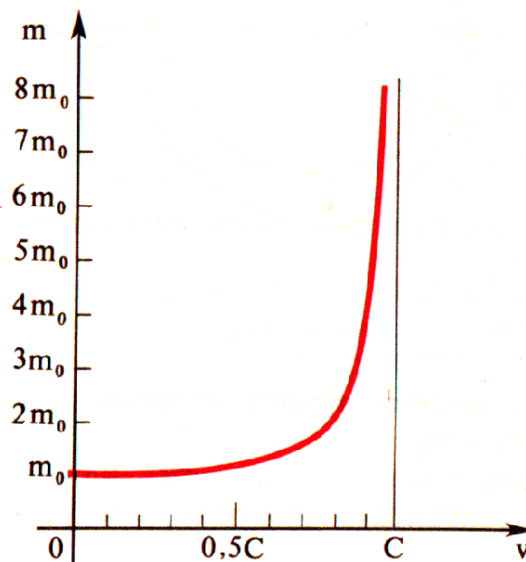


Figura 3: Gráfico da massa em função da velocidade de um corpo

(Fonte: Google imagens)

Para baixas velocidades podemos observar que $m=m_0$, como diz a teoria clássica

Outra consequência importante dessa teoria é o fato da inércia do corpo estar relacionado com o seu conteúdo energético. Einstein publicou esse estudo no artigo: “A Inércia de um Corpo Depende do Seu Conteúdo Energético?” (Hawking, 2005). Nele Einstein deduz uma equação que mostra que a massa e a energia de um corpo são equivalentes.

Para demonstrar essa equação devemos lembrar o teorema da energia cinética dado por:

$$K = \int_{v=0}^{v=v} F. dx \quad (41)$$

Aplicando a segunda lei de Newton temos:

$$K = \int_{v=0}^{v=v} F. dx = \int m \frac{dv}{dt} dx = m \int_0^v v dv$$

Que nos fornece:

$$K = \frac{mv^2}{2}$$

Essa é a expressão clássica para a energia cinética de um corpo, pois de acordo com essa teoria a massa é sempre constante. Agora vamos resolver novamente a equação (41) para o caso relativístico, onde a massa agora é dada pela equação (38). Aplicando novamente a segunda lei de Newton na equação (41) temos:

$$K = \int_{v=0}^{v=v} F. dx = \int \frac{dp}{dt}. dx = \int d(mv)v$$

Que nos leva há:

$$K = \int_{v=0}^{v=v} (mv dv + v^2 dm) \quad (42)$$

Agora modificando a equação (35) podemos escrever:

$$mc^2 - v^2 m^2 = m_0^2 c^2$$

Diferenciando a equação acima temos:

$$(mvdv+v^2dm)=c^2dm \quad (43)$$

Substituindo (43) em (42) temos:

$$K = \int_{v=0}^{v=v} c^2 dm = c^2 \int_{m_0}^m dm$$

Assim obtemos:

$$K = mc^2 - m_0c^2$$

Vamos tomar $E=mc^2$, onde E é a energia total do corpo. Por fim temos:

$$E = m_0c^2 + K \quad (44)$$

Com essas novas equações e conceitos, Einstein elaborou uma nova teoria que veio complementar a teoria clássica de Galileu e Newton para altas velocidades.

CAPÍTULO 2. PLANEJAMENTO DO CURSO E A ELABORAÇÃO DO MATERIAL

2.1 Apresentações de outros trabalhos

Realizamos uma busca de Dissertações, Teses e artigos que abordassem o assunto da física moderna no ensino médio. Foi possível verificar que não havia muitos trabalhos disponíveis sobre este tema.

A seguir, passaremos a descrever os principais trabalhos analisados.

Um dos trabalhos analisados foi o artigo “Relatividade no ensino médio: o debate em sala de aula” (Coimbra, 2007). Neste artigo os autores descrevem parte de uma sequência didática desenvolvida com alunos do primeiro ano do ensino médio na qual foi trabalhado alguns conceitos da relatividade especial e da relatividade clássica do movimento.

O artigo começa fazendo uma discussão sobre alguns trabalhos que grandes cientistas haviam feito sobre o conceito de movimento. O primeiro a ser citado é Zenão de Eléia, que pretendeu demonstrar, em seu paradoxo dos bastões, que a relatividade do movimento é uma impossibilidade lógica. O estudo de Aristóteles também é apresentado. Segundo ele, os objetos eram constituídos de quatro elementos (terra, fogo, ar e água) e que cada objeto tende a se mover de forma a retornar ao seu lugar natural, como exemplo, a fumaça se espalha no ar porque ela pertence ao elemento “ar”. Essas ideias foram questionadas por outros cientistas como Galileu Galilei. Ele estudou o estado de repouso e o de movimento retilíneo uniforme de um corpo e afirmava que não existe distinção entre esses estados. Essa ideia ficou conhecida como princípio da relatividade e foi um dos tópicos que os autores escolheram para ensinar para os alunos. O texto faz também uma abordagem das incompatibilidades que esses estudos clássicos apresentam com a teoria eletromagnética de Maxwell e que essas incompatibilidades levaram ao desenvolvimento da teoria da relatividade especial.

Feito essa apresentação histórica, o artigo começa a descrever a metodologia utilizada para explicar para os alunos de uma escola pública da cidade de Florianópolis os estudos de Galileu e as incompatibilidades com a teoria de Waxwell. Primeiro foi proposto para os alunos pensarem sobre uma situação hipotética em que uma pessoa encontra-se dentro da carroceria fechada de um caminhão que se move com velocidade constante de 10m/s em

relação ao solo. Em seguida, os alunos foram questionados se seria possível para essa pessoa, concluir se está ou não em movimento sem olhar para fora.

Com essa situação problema proposta, o texto apresenta vários exemplos que foram adotados para a discussão desse fenômeno. Em um dos exemplos o professor propõe uma situação na qual se encontra em pé no caminhão e que num determinado momento deixa cair o seu celular. Com isso pergunta como ele veria a queda deste celular e onde este iria cair.

O texto traz outros exemplos para a discussão da relatividade do movimento, seguidos dos depoimentos dos alunos que tentavam explicar as situações propostas.

Outro trabalho analisado foi a dissertação “Uma introdução conceitual a relatividade especial no ensino médio” (Castilho, 2005). Este trabalho teve como proposta elaborar um curso introdutório a relatividade especial para alunos de ensino médio fazendo uso de recursos computacionais como animações produzidas pelo software flash.

De início o texto faz uma breve revisão de outros trabalhos relacionados ao ensino da relatividade especial e ao uso de novas tecnologias que auxiliam o aprendizado dos conceitos da física.

Para dar início a produção a autora aplica um formulário aos seus alunos para um levantamento preliminar de dados, na qual seria analisado qual o conhecimento que os alunos apresentam em relação ao assunto, o nível de interesse e as fontes de onde os alunos obtiveram as informações. Com esses dados a autora deu início a montagem de um curso cujos produtos são um material texto e animações em flash. O curso foi dividido em três tópicos:

- *Etapa 01: Histórico da Relatividade Especial e retomada de conhecimentos relativos a relatividade clássica*
- *Etapa 02: Os postulados da Relatividade Especial e as consequências da teoria*
- *Etapa 03: A relação massa e energia e o paradoxo dos gêmeos*

Na primeira etapa a autora aborda alguns aspectos bibliográficos de Albert Einstein, assim como, algumas incompatibilidades que a teoria eletromagnética de Maxwell apresentava com a visão de Isaac Newton, como por exemplo, a questão do tempo ser

absoluto. Fala-se também sobre a importância do conceito de referencial e sistema de coordenadas para o estudo de um determinado fenômeno.

A ideia principal deste tópico, como relatado pela autora, é de facilitar a compreensão de como deu-se o início da relatividade especial de Albert Einstein.

“...em relação à concordância das teorias da Mecânica Clássica de Newton e do Eletromagnetismo de Maxwell com a Relatividade Clássica, pretendíamos criar um ambiente adequado em que os alunos elaborassem seus esquemas mentais num processo de assimilação, de forma a favorecer uma introdução correta dos postulados da Relatividade Especial.”

Castilho (2005)

Na etapa dois, o curso trata dos postulados da relatividade especial e das consequências que esses postulados trazem como a dilatação do tempo e a contração do espaço. Para esse desenvolvimento foi produzido no curso algumas animações que facilitam a compreensão do aluno em relação ao assunto. Como exemplo, para o estudo do conceito de dilatação temporal foi produzida uma animação que simula um relógio de luz em repouso e movimento.

Na etapa três, a autora trata do tema relação massa-energia dado pela equação $E=mc^2$. Foi criada uma animação onde é deduzida essa famosa equação da física.

Por fim, o curso visava a aplicação de uma avaliação para analisar a compreensão dos alunos em relação a todo conteúdo apresentado.

Foi analisada uma segunda dissertação de mestrado “O ensino da teoria da relatividade especial no nível médio: uma abordagem histórica e conceitual.” (Wolff, 2005). Este trabalho relata uma experiência de ensinar o conteúdo de relatividade para alunos do terceiro ano do ensino médio.

Nesta proposta o autor não conta com a produção de animações. Foi elaborado agora um material texto para o aluno e um material texto de apoio para o professor. O material texto do aluno é dividido em vários capítulos:

➤ *Pensamento aristotélico e a relatividade Galileana.*

- *Isaac Newton e o movimento relativo dos corpos.*
- *Histórico da eletricidade e magnetismo até a unificação.*
- *Problema do eletromagnetismo com a mecânica clássica e a origem da relatividade especial.*
- *Relatividade da simultaneidade.*
- *Dilatação temporal e contração do espaço.*
- *Adição de velocidades.*
- *Energia relativística.*
- *Paradoxo dos gêmeos.*
- *Relatividade geral.*

Neste trabalho é relatado como foi aplicado esses temas em sala de aula e com a aplicação de questionários, foi analisado como foi assimilado este conteúdo por parte dos alunos.

Em todos esses trabalhos podemos perceber que houve, antes de introduzir os conceitos da relatividade especial, uma abordagem histórica que vai desde os estudos sobre o movimento realizados pelos gregos, passando pela relatividade Galileana e chegando até a física do eletromagnetismo. Com essa abordagem no início dos cursos, podemos perceber, que cria-se um ambiente propício para introduzir os conceitos que envolvem a teoria da relatividade especial, pois esta surge justamente com o propósito de explicar essas incompatibilidades entre o eletromagnetismo e a física clássica. Essa experiência foi bastante útil para a montagem da estrutura no nosso curso, apresentada no capítulo a seguir.

Outras experiências também foram levadas em consideração, como a aplicação de questionários antes e após a aplicação do curso, propostos pelas duas dissertações (Wollf,2005) e (Castilho, 2005). Os exemplos do movimento relativo de Galileu do nosso curso também foram baseados nos exemplos apresentados pelo artigo (Coimbra, 2007).

2.2 Planejamento do curso

O curso desenvolvido neste trabalho é referente a alguns tópicos da teoria de relatividade especial (TRE). Como a abordagem da TRE apresentada no capítulo 1 não é adequada para o ensino médio, houve uma preocupação em planejar e adaptar este conteúdo para este nível de ensino.

Com base nos trabalhos apresentados no capítulo anterior, inicialmente foi idealizado quais seriam os conceitos interessante para se desenvolver com o aluno. Os conteúdos da TRE escolhidos foram os conceitos que podemos encontrar com mais facilidade na mídia, como a relatividade do tempo, do espaço e a famosa equação $E=mc^2$. Foram escolhidos também outros tópicos que acreditamos ser importante para o aluno e que não seja de difícil compreensão, como a relatividade da simultaneidade e os postulados da relatividade especial.

Como experiência desses trabalhos do capítulo anterior, foi pensado, também, em fazer uma abordagem histórica sobre outros estudos clássicos da relatividade, realizados antes de Albert Einstein, e sobre alguns tópicos do eletromagnetismo, pois vão auxiliar a compreender melhor alguns temas da TRE.

Para isso foram analisados alguns artigos que auxiliaram no desenvolvimento desses tópicos. Para a base histórica estudamos o artigo (Bassalo, 1996), que aborda os estudos realizados pelo filósofo grego Zenão e a relatividade clássica de Galileu Galilei. Para os tópicos do eletromagnetismo foram estudados livros como (Halliday, 2003) e (Resnick, 1971). Para os problemas entre a teoria eletromagnética e a física clássica e como se iniciou a relatividade especial as referencias foram (Villani, 1985), (Renn, 2004).

Para discutir os tópicos da relatividade do tempo, do espaço e a simultaneidade foram utilizados livros de ensino superior como (Resnick, 1971) e (Tipler, 2001) e livros de ensino médio como (Hewitt, 2002) e (Torres, 2001). Os dois primeiros foram utilizados principalmente para uma análise matemática desses conteúdos. Já os dois últimos para uma análise mais conceitual dos temas.

Para o estudo da equação $E=mc^2$ foram analisados os artigos (Hobson, 2005) e (Vieira, 2004). Esses trazem o significado desta equação e algumas formas de deduzi-la para vários níveis. Como decidimos que a proposta deste trabalho seria introduzir de maneira mais

conceitual os fenômenos relacionados a TER, optamos apenas por trabalhar com o aluno o significado desta equação sem uma dedução formal.

Assim o curso foi estruturado da seguinte forma. Inicialmente, por ficar mais próximo do conhecimento que o aluno já apresenta, seria realizada uma abordagem histórica sobre a relatividade do movimento estudados por Zenão e Galileu. O próximo passo é apresentar alguns tópicos do eletromagnetismo e como algum desses conceitos eram incompatíveis com a teoria clássica de Galileu. Mostrar, também, para o aluno que essas incompatibilidades levaram Einstein aos postulados da TER e suas consequências. Por fim, apresentar a equação $E=mc^2$ e seu significado.

Para a apresentação desses conteúdos o curso contou com animações desenvolvidas em diversos softwares para auxiliar a aprendizagem do aluno. A figura abaixo ilustra um mapa conceitual sobre o planejamento do curso.

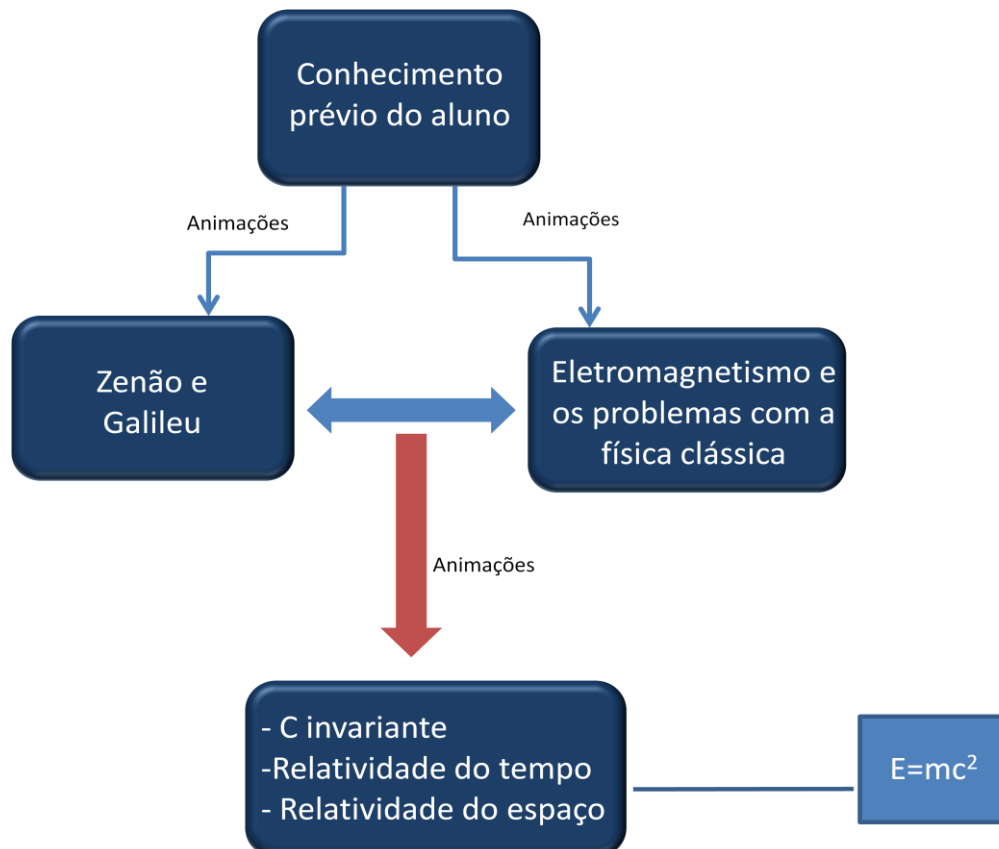


Figura 4: Mapa conceitual ilustrando o planejamento do curso.

2.3 Elaboração do produto

2.3.1 Material do Aluno

No anexo A, é apresentado o material texto do aluno onde se encontra todo o conteúdo, que foi estudado durante o curso. Este material texto foi elaborado com o objetivo de auxiliar o entendimento do aluno durante aula do professor e nos estudos de casa.

Foram desenvolvidos oito tópicos que estão diretamente ou indiretamente ligados a teoria da relatividade especial. Cada um desses tópicos apresenta um papel fundamental para a compreensão do conteúdo pelo aluno. A seguir é apresentado como foi desenvolvidos os principais pontos de cada tópico.

Filósofo grego Zenão

No início da produção deste material houve uma preocupação em elaborar um texto que aborde não só os conceitos relacionados a TRE, mas também, apresentar uma base histórica com outros conceitos e cientistas que também estão relacionados a relatividade e que ajudam a explicar como surgiram os conceitos desenvolvidos por Einstein na relatividade especial publicada em 1905.

Assim, o curso tem início com o tópico sobre o filósofo grego Zenão e o estudo que ele realizou sobre o movimento relativo dos corpos. A fonte de referência foi o artigo de Bassalo (1996). O objetivo é mostrar ao aluno que estudos sobre relatividade de fato não iniciaram com Albert Einstein no início do século vinte. O filósofo grego Zenão, pelo que se têm registros, foi o primeiro a estudar o movimento relativo dos corpos.

Zenão considerava que se dois bastões (A,B) de iguais tamanhos se deslocarem com a mesma velocidade e em sentidos opostos em relação a um terceiro (C) mantido fixo, então o observador em A (ou B) vê, num mesmo intervalo de tempo, um deslocamento do

bastão B (ou A) duas vezes maior que o do bastão C. Para exemplificar essa relatividade do movimento, no material do aluno foram criadas ilustrações indicadas pelas figuras 5 e 6.

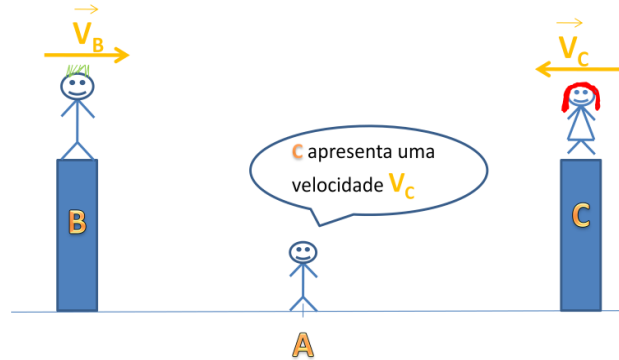


Figura 5: Ilustração do observador A vendo o movimento do bastão C.

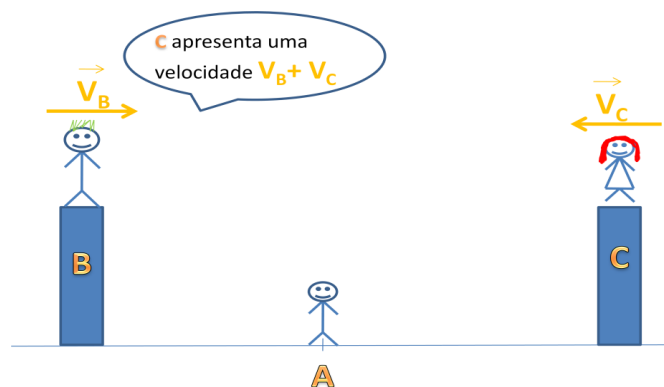


Figura 6: Ilustração do observador B vê o movimento do bastão C.

A relatividade de Galileu Galilei

Este tópico foi elaborado para apresentar ao aluno os estudos de Galileu sobre a relatividade do movimento. A compreensão desses estudos, conhecidos como relatividade Galileana, é de fundamental importância, pois serão comparados com os conceitos da TRE.

O primeiro estudo de Galileu e a ser apresentado no material do aluno é sobre referencial inercial. Galileu percebeu que a escolha de um referencial é muito importante para o movimento e classificou essas referências em dois tipos: inercial, referencial que não se encontra acelerado e referencial não-inercial, que se encontra acelerado. Para isso foi produzido a ilustração indicada na figura 7, que apresenta alguns exemplos de referenciais inerciais e não inerciais.

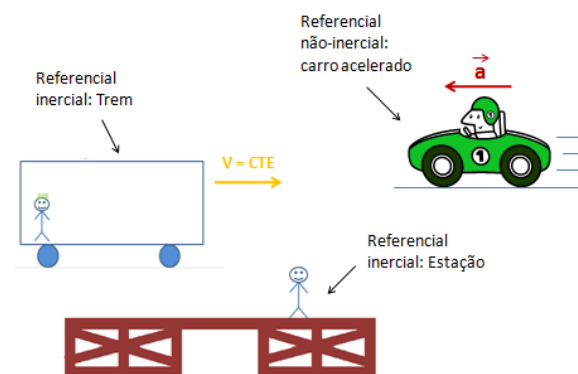


Figura 7: Exemplo de referenciais inerciais e não inerciais

Outro conceito apresentado de Galileu é que a trajetória que um corpo sofre ao realizar um movimento pode ser observada de forma diferente por observadores diferentes. As figuras 8 e 9 ilustram esse fenômeno.

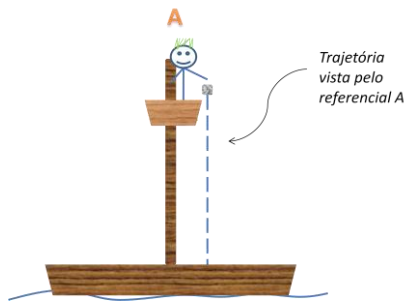


Figura 8: Ilustração da trajetória observada pelo referencial A.

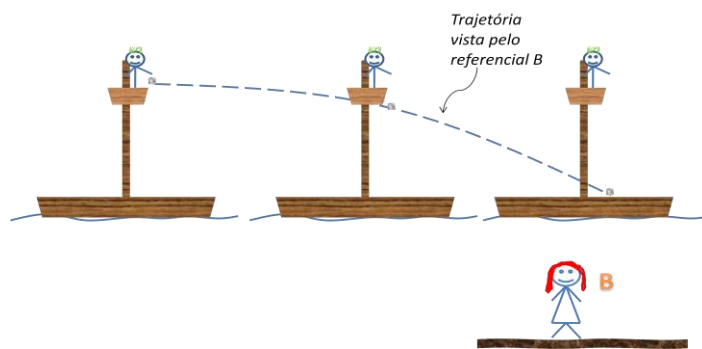


Figura 9: Ilustração da trajetória observada pelo referencial B.

Galileu relacionou, também, os fenômenos que ocorrem em referenciais inerciais distintos de maneira matemática. Para isso foram criadas as figuras 10a e 10b.

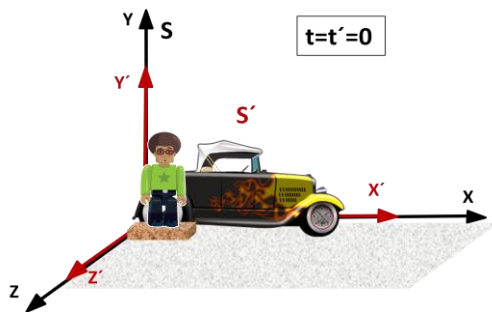


Figura 10a: Posição do automóvel para $t=0$

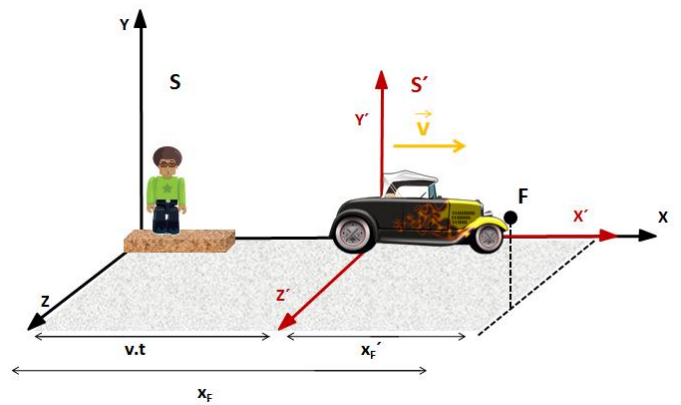


Figura 10b: Posição do ponto F em um determinado tempo t

Com essas ilustrações podemos mostrar claramente que:

$$x_F = x_F' + vt$$

$$y_F = y_F'$$

$$z_F = z_F'$$

$$t = t'$$

Essas relações são conhecidas como transformações galileanas, e permitem descrever o movimento em dois referenciais distintos.

Por fim, para o estudo da velocidade relativa de Galileu, foi desenvolvida a figura 13. Esta mostra que o deslocamento sofrido pelo carro B em relação ao carro A (ΔS_{BA}) é diferente do deslocamento do carro B sofrido em relação ao menino (ΔS_B).

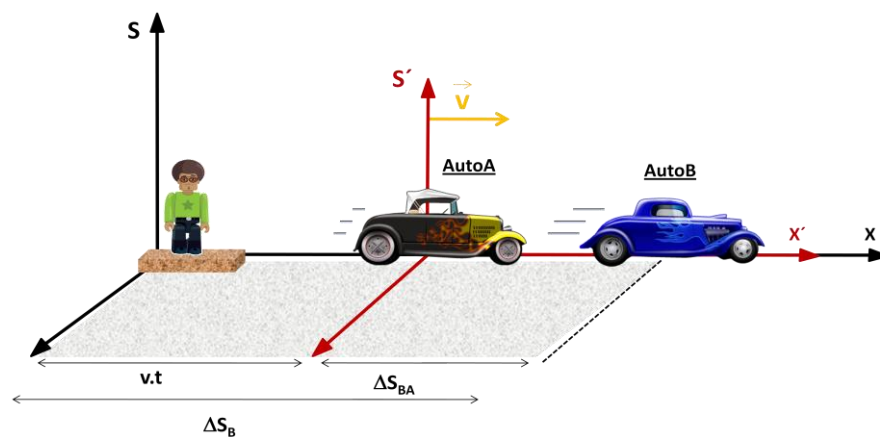


Figura 11: Deslocamento sofrido pelo carro B observado pelo referencial S e S'.

Com essa figura podemos demonstrar a seguinte relação:

$$\Delta S_B = vt + \Delta S_{BA}$$

Dividindo pelo tempo obtemos:

$$\mathbf{v}_B = \mathbf{v} + \mathbf{v}_{BA}$$

Essa é a equação matemática que relaciona as velocidades medidas por referenciais diferentes.

Movimento e os fenômenos eletromagnéticos

Este tópico tem a função de introduzir ao aluno alguns dos motivos que levaram Albert Einstein modificar a teoria clássica de Galileu e desenvolver a relatividade especial.

Para isso, foi desenvolvido um texto que faz uma abordagem histórica sobre o eletromagnetismo e que aborda grandes descobertas como a Lei de Faraday e as equações de Maxwell.

Em seguida o texto trata de discutir algumas das consequências das equações de Maxwell e relacioná-las com a relatividade galileana, para que o aluno possa, assim, identificar as incompatibilidades que essa nova teoria eletromagnética apresenta com a teoria clássica.

Essas incompatibilidades apontadas pelo texto servirão como ancora para explicar o porquê do surgimento da relatividade especial e criarão certo conflito na estrutura de pensamento do aluno, conflitos que serão resolvidos com a apresentação dos próximos tópicos.

Einstein e seus postulados

Hoje em dia grande parte dos estudantes do ensino médio já ouviu falar sobre Albert Einstein e a sua teoria da relatividade. Porém é difícil encontrar um aluno que saiba descrever quem foi de fato esse cientista e os seus outros grandes feitos.

Assim, este tópico foi desenvolvido para apresentar ao aluno uma rápida biografia desse grande cientista e como se deu início os trabalhos sobre relatividade especial.

O texto aborda que Einstein estava familiarizado desde cedo com os fenômenos eletromagnéticos e que sabia dos problemas que essa parte da física apresentava em relação a física clássica de Galileu e Newton.

De fato, Einstein percebeu que a luz deve ser tratada como algo especial e que somente ela deverá apresentar uma velocidade invariante para qualquer referencial que observe a sua propagação.

O texto destaca também que pelo fato da velocidade da luz ser invariante, terá como consequência a relatividade do tempo e do espaço. Com isso o aluno deverá compreender que toda uma nova teoria é desenvolvida para explicar os fenômenos que estão relacionados a altíssimas velocidades.

Relatividade do Tempo

A este ponto do curso o aluno já deverá ter entendido que para fenômenos relacionados a pequenas velocidades, que ocorre no seu dia-dia, são válidas as ideias da física clássica e que para fenômenos relacionados a velocidades próximas da luz serão válidas a teoria da relatividade.

O material aborda que pelo fato da velocidade da luz ser constante no vácuo então o tempo medido entre um observador e outro é diferente. Para isso foram desenvolvidas figuras que ajudam o estudante a visualizar este fenômeno.

Primeiro foi baixado o vídeo do endereço: <http://www.youtube.com/watch?v=KHjpBjgIMVk>, e selecionados algumas imagens, indicadas pelas figuras 12a e 12b.



Figura 12a: Duas naves juntas no espaço



Figura 12b: Deslocamento do pulso de luz disparado por uma das naves

Em seguidas essas imagens foram editadas no software PowerPoint, onde foi adicionado personagens e textos explicativos como mostram as figuras 13a e 13b.

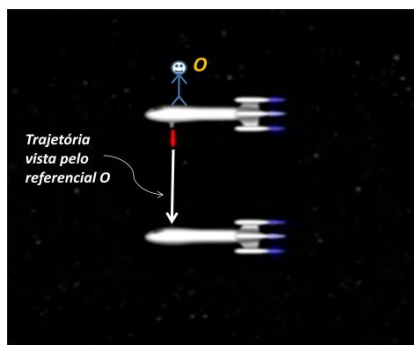


Figura 13a: Trajetória do pulso de luz observada por O

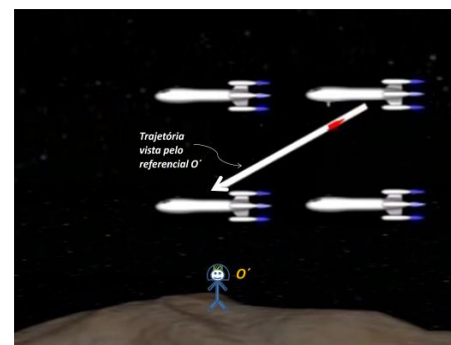


Figura 13b: Trajetória do pulso de luz observada por O'

Por essas ilustrações, o aluno poderá compreender que o espaço percorrido pelo pulso de luz observado pelo referencial O é diferente se comparado com o referencial O'.

Assim, como a velocidade da luz é medida de forma igual para ambos os referenciais, então o tempo medido deverá ser diferente.

Da mesma forma foram produzidas outras figuras que auxiliam na dedução da equação que relaciona esses tempos medidos para referenciais diferentes.

Utilizando a figura 14b novamente, foi desenhado com a ajuda do programa PowerPoint um triângulo retângulo que relaciona o deslocamento que pelo pulso de luz sofre em relação ao referencial O, dado por $c.\Delta t$, com o deslocamento que o pulso de luz sofre em relação ao referencial O', dado por $c.\Delta t'$, como mostra a figura 14.

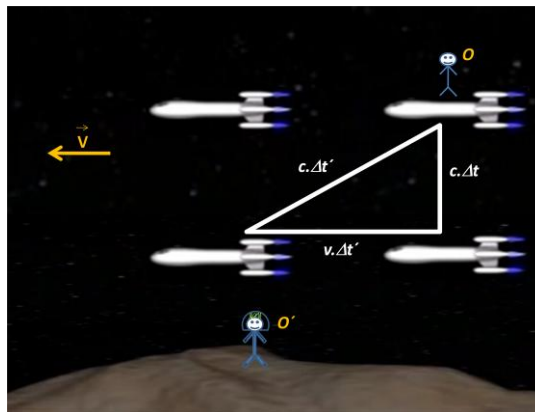


Figura14: Relação entre os espaços percorridos pelo pulso de luz observados pelo referencial O e O'.

A partir dessa geometria pode-se deduzir para o aluno, utilizando o teorema de Pitágoras, a seguinte relação:

$$\Delta t' = \gamma.\Delta t \quad (45)$$

Onde é apresentado o chamado fator de Lorentz (γ), o fator que relaciona os tempos medidos por diferentes observadores.

Após essa dedução o texto mostrará que o fator γ sempre é maior ou igual a 1. Essa abordagem servirá para que o aluno compreenda que para γ maior do que 1 então o

intervalo de tempo $\Delta t'$ deverá ser maior do que Δt , e que para esse fenômeno dá-se o nome de dilatação dos tempos.

Para que o aluno compreenda melhor as idéias por traz do fator de Lorentz (γ) o texto traz também, na página 27 do material do aluno, um gráfico mostrando como este fator γ se comporta para diferentes velocidades e que este diverge quando a velocidade de um referencial tende a velocidade da luz. Essa abordagem identifica para o estudante que nenhum corpo poderá atingir a velocidade da luz a não ser a própria luz.

Relatividade do Espaço

Neste tópico o objetivo foi identificar e compreender o conceito de que o espaço medido por um determinado referencial é diferente do espaço medido por outro referencial.

De maneira mais específica, o estudante deverá compreender que o comprimento de um corpo medido quando este se encontra em movimento em relação a um observador é sempre menor do que o comprimento medido quando este corpo se encontra em repouso, o chamado comprimento próprio, e que a esse fenômeno dá-se o nome de contração do espaço.

Para este estudo o texto se apoiará em uma nova ilustração produzida da mesma maneira como no tópico anterior (Relatividade do tempo). Uma imagem é retirada do vídeo baixado da internet (<http://www.youtube.com/watch?v=KHjpBjgIMVk>) como indica a figura 15.

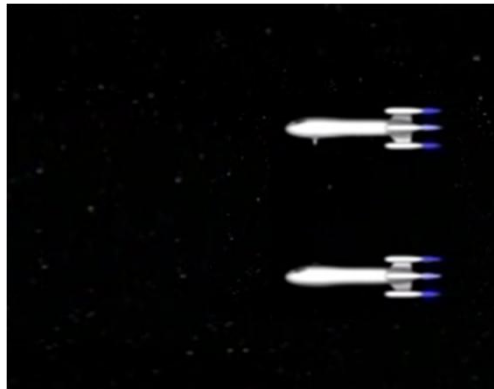


Figura 15: Vídeo das naves viajando juntas no espaço

Em seguida com a ajuda do PowerPoint, foram adicionados elementos que ajudam a visualizar o conceito de comprimento próprio. O comprimento próprio nada mais é do que o comprimento medido de um determinado corpo por um referencial que observa este corpo em repouso. No caso da ilustração produzida, indicada pelo figura 16, o comprimento próprio é mostrado como a distância entre duas estrelas, vista por um observador que se encontra em repouso em relação a elas O' .

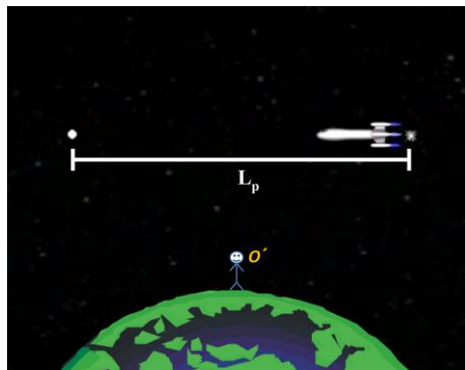


Figura 16: Distância entre duas estrelas vista por um observador fixo em relação a elas

Em seguida considera-se que a distância medida pelo observador O' entre as estrelas é dada por:

$$L_p = v \cdot \Delta t' \quad (46)$$

O texto indica também que distância medida por um observador que se encontra dentro da nave é dado por:

$$L=v.\Delta t \quad (47)$$

Assim dividindo a equação (46) por (47) e substituindo a equação (45) obtemos:

$$L = \frac{L_p}{\gamma} \quad (48)$$

Com essa equação o estudante estará apto a relacionar os espaços medidos entre referencias distintos e compreender que quando $\gamma > 1$ então $L < L_p$, ou seja, ocorre a contração do espaço.

Por fim, neste capítulo, também foi abordado o que ocorre com o espaço L quando um corpo atinge a velocidade da luz e quando o corpo se encontra a baixas velocidades (comparadas a da luz). No primeiro caso é mostrado para o aluno que γ tende ao infinito e pela equação acima (48) L tenderá a zero, ou seja, o espaço se contrai até um valor nulo. O segundo fato vem mostrar que para baixas velocidades, ou seja, para $\gamma=1$ temos que, pelas equações (45) e (48), $L=L_p$ e $\Delta t'=\Delta t$, como Galileu havia afirmado. Essa abordagem é importante, pois explicita para o aluno que a teoria clássica de Galileu e Newton não deve ser jogada fora, e que na realidade para baixas velocidades elas descrevem muito bem o movimento dos corpos. A teoria da relatividade especial veio a complementar os conhecimentos já existentes.

Relatividade da Simultaneidade

Neste tópico da TRE, o material texto apresenta a ideia de que a simultaneidade é um conceito relativo. A ideia é mostrar para o aluno que em um referencial é observado dois eventos ocorrerem simultaneamente, enquanto que um segundo referencial é observado esses mesmos eventos não ocorrerem simultaneamente.

Para exemplificar esse fenômeno foram desenvolvidas algumas imagens. Primeiramente foi baixado o vídeo “Simultaneity - Albert Einstein and the Theory of Relativity” no site <http://www.youtube.com/watch?v=wteiuxyqtoM> e escolhidas algumas imagens.

A primeira imagem escolhida foi de um trem passando por uma estação em um determinado tempo, como indica a figura 17.

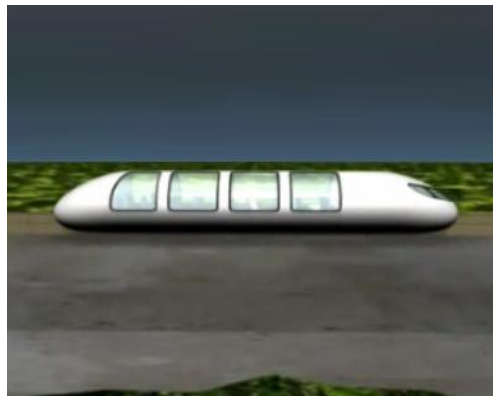


Figura 17: Trem passando por uma estação

Em seguida, foram adicionados com a ajuda do software PowerPoint alguns elementos como o personagem Pedro e Maria que se encontram em referenciais distintos, Maria no interior do trem e Pedro na estação, como indica a figura 18.

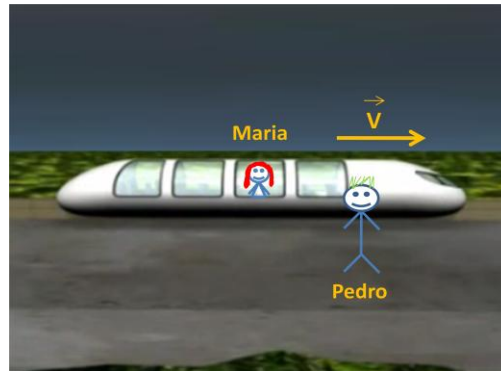


Figura 18: Pedro e Maria em referenciais diferentes

A segunda imagem escolhida foi a que continha dois raios de luz atingindo o trem em suas extremidades e espalhando um clarão.

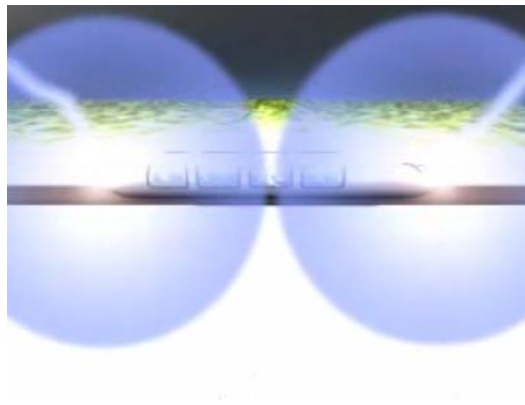


Figura 19: Raios de luz atingindo o trem

Essa figura foi editada para mostrar que para um observador que se encontra na estação os clarões de luz vão chegar simultaneamente, e que assim, este observador afirmará que os raios ocorreram simultaneamente, como indica a figura 20.

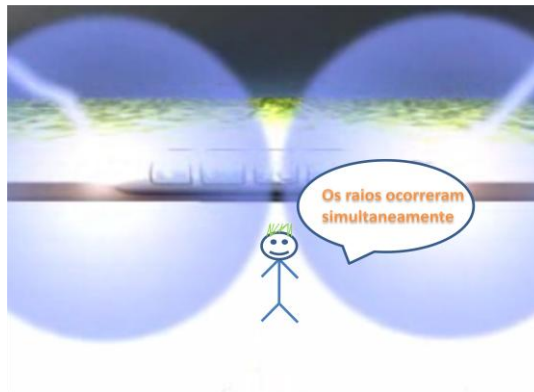


Figura 20: Pedro observando os raios de forma simultânea

Por fim uma terceira imagem foi retirada dos vídeos. Essa imagem mostra agora como se comportam os clarões de luz para um ponto de vista de dentro do trem como indica a figura 21.



Figura 21: Clarões de luz vista por observador no interior do trem

Essa imagem foi editada acrescentando o personagem Maria. Assim o aluno pode visualizar melhor que para este observador os clarões de luz não o atingem simultaneamente, e que assim, afirmará que os raios não foram simultâneos como indica a figura 22.



Figura 22: Maria observando os clarões de forma não simultânea.

Com essas figuras o texto vem a mostrar para o estudante que um evento que ocorre simultaneamente para um referencial pode não ser simultâneo para outro.

Relação Massa e Energia

Esse tópico vem a discutir o significado da famosa equação do Einstein, $E=mc^2$. Essa discussão tem por objetivo fazer com que o aluno compreenda que massa é equivalente a energia e que uma pode ser convertida em outra.

Antes da apresentação desta equação o texto aborda o conceito de energia e apresenta alguns tipos de energia que fazem parte do cotidiano do aluno. Só após essa abordagem é apresentado em sua forma final a equação que relaciona massa e energia.

No texto foi desenvolvido também um exemplo de aplicação desse conceito a fissão nuclear. Esse assunto é abordado de forma que o estudante compreenda basicamente como ocorre um processo de fissão nuclear e como é obtida energia das reações que a envolvem.

Na fissão nuclear temos que o núcleo de um átomo pesado, como por exemplo o urânio, é bombardeado por partículas, os nêutrons, que fissiona este núcleo em dois outros menores. Se calcularmos a massa do núcleo original com a massa formada no produto final notamos uma diferença, o núcleo inicial apresenta uma massa maior. Isso significa que parte dessa massa “perdida” foi transformada em energia. Essa quantidade de energia pode ser determinada pela equação $E=mc^2$, onde m seria a massa “perdida”.

Para isso foi desenvolvido uma figura em PowerPoint (figura 23) que ilustra esse tipo de reação nuclear e como a energia é liberada.

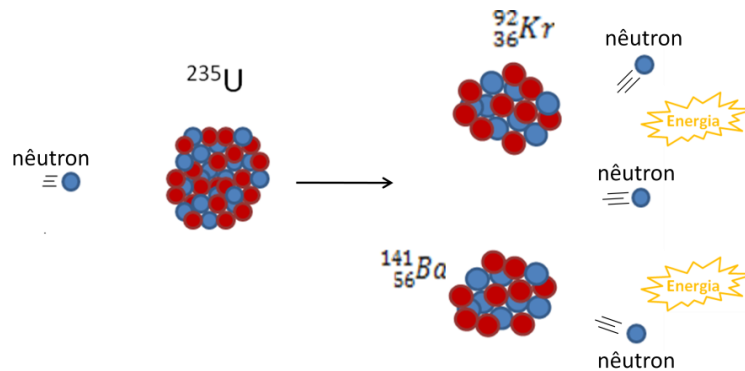


Figura 23: Fissão de um átomo de Urânio.

2.3.2 As animações

A ideia de produzir um conjunto de animações é para que elas auxiliem o aprendizado do conteúdo, tornando a aula mais didática e mais motivadora para os alunos.

Foram montadas animações em PowerPoint e animações interativas no software Isadora, cada um com um objetivo diferente.

O PowerPoint 2007 apresenta algumas figuras prontas, como mostra a figura 24, e recursos de animação que possibilitam adicionar movimento a essas figuras.

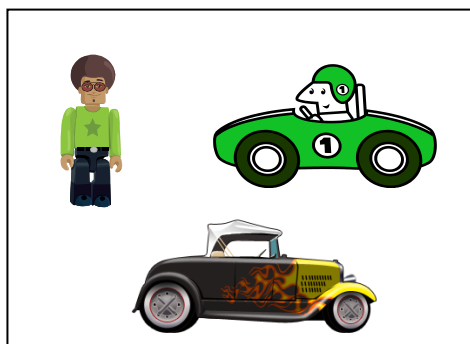


Figura 24: Figuras retiradas do programa PowerPoint

As animações desenvolvidas neste software servem como complemento para o material texto do aluno. Agora, as ilustrações desenvolvidas no material texto estão animadas, com movimentos e interações que o professor pode utilizar para melhorar a dinâmica da aula.

A primeira animação produzida faz abordagem sobre o paradoxo dos bastões de Zenão. Essa animação tenta mostrar para o aluno como a velocidade de um bastão poderá ser vista de maneira diferente por observadores diferentes. Em seguida o material dispõe de mais dois outros exemplos animados que ajudam o aluno a visualizar a relatividade do movimento. Um utiliza exemplo com carros e o outro mostra que para um referencial que se encontra fixo em relação a terra então esta se encontra em repouso, mas para um astronauta que se encontra em um outro referencial fora da terra, então esta está em movimento. Sobre o

tópico de Galileu Galilei, foram produzidos dois tipos de animações que ilustram alguns exemplos sobre os estudos realizados por este cientista. A primeira aborda que o deslocamento sofrido por uma pedra ao cair do mastro de um barco em direção ao convés pode ser vista de maneira diferente por observadores diferentes. A segunda animação consiste em deduzir junto ao aluno uma equação matemática que relaciona as diferentes velocidades medidas por diferentes referenciais, ilustrando o conceito de movimento relativo descrito por Galileu.

Outro tópico importante para curso e de difícil explicação para alunos do ensino médio são as equações de Maxwell e os fenômenos eletromagnéticos. Por isso, são encontradas neste material PowerPoint, também animações que vem a explicar basicamente os conceitos relacionados a essas equações de Maxwell e as consequências que elas trazem como o fato da luz ser uma onda eletromagnética.

A próxima e última animação produzida em PowerPoint é sobre a fissão nuclear. Esta mostra que a “quebra” do átomo de urânio em outros dois elementos e que desta reação é produzida energia.

Para explicar conceitos como a relatividade do tempo e a simultaneidade foram desenvolvidas, com a ajuda do programa de edição de vídeo Isadora, um material multimídia que permite a interação do usuário com os vídeos.

O software Isadora apresenta um ambiente de programação que permite a manipulação em tempo real de um vídeo digital. Na sua interface gráfica, o programa ao invés de códigos de programação, oferece blocos, chamados de atores, que apresentam comandos prontos para executar uma determinada função no vídeo. A figura 25 mostra a interface de programação e os blocos que realizam os comandos.

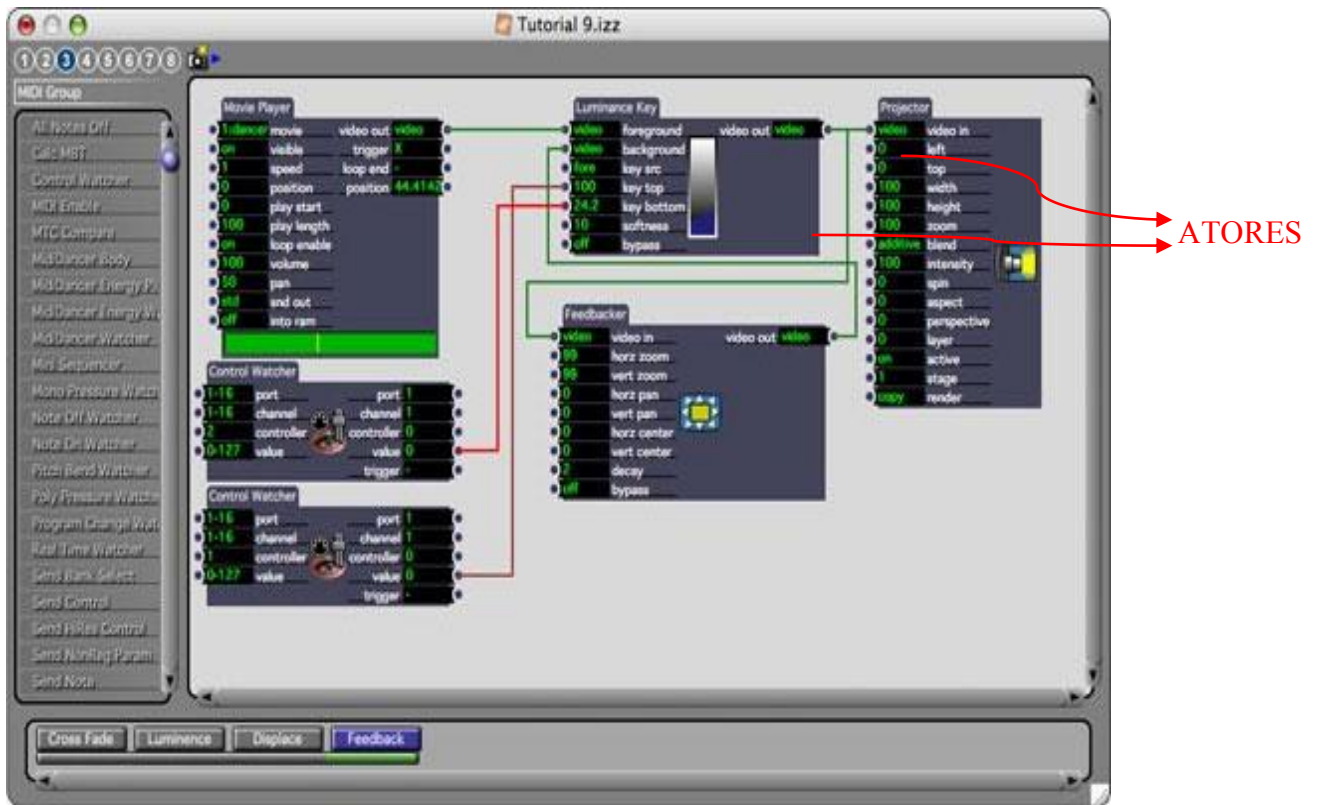


Figura 25: Interface gráfica Isadora que mostra vários atores conectados executando uma ação

Alguns atores executam funções simples como rodar um vídeo, enquanto outros permitem funções mais sofisticadas, como entortar uma imagem de vídeos ou modificar suas cores.

Ao ligar vários atores juntos é possível adicionar múltiplos comandos para um ou vários vídeos. Nas animações produzidas, por exemplo, para uma determinada cena foi adicionado um ator que permite controlar o vídeo com o mouse e outro que troca o vídeo ao apertar a tecla “espaço” do teclado.

A produção das animações foi realizada em três etapas. Primeiro foram baixados do site Youtube, vídeos com animações em 3D que ilustram a relatividade do tempo e do espaço.



Figura 26: Animações em 3D baixadas do site youtube.

Em seguida, antes de utilizar o programa Isadora, foi utilizado um segundo programa também editor de vídeos chamado Vídeospin. Este programa apresenta recursos de edição um pouco mais simples do que o Isadora. Ele permite, por exemplo, adicionar textos e cortar cenas de um vídeo. No nosso material o Vídeospin foi utilizado para adicionar textos didáticos nos vídeos para explicar fenômenos físicos ocorridos e textos que serão utilizados para indicar uma ação interativa que o usuário possa fazer, como por exemplo, um menu.

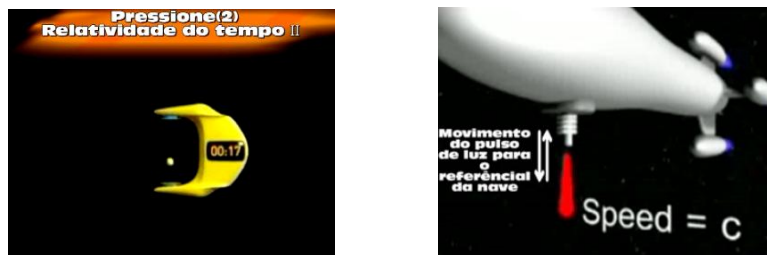


Figura 27: Animações em 3D editadas no programa vídeospin

Por fim no LABI, laboratório aberto de interatividade da UFSCar, foi utilizado o programa Isadora para produzir um arquivo final, chamado executável, que contem todos os vídeos editados e adicionados de recursos interativos.



Figura 28: Arquivo final produzido e editado pelo programa Isadora

Conforme mostra a figura acima, este material é dividido em três sessões: Relatividade do tempo I, Relatividade do tempo II e Simultaneidade. Na primeira sessão é ilustrado duas naves viajando juntas no espaço e que num determinado tempo uma das naves dispara um pulso de luz contra a outra. O objetivo deste vídeo é fazer com que o aluno entenda que como o pulso de luz é observado realizando deslocamentos diferentes para referenciais diferentes, então pelo fato da velocidade deste pulso ser invariante, o tempo medido pelos referenciais deverão ser diferentes.

Para complementar essa ideia foi montado os vídeos Relatividade do tempo II. Nesta sessão encontram-se vídeos que ilustram a mesma ideia construída pela sessão anterior, porém agora ao invés de naves são utilizados relógios que medirão os tempos para cada referencial indicando como este é relativo.

A terceira sessão aborda como dois eventos podem ocorrer de forma simultânea para um referencial e para outro não. Esses vídeos ilustram o famoso trem do Einstein, experimento mental que este próprio fez para explicar a relatividade da simultaneidade.

As animações mostram caindo num trem dois raios de luz, um em cada ponta, no momento que este está passando por uma estação. Em seguida nessas animações pode-se identificar que o passageiro do trem observará os raios caírem simultaneamente, mas a pessoa que se encontra na estação, observará os raios caírem em tempos diferentes.

2.3.3 Material do professor

O material texto do professor foi elaborado somente após a aplicação do curso, isso para que fosse analisado as sugestões de como o professor possa vir a aplicar o curso.

Este material, assim como no material do aluno, é dividido em tópicos referentes a cada assunto. Em cada um desses tópicos é apresentado uma sugestão do número de aulas que acreditamos ser suficiente para a aplicação deste conteúdo.

Além disso, foi produzido em cada tópico um texto contendo os objetivos a serem alcançados e uma descrição de como o professor poderia abordar cada assunto do material do aluno e como estar utilizando as animações encontradas no CD para facilitar a compreensão desses assuntos.

Por fim, abaixo de cada tópico pode-se encontrar as resoluções dos exercícios propostos em cada um desses tópicos.

CAPÍTULO 3. APLICAÇÃO DA PROPOSTA

Com todo material elaborado foi realizado um curso de extensão na universidade Camilo castelo branco (UNICASTELO) na cidade de Descalvado interior de São Paulo. O curso foi aplicado em um único sábado num total de oito horas aulas e com dezessete alunos presentes.

Os alunos eram do segundo e terceiro período do curso de licenciatura em química, bacharelado em química e engenharia ambiental. A faixa etária era dos 20 aos 41 anos. Esses alunos apresentavam dois perfis. O primeiro tipo de alunos eram aqueles que haviam terminado o ensino médio há muito tempo e com isso estavam defasados apresentando algumas dificuldades no estudo de exatas. O segundo tipo eram alunos que terminaram o ensino médio havia pouco tempo, porém não tiveram uma formação adequada principalmente na área de exatas. Assim, apesar de serem do ensino superior esses alunos apresentavam um perfil de ensino médio.

No início do curso foi entregue aos alunos o material texto e o questionário pré-curso para responderem. Após o recolhimento desses questionários foi realizado uma breve apresentação de quais assuntos seriam abordados no curso.

O primeiro tópico apresentado foi sobre o Filósofo Grego Zenão. Nesta apresentação foi utilizado o material produzido em PowerPoint, encontrado no CD-ROOM, para ilustrar sobre o movimento relativo de bastões, exemplo estudado por Zenão.

Ainda com a ajuda da apresentação em PowerPoint, foram apresentadas outras animações exemplos, sobre a relatividade do movimento, que complementam o exemplo de Zenão.

Em seguida, foram apresentados alguns estudos de Galileu Galilei sobre o movimento. A primeira ideia trabalhada foi sobre o conceito de referencial. Os alunos acompanharam essa explicação através da figura 4 do material do aluno. Com essa ilustração foi discutido exemplos de referenciais inerciais e não inerciais. Foi indicado, também, que no presente curso os fenômenos físicos apresentados serão apenas tratados em referenciais inerciais, ou seja, que não se encontram acelerados.

Com isso deu início a apresentação dos conceitos que Galileu afirmava ser relativa, a trajetória descrita pelo movimento de um corpo e a velocidade observada deste corpo. No material em PowerPoint pode demonstrar esses conceitos e deduzir as chamadas transformações Galileanas. Apresentado este conteúdo foi dado um tempo para que os alunos realizassem os exercícios (1), (2), (3), e (4) do capítulo “relatividade de Galileu” do material do aluno (anexo A). Esses exercícios são úteis para que os estudantes assimilem melhor os conceitos de referencial inercial e não inércia e as transformações de Galileu.

O seguinte tópico trata dos fenômenos eletromagnéticos e as equações de Maxwell. Ainda com a ajuda do material em PowerPoint foram apresentadas algumas leis do eletromagnetismo, uma parte conceitual das equações de Maxwell e suas consequências. Após essa apresentação, foi discutido com os alunos que duas dessas consequências eram incompatíveis com a teoria clássica já apresentada do movimento relativo de Galileu e que essas incompatibilidades gerarão na época uma necessidade de se desenvolver novas idéias, novos conceitos que explicassem os fatos. Após essa discussão é apresentado ao aluno uma dessas tentativas que ocorreu na época, a ideia de um referencial absoluto chamado de éter. Por fim foi discutido que então na época tinham-se três alternativas:

1. A relatividade de Galileu era válida apenas para a mecânica e as equações de Maxwell para o eletromagnetismo;

2. A relatividade galileana estava correta e as equações de Maxwell deveriam ser modificadas;

3. As equações de Maxwell estavam corretas e a relatividade galileana deveria ser modificada.

Foi dado um tempo para que o aluno respondesse a questão (2) do deste capítulo, justamente para pensar em qual dessas alternativas deveria ser correta.

No próximo tópico foi apresentada uma rápida biografia de Einstein e as considerações que ele faz, chamado de postulados, que o levaram a desenvolver a TRE. Em um desses postulados Einstein afirma que a velocidade da luz é constante e como consequência desse fato o tempo e o espaço deveriam ser relativos.

Feito essa explanação abrimos a animação feito no programa Isadora, encontrada no CD-ROOM, para mostrar a relatividade do tempo. Primeiramente, nesta animação, foi escolhida a opção (1) “Relatividade do tempo I” para mostrar que o intervalo de tempo medido por um referencial é diferente do intervalo de tempo medido por um segundo referencial. Em seguida passamos para a opção (2) “Relatividade do tempo II” onde mostra a mesma ideia da animação anterior, porém agora com dois relógios que vão ilustrar com números o tempo sendo medido de forma diferente. Nesta parte do curso os alunos demonstraram um ar de admiração pelo assunto, alguns comentaram que isso era uma coisa realmente diferente, do outro mundo, e reconheceram que Einstein realmente fez um trabalho interessante, como mostra o depoimento: “Einstein para pensar em tudo isso era de fato um gênio.”

Após essas animações os alunos disseram ter visualizado que o tempo é relativo, então expliquei que agora iríamos deduzir uma equação que relaciona esses tempos para dois referenciais distintos. Fui para a lousa e utilizando do mesmo exemplo do material

do aluno demonstrei o fator de Lorentz (γ) que relaciona os diferentes intervalos de tempo medido entre diferentes referenciais. Trabalhei com os estudantes alguns possíveis valores desse fator e concluímos que ele sempre teria um valor positivo. Como consequência, de acordo com a equação deduzida, $\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t$, $\Delta t'$ seria sempre maior que Δt , e que esse fenômeno recebe o nome de dilatação do tempo.

Foi discutido também que se um corpo atinge a velocidade da luz então este fator diverge e conseqüentemente o tempo medido pelo referencial de onde se observa este movimento também irá divergir, ou seja, tende ao infinito. Assim, um corpo não poderá atingir a velocidade da luz, pois o intervalo tempo tenderá ao infinito.

Para assimilar melhor essas ideias foi trabalhado com o aluno o exercício (2) referente a este capítulo. Nele pode calcular os diferentes tempos medidos para dois referenciais distintos.

Para a relatividade do espaço foi discutido com o aluno primeiramente o conceito de comprimento próprio representado por L_p , em seguida, ainda utilizando da lousa, foi deduzido a relação: $L = \frac{L_p}{\gamma}$. A partir desta equação foi discutido que o comprimento de um corpo medido por um referencial que observa este corpo em movimento (L) é sempre menor do que o comprimento medido quando este corpo se encontra em repouso (L_p) e que a este fenômeno dá-se o nome de contração dos espaços. Em seguida, para trabalhar essa equação foi resolvido em sala o exercício (2) referente a este capítulo.

Para o capítulo da relatividade da simultaneidade, voltamos para as animações feitas no Isadora, onde agora foi utilizada a opção (3) referente a este tema. Com isso foi feita uma abordagem apenas visual do conceito para o aluno, onde com a ajuda dessas animações

-CAPÍTULO 3. APLICAÇÃO DA PROPOSTA-

foi mostrado que dois eventos que ocorrem simultaneamente em um referencial podem não ocorrer simultaneamente para um segundo referencial.

O curso encerra com o assunto da equivalência massa e energia. Para isso voltei a utilizar o material PowerPoint que contem uma breve apresentação da equação $E=mc^2$ e uma animação que mostra um exemplo de reação de fissão nuclear. Nesta apresentação foi trabalhado com o aluno o conceito de que massa e energia são equivalentes e que essa relação é dada por essa famosa equação de Einstein. Em seguida resolvi o exercício (2) deste capítulo para que o aluno compreenda melhor os conceitos. Por fim, foi dado um tempo para que o estudante resolvesse o exercício (3). O objetivo seria fazer que o aluno compreendesse descobrindo por ele mesmo que pequenas quantidades de massa, como a massa de uma pêra que o problema trata, podem ser transformadas em grandes quantidades de energia.

CAPÍTULO 4. PLANEJAMENTO DO CURSO E A RELAÇÃO COM A TEORIA DE DAVID AUSUBEL

Após a montagem do curso, observou-se uma relação de como foi organizado este curso com as teorias de aprendizagem de David Ausubel (Ausubel,1980), (Moreira, 1982).

Os estudos de Ausubel sobre o processo de aprendizagem, apresentam um ponto de vista cognitivista. Cognição vem a ser o processo pelo qual um determinado assunto ou ideia é compreendido por certo indivíduo, ou seja, é o processo através do qual um mundo de significados tem origem.

Para Ausubel, assim como outros psicólogos cognitivistas, um indivíduo apresenta um determinado conjunto de ideias e conhecimentos que já foi adquirido ao longo de sua vida. Esse conteúdo de ideias e conhecimentos recebem o nome de estrutura cognitiva. Essa estrutura de conhecimentos pode ser modificada ou aumentada através de processos de aprendizagem. Ausubel faz a distinção entre quatro tipos de processos de aprendizagem, que podem ser classificadas em aprendizagem por recepção ou por descoberta e aprendizagem significativa ou automática. Vamos agora discutir cada uma dessas aprendizagens relacionando com o desenvolvimento do curso aplicado.

4.1 Aprendizagem por descoberta

A característica principal deste processo de aprendizagem é que o conteúdo a ser assimilado pelo aluno não é dado em sua forma final. Pelo contrário, o aluno deverá descobrir por ele mesmo o significado de um conceito antes que possa ser incorporado significativamente em sua estrutura cognitiva. Assim o papel do educador é criar condições

para que o estudante possa descobrir algo novo. Como exemplo, podemos citar os trabalhos escolares de laboratório, na qual o professor desenvolve uma experiência e orienta o aluno a desenvolvê-la. Nesta experiência, o estudante, por meio de análise dos dados, poderá chegar por si mesmo a conclusões em relação a um determinado conceito ou ideia, que poderão acrescentar algo de novo na sua estrutura de conhecimentos.

Nossa proposta do curso sobre a TRE, utilizou-se o processo de aprendizagem por descoberta. Esse processo de aprendizagem ocorreu em um rápido momento do curso no tópico “Relação massa e energia”.

O significado da $E=mc^2$, de que a massa pode ser transformada em energia e vice-versa, foi apenas apresentado ao aluno em sua forma final sem nenhuma dedução ou utilização de conceitos prévios que ele apresenta. Esse processo é chamado de aprendizagem mecânica, que discutiremos mais adiante. Porém essa equação mostra também uma segunda ideia: uma **pequena** quantidade de massa pode ser transformada em uma **grande** quantidade de energia. É essa ideia que foi deixado para que os alunos descobrissem por eles mesmos.

Para isso foram utilizados os exercícios três e quatro do texto de apoio ao aluno no tópico “relação massa e energia”.

Após a apresentação da equação $E=mc^2$, foi dado um tempo para que o aluno tentasse resolver o exercício três. Neste, o estudante deverá calcular quanto tempo uma lâmpada comum poderia ficar ligada se ela utilizasse a energia obtida de 100 gramas de uma pera. Como a resposta é um número muito elevado o aluno deverá perceber que pode-se produzir grandes porções de energia com pequenas porções de massa.

Compreendido essa ideia, no exercício quatro, o aluno estudaria uma aplicação desse conceito, a reação de fissão nuclear, que é aplicada a bombas nucleares e em usinas nucleares para produção de energia elétrica.

4.2 Aprendizagem por Recepção

Neste tipo de aprendizagem o conteúdo a ser compreendido é apresentado sobre a sua forma final. Um assunto ou conceito é trabalhado com o aluno sob uma forma acessível e que possa ser reproduzido por este numa ocasião futura, porém sem qualquer descoberta por parte do estudante.

A aprendizagem por descoberta foi pouco utilizada na aplicação deste curso. Por aulas expositivas, foram apresentados aos alunos os conceitos sob a sua forma final.

O curso deu-se início apresentando aos alunos as ideias clássicas do filósofo grego Zenão e os Estudos de Galileu Galilei sobre a relatividade do movimento. Esse início do curso ocorreu o processo de aprendizagem por recepção, pois não foi deixado ao aluno descobrir sobre os estudos desses pensadores, foi somente apresentado sobre esses trabalhos em sua forma final.

Assim foi também o processo que predominou nos tópicos: “Einstein e seus postulados”, “Relatividade do Tempo”, “Relatividade do Espaço”, e a “Relatividade da Simultaneidade”, nos quais todos os conceitos envolvidos não foram os alunos que descobriram individualmente.

Apesar de todos esses conceitos serem apresentados sob a sua forma final ao estudante, houve uma grande preocupação na montagem do curso de relacionar esses novos conceitos com os conhecimentos prévios que o aluno já apresenta, fazendo que ocorra

também o processo de aprendizagem significativa. Essa aprendizagem será discutida mais adiante.

4.3 Aprendizagem automática

A aprendizagem por descoberta e por recepção podem ainda ser caracterizadas em dois tipos: aprendizagem significativa ou automática. A primeira será discutida com maiores detalhes no tópico abaixo. Já a aprendizagem automática ou mecânica, segundo Ausubel, é um processo no qual os conceitos novos adquiridos por um indivíduo não são associados com o conhecimento prévio que o aluno apresenta em sua estrutura cognitiva, ou seja, há pouca ou nenhuma relação entre os novos conceitos e os antigos conceitos já armazenados.

A simples memorização de equações matemáticas ou leis, como ocorre com grande frequência na área das ciências exatas, é um exemplo do processo de aprendizagem automática. Este fato é muito frequente no ensino médio. Quando um assunto é abordado neste nível, muitos conceitos e ideias simplesmente não convêm ser explicados ou não fazem parte do objetivo a ser atingido pelo curso, pois podem exigir, como por exemplo, um domínio matemático maior. Assim, o professor pode apresentar um conteúdo na qual não venha ter significado ao aluno apenas com o objetivo de que ele saiba reproduzir numa ocasião futura. O conceito é apenas assimilado pelo estudante de maneira arbitrária.

Em relação ao curso, o processo de aprendizagem mecânica, ocorreu quando foi trabalhada a equação $E=mc^2$, no tópico “Relação Massa e Energia”.

A dedução formal dessa equação exige um conhecimento mais aprofundado sobre o cálculo diferencial e integral, conhecimento que dificilmente é ensinado à alunos do

ensino médio. Desta forma a equação foi apresentada ao aluno sobre a sua forma final (aprendizagem por recepção) e a discussão das ideias que a envolvem não fizeram relação alguma com os conceitos que os alunos já adquiriram (aprendizagem automática). Foi explicado somente para eles que massa pode ser transformada em energia e vice-versa e que a relação entre essas grandezas é dada pela equação $E=mc^2$, onde a massa m é dada agora por $m=\gamma m_0$.

Outra parte do curso que ocorreu esse processo de aprendizagem foi no tópico “Movimento e os fenômenos eletromagnéticos”. Nesta parte do curso foram apresentados aos alunos as equações de Maxwell e suas consequências de uma maneira mecânica, sem nenhuma relação com as ideias que os alunos já apresentavam durante o curso.

4.4 Aprendizagem Significativa

Para Ausubel, aprendizagem significativa é um processo pelo qual uma nova informação se relaciona com conhecimentos relevantes que já se encontram na estrutura cognitiva do indivíduo. Esse processo é, segundo o próprio Ausubel, o processo de aprendizagem mais importante:

“Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só princípio, diria o seguinte: o fato mais importante influenciando a aprendizagem é aquilo que o indivíduo já sabe.”

(Ausubel,1978)

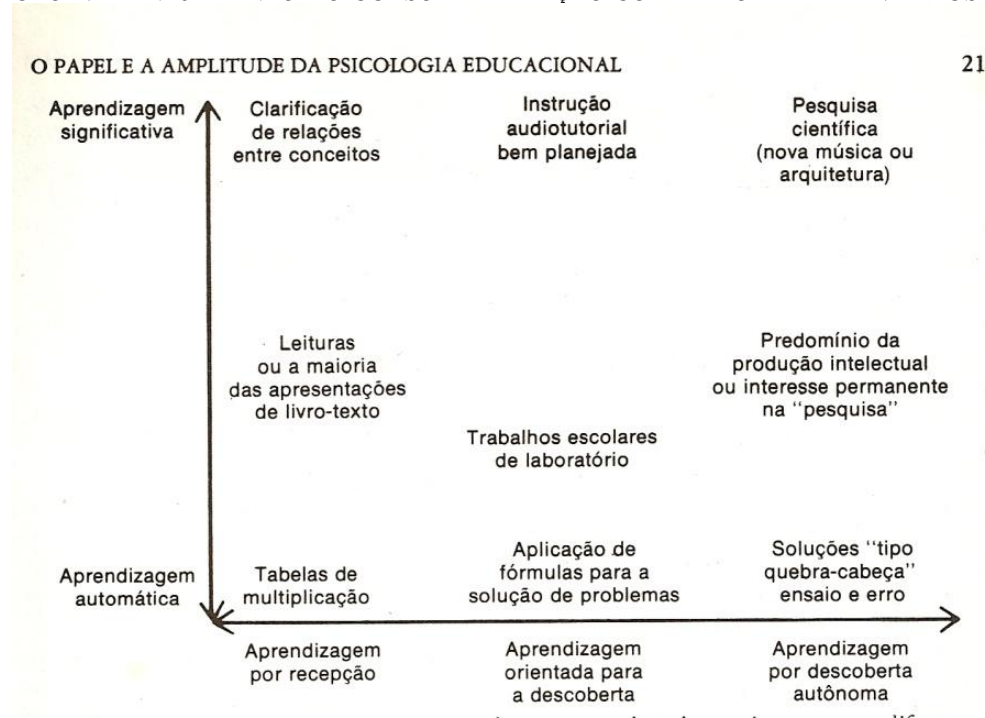


Figura 29: Esquema mostrando os tipos de aprendizagem (Ausubel, 1980)

Esse conhecimento prévio que um indivíduo já apresenta e que irá interagir com o novo conhecimento é chamado de subsunçor. Vamos supor na Física, por exemplo, que o aluno precisa aprender sobre o conceito de campo elétrico e força elétrica. Neste caso se os conceitos de campo e força já estiverem na estrutura cognitiva do estudante, eles servirão de subsunçores para as novas informações mais específicas de campo elétrico e força elétrica.

Mas de onde vêm os subsunçores? Como fazer para que eles se formem na estrutura cognitiva do aluno? Segundo Ausubel é recomendado o uso de *organizadores prévios*. Esses organizadores são materiais introdutórios que normalmente são apresentados antes do próprio material de aprendizagem. Assim, desenvolvem no indivíduo os conceitos bases (subsunçores) necessários para que um determinado tema seja aprendido de forma significativa.

Dois dos temas que são utilizados como subsunçores são os conceitos sobre relatividade do movimento de Zenão e Galileu Galilei. A partir desses tópicos o aluno deverá compreender a ideia de grandezas relativas, como por exemplo, o movimento. Essas ideias foram utilizadas mais tarde como base para a compreensão dos conceitos que envolvem a relatividade especial.

Para a compreensão desses temas foi elaborado no material CD-ROM e no material do aluno exemplos do dia-dia que ilustram que o movimento de um determinado corpo pode ser observado de forma diferente para referenciais diferentes.

Como exemplo, podemos citar as animações sobre movimentos de automóveis numa rodovia. Essas animações, montadas em PowerPoint, mostram que se uma pessoa encontra-se numa calçada em repouso em relação a esta e observar um motorista em um automóvel passar na sua frente com uma velocidade de 100km/h, esta pessoa afirmará que o motorista está em movimento. Porém, de acordo com as animações, se mudarmos o ponto de vista para um passageiro que se encontra sentado no automóvel, ao lado do motorista, este observará o motorista em repouso. Com isso é criado no aluno a ideia de que existem grandezas relativas e que o movimento, como estudado por Galileu e Zenão, é uma dessas grandezas.

Essas animações são o que Ausubel chama de organizadores prévios. Esses organizadores são utilizados para desenvolver no aluno o conhecimento de grandezas relativas, como já dito anteriormente, conhecimento que será utilizado como subsunçores para compreender conceitos específicos sobre a relatividade especial, conforme o avanço do curso.

Outro tópico que apresenta conceitos que são utilizados como subsunçores é “Movimento e os fenômenos eletromagnéticos”. Apesar de este assunto ter sido tratado por meio da aprendizagem mecânica, a sua introdução tem por objetivo apresentar para os alunos

alguns conceitos de eletromagnetismo que são de fundamental importância para compreender o início a relatividade especial, ou seja que serão utilizados como subsunçores.

Como exemplo pode citar o fato da velocidade da luz ser invariante para qualquer referencial. Esse fato, que é uma das consequências das equações de Maxwell, tem por objetivo mostrar para o aluno uma das incompatibilidades que o eletromagnetismo apresentava com as teorias clássicas, como as de Galileu, onde a velocidade era vista como uma grandeza relativa e não absoluta. Assim o estudante deverá compreender que foi essa e outras incompatibilidades que levaram Einstein a desenvolver a TRE.

Neste momento do curso o aluno deveria apresentar conhecimento prévio suficiente para começar a aprender sobre outros fenômenos que envolvem a relatividade especial, como os fenômenos de tempo e espaço relativos. Para fazer esta ponte entre esses conhecimentos prévios e os conceitos de tempo e espaço relativos se utilizou mais um organizador prévio, as animação interativas sobre tempo relativo e simultaneidade encontradas no CD-ROOM do professor. Essas animações tentam mostrar ao aluno que se a velocidade da luz é de fato invariante então quem passa a ser relativo é o tempo e o espaço. Com esse conceito já desenvolvido na estrutura cognitiva do aluno, fica mais tranquilo agora desenvolver com este a parte matemática desses conceitos.

Toda essa organização didática que o curso apresenta faz com que o aluno aprenda os conceitos básicos da teoria da relatividade especial de maneira significativa, que como dizia Ausubel, é um dos processos de aprendizagem mais importantes.

A figura 30 mostra um esquema montado de como se estrutura o curso conforme a teoria apresentada.

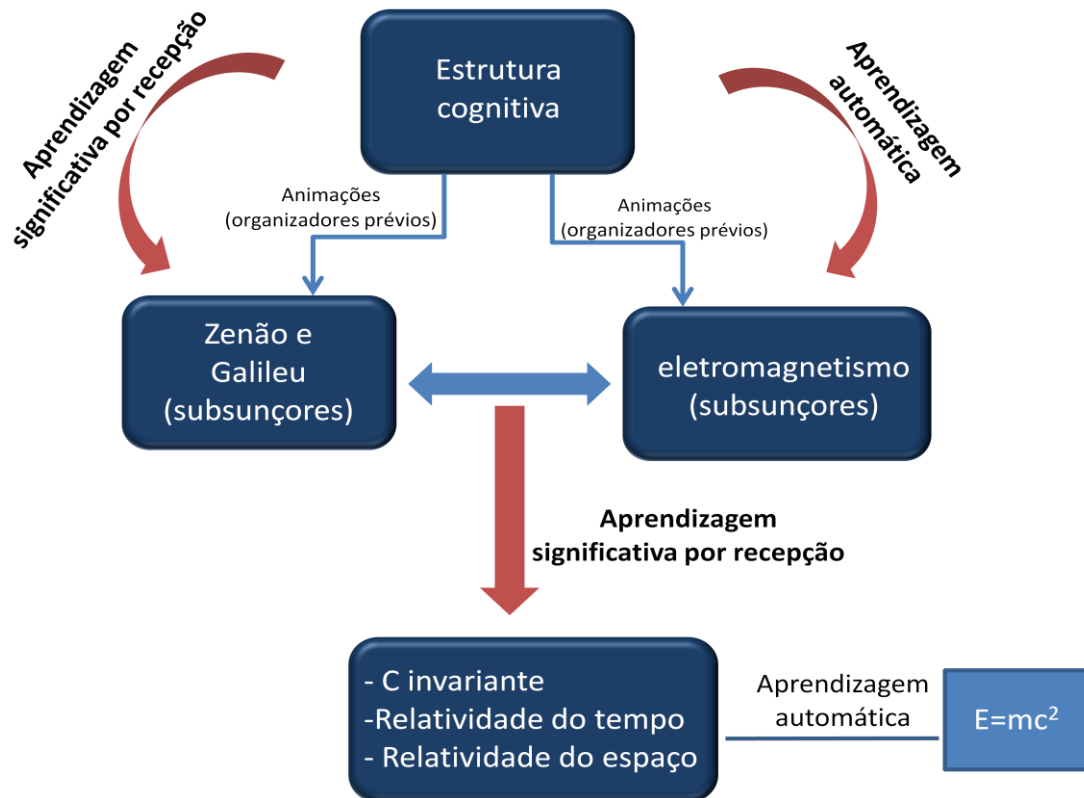


Figura 30: Mapa conceitual ilustrando os tipos de aprendizagem que ocorreram durante o curso

CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foi aplicado para dezessete alunos que participaram integralmente do curso dois questionários avaliatórios. O primeiro momento ocorreu antes do início do curso. Um questionário, que pode ser encontrado no apêndice C, foi passado aos alunos. O objetivo deste questionário é de fazer uma pré-análise dos conhecimentos prévios que os alunos já apresentam sobre o tema relatividade, assim como, uma análise de quais seriam as maiores fontes de obtenção deste conhecimento. O segundo momento de análise ocorreu no final do curso. Um questionário, que pode ser encontrado no apêndice D, serviu para analisar se os materiais utilizados no curso, as animações e o material texto, auxiliaram os alunos a compreender os temas apresentados sobre a relatividade especial.

5.1 Questionário pré-curso

O questionário foi aplicado a dezessete (17) alunos que estavam presentes no curso. Como primeira pergunta deste tópico temos:

“1) Você já ouviu falar a respeito da teoria da relatividade especial de Einstein? Sobre o que se trata?”

Do total, doze (12) alunos responderam que sim, que já conheciam algo sobre a teoria da relatividade. Três alunos (3) responderam que não e dois (2) não responderam.

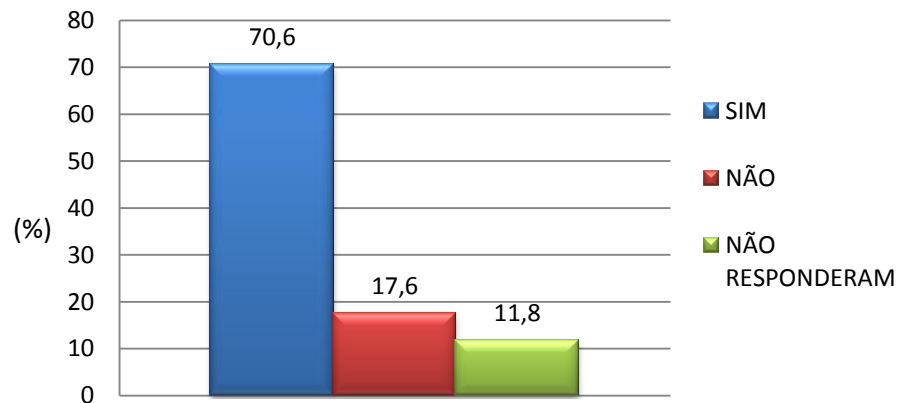


Figura 31: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 1

Referente a segunda parte da pergunta, “Sobre o que se trata?”, foram selecionadas algumas das respostas que são citadas abaixo:

“Velocidade da luz.”

“Se trata de uma relação entre o tempo e espaço.”

“Sobre a relação da velocidade da luz e o tempo/espaço.”

“Sobre energia.”

“Trata de energia nuclear.”

“ $E=mc^2$, onde massa próxima a velocidade da luz transforma-se em energia.”

“Sobre gravidade.”

2) Cite algumas fontes onde ouviu falar sobre a teoria de relatividade especial.

Apenas nove (9) alunos responderam essa pergunta. Dentre esses, sete (7) responderam ser meios de comunicação tais como: revistas, internet, televisão e outros e apenas dois (2) responderam sala de aula.

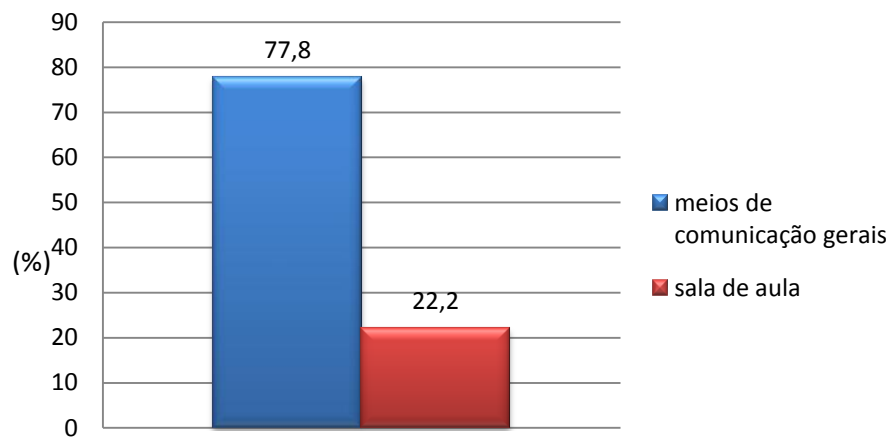


Figura 32: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 2

Segue abaixo as respostas dos alunos que responderam:

“Sala de aula, programas de TV.”

“Sala de aula.”

“Revistas, internet e amigos.”

“Livros, revistas, internet e televisão.”

“Mídia televisiva.”

De acordo com esses gráficos a maior parte dos alunos já ouviram falar do tema “Relatividade Especial” e através dos meios de comunicação mais comuns, como a internet e a televisão. Podemos observar também que poucos alunos se familiarizaram com este tema em sala de aula.

3) Dos cientistas abaixo marque com um “x” apenas aqueles que acredita que já fizeram algum estudo sobre relatividade:

- a) Albert Einstein
- b) Galileu Galilei
- c) Hendrik A. Lorentz
- d) George Fitzgerald
- e) Isaac Newton

Dezesseis alunos (16) responderam Albert Einstein, dois (2) responderam também Isaac Newton e um (1) não respondeu.

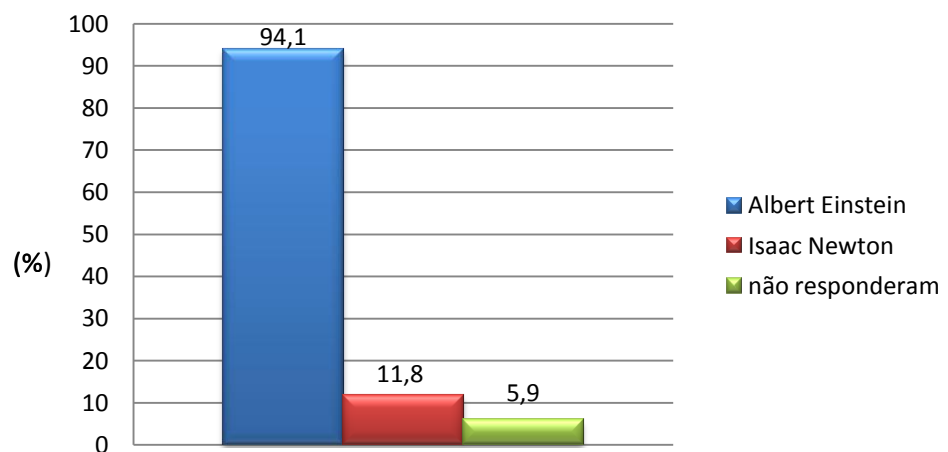


Figura 33: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 3

Por este gráfico podemos perceber que grande parte dos alunos só relaciona estudos feitos sobre a relatividade a Albert Einstein. Os estudos realizados por Hendrik A. Lorentz, George Fitzgerald na relatividade especial e o estudo da relatividade dos movimentos feitos por Galileu são desconhecidos por parte dos alunos. Para eles sobre o tema relatividade o único cientista que contribuiu foi Albert Einstein.

4) Dos conceitos abaixo marque com um “x” quais deles você acredita ser relativo:

- a) o movimento
- b) a velocidade da luz
- c) o tempo
- d) o espaço

Nesta questão quatro (4) alunos responderam o movimento, oito (8) responderam a velocidade da luz, nove (9) o tempo, seis (6) o espaço e apenas dois (2) não responderam.

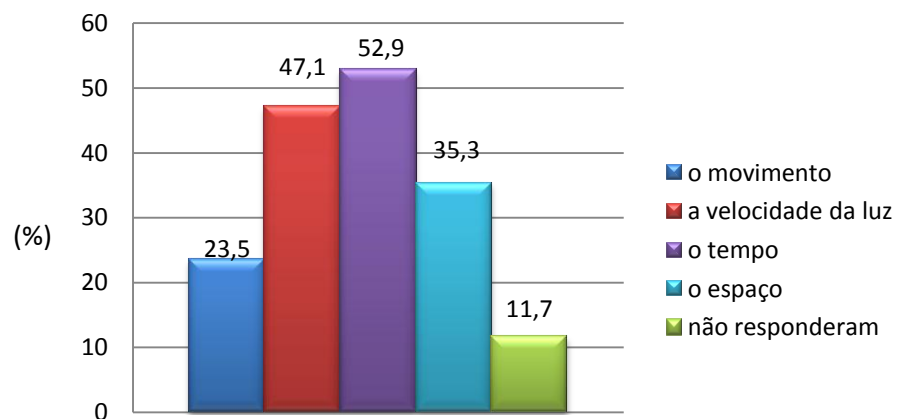


Figura 34: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 4

Por esses dados podemos concluir que o conhecimento dos alunos sobre quais conceitos são relativos não é muito aprofundado. De acordo com o gráfico quase metade dos alunos (47,1%) acreditam que a velocidade da luz é um conceito relativo, quando de fato não é, conforme afirma o segundo postulado de Einstein. Poucos acreditam também que o movimento é relativo, isso talvez venha do fato de poucos conhecerem os estudos de Galileu referente a essa relatividade, como indica o gráfico da questão anterior. O tempo acaba sendo realmente um dos conceitos que os alunos relacionam a relatividade, pelo gráfico podemos perceber que mais da metade da turma (52,9%) assinalaram que o tempo é um conceito relativo.

5) Explique o que sabe sobre a equação $E=mc^2$.

Do total de alunos oito (8) responderam que não se lembram ou não ouviram falar. Nove (9) alunos responderam que já ouviram falar e deram algumas explicações, dentre elas algumas são citadas abaixo:

“É a energia contida em cada corpo”

“Energia e movimento”

“Energia é igual a massa vezes a velocidade da luz ao quadrado”

“Relação entre massa e energia.”

“É uma equação que relaciona massa e energia.”

6) Você gostaria de ter aulas onde fossem empregados recursos de informática, como, por exemplo, animações ou programas de simulação, para ajudar o professor a ensinar melhor o conteúdo de um assunto da Física?

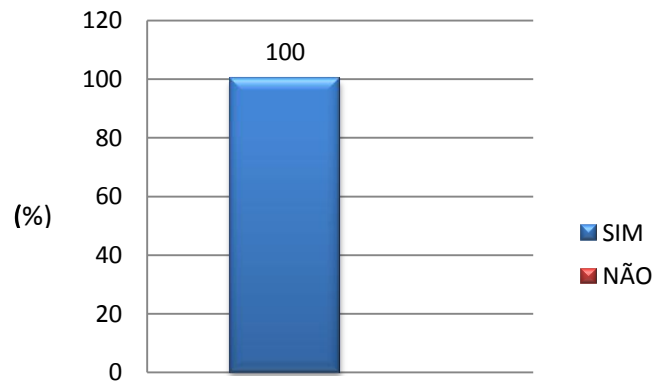


Figura 35: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 5

Para esta pergunta todos os alunos responderam que “sim” e algumas dessas respostas estão descritas abaixo:

“Ajuda a visualizar o conteúdo”

“Ajuda muito a comunicação”

“Ajudaria e agilizaria muito a aula, seria mais prática”

“Melhora o aprendizado”

5.2 Questionário pós-curso

Este questionário foi aplicado uma semana após o término do curso. Os dezessete (17) alunos que responderam o questionário pré-curso foram os mesmos que responderam a este questionário.

1) Dos tópicos abordados pelo curso marque com a letra “D” o que mais teve dificuldade em compreender e marque com “F” o que teve mais facilidade de compreensão.

- a) Filósofo grego Zenão e a relatividade de Galileu Galilei
- b) Movimento e os fenômenos eletromagnéticos
- c) Einstein e seus postulados
- d) Relatividade do Tempo
- e) Relatividade do Espaço
- f) Relatividade da Simultaneidade
- g) Relação Massa e Energia

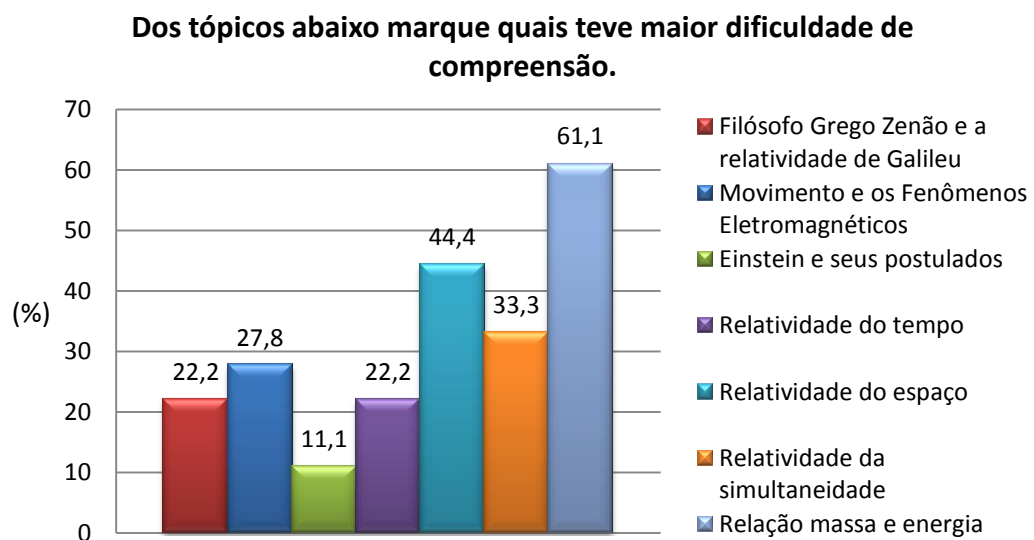


Figura 36: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 1

Por esses resultados podemos observar que a maior parte dos alunos (61,1%) tiveram dificuldades de compreensão sobre o tema “Relação massa e energia”. Isso pode estar associado ao fato de como o tema foi abordado pelo curso. No capítulo “Planejamento do curso e a relação com a teoria de David Ausubel” desta dissertação, é discutido que este tema, “Relação massa e energia”, é abordada de forma a ocorrer a aprendizagem mecânica do assunto, ou seja, esses novos conceitos são apresentados ao aluno sem que haja nenhuma relação com um conteúdo que o aluno já apresenta em sua estrutura de conhecimentos. Isso faz com que talvez o aluno tenha dificuldades de assimilar o conteúdo, pois como o próprio Ausubel diz: “... o fato mais importante influenciando a aprendizagem é aquilo que o indivíduo já sabe.” (Ausubel,1978).

Pelo gráfico os próximos assuntos que os alunos tiveram maior dificuldades de compreensão foram a relatividade do espaço e da simultaneidade.

Fora esse tópico todos os outros ficaram abaixo da média. Isso indica que grande parte dos alunos não tiveram dificuldades para compreender os outros temas.

2)O material em PowerPoint apresentado pelo professor foi útil para a compreensão dos conceitos desenvolvidos sobre a relatividade?

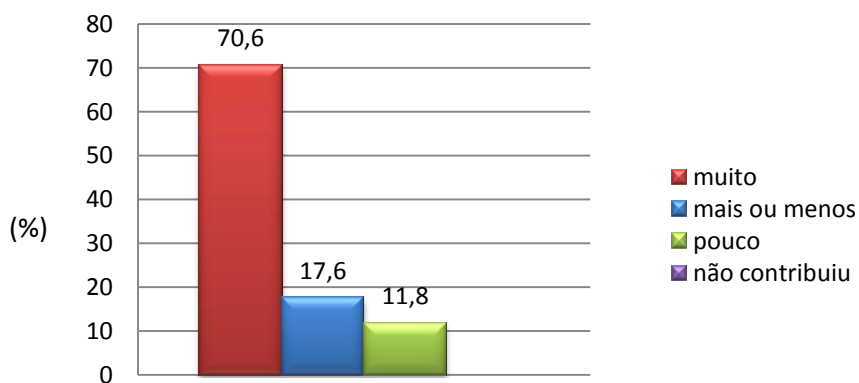


Figura 37: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 2

3)Anteriormente as deduções das equações da contração do espaço($L=L_0/\gamma$) e da dilatação do tempo($\Delta t'=\gamma\Delta t$) foram apresentadas algumas animações interativas. Essas animações auxiliaram a visualização da relatividade do tempo e do espaço?

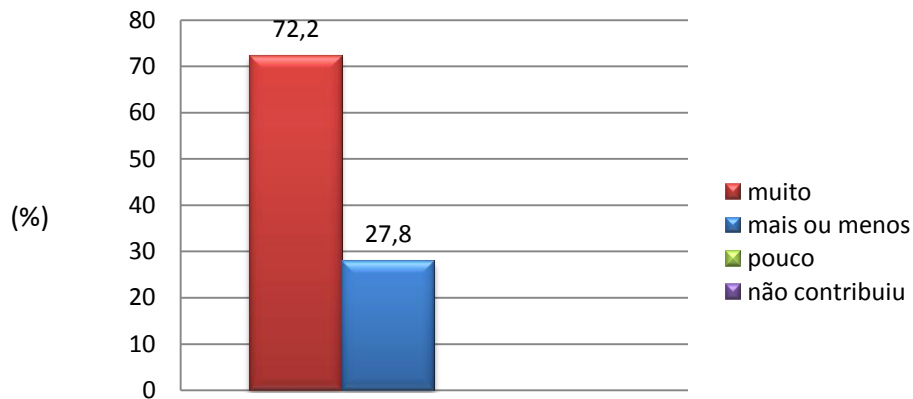


Figura 38: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 3

4)O material texto fornecido a você foi útil para estudar o conteúdo sobre relatividade?

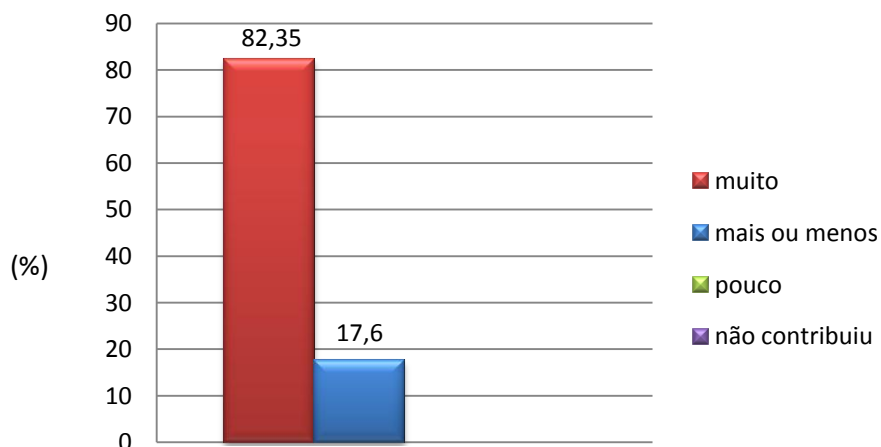


Figura 39: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 4

5) Os exercícios abordados auxiliaram no aprendizado do assunto?

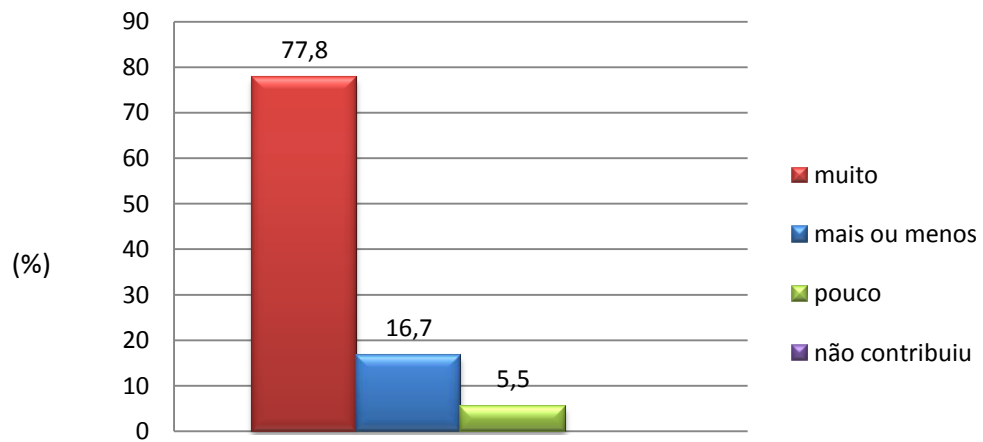


Figura 40: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 5

Por esses gráficos podemos perceber que o curso foi bem avaliado por parte dos alunos. Em todas as perguntas a opção “muito” ficou acima dos 70% dos alunos.

6) Agora que conhece sobre a relatividade especial de Albert Einstein, você acredita que é interessante que este tema seja abordado desde o ensino médio?

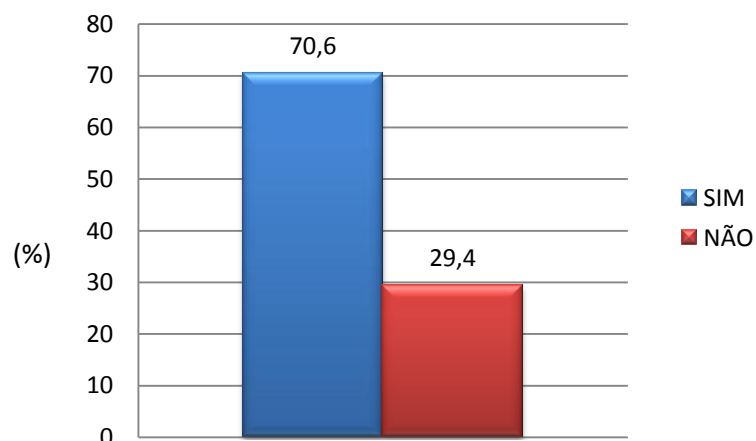


Figura 41: Percentual indicando as respostas dos alunos a questão 6

-CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS-

Essa questão vem a mostrar que os alunos acreditam que se deve ensinar o tema “Relatividade Especial” no ensino médio. Poucos alunos (29,4%) acreditam que não, devido ao grau de dificuldade de compreensão do tema.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E COMENTARIOS FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi a construção de um produto que auxilie o aprendizado dos alunos do ensino médio sobre os conceitos da relatividade especial. Para tal foi desenvolvido e aplicado um texto para o aluno, para o professor e animações que juntos formam um material completo para o desenvolvimento de um curso para o ensino médio e para alunos dos anos iniciais de um curso superior na área de exatas.

De acordo com os dados obtidos pelos questionários os alunos gostaram do curso. Em todas as perguntas sobre os materiais desenvolvidos houve mais de setenta por cento das respostas positivas, ou seja, os alunos responderam que esses materiais auxiliaram muito na compreensão e visualização dos conceitos. Pelo feedback que tivemos ao aplicar o curso observamos que realmente, esses materiais, ajudaram os alunos a entender os conceitos difíceis da relatividade especial, em particular a relatividade do tempo e a simultaneidade.

Ao aplicar o curso várias etapas foram analisadas. Pelo questionário pré-curso verificamos que grande parte dos alunos já haviam ouvido falar sobre a relatividade especial, principalmente através de meios de comunicação. Esse trabalho mostrou também que alguns alunos traziam consigo conceitos equivocados sobre o tema, como por exemplo, a velocidade da luz ser relativa, para eles “tudo é relativo”. Porém, após o curso, conversando com esses alunos, pude notar que o conhecimento deles em relação a esses temas havia melhorado. Eles sabiam dizer, agora, quais os conceitos são de fato relativos e qual que não é. O que é a dilatação do tempo e a contração do espaço.

Outro fator importante no curso foi observar que a sua estrutura, como foi montado e organizado este curso, tem haver com a teoria de David Ausubel. Pelos tipos de aprendizagem que o próprio Ausubel identifica e pela experiência que este curso me forneceu, pude notar que de fato é importante ensinar um novo conteúdo ao aluno fazendo uso de

conceitos que ele já sabe. Quanto mais próximo do aluno este novo conceito estiver mais fácil será o processo de aprendizagem. Essa foi uma experiência importante relevada quando houve a relação entre o planejamento do curso e a teoria de Ausubel. Experiência que o professor de ensino médio ou até mesmo superior poderá utilizar em sua sala de aula.

O professor de ensino médio em geral cumpre uma carga horária muito grande e infelizmente não faz parte da realidade deste participar de projetos acadêmicos que auxiliem as suas aulas. Assim, apesar de já existirem outros trabalhos da mesma temática que este é importante para o ensino e para esse professor que esteja disponível vários trabalhos desse tipo, mesmo que seja sobre um mesmo assunto, pois é somente com um leque de opções que o professor poderá analisar e escolher o que mais se adéqua as suas necessidades e a realidade que este enfrenta na sala de aula.

O tema desenvolvido, relatividade especial, assim como outros da física moderna não é comum ser estudado nas salas de aula dos alunos do ensino médio. Esse fato é muito ruim, pois esses assuntos estão cada vez mais presentes no cotidiano dos alunos. A tecnologia dos computadores como o transistor, as novas formas de obtenção de energia como a fissão e a fusão nuclear, máquinas e dispositivos modernos como a ressonância magnética são exemplos dos assuntos que despertam a curiosidade do aluno simplesmente por serem temas atuais.

Desta forma, é importante que outros trabalhos sobre a física moderna sejam desenvolvidos. Pois são esses trabalhos que podem fazer com que esses temas, não tão triviais, possam ser abordados de maneira adequada no ensino médio e despertem a curiosidade dos alunos para com a ciência.

REFERÊNCIAS

ARRUDA, S. M.; VILLANI, A. Sobre as origens da relatividade especial: Relações entre quanta e relatividade em 1905. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v.13, n1, p.32-47, abr. 1996.

AUSUBEL, David P.; NOVAK, Joseph Donald; HANESIAN, Helen. **Psicologia educacional**. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.

BASSALO, J. M. S. Aspectos históricos das bases conceituais das relatividades. **Revista Brasileira do Ensino de Física**. São Paulo, vol. 19, no .2, junho, 1997.

BRAGA, M.; GUERRA, A.; REIS, J. C. Teoria da relatividade restrita e geral no programa de mecânica do ensino médio: uma possível abordagem. São Paulo, vol.29, n. 4, p. 575-583, 2007

CASTILHO, M. I. Uma introdução conceitual à relatividade especial no ensino médio. Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

CINDRA, J. L. Esboço da evolução histórica do princípio da relatividade. **Revista Brasileira do Ensino de Física**. São Paulo, vol. 16, 1994.

COIMBRA, D.; CRUZ, S. M.; KARAM, R. A. Relatividade no ensino médio: o debate em sala de aula. **Revista Brasileira do Ensino de Física**. São Paulo, vol.29, n. 1, p. 105-114, 2007

EINSTEIN, A.; INFELD, L. **A evolução da física**. São Paulo: Nacional, 1939.

FERNANDA, O.; TRIESTE F. R. Relatividade restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de física. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 83-102, abr. 2004.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. Rio de Janeiro LTC, 2003.

HAWKING, Stephen William. **Os gênios da ciência: sobre os ombros de gigantes**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. Porto Alegre, Bookman, 2002.

HOBSON, A. Teaching $E=mc^2$: Mass without mass. The physics teacher. Vol. 43 fevereiro 2005

MARTINS, A. R. Dinâmica relativística antes de Einstein. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, São Paulo, v.27, n.1, p.11- 26, (2005)

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. Curso de Física. São Paulo, Scipione, 2000. Vol. 3

MOREIRA, Marco Antonio. **A aprendizagem significativa**. São Paulo: Moraes, 1982.

MOREIRA, M. A. **Melhorias do Ensino**. PADES UFRGS, 1984.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Relatividade restrita no ensino médio: contração de Lorentz-Fitzgerald e a aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de física. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, São Paulo, v. 19, n.2: p. 176-190, ago. 2002

PAULO A. MARIA NETO; PAULO H. SOUTO RIBEIRO; Aula 1 – As Equações de Maxwell - Física 4a – Módulo 1, Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2005

PORTO, C. M.; PORTO, M.B.D.S.M. Uma visão do espaço na mecânica newtoniana e na teoria da relatividade de Einstein. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, São Paulo, v.30, n.1, 1603 (2008).

RENN, J. A física clássica de cabeça para baixo: Como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, São Paulo, v.27, n.1, p.27- 36, (2004)

RESNICK, R. **Introdução à Relatividade especial**. São Paulo: Polígono. 1971

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D. **Física**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1985.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física moderna**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.

TORRES, C. M. A. Física ciência e tecnologia. São Paulo: Moderna, 2001

VIEIRA, S.; BARROS, A.; ARAÚJO, I.; OLIVEIRA, J. C. T. Uma comparação entre deduções da equação $E=mc^2$. **Revista Brasileira do Ensino de Física**. São Paulo, v. 26, n. 2, p. 93 - 98, (2004).

VILLANI, A. Análise de um curso de introdução a relatividade. **Revista Brasileira do Ensino de Física**. São Paulo, Março, 1980.

VILLANI, A. A visão eletromagnética e a relatividade: I. A gênese das teorias de Lorentz e Einstein. **Revista Brasileira do Ensino de Física**. São Paulo, vol. 7, n. 1, junho 1985.

VILLANI, A. A visão eletromagnética e a relatividade: II. O desenvolvimento das teorias de Lorentz e Einstein. **Revista Brasileira do Ensino de Física**. São Paulo, vol 7, n. 2, dez. 1985.

WOLFF, J. F. S. O ensino da teoria da relatividade especial no ensino médio: uma abordagem histórica e conceitual. Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

YAMAMOTO, I.; BARBETA, V. B. Simulações de experiências como ferramenta de demonstração virtual em aulas de teoria de física. **Revista Brasileira do Ensino de Física**. São Paulo, vol. 23, no. 2, Junho, 2001.

Disponível em :

<http://www.youtube.com/watch?v=KHjpBjgIMVk>, acessado em 19 de abril de 2010

Disponível em :

<http://www.youtube.com/watch?v=wteiuxyqtoM>, acessado em 19 de abril de 2010

Apêndice A: Texto de apoio ao aluno

Índice

-Introdução.....	88
-Filósofo grego Zenão.....	89
-A relatividade de Galileu Galilei.....	91
-Movimento e os fenômenos eletromagnéticos.....	98
-Einstein e seus postulados.....	102
-Relatividade do Tempo.....	107
-Relatividade do Espaço.....	115
-Relatividade da Simultaneidade.....	121
-Relação Massa e Energia.....	123

-Introdução

Desde a Antiguidade o homem tem a necessidade de explicar os fenômenos físicos que ocorrem a sua volta. Por causa disso, grandes estudiosos sempre buscaram teorias que respondessem a essas questões do nosso dia-dia. Uma dessas grandes teorias foi proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, a chamada da relatividade especial. Essa teoria ficou muito famosa principalmente por explicar um dos conceitos que gerou muita polêmica dentro da ciência, o movimento.

A ideia de movimento relativo não começou de fato com o Einstein em 1905. Vários cientistas e filósofos já haviam estudado e elaborado trabalhos na tentativa de explicar esse conceito.

Por causa disso, para compreendermos a relatividade especial este texto propõe primeiramente entender algumas dessas grandes ideias realizadas ao longo da história, e somente depois estudar as propostas de Einstein e as suas conseqüências como a relatividade do tempo e espaço.

-Filósofo grego Zenão

Um dos primeiros a estudar a idéia de movimento relativo foi o filósofo grego Zenão, de Eléia (500 – 451 a.C.). Para analisar esse fenômeno, Zenão, considerava dois bastões em movimento e imaginava como era vista as velocidades desses bastões se observados de posições diferentes, ou seja, referenciais diferentes. Vamos entender melhor esse exemplo. Imagine um observador *A* olhando para um bastão *B* que se move na sua direção. Vamos considerar que o observador *A* vê o bastão com velocidade V_B , como mostra a figura 1.

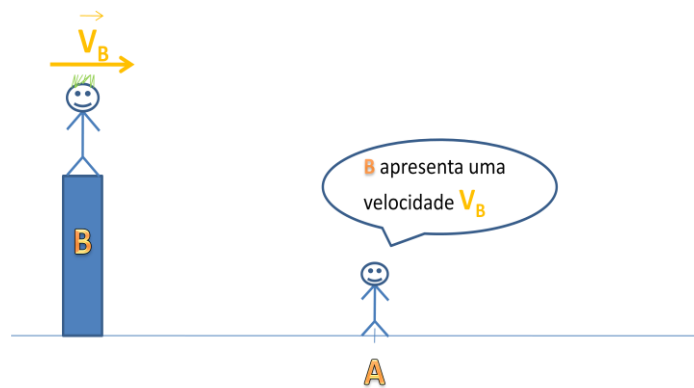


Figura 1: Observador *A* vendo o movimento do bastão *B*.

Suponha agora um segundo bastão *C* venha de encontro ao bastão *B* apresentando uma velocidade V_A em relação a *A*, como mostra a figura 2.



Figura 2: Observador *A* vendo o movimento do bastão *C*.

De acordo com Zenão se agora adotarmos o observador que se encontra em B como o nosso referencial, este irá afirmar que o bastão C terá uma velocidade $V_B + V_C$, pois esses bastões estão indo de encontro, ou seja, se movem na mesma direção e sentidos contrários.

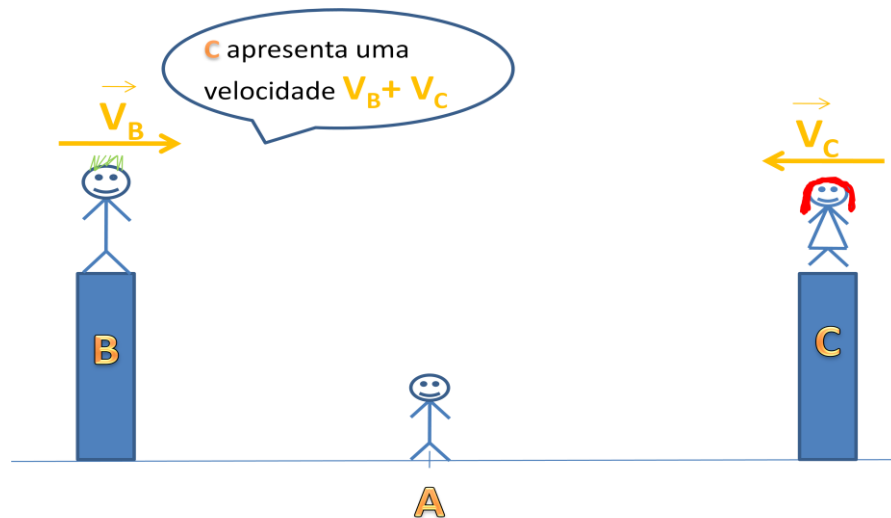


Figura 3: Observador B vendo o movimento do bastão C.

Sendo assim, podemos concluir que o movimento do bastão C é medido de maneira diferente entre os observadores A e B.

Zenão estudou esse fato, porém ele mesmo não compreendia como o movimento poderia ser relativo. Chegou até concluir que este movimento, dos bastões, era impossível, passando a chamar esse problema de paradoxo dos bastões.

Se pensarmos no nosso dia-dia, podemos ter várias situações em que a relatividade das velocidades ocorre. Como por exemplo, podemos citar o movimento dos carros. Se você se encontra sentado numa calçada e vê um automóvel passar, perceberá que o carro apresenta certa velocidade em relação a você. Porém, imagine agora que você está dirigindo um segundo automóvel e tenta ultrapassar aquele primeiro carro que viu passar quando estava sentado na calçada. Nesta ultrapassagem se você observar o carro ao lado, poderá perceber

que este não se encontra tão rápido como antes, pelo contrário, se a ultrapassagem for bem lenta, verá que este se encontra quase que parado em relação a você.

Vários outros filósofos vieram a estudar o movimento dos corpos. Porém, uma explicação realmente plausível só veio muito tempo depois com Galileu Galilei (1564 - 1642).

-A relatividade de Galileu Galilei

Galileu Galilei (1564-1642) é considerado um dos primeiros grandes gênios da ciência moderna. Ele foi um dos primeiros a estudar a relatividade do movimento dos corpos utilizando a matemática como ferramenta.

Em seus estudos, Galileu percebeu que a escolha de um referencial é muito importante para o movimento. Sendo assim, é importante compreendermos o significado da idéia referencial e seus tipos.

Referencial nada mais é do que um ponto de vista, o lugar de onde se observa a ocorrência de um evento. Assim, para diferentes referenciais podemos ter diferentes pontos de vista, ou seja, o que um observador mede em um referencial pode não concordar com o que um observador mede em um segundo referencial.

Existem dois tipos de referenciais, os inerciais e os não-inerciais. O termo referencial inercial foi introduzido pelo próprio Galileu e significa que obedece a lei da inércia, ou seja, é um sistema que se encontra em repouso ou com velocidade constante. Como exemplo, podemos citar um carro ou um trem com velocidade constante, uma estação de trem que se encontra em repouso em relação ao solo (figura 4) ou um barco em repouso num cais.

Já referencial não-inercial é todo sistema que não se encontra com uma velocidade constante, ou seja, é um sistema que está acelerado devido a ação de uma ou mais forças,

como por exemplo, uma carro acelerado em relação ao solo (figura 4), uma moto fazendo uma curva, a lua girando em torno da terra e entre outros.

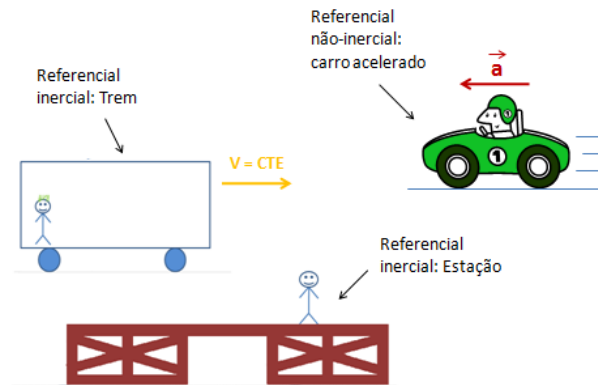


Figura 4: Exemplos de referenciais inerciais e referenciais acelerados.

Neste trabalho vamos estudar apenas os referenciais inerciais, pois é o tipo de referencial estudado por Galileu e pela teoria da relatividade especial de Einstein.

Um dos conceitos relativos que Galileu chamou a atenção é o conceito de trajetória. Ele dizia que o caminho percorrido por um corpo, seu o deslocamento, pode ser visto de maneira diferente por observadores diferentes. Para ilustrar essa situação vamos imaginar um barco em movimento e uma pessoa no mastro deste barco soltando uma pedra em direção ao convés. Para a pessoa que libera a pedra, observará esta se deslocar em uma trajetória reta, como ilustra a figura 5.

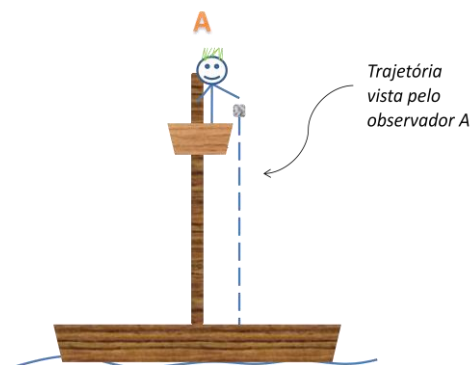


Figura 5: Trajetória da pedra vista pelo observador A.

Para um segundo observador que se encontra em terra firme assistindo todo o movimento de queda da pedra, afirmará que a pedra descreve uma trajetória parabólica, como mostra a figura 6.

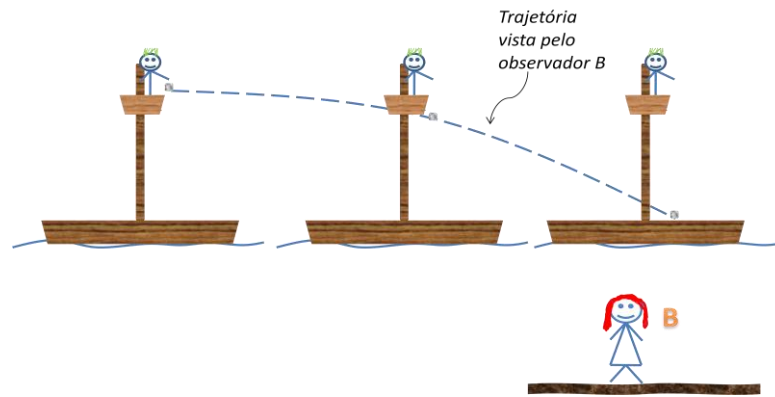


Figura 6: Trajetória da pedra vista pelo observador B.

Galileu estudou este fato e também relacionou os fenômenos que ocorrem em referenciais inerciais distintos de maneira matemática.

Para entendermos esse trabalho de Galileu suponha um carro em movimento com uma velocidade constante v em relação a Terra. Vamos considerar esse sistema “carro” como sendo o nosso referencial S' , apresentando coordenadas espaciais x' , y' , z' e a coordenada tempo como sendo t' . Como segundo referencial, consideremos um menino parado, em relação a calçada, que vê o carro passar. Esse será o nosso referencial S , com coordenadas x , y , z e t . Considere, também, que o carro se movimenta somente na direção x como mostra a figura 7.

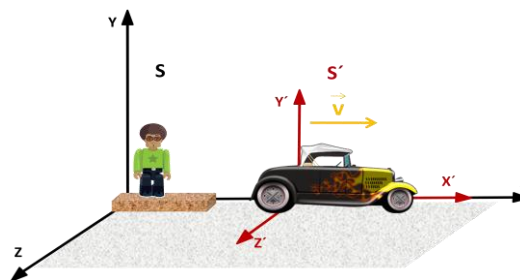


Figura 7: Ilustração referencial S e S'.

Para o próximo passo, vamos chamar de ponto F a posição que se encontra o farol do carro. Para esse ponto as coordenadas espaciais do referencial S' serão representado por $S'(x_F', y_F', z_F')$ e do referencial S por $S(x_F, y_F, z_F)$.

Analisando o movimento deste ponto, se considerarmos que, inicialmente para $t=t'=0$, os dois sistemas se encontram na mesma posição (figura 8a), então, após um intervalo de tempo o ponto F terá sofrido um deslocamento dado por: $\Delta X=v.t$ (figura 8b)

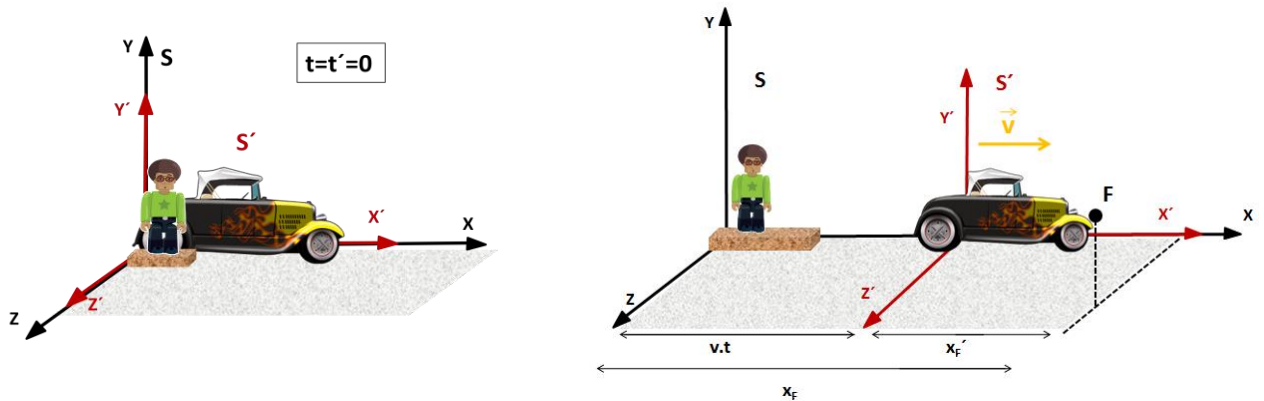


Figura 8a: Posição do referencial S' para tempo $t=0$

Figura 8b: Posição do referencial S' para um tempo t .

Assim, de acordo com a ilustração, se para o referencial S' o farol do carro está a uma distância x_F' , então para o referencial S (o menino) a distância medida fica sendo x_F' somado ao deslocamento ($\Delta X=v.t$) que o sistema S' (carro) sofre. Logo a relação entre as coordenadas dos dois referenciais ficam da seguinte forma:

$$x_F = x_F' + vt \quad (1)$$

$$y_F = y_F' \quad (2)$$

$$z_F = z_F' \quad (3)$$

$$t = t' \quad (4)$$

Note que consideramos $t=t'$. Isto, porque para Galileu o tempo é considerado absoluto, ou seja, não é relativo como o conceito de trajetória mostrada anteriormente.

Essas relações são conhecidas como transformações galileanas, pois permitem descrever o movimento em dois referenciais distintos.

A partir dessas equações Galileu consegue mostrar que as velocidades dos corpos são relativas. Como dissemos anteriormente, ele foi um dos únicos que conseguiu explicar a relatividade das velocidades do problema de Zenão.

Para mostrar agora que as velocidades medidas por diferentes referenciais são relativas vamos supor que no exemplo anterior um segundo automóvel, que vamos chamar de automóvel B, ultrapassa tanto o menino quanto o primeiro carro, que vamos chamar agora de automóvel A, na direção do eixo x. Após um intervalo de tempo t esse segundo automóvel estará a uma distância ΔS_{BA} em relação ao carro A e uma distância ΔS_B do menino, como mostra a figura 9.

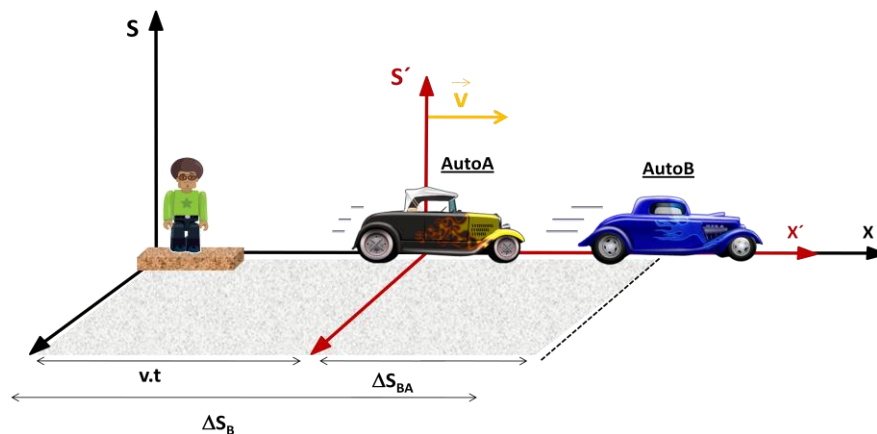


Figura 9: Ilustração do movimento relativo dos carros

Pela figura podemos relacionar esses deslocamentos que o auto B sofre em relação ao auto A e o menino da seguinte forma:

$$\Delta S_B = vt + \Delta S_{BA} \quad (5)$$

Como os deslocamento medidos pelos referenciais S e S' são diferentes, então as velocidades medidas, também, deveram ser diferentes. Vamos chamar de v_B a velocidade do automóvel B observada pelo menino e de v_{BA} a velocidade do automóvel B observado pelo automóvel A. Assim, podemos escrever:

$$\Delta S_B = v_B t \quad (6)$$

$$\Delta S_{BA} = v_{BA} t \quad (7)$$

Substituindo as equações (6) e (7) na equação (5) temos:

$$v_B t = v t + v_{BA} t \quad (8)$$

Dividindo, agora, a equação (8) pelo tempo t, temos:

$$\boxed{v_B = v + v_{BA}} \quad (9)$$

ou

$$\boxed{v_{BA} = v_B - v} \quad (10)$$

Essas equações nos mostra como a velocidade de um corpo pode ser medida de formas diferentes. A equação (10), por exemplo, indica que a velocidade do automóvel B em relação ao automóvel A (v_{BA}) é dada pela diferença entre a a velocidade do automóvel B em relação ao menino (v_B) e a velocidade do automóvel A em relação ao menino (v).

Para visualizar melhor isso tudo, podemos pensar em um exemplo com números. Imagine o menino na calçada observando o automóvel A se movendo com uma velocidade de 80km/h (velocidade v) e o automóvel B se movendo a uma velocidade de 100km/h (velocidade v_B). Para o automóvel A, de acordo com a equação (10), este observará o automóvel B com uma velocidade de 20km/h (v_{BA}).

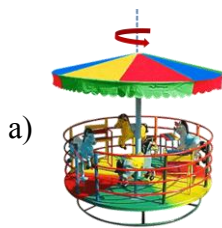
Com essas ideias Galileu consegue explicar o problema dos bastões em movimento de Zenão. Realmente para observadores diferentes podemos ter medidas de velocidades diferentes.

Questões e Problemas

1) De acordo com a teoria de Galileu, algumas grandezas são consideradas relativas, ou seja, são observadas de maneira diferente em referenciais diferentes e outras grandezas são consideradas invariantes, ou seja, são medidas de maneira igual para qualquer referencial. Das grandezas abaixo, de acordo com a teoria galileana, indique quais são relativas e quais são invariantes:

- a) Deslocamento
- b) Velocidade
- c) Tempo
- d) Trajetória

2) Indique em quais das figuras abaixo pode haver referenciais inerciais e referenciais não-inerciais. Explique o porquê.



3) Leopoldo se encontra sentado numa calçada de uma avenida observando os carros passarem. Se num instante de tempo $t_0=0$ um automóvel passa por Leopoldo a uma velocidade constante de 54km/h, em relação a este, determine quanto tempo irá levar para que o automóvel esteja a uma distância de 300 m em relação a Leopoldo.

4) Se você caminha dentro de um trem com velocidade constante de 5km/h, na mesma direção e sentido que este se move com 50km/h em relação ao solo, determine a sua velocidade em relação ao solo?

5) Um automóvel A, com uma velocidade constante de 100km/h em relação ao solo, ultrapassa um automóvel B que apresenta uma velocidade constante de 60km/h em relação ao solo. Determine a velocidade relativa (v_{AB}) entre o automóvel B e o automóvel A.

6) Um automóvel de tamanho desprezível, se movimenta a uma velocidade constante de 30m/s em relação ao solo e vai ultrapassar um trem de comprimento 200 m que se desloca a uma velocidade, também constante, de 10m/s. Utilizando o conceito de velocidade relativa determine quanto tempo leva para que o automóvel ultrapasse o trem.

-Movimento e os fenômenos eletromagnéticos

Na época de Galileu e Isaac Newton (1643-1727) grandes estudos foram feitos com fenômenos relacionados a mecânica dos corpos. Em meados do século XIX a ciência passou a ter, também, um grande avanço num ramo da física chamado Eletromagnetismo.

A eletricidade e o Magnetismo foram conceitos desenvolvidos de forma totalmente independente até o século XIX, quando o físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) verificou uma relação entre os efeitos elétricos e magnéticos. Oersted observou que, quando a agulha de uma bússola é colocada próxima de uma corrente elétrica, essa agulha é desviada de sua posição. Como se sabia naquela época a agulha de uma bússola só muda de posição quando nela atua um campo magnético, logo se conclui que uma corrente elétrica produz campo magnético.

Outro cientista que contribuiu para unificar o eletromagnetismo foi Michael Faraday (1791- 1867) com a sua lei da indução magnética. Faraday percebeu que variando-se a quantidade de campo magnético próximo a um condutor (figura 10), neste apareceria uma corrente elétrica, chamada de corrente induzida, daí o nome indução eletromagnética. É importante ressaltar nesta lei a relação entre os fenômenos eletromagnéticos com o

movimento, pois para produzirmos o tal campo magnético variável uma forma é movimentar um ímã afastando e aproximando-o de um condutor como mostra a figura abaixo.



Figura 10: Ilustração da Lei de Indução de Faraday

Mas, talvez a grande contribuição do eletromagnetismo venha do cientista James Clerk Maxwell. Físico e matemático, Maxwell através de equações, conhecidas por equações de Maxwell, unificou não somente as leis do eletromagnetismo, mas também a óptica ao eletromagnetismo.

As equações de Maxwell relacionam campos elétricos e magnéticos numa forma análoga a equação de uma onda mecânica, e mostram que estes campos eletromagnéticos se propagam com uma velocidade igual a da luz. Assim, os cientistas da época concluíram que a luz é uma onda eletromagnética que se propaga no espaço.

Citando agora Maxwell, a respeito de sua descoberta:

“A velocidade das ondulações transversais no nosso meio hipotético, calculada a partir das experiências de Eletromagnetismo efetuadas pelo Srs. Kolhraush e Weber (311.000 km/s), tem um valor tão próximo do valor da velocidade calculado a partir de experiências de Óptica realizadas pelo Sr Fizeau que é difícil de evitar a inferência de que a luz consistirá em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos.”

A figura abaixo ilustra a propagação de uma onda eletromagnética.

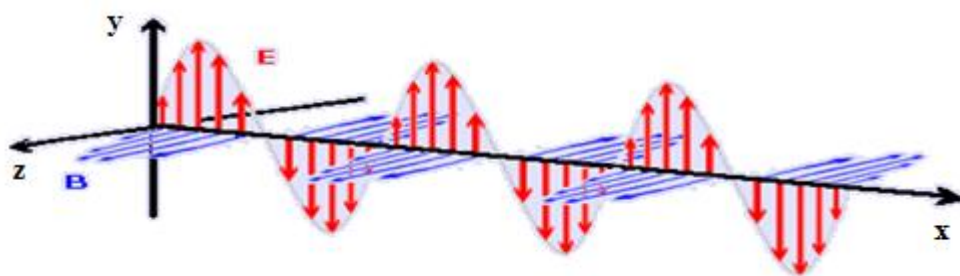


Figura 11: Ilustração de onda eletromagnética.

Um pouco mais tarde o físico alemão Heinrich Hertz confirmou este fato por meio de um experimento onde mostrava que ondas eletromagnéticas podiam ser refletidas, refratadas, difratadas e polarizadas da mesma forma que a luz.

Essa conclusão de que a luz é uma onda eletromagnética foi de grande importância para época, pois muitos estudiosos haviam tentado explicar de fato qual seria natureza da luz sem grandes sucessos.

Mas, como quase sempre na ciência, a solução de um problema acaba levando a outro.

O primeiro problema ocorria quando as transformadas de Galileu, apresentadas no capítulo anterior, eram aplicadas nas equações de Maxwell. Ao passarmos de um referencial inercial para outro, utilizando essas transformações, as equações de Maxwell forneciam resultados diferentes para um mesmo fenômeno, e como o próprio Galileu dizia, as leis da física deveriam ser iguais em qualquer referencial inercial, gerando assim um conflito.

Outro problema partia do fato de que as equações de Maxwell descreviam uma onda eletromagnética, cuja propagação se dava no vácuo sempre com uma velocidade “c”, cujo valor para vácuo é aproximadamente $c=3.10^8 m/s$, ou seja, a velocidade da luz seria invariante para qualquer referencial. Isso era inconsistente com o que se sabia na época, pois neste período o conhecimento que se tinha sobre ondas era de ondas mecânicas, ondas que precisam de um meio material para se propagar, como por exemplo, o som. A outra incoerência era

pelo fato de que de acordo com a teoria de Galileu, a velocidade é um conceito relativo, depende do referencial, e a luz, pelas equações de Maxwell, apresenta uma mesma velocidade c no vácuo, para qualquer referencial que a observasse. Essa visão mecanicista dominava o pensamento da época. Assim, não fazia sentido a luz se propagar no vácuo com a mesma velocidade para qualquer referencial.

Uma das tentativas de explicar esses problemas foi postular a existência de um referencial absoluto. Deveria existir um meio que permeia todo universo e com algumas propriedades especiais onde as ondas eletromagnéticas (luz) se propagam. Assim, como estaria em todo o universo a velocidade da luz sempre constante “ c ”, obtido pelas equações de Maxwell, seria referente a ele. Esse meio foi chamado de éter e deveria ter propriedades como densidade zero e transparência perfeita.

Alguns cientistas vieram a tentar detectar o éter, como por exemplo, Albert Michelson (1852-1931) e Edward Morley (1838-1923). Eles montaram um experimento sofisticado, conhecido como Experiência de Michelson-Morley. Nesse experimento, Michelson e Morley, lançavam feixes de luz em diferentes direções e supuseram, por exemplo, que se o feixe de luz andar na mesma direção e sentido do movimento da terra que se move em relação ao éter com uma velocidade v , então a velocidade do feixe de luz em relação ao éter deverá ser $c+v$, como mostra a figura abaixo. Porém, essa alteração na velocidade da luz não foi detectada de forma alguma, e o problema continuava.

Frente a isso, na época, tinha-se três alternativas:

4. A relatividade de Galileu era válida apenas para a mecânica e as equações de Maxwell para o eletromagnetismo;
5. A relatividade galileana estava correta e as equações de Maxwell deveriam ser modificadas;

6. As equações de Maxwell estavam corretas e a relatividade galileana deveria ser modificada.

A resposta para esses problemas só veio em 1905 com Albert Einstein.

Questões e Problemas

- 1) Cite e explique uma das incompatibilidades entre as equações de Maxwell e as teorias clássicas.
- 2) Das alternativas apresentadas na época, mostradas na página 15, escolha uma em que acredite que esteja correta e tente explicar o porquê.

-Einstein e seus postulados

Albert Einstein (1879-1955) nasceu em Ulm na Alemanha, e cresceu em Munique. Ele era filho de Hermann Einstein que era dono, junto ao tio de Albert, de uma oficina eletrotécnica. Dizem os estudiosos que Einstein não se dava muito bem nas escolas. Em 1895, Einstein, quis adiantar seus estudos prestando o exame de ingresso para a Escola Politécnica Federal de Zurique na Suíça. Porém não foi aprovado na parte de ciências humanas e teve a sua admissão negada. Mais tarde sua família decide enviá-lo para Aarau, na Suíça, na esperança que isso lhe rendesse uma segunda chance. Einstein foi admitido e se formou pela escola Politécnica em 1900 em licenciatura em física. Mais tarde, sem conseguir encontrar um bom emprego como professor, começou a trabalhar como analista num escritório de patentes na Suíça e foi nesse período que começou a desenvolver uma série de trabalhos que levaram a teoria da relatividade especial.



Figura 12: Albert Einstein quando funcionário do escritório de Patentes de Berna, cerca de 1906.

Einstein estudou a teoria da eletrodinâmica de Maxwell e as incompatibilidades que esta apresentava com a relatividade do movimento clássico. Veja um trecho de um de seus artigos sobre relatividade publicada em 1905:

“É sabido que a eletrodinâmica de Maxwell- como compreendida atualmente -, quando aplicadas a corpos em movimento, leva a simetrias que não parecem ser inerentes aos fenômenos.”

Por estar familiarizado desde cedo com fenômenos eletromagnéticos, pois seu pai era dono de uma oficina eletrotécnica, Einstein elabora vários experimentos mentais que o auxiliam a produzir a teoria da relatividade especial.

Na sua juventude se pergunta como uma onda de luz pareceria se ele se movesse com a mesma velocidade c na direção da propagação desta onda. Einstein sabia que sempre que estivesse em movimento com uma velocidade v igual a velocidade que um segundo objeto apresenta, então este objeto em relação a você estaria em repouso. Para a luz, o raciocínio é o mesmo. Se estivermos em movimento ao lado de uma onda eletromagnética com uma mesma velocidade c , então devemos observar esse raio de luz como um campo eletromagnético em repouso. Entretanto, Einstein sabia que tal fato não poderia existir. A luz consiste justamente de um campo eletromagnético em movimento, ou seja, uma onda eletromagnética que se propaga no tempo e no espaço.



Figura 13: Albert Einstein e Charlie Chaplin Hollywood - 1931

Foi a partir desse tipo de pensamento e outros sobre o eletromagnetismo que fez Einstein chegar a brilhante conclusão de que a luz é algo especial e deve ser observada sempre com uma mesma velocidade c , no vácuo, não importando quão rápido os observadores possam se mover uns em relação aos outros, cada um deles mediria a rapidez da luz que passa por eles como sendo $3 \cdot 10^8$ m/s.

Assim, em 1905, Einstein publica os seus resultados em dois trabalhos que deram origem a teoria da relatividade especial: “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento” e “A Inércia de um Corpo Depende do seu Conteúdo energético?”.

No primeiro artigo, Einstein trabalha os problemas relacionados ao eletromagnetismo e anuncia dois postulados:

3. As leis da física são iguais em qualquer referencial inercial, não existe nenhum sistema preferencial.
4. A velocidade da luz no vácuo tem sempre o mesmo valor c , independentemente do movimento de sua fonte

O primeiro postulado é a generalização do princípio da relatividade galileana que era válido apenas para as leis da mecânica. Este postulado afirma que todas as leis da física, da mecânica, da óptica, da termodinâmica, do eletromagnetismo são válidas para todos os referenciais inerciais.

O segundo postulado afirma que a velocidade da luz é invariante e a partir disso é possível mostrar que as equações de Maxwell estavam corretas.

Partindo deste fato, Einstein começa a analisar quais seriam as conseqüências da velocidade da luz ser constante. E chega à conclusão de que se a velocidade da luz é invariante entre um referencial e outro então um dos conceitos que deveriam ser relativos são o tempo e o espaço.

De acordo com Galileu a velocidade é um conceito relativo, e o tempo e o espaço são conceitos absolutos.

$$\underset{\text{relativo}}{\textit{velocidade}} = \frac{\overset{\text{absoluto}}{\textit{espaço}}}{\underset{\text{absoluto}}{\textit{tempo}}}$$

Figura 14: Conceito de velocidade, espaço e tempo segundo Galileu.

A genialidade de Einstein foi perceber, partindo do fato da velocidade da luz ser invariante, o tempo e o espaço são grandezas relativas e não absolutas como se previa na mecânica clássica.

$$\underset{\substack{\text{Vel. da luz} \\ \text{absoluta}}}{\mathbf{C}} = \frac{\overset{\text{relativo}}{\textit{espaço}}}{\underset{\text{relativo}}{\textit{tempo}}}$$

Figura 15: Conceito da velocidade da luz, espaço e tempo segundo a Einstein.

Isso tudo foi um choque para época, pois as teorias da mecânica de Galileu e Newton eram muito bem aceitas até então, mas agora deveriam ser modificadas.

Deu-se início a uma nova mecânica a chamada mecânica relativística. Como veremos nos próximos tópicos, essa mecânica é muito útil para explicar fenômenos relacionados a movimentos em altíssimas velocidades como da própria luz ou próximas desta. Nessa nova física é utilizado as idéias de cientistas como Albert Einstein, Hendrik Lorentz, Henri Poincaré e George Fitzgerald.

Mas apesar dessas novas idéias não podemos simplesmente dizer que os estudos da mecânica clássica, como as idéias de Galileu, estavam errados. Pelo contrário, fenômenos de movimento relacionados a baixas velocidades, como velocidades que estamos habituados em nosso dia-dia, são muito bem explicados por essa mecânica clássica. O que podemos dizer é que essas leis estavam incompletas e deveriam ser modificadas para explicar fenômenos relacionados a altas velocidades.

Junto com a relatividade do tempo e do espaço, outras conseqüências vieram com o fato da velocidade da luz ser constante. Conseqüências como a relatividade do conceito de simultaneidade, relatividade do momento linear, e até mesmo a famosa equação $E=mc^2$. Algumas dessas conseqüências serão trabalhadas melhor nos próximos tópicos.

Questões e Problemas

1) Uma nave espacial se move com uma velocidade constante de 1500m/s em relação a um planeta próximo. Em um determinado instante a nave lança a sua frente, na mesma direção e sentido do deslocamento da nave, uma sonda com uma velocidade de 15m/s em relação a nave. Determine a velocidade com que uma pessoa fixa no planeta observará a sonda se mover. Indique qual teoria, relatividade clássica de Galileu ou Relatividade Especial de Einstein, melhor se adéqua para encontrar a solução deste problema e explique o Por quê?

2)Em relação a questão anterior, considere agora que a nave acionou seu motor principal que lhe imprimiu uma velocidade de 100000km/s. Vamos considerar também que em sua viagem espacial, a nave se depara com alguns asteróides e aciona a sua arma a laser, que atira pulsos de luz a sua frente com uma velocidade constante $c=300000m/s$ em relação a nave, para destruir os asteróides. Determine a velocidade com que uma pessoa fixa no planeta observará o pulso de luz se mover:

$$a)v_{luz}= 200000 \text{ km/s}$$

b) $v_{\text{luz}} = 400000 \text{ km/s}$

c) $v_{\text{luz}} = 500000 \text{ km/s}$

d) $v_{\text{luz}} = 300000 \text{ km/s}$

e) zero

-Relatividade do Tempo

Uma consequência interessante dos postulados de Einstein é a relatividade do tempo. É interessante compreender que o tempo medido em um referencial pode ser diferente do tempo medido em um segundo referencial.

Para estudar esse fato vamos imaginar uma viagem espacial. Vamos considerar duas naves viajando juntas no espaço uma logo acima da outra, como mostra a figura 16.



Figura 16: Ilustração de duas naves viajando juntas no espaço

Num determinado instante da viagem essas naves passam perto de um asteróide que se encontra no espaço.



Figura 17: Ilustração das naves próximas a um asteróide.

Vamos chamar de observador O' , um astronauta que se encontra no asteróide observando as naves passarem e de observador O o piloto de uma das naves que se encontra viajando junto com esta numa velocidade v , conforme a figura 18.

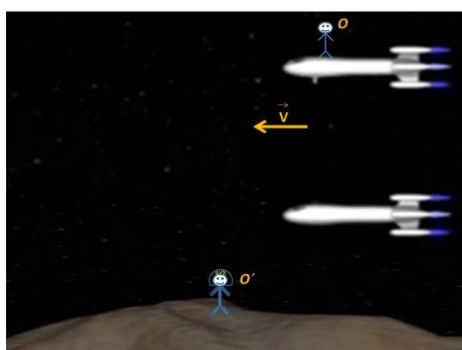


Figura 18: Ilustração observador O e observador O' .

Agora vamos supor que a nave de cima apresenta uma arma laser e que num certo momento dispara um pulso de luz contra a outra nave. O observador O verá o pulso de luz fazer uma trajetória reta até atingir a outra nave da maneira como indica a figura:

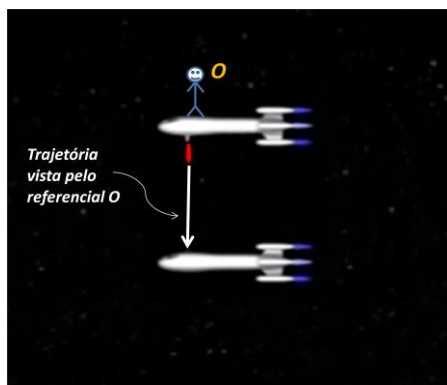


Figura 19: Trajetória do pulso de luz vista pelo observador O.

No para o referencial O' , temos que considerar que este vê as naves em movimento. Isso significa que este observador vê o pulso de luz realizar um movimento não apenas vertical, de uma nave a outra, mas também, na horizontal acompanhando o movimento das naves. A figura 21 ilustra a trajetória vista pelo observador O' .

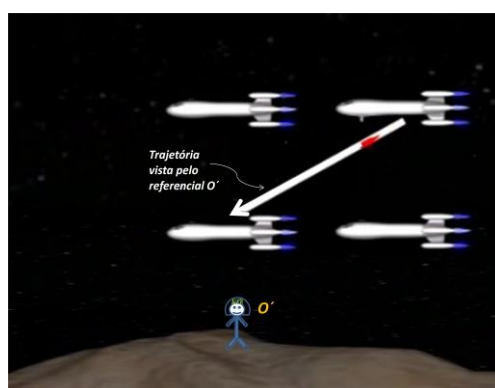


Figura 20: Trajetória do pulso de luz vista pelo observador O' .

Se compararmos, agora, a figura 19 com a 20, para o observador O' o pulso de luz percorre uma distância maior do que para o referencial O. Para a física clássica o observador O' mediria um deslocamento maior do pulso mas ao mesmo tempo mediria a velocidade deste pulso também maior dada por $(c+v)$, velocidade c do pulso medida pelo observador O somada da velocidade v das naves. Assim, para O' como a distância medida é maior, mas a velocidade

medida do pulso também é maior então um compensa o outro e o tempo medido do pulso de luz ir de uma nave a outra é o mesmo medido pelo referencial O.

Por outro lado na relatividade especial sabemos que o observador O' deverá medir a velocidade do pulso de luz também como sendo c, e não c+v como mostra a relatividade clássica. Assim, se a distância medida pelo observador O' for maior do que a distância medida pelo observador O, então o tempo medido pelo observador O' deverá ser maior do que o tempo medido pelo referencial O.

Para determinar essa relação entre os tempos medidos, devemos primeiramente saber qual a distância que o pulso de luz percorre, para cada observador, até chegar na outra nave. Para o observador O essa distância, de acordo com a equação da velocidade média, é dada por:

$$\Delta S = c \cdot \Delta t \quad (11)$$

Onde c é a velocidade da luz e Δt é o tempo medido por este observador:

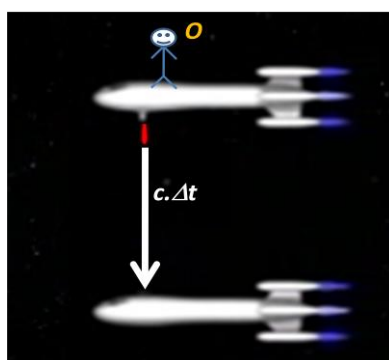


Figura 21: Deslocamento do pulso de luz vista pelo observador O.

Para o referencial O' a distância que esse observa o pulso de luz percorrer obedece o mesmo raciocínio do anterior, porém com um intervalo de tempo diferente:

$$\Delta S' = c \cdot \Delta t' \quad (12)$$

Onde c é a velocidade da luz também medida para este referencial, e $\Delta t'$ é o intervalo de tempo medido por O' .

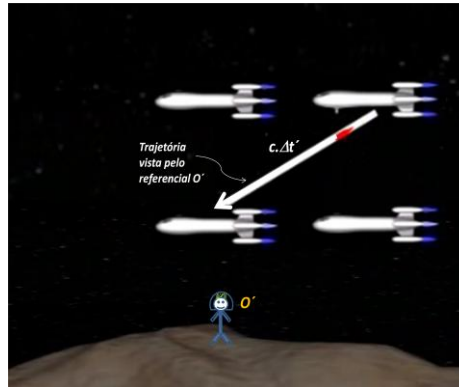


Figura 22: Deslocamento do pulso de luz vista pelo observador O' .

Se combinarmos as figuras 21 e 22 em uma só, obtemos o seguinte triângulo retângulo mostrado na figura 23:

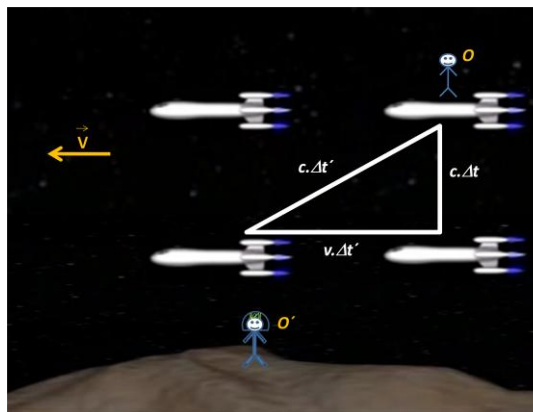


Figura 23: Relação entre os deslocamentos do pulso de luz vista pelos observadores O e O' .

Onde $(v \cdot \Delta t')$ é a distância percorrida pelas naves. Usando o teorema de Pitágoras neste triângulo obtemos a seguinte relação:

$$(c \cdot \Delta t')^2 = (v \cdot \Delta t')^2 + (c \cdot \Delta t)^2 \quad (13)$$

Isolando $\Delta t'$ temos:

$$(c^2 - v^2)\Delta t'^2 = c^2 \cdot \Delta t^2 \quad (14)$$

Dividindo ambos os membros por c^2 temos:

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\Delta t'^2 = \Delta t^2 \quad (15)$$

Extraindo a raiz dos dois lados:

$$\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \Delta t' = \Delta t \quad (16)$$

Isolando $\Delta t'$ temos:

$$\Delta t' = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \Delta t \quad (17)$$

Onde a expressão $\frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}$ é representado pela letra grega γ . Por fim temos:

$$\boxed{\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t} \quad (18)$$

Este termo γ é conhecido como fator de Lorentz, em homenagem ao cientista Hendrik Lorentz, que foi um dos primeiros a deduzir equações matemáticas que relaciona o espaço e o tempo medidos entre um referencial e outro.

-Uma introdução a Relatividade Especial utilizando materiais multimídias-

Se substituirmos valores de v menores que c neste termo, com um pouco de esforço mental, veremos que γ é sempre maior que 1, logo $\Delta t'$ será sempre maior que Δt . A este fenômeno chamamos de *dilatação dos tempos*, ou seja, o tempo medido para o referencial O' que vê a nave em movimento é maior que o tempo medido pelo referencial O , que se encontra em repouso em relação as naves.

Mas podemos pensar mais sobre esse fator. Vamos substituir, agora, alguns de v , a velocidade das naves, para entendermos melhor o comportamento do γ . Para $v=0,2.c$, ou seja, quando as naves viajam a 20% da velocidade da luz, com a ajuda de uma calculadora, obtemos aproximadamente $\gamma=1,02$. Para $v=0,8.c$, ou seja, 80% da velocidade da luz, γ vale aproximadamente 1,7. Agora vamos tomar $v=c$, se fizermos isso teremos no denominador da expressão γ o termo zero. Sabemos que essa divisão não existe, então quando a velocidade v tender para c γ deverá tender ao infinito, $\gamma=\infty$, como mostra o gráfico abaixo.

v	γ
0,000	1,00
0,200 c	1,02
0,400 c	1,09
0,600 c	1,25
0,800 c	1,67
0,900 c	2,3
0,990 c	7,14
0,999 c	25,00
c	∞

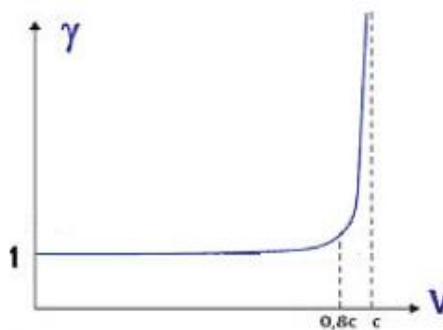


Gráfico 1: γ em função da velocidade.

Daqui podemos tirar uma conclusão muito importante, já observada por Einstein. Como γ tende ao infinito quando $v=c$, então nunca poderemos atingir a velocidade da luz. Se voltarmos a pensar no nosso exemplo das naves e nos tempos medidos dos referenciais Δt e $\Delta t'$, as naves atingindo a velocidade da luz ($v=c$), então γ tenderá ao infinito e de acordo com a equação (19) o tempo $\Delta t'$ medido pelo referencial O' também tenderá ao infinito. Assim, o astronauta que se encontra no asteróide só verá as naves atingirem a velocidade da luz num intervalo de tempo infinito, ou seja, este nunca observará as naves com a velocidade da luz.

Isso tudo foi muito bem deduzido pelo Einstein. Este afirmou que a maior velocidade encontrada na natureza é a velocidade da luz, e que nenhum corpo no universo pode atingir esta velocidade a não ser a própria luz.

Questões e Problemas

1) O que significa dilatação do tempo?

2) Um passageiro de um expresso interplanetário, deslocando-se com $v=0.99c$, tira uma soneca de cinco minutos pelo seu relógio. Quanto dura esta soneca do ponto de vista de um planeta considerado fixo?

3) Os Múons são partículas elementares formadas na alta atmosfera pelas interações dos raios cósmicos com os átomos encontrados no ar. Apresentam um tempo de vida de aproximadamente $2,2\mu\text{s}$, medido a partir do referencial do próprio múon, e esse tempo não é suficiente para que essas partículas atravessem toda a atmosfera e cheguem até a terra. Porém alguns experimentos detectaram algumas dessas partículas ao nível do mar. Isso ocorre devido a dilatação dos tempos. O tempo de vida do múon é de $2,2\mu\text{s}$ para o referencial do próprio múon, mas se considerarmos um observador fixo aqui na terra este verá o múon apresentar um tempo de vida de aproximadamente $15,6\mu\text{s}$. Determine qual a velocidade que a partícula múon deve apresentar para que ocorra essa dilatação dos tempos entre os dois referenciais descritos anteriormente.

-Relatividade do Espaço

Assim como o tempo é relativo entre um referencial e outro, outra consequência dos postulados de Einstein, é que o espaço também é relativo. O comprimento de um corpo medido quando este se encontra em movimento em relação a um observador é sempre menor do que o comprimento medido quando este corpo se encontra em repouso. A esse fenômeno chamamos de *contração do espaço*.

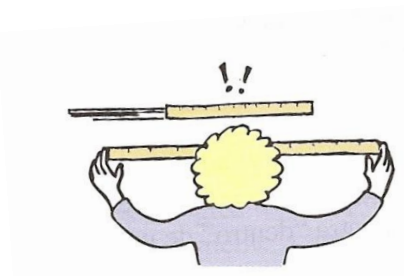


Figura 24: Ilustração de um observador vendo uma reta em movimento e em repouso.

Figura extraída de (HEWITT,2002).

Essa idéia de contração, foi proposta pela primeira vez pelo físico Geoege F. FitzGerald e expressa matematicamente pelo físico, Hendrick A. Lorentz. Enquanto esses cientistas acreditavam que era a própria matéria que sofria contração, Einstein percebeu que na verdade quem sofre contração é o próprio espaço.

Considere uma nave que viaja de uma estrela a outra com uma velocidade v em relação a um observador que se encontra fixo no planeta terra. A este observador vamos chamar de referencial O' e o piloto da nave que se encontra em movimento junto a nave vamos chamar de referencial O .

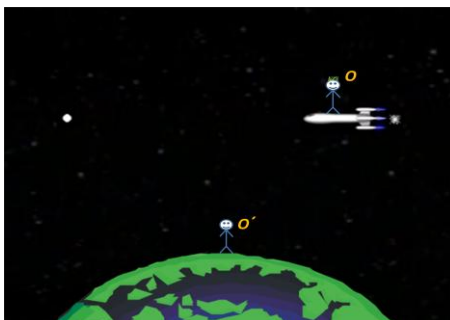


Figura 25: Ilustração do observador O e O'.

O observador O' que se encontra em repouso em relação a terra, também irá se encontrar em repouso em relação a posição das estrelas. A distância que este observador mede entre uma estrela e outra vamos chamar de comprimento próprio e representar por L_p . Os cientistas dão esse nome de comprimento próprio a todo comprimento de um corpo que é medido do referencial em que este corpo se encontra em repouso.

Para medir esse comprimento L_p , o observador O' não pode utilizar, por exemplo, uma régua ou uma trena comum. Para isso ele deverá medir o intervalo tempo que a nave demora a ir de uma estrela a outra e utilizando a equação da velocidade média obtém L_p :

$$L_p = v \cdot \Delta t' \quad (19)$$

Onde $\Delta t'$ é o intervalo de tempo de viagem da nave, medido pelo observador O'.

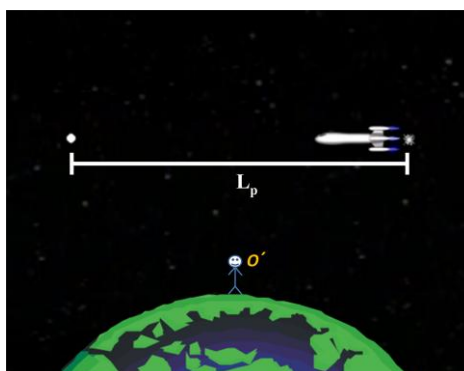


Figura 26: Distância das estrelas vista pelo observador O'.

Pensando agora no observador O, este medirá uma distância diferente de O', pois como já sabemos o tempo é medido de forma diferente entre esses observadores. A distância medida por O vamos chamar de L e é dada por:

$$L = v \cdot \Delta t \quad (20)$$

Onde o Δt é o intervalo de tempo, medido pelo referencial O. Se dividirmos, agora, a equação (19) pela equação (20) temos:

$$\frac{L}{L_p} = \frac{\Delta t}{\Delta t'} \quad (21)$$

Substituindo, agora, a relação dos tempos $\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t$ obtido no capítulo anterior temos:

$$\frac{L}{L_p} = \frac{1}{\gamma} \quad (22)$$

Por fim, isolando L ficamos com:

$$\boxed{L = \frac{L_p}{\gamma}} \quad (23)$$

Como sabemos γ é sempre maior que um, assim, a equação acima mostra que L é sempre menor do que L_p , ou seja, o espaço medido pelo referencial O está contraído em relação ao espaço medido pelo referencial O'.

Podemos dizer, então, que para o piloto da nave, o referencial O, a viagem vai ser mais curta do que para o observador que se encontra na terra.

Mas como isso é realmente possível? Como não observamos tais fenômenos de dilatação do tempo e contração do espaço no nosso dia-dia? Como, por exemplo, uma pessoa a bordo de um trem mede um tempo menor de viagem do que uma pessoa em repouso na estação?

Realmente isso tudo é algo que foge do nosso bom senso. Não estamos habituados a pensarmos deste modo. Mas como explicado no começo deste texto, esses fenômenos de tempo e espaço relativos, na verdade só ocorrem quando estamos nos movendo a velocidades muito rápidas, velocidades que se aproximam a da luz, próximos de 300 000 km/s. Neste caso sim, para esse universo de altas velocidades, que são validas as idéias criadas pelo Einstein e outros cientistas. Para o nosso dia-dia comum, a velocidades pequenas, são as famosas leis de Newton e Galileu que valem e explicam bem os fenômenos ocorridos.

Pela equação de γ podemos perceber que se v , a velocidade que o corpo apresenta, for bem menor do que c , a velocidade da luz, então o termo v/c pode ser considerado zero e γ acaba valendo um:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{(1-\frac{v^2}{c^2})}} = \frac{1}{\sqrt{(1-\frac{0}{c^2})}} = \frac{1}{\sqrt{(1-0)}} = \frac{1}{\sqrt{1}}$$

Logo:

$$\gamma=1$$

Sendo assim a equação (18) da relatividade do tempo e a equação (23) do espaço ficam:

$$L = L_p \quad (24)$$

$$\Delta t' = \Delta t \quad (25)$$

Isso significa que, realmente para pequenas velocidades, o tempo e o espaço medidos entre um referencial e outro são iguais, como afirmavam Galileu e Newton.

Questões e Problemas

1) Explique porque não podemos atingir a velocidade da luz.

2) A estrela mais próxima do nosso sistema solar é chamada de Alfa Centauri C. Ela pertence ao sistema alfa centauri, um sistema triplo de estrelas que fica na constelação do Centauro. A distância dessa estrela ao Sol foi medida com a ajuda de telescópios fixos na terra e vale aproximadamente 4,2 anos-luz. Considerando que uma nave espacial possa viajar a 0,9 da velocidade da luz e que esta faça uma viagem do sol a alfa centauri, determine:

a) O espaço percorrido pela nave durante a viagem, medida pelo piloto da nave em anos-luz;

b) O tempo de duração da viagem medido pelo piloto da nave, em anos;

c) O tempo de duração da viagem medido por um observador fixo na terra, em anos.

3) De acordo com a teoria de relatividade especial o comprimento de um corpo medido quando este se encontra em movimento em relação a um observador é sempre menor do que o comprimento medido quando este corpo se encontra em repouso. Considere que uma régua apresenta um comprimento de 30cm como mostra a figura 1.

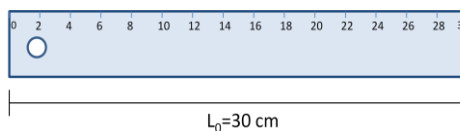
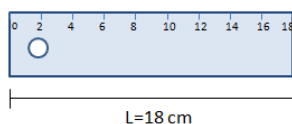


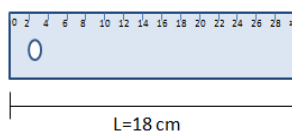
Figura 1

Das alternativas abaixo escolha a qual melhor represente a forma da régua vista por um observador que se encontra fixo no solo e observa a régua se movimentando, na mesma direção de seu comprimento, a uma velocidade constante de $0,8c$:

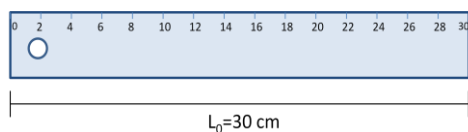
a)



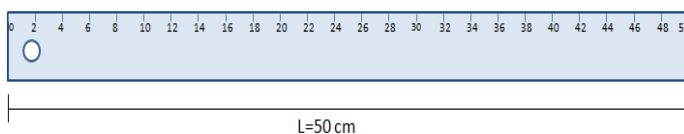
b)



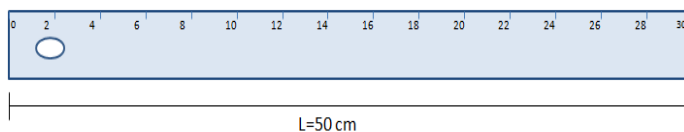
c)



d)



e)



-Relatividade da Simultaneidade

Vamos agora estudar a relatividade do conceito de simultaneidade. Dizemos que dois eventos são simultâneos se eles ocorrem no mesmo instante de tempo. Na relatividade galileana, se dois eventos são simultâneos para um determinado referencial inercial, então serão simultâneos para qualquer outro sistema de referencia, ou seja, a simultaneidade não é relativa. Isso ocorre devido ao fato do tempo medido ser igual para qualquer referencial de onde se observa o evento. Contudo na relatividade especial de Einstein, o tempo é relativo, então um evento que é simultâneo para um referencial pode não ser simultâneo para outro.

Para entendermos esse fato vamos utilizar um exemplo dado pelo próprio Einstein. Considere um trem se movendo com uma velocidade v em relação a uma estação. Dentro do trem encontra-se uma passageira chamada Maria. Na estação encontra-se um segundo observador chamado Pedro.

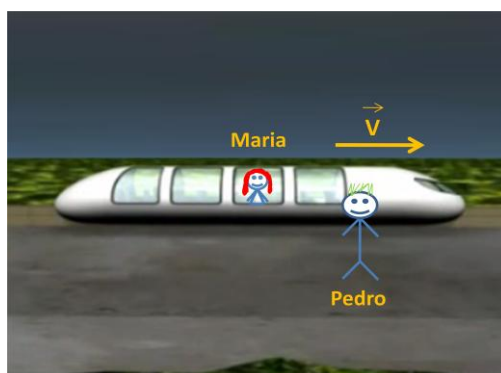


Figura 27: Observadores Pedro e Maria.

Vamos supor agora que a região onde a estação se encontra se apresenta com um tempo de tempestade e que num certo instante Pedro vê dois raios atingirem o trem simultaneamente, um na parte dianteira e outro na parte traseira, como mostra a figura 28.



Figura 28: Raios de luz que atingem as extremidades do trem.

Pedro vê esses raios ocorrerem simultaneamente, pois os clarões de luz emitida de cada ponta do trem vão atingi-lo ao mesmo tempo, com uma velocidade c , como mostra a figura abaixo:



Figura 29: Pedro observando os clarões de luz simultaneamente.

Se pensarmos agora no referencial de Maria, esta deverá ver os pulsos de luz chegarem com a mesma velocidade c observada por Pedro, pois como já sabemos a velocidade da luz é invariante. Porém, Maria se encontra em um trem que se move em sentido ao pulso de luz dianteiro e se afasta do pulso traseiro. Isso fará com que ela observe primeiro um pulso de luz e depois o outro (figura 30).



Figura 30: Passageira observando os clarões de luz em tempos diferentes.

Assim, os pulsos de luz não chegarão ao mesmo tempo em Maria e farão com que esta afirme que um raio ocorreu primeiro que o outro, ou melhor, afirmará que não são simultâneos.

Podemos dizer então que, na relatividade especial, dois eventos que são simultâneos para sistema de referencia não necessariamente são simultâneos para outro sistema de referência.

-Relação Massa e Energia

De todos os conceitos da ciência, talvez o mais amplo seja o conceito de energia. Energia é um conceito abstrato, não podemos tocá-la, manipulá-la, podemos apenas imaginá-la em nossos pensamentos.

Mesmo assim, energia é um conceito muito familiar para nós. Podemos observar a sua manifestação quando recebemos a luz do sol, quando ligamos um aparelho de televisão, ou até mesmo quando nos alimentamos.

Existem muitas formas de energia no nosso dia-a-dia. Quando estudamos a mecânica de um corpo, por exemplo, estudamos dois importantes tipos de energia, a energia cinética e a potencial que esse corpo pode apresentar.

A energia cinética é conceito que está relacionada ao movimento. Podemos dizer que quando um corpo apresenta uma velocidade, este apresentará, também, uma energia cinética associada a esta velocidade.

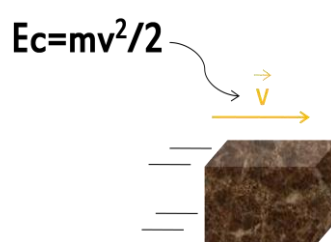


Figura 31: Ilustração de um corpo com energia cinética

Energia potencial gravitacional é a energia que fica armazenada no campo gravitacional da terra e que é transferida a um corpo, através da força da gravidade, quando liberamos este a de uma determinada altura em relação ao solo. É essa energia, por exemplo, que uma represa apresenta quando se encontra a um nível mais elevado do terreno, energia na qual a hidroelétrica utiliza para transformar em energia elétrica.

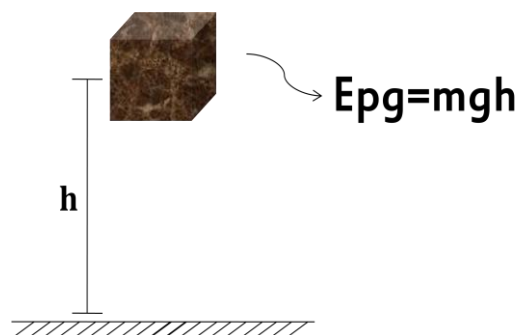


Figura 32: Ilustração de um corpo com energia potencial gravitacional.

Mas e se pensarmos em um corpo que se encontra em repouso no chão, este então não apresentará energia alguma? A resposta para essa pergunta é não.

Em 1905, Einstein publica na revista *Anais da Física* um artigo sob o título: “A inércia de um corpo depende de seu conteúdo energético?”. Nele, Einstein afirma que um corpo mesmo em repouso e com ausência de forças atuando sobre ele apresenta uma energia. Ela é chamada de energia de repouso. Einstein concluiu que a massa pode ser considerada como uma forma de energia, como cita em seu artigo: “A massa de um corpo é uma medida de seu conteúdo energético, se a energia muda de E a massa muda no mesmo sentido de E/c^2 ”. Assim, podemos dizer que pelo fato do corpo ter massa, existe uma energia associada a esta massa e esta relação é expressa pela equação:

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (26)$$

Onde E_0 é energia que um corpo apresenta quando se encontra em repouso, m_0 é a massa de repouso e c é a velocidade da luz.

Para chegar a essa conclusão, Einstein percebeu que a definição de energia cinética necessitava de modificações relativísticas e com algum esforço matemático chegou à seguinte relação:

$$\Delta E_c = \gamma m_0 c^2 - m_0 c^2 \quad (27)$$

O termo constante $m_0 c^2$ é a energia de repouso apresentada anteriormente. O termo $\gamma m_0 c^2$ seria a energia total do corpo que depende da velocidade, pois γ depende da velocidade. Este termo, também, é muito escrito da seguinte forma:

$$\boxed{E = mc^2} \quad (28)$$

Onde m é conhecido como massa relativística e é dado por:

$$m = \gamma m_0 \quad (29)$$

Esse fator m depende de γ , e como já sabemos, γ vai aumentando conforme se aumenta a velocidade, então m também aumentará conforme a velocidade cresce.

Resumindo, podemos dizer que quando um corpo se encontra em repouso sua energia é determinada pela equação $E_0 = m_0 c^2$, mas se este corpo estiver em movimento a sua energia é dada por $E = mc^2$, com $m = \gamma m_0$.

A equação (28) acabou ficando muito famosa, pois mostra que uma pequena quantidade de massa pode ser transformada em uma grande quantidade de energia. Isso acaba tendo uma aplicação incrível na área de reações nucleares como a fissão e fusão nuclear.

A fissão nuclear é uma reação em que o núcleo de um átomo pesado é quebrado em dois outros núcleos, formando novos elementos e liberando energia. Essa energia vem de uma pequena parte da massa do átomo original. Se somarmos a massa dos elementos resultantes do final da reação observaremos que esta massa é menor do que a massa do átomo original. Essa pequena quantidade de massa que falta é a que foi transformada em energia de acordo com a equação $E = mc^2$.

Um exemplo típico de fissão nuclear é a quebra do núcleo do átomo de urânio ${}_{92}^{235}\text{U}$, por um nêutron. Nessa reação são formados átomos de criptônio ${}_{36}^{92}\text{Kr}$, e bário ${}_{56}^{141}\text{Ba}$, além de alguns nêutrons.

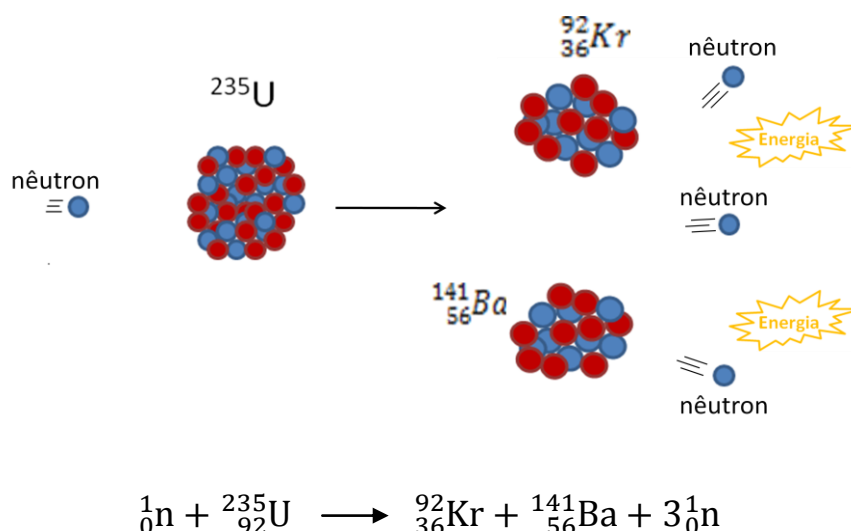


Figura 33: Ilustração da fissão nuclear do átomo de Urânio

Se somarmos as massas atômicas do bário, do criptônio e dos nêutrons veremos que não é igual a massa do nêutron inicial mais a massa do átomo de urânio, veja o problema 4.

Esse processo de fissão é utilizado para gerar energia elétrica numa usina nuclear, por exemplo. É também, o processo que ocorre dentro das bombas nucleares, onde uma reação em cadeia transforma pequenas quantidades de massa em grandes quantidades de energia.

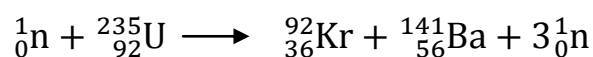
Questões e Problemas

- 1) Explique o que significa a equação $E=mc^2$?
- 2) Um elétron se move com uma velocidade de $0,85c$. Determine:
 - a) Qual a massa relativística do elétron a essa velocidade;
 - b) Qual a energia total que o elétron apresenta quando se encontra a essa velocidade;
 - c) Qual a energia elétron quando este se encontra em repouso;
 - d) Qual a variação de energia cinética do elétron desde o seu repouso até quando atinge a velocidade de $0,85c$;

dado: massa do elétron vale $9,11 \cdot 10^{-31} \text{kg}$

3) Se uma pera de 100 gramas fosse transformada integralmente em energia e essa energia fosse utilizada para manter acesa uma lâmpada de 100W de potência, determine quanto tempo esta lâmpada permaneceria acesa?

4) Na reação de fissão nuclear descrita abaixo sabemos que a diferença de massa entre os produtos e os reagentes é de aproximadamente $4 \cdot 10^{-16}$ kg.



a) Determine a energia que foi liberada nessa reação devido a essa diferença de massa?

b) Imagine agora para 1 mol de urânio ($6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), qual a energia total liberada na reação?

Apêndice B: Texto de apoio ao professor

Texto para professor

Introdução

Este material é destinado a professores que desejam trabalhar o conteúdo de relatividade especial junto ao texto de apoio dos alunos: *Relatividade Especial*. A idéia de produzir um trabalho sobre esse tema é pelo fato de que este foge dos conteúdos básicos de física que são apresentados para os alunos de ensino médio.

Sugestões

É importante salientar que para a boa aplicação do curso o professor deve primeiramente ler todo este manual do professor, assim como, cada conteúdo apresentado no material de apoio do aluno e somente depois montar a apresentação da sua aula como achar correto. Por fim deve resolver os exercícios propostos antes de desenvolvê-los em aula e estudar qual a melhor forma de aplicá-los.

Objetivos

Será tratado neste texto sugestões de como o professor deverá abordar cada conteúdo do texto de apoio dos alunos e as animações do CD-ROM, sugestões do número de aulas para a abordagem desses conteúdos e a resolução dos exercícios propostos no material do aluno.

-Tópico 1: *Filósofo Grego Zenão e A Relatividade de Galileu Galilei*

Nº de aulas: 2 aulas

Conteúdo a ser abordado: Como esse tópico é o primeiro a ser abordado no curso é interessante que o professor, antes de começar a explicar os conceitos envolvidos com a relatividade de Zenão, que faça uma breve introdução explicando que a idéia de conceitos relativos não começou de fato com a Relatividade Especial de Albert Einstein. Alguns cientistas e filósofos já haviam estudado que o movimento é relativo e que alguns desses estudiosos é o filósofo grego Zenão e Galileu Galilei.

O objetivo de iniciar o curso com esse tópico é de que o conceito de movimento relativo fica mais próximo do bom senso do aluno do que a ideia de tempo e do espaço relativos que são estudados na relatividade especial. Assim, a partir dessa introdução histórica o aluno vai se familiarizando com a ideia de coisas relativas, como o movimento, que faz parte do seu dia-dia. O professor, para essa parte da aula, poderá utilizar a apresentação produzida em PowerPoint que se encontra no CD-ROM. No início dessa apresentação encontram-se animações sobre os estudos dos bastões realizados por Zenão, animações com exemplos do cotidiano do aluno que ilustram o conceito de movimento relativo e outras animações que desenvolvem algumas ideias do trabalho de Galileu Galilei.

Questões e Problemas:

1) Resp. Grandezas relativas: a) Deslocamento; b) Velocidade; d) Trajetória

Grandezas invariantes: c) Tempo

Essa questão tem por objetivo estudar com o aluno quais são as ideias que Galileu propunha como sendo relativas, para que depois o aluno possa entender a diferença entre o que é relativo nessa física de Galileu com o que é relativo na Relatividade de Einstein.

2) Resp. a) Referencial não-inercial, pois este recebe a ação de forças como a força centrípeta e a força “fictícia” a centrífuga que faz com que os corpos deste referencial estejam acelerados

b) Pode haver referencial não-inercial ou inercial, pois os dois pára-quedistas podem estar acelerando, devido a força da gravidade ser maior que a força de resistência do ar, ou podem apresentar uma velocidade constante, a chamada velocidade terminal. Neste último a força da gravidade apresenta o mesmo valor da força de resistência do ar.

c) Referencial inercial, pois o avião se encontra com uma velocidade constante.

3) Resp. 20 segundos

4) Resp. 55km/h

5) Resp. 40km/h

6) Resp. 10 segundos

-Tópico 2: Movimento e os fenômenos eletromagnéticos

Nº de aulas: 1/2 aula

Apresentado as idéias clássicas sobre a relatividade do movimento para o aluno o professor agora deverá introduzir alguns conceitos sobre o eletromagnetismo e os problemas que essas novas idéias apresentavam com as teorias clássicas da relatividade do movimento.

O professor poderá iniciar este tópico pelas apresentações montadas no arquivo PowerPoint que se encontra no CD-ROM. Essa apresentação começa indicando algumas leis do eletromagnetismo como a lei de Coulomb e a Lei de Faraday. Apesar de existirem outras leis e fenômenos do eletromagnetismo, apenas essas duas leis são apresentadas, pois a ideia deste tópico é de somente tentar mostrar ao aluno os conflitos que o eletromagnetismo gerava com as idéias clássicas já apresentadas de Galileu e Zenão. Por isso, em seqüência, o professor deverá trabalhar as equações de Maxwell que é onde se encontra a origem desses grandes problemas.

Essas equações deveram ser apenas citadas. Elas são de difícil compreensão por parte dos alunos principalmente do nível médio, pois exige um conhecimento matemático mais aprofundado. O professor poderá encontrar também uma pequena apresentação dessas equações no CD-ROM.

Feito essas apresentações o professor deverá, agora, citar as conseqüências que essas equações prevêm. Uma dessas previsões seria de que a luz é uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo com uma velocidade de $c=300.000\text{km/s}$. Nesta parte é importante que o professor destaque para seus alunos de que essa ideia da luz se propagar no vácuo com uma velocidade constante c era incompatível com as idéias da física clássica, que mostrava que a velocidade de qualquer corpo que seja é um conceito relativo e não invariante como mostrava as equações de Maxwell. É importante nessa parte do curso que o aluno entenda o que seria a luz apresentar uma velocidade invariante para qualquer referencial. Por isso no CD-ROM, na apresentação em PowerPoint, também foi preparado uma animação que se encontra no slide 23.

O segundo problema seria em relação as transformadas de Galileu apresentadas no capítulo anterior. Essas equações eram incompatíveis com as equações de Maxwell, pois essas transformações ao serem aplicadas nas equações de Maxwell mostravam que um fenômeno poderia ocorrer em certo referencial e em outro não. Os slides 20 e 21 do material

em PowerPoint apresentam uma animação de um exemplo dessa incompatibilidade. Este exemplo mostra que o campo magnético gerado por uma carga em movimento poderá ser observado por um referencial que observa a carga em movimento e outro que se encontra em repouso em relação a carga não observará este campo magnético. É conveniente que o professor, antes de apresentar esta animação, destaque para seus alunos que o campo magnético é um conceito que aparece também pelo fato da carga estar em movimento, e de acordo com Galileu o movimento é relativo, assim sendo, para um referencial inercial poderá ser observado o campo magnético se manifestar e para outro não. Como isso seria possível? Com isso o professor destaca um exemplo das incompatibilidades do eletromagnetismo com a relatividade clássica de Galileu.

O professor deverá terminar este tópico explicando que na época não conseguiram explicar essas incompatibilidades e que só foram resolvidas em 1905 quando Albert Einstein propõe a teoria da relatividade especial.

Questões e Problemas:

1) A primeira seria em relação as transformações de Galileu. Essas equações ao serem aplicadas nas equações de Maxwell, para relacionar fenômenos eletromagnéticos entre referenciais distintos, ocorriam certas incompatibilidades, ou seja, um fenômeno observado em um determinado referencial era observado de maneira diferente em um segundo referencial.

A segunda incompatibilidade é que pelas equações de Maxwell pode-se mostrar que a luz consiste em uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo com uma velocidade sempre constante $c=3.10^8$ m/s. Na época o que se imaginava é que toda onda necessita de um meio para se propagar por isso a ideia de vácuo era inconcebível. Outro problema seria pelo fato da velocidade da luz não variar para referenciais diferentes, pois como Galileu havia estudado anteriormente a velocidade de um determinado corpo dependerá do referencial que se observa esse movimento.

2) Nesta questão as respostas podem ser variadas.

-Tópico 3: *Einstein e seus postulados*

Nº de aulas: 1/2 aula

Neste tópico serão introduzidos os conceitos da relatividade especial. Essa parte do curso é uma das partes onde os alunos despertam maior interesse pelo assunto. Muito deles já ouviram falar de Albert Einstein, em revistas, jornais, na mídia em geral, mas poucos realmente sabem sobre seus estudos e como viveu. Assim antes do professor começar a estudar com o aluno a física da relatividade especial é interessante que faça uma breve introdução bibliográfica sobre esse brilhante cientista e suas idéias.

No texto do aluno o professor encontrará uma breve introdução sobre a vida de Einstein. No material em CD-ROM foi preparado também uma apresentação (arquivo em PowerPoint) com algumas fotos e frases sobre a vida de Einstein.

Dando continuidade ao curso o professor deverá agora introduzir ao aluno os trabalhos que Einstein realizou sobre a relatividade. Para isso é importante que o professor volte a destacar os problemas entre o eletromagnetismo e a física clássica que permeavam na época e que Albert Einstein em 1905 veio explicar essas incompatibilidades com a proposta de uma nova teoria a relatividade especial.

Para explicar essa nova teoria Einstein publicou dois artigos: “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento” e “A Inércia de um Corpo Depende do seu Conteúdo energético?”.

O primeiro apresenta dois postulados que esclarecem os problemas da época. É nesta parte que o professor deve chamar a atenção do aluno, pois a compreensão desses postulados é de fundamental importância para o andamento do curso.

Os postulados:

5. As leis da física são iguais em qualquer referencial inercial, não existe nenhum sistema preferencial.

Este postulado afirma que todas as leis da física, da mecânica, da óptica, da termodinâmica, do eletromagnetismo são válidas para todos os referenciais inerciais.

6. A velocidade da luz no vácuo tem sempre o mesmo valor c , independentemente do movimento de sua fonte.

Neste postulado o professor deverá explicar que Albert Einstein afirmou que de fato que a velocidade da luz é invariante, ou seja, independe do referencial que é observada e que como consequência dessa nova ideia outros conceitos passam a ser relativos, como o tempo e o espaço. Essas novas idéias estão descritas no material do aluno e a apresentação em PowerPoint apresenta um material de apoio nos slides 30 e 31.

Questões e Problemas:

1) Resp. 1515m/s. Pois de acordo com a relatividade de Galileu as velocidades deveram ser somadas.

Não há necessidade de utilizar as ideias da relatividade especial de Einstein pois as velocidades dos corpos são pequenas se comparadas as da luz e a teoria que mais se adequa para explicar o movimento de corpos a pequenas velocidades é a teoria clássica.

2) Resp. “d”. Pois de acordo com Einstein a velocidade da luz é medida com a mesma velocidade, num mesmo meio, para qualquer referencial.

-Tópico 4: Relatividade do Tempo

Nº de aulas: 1 a 2 aulas

A relatividade do tempo surge como consequência da velocidade da luz ser constante. Para mostrar essa ideia o professor conta com um recurso multimídia desenvolvido num programa chamado Isadora. Este recurso é encontrado no CD-ROM do professor na pasta “relatividade” e o arquivo a ser executado é “anirelatividade”. Um pequeno manual de como operar esse material encontra-se disponível também nesta mesma pasta com o nome “manual_animação”.

Ao iniciar este arquivo uma breve abertura aparecerá junto com uma música de fundo tema do filme “De Volta para o Futuro”. O objetivo desta abertura é despertar no aluno uma sensação de curiosidade e interesse para o assunto que se segue. No meu principal o professor terá acesso a três opções. A terceira opção “simultaneidade” será desenvolvida no tópico referente a esse assunto, por ora utilizaremos as animações “relatividade do tempo I” e “relatividade do tempo II”.

Na “relatividade do tempo I” num primeiro momento as animações apresentam duas naves que viajam pelo espaço com uma mesma velocidade e se encontram uma logo acima da outra. Em um determinado instante da viagem a nave de cima atira um pulso de luz na nave de baixo e que devido a um espelho localizado nesta nave irá refletir de volta o pulso de luz. O objetivo desta animação é estudar junto ao aluno qual a trajetória que o pulso de luz irá percorrer observada de diferentes referenciais.

A primeira trajetória estudada é a trajetória vista pelo referencial da própria nave, ou seja, de um observador que se encontra viajando junto com elas numa mesma velocidade, como por exemplo, o piloto das naves. A foto abaixo mostra a parte da animação referente a este referencial.

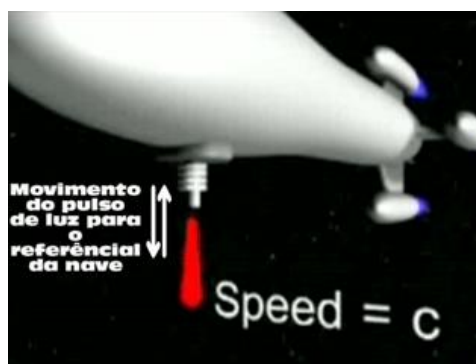


Figura 1: Imagem da animação mostrando a vista do primeiro referencial

Numa segunda cena, as animações mostram como seria observada a trajetória do pulso de luz vista de um referencial de fora das naves, um observador que se encontra num asteróide, por exemplo, vendo as naves passarem.

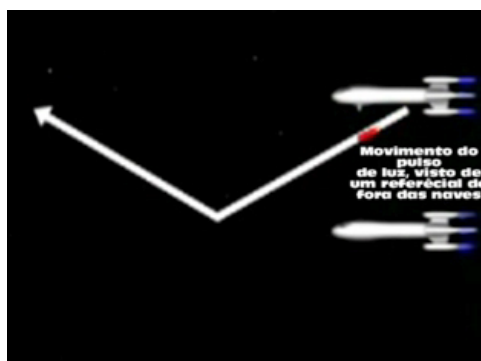


Figura 2: Foto da animação mostrando a vista do segundo referencial

No momento dessas apresentações o professor deve explicar que como o pulso de luz percorre distâncias diferentes para referenciais diferentes o tempo que este leva para percorrer essas distâncias deverá ser medido de forma diferente para cada referencial, já que, de acordo com Einstein, a velocidade da luz é a mesma para os dois referenciais.

Com essas idéias os alunos já estarão mais sensíveis para trabalhar com a ideia de tempo relativo.

De volta ao menu principal o professor deverá agora e iniciar a animação “relatividade do tempo II”. Essa mostra os mesmos conceitos explicados na animação anterior porem agora ao invés de utilizar duas naves utiliza-se dois relógios que mediram de fato o tempo observado entre os diferentes referenciais.

Feito essa apresentação de conceitos utilizando as animações, o professor está apto agora a desenvolver o restante do conteúdo utilizando a própria lousa. Neste momento do curso será desenvolvida a equação matemática ($\Delta t' = \gamma \Delta t$) que relaciona o tempo medido entre um referencial e outro. Uma sugestão de como deduzir esta equação é mostrada no texto do aluno.

O objetivo de mostrar aos alunos esta equação é para que eles possam realizar alguns cálculos para perceberem como realmente o tempo é medido de forma diferente para referenciais diferentes, como propõe os exercícios.

Por fim é importante que o professor discuta com seus alunos sobre o fator de correção de Lorentz (γ) e quais as suas conseqüências. Essas idéias todas são tratadas no material de apoio ao aluno.

Questões e Problemas:

1) *Resp. O tempo de duração de um determinado evento medido por um referencial que observa um objeto em movimento é maior que o tempo medido por um referencial que se encontra em repouso em relação ao objeto.*

2) *Resp. Aproximadamente 35 min.*

3) *Resp. Aproximadamente $0,99c$ ou $2,97 \cdot 10^8 m/s$*

-Tópico 5: Relatividade do Espaço

Nº de aulas: 1 aula

A esta altura do curso o aluno já deverá ter compreendido de que o tempo e o espaço são grandezas relativas, principalmente após o uso do material multimídia. Assim basta o professor deduzir formalmente a equação matemática que relaciona os espaços medidos por diferentes referenciais, da mesma forma como fez com a relatividade. O professor poderá utilizar da dedução feita no material do aluno a partir da página 28.

É importante que o professor explique que de acordo com essa relação ($L = \frac{L_p}{\gamma}$) o espaço do referencial que mede L será menor do que o espaço L_p medido por um segundo referencial, a esse fenômeno chamamos de contração do espaço.

Outras conseqüências dessa equação matemática, mostradas nas páginas 31 e 32, também deveram ser abordadas.

Questões e Problemas:

1) *Resp. Dois dos motivos seria pelo fato de que quando um corpo se aproximar da velocidade da luz o seu espaço vai tendendo a zero, e o tempo que leva para este corpo atingir a velocidade da luz medido por um observador que assisti esse corpo em movimento tenderá ao infinito.*

2)a) *Aproximadamente 1,83 anos-luz.*

b) *Aproximadamente 2anos.*

c) *Aproximadamente 4,6 anos*

3) *Resp. Alternativa b*

-Tópico 6: A Relatividade da Simultaneidade

Nº de aulas: 1/2 aula

Sobre a o conceito de simultaneidade este curso tem como proposta de apenas apresentar a ideia para o aluno de que se para um observador dois eventos são simultâneos para outro pode ser que não. Para isso o professor poderá utilizar a animação montada no material multimídia do CD-ROM. Após acessar o arquivo “anirelatividade” escolha a opção 3 “simultaneidade”. Neste irá encontrar animações que mostram dois raios de luz atingindo um trem que passa por uma estação. As animações mostram também a visão que dois observadores terão sobre esses dois raios de luz. Um observador seria um homem que se encontra em repouso na estação. Para este os raios que atingem o trem serão simultâneos. Um segundo observadora seria uma mulher que se encontra dentro do trem que se move em relação à estação. Para este observador, de acordo com as animações, verá os raios de luz atingir o trem um por vez, ou seja, não simultaneamente.

Se o professor desejar poderá fazer uso também do material de apoio do aluno. Neste encontrará uma maior discussão sobre o assunto.

-Tópico 7: Relação Massa e Energia

Nº de aulas: 1 aula

Para iniciar este tópico é interessante que o professor comece a desenvolver com o aluno o conceito de energia. Essa tema não é fácil de se ensinar, pois o conceito de energia é um conceito muito abstrato para os alunos.

Feito essa breve introdução o professor deverá agora apresentar ao seu aluno qual o significado da equação $E=mc^2$. A dedução desta formula não é conveniente para um nível de ensino médio.

Sobre a discussão dessa famosa equação é importante que o professor destaque que agora a massa é dada por $m=\gamma m_0$. Essa é a chamada massa relativística que vai aumentando conforme aumenta a velocidade do corpo. E lembrando que para $v=0$ $\gamma=1$, ou seja, $m=m_0$.

O principal objetivo a ser atingido é que o aluno compreenda que nessa equação é que uma pequena parcela de energia pode se transformar em grande quantidade de energia. Isso gera grandes aplicações

Como apoio ao professor foi produzido uma apresentação desta equação no arquivo em PowerPoint encontrado no CD-ROM.

O professor poderá trabalhar também algumas aplicações que essa equação oferece

Questões e Problemas:

1) *Resp. Essa equação demonstra que uma pequena parcela de massa pode ser convertida em grandes quantidades de energia e vice-versa.*

2) a) *Resp. Aproximadamente $m=17,3 \cdot 10^{-31} \text{kg}$*

b) *Resp. Aproximadamente $E=1,5 \cdot 10^{-13} \text{J}$*

c) *Resp. Aproximadamente $E_0=8,2 \cdot 10^{-14} \text{J}$*

d) *Resp. Aproximadamente $\Delta K=6,8 \cdot 10^{-14} \text{J}$*

3) *Resp. $\Delta t=9 \cdot 10^{13}$ segundos ou aproximadamente 3 milhões de anos.*

-Uma introdução a Relatividade Especial utilizando materiais multimídias-

4) a) *Resp. $\Delta E=36J$*

b) *Resp. aproximadamente $\Delta E=217.10^{23} J$*

Apêndice C: Questionário pré-curso

Questionário – Pré curso

Nome: _____ idade: _____

1) Você já ouviu falar a respeito da teoria da relatividade especial de Einstein? Sobre o que se trata?

2) Cite algumas fontes onde ouviu falar sobre a teoria de relatividade especial.

3) Dos cientistas abaixo marque com um “x” apenas aqueles que acredita que já fizeram algum estudo sobre relatividade:

a) Albert Einstein

b) Galileu Galilei

c) Hendrik A. Lorentz

d) George Fitzgerald

e) Isaac Newton

4) Dos conceitos abaixo marque com um “x” quais deles você acredita ser relativo:

a) o movimento

b) a velocidade da luz

c) o tempo

d) o espaço

5) Explique o que sabe sobre a equação $E=mc^2$?

6) Você gostaria de ter aulas onde fossem empregados recursos de informática, como, por exemplo, animações ou programas de simulação, para ajudar o professor a ensinar melhor o conteúdo de um assunto da Física?

Apêndice D: Questionário pós-curso

Questionário – Após a realização do curso

1) Dos tópicos abordados pelo curso marque com a letra “D” o que mais teve dificuldade em compreender e marque com “F” o que teve mais facilidade de compreensão.

- a) Filósofo grego Zenão e a relatividade de Galileu Galilei
- b) Movimento e os fenômenos eletromagnéticos
- c) Einstein e seus postulados
- d) Relatividade do Tempo
- e) Relatividade do Espaço
- f) Relatividade da Simultaneidade
- g) Relação Massa e Energia

Comentários (se desejar): _____

2) O material em PowerPoint apresentado pelo professor foi útil para a compreensão dos conceitos desenvolvidos sobre a relatividade?

- a) Muito
- b) Mais ou menos
- c) Pouco
- d) Não contribuiu

Comentários (se desejar): _____

3) Anteriormente as deduções das equações da contração do espaço ($L=L_0/\gamma$) e da dilatação do tempo ($\Delta t'=\gamma\Delta t$) foram apresentadas algumas animações interativas. Essas animações auxiliaram a visualização da relatividade do tempo e do espaço?

- a) Muito
- b) Mais ou menos
- c) Pouco
- d) Não contribuiu

Comentários (se desejar): _____

4)O material texto fornecido a você foi útil para estudar o conteúdo sobre relatividade?

- a) Muito
- b) Mais ou menos
- c) Pouco
- d) Não contribuiu

Comentários (se desejar): _____

5)Os exercícios abordados auxiliaram no aprendizado do assunto?

- a) Muito
- b) Mais ou menos
- c) Pouco
- d) Não contribuiu

Comentários (se desejar): _____

6)Agora que conhece sobre a relatividade especial de Albert Einstein, você acredita que é interessante que este tema seja abordado desde o ensino médio?

7)Deixe a sua opinião sobre o curso, assim como críticas e sugestões para que possa ser melhorado numa próxima edição.

Apêndice E: Guia de instalação Isadora

Instalação e preparação do programa Isadora

1) Na pasta “ISADORA” clique duas vezes no ícone “isadora-win” se o seu sistema operacional for Windows ou “isadora-mac os” se o seu sistema for o MAC OS, para iniciar a instalação.

2) Siga os passos indicados nas janelas até finalizar a instalação.

Obs: Na ultima janela aparecerá uma caixa de texto indicando que o programa será inicializado. Deixe a caixa de texto selecionada para iniciar o programa.

3) Se o programa já inicializou automaticamente pule essa etapa senão clique em *iniciar>todos os programas>Isadora>Isadora*, ou se instalou em outra pasta, procure o arquivo Isadora e execute-o.

4)O programa pode entrar em dois ambientes: uma tela preta que é a janela onde será passada as animações ou então direto no ambiente de programação. Se aparecer a tela preta pressione “Ctrl+G” para ir no ambiente de programação e siga para o próximo passo.

5)No menu superior clique em *Edit>Preferences* e selecione a aba *General*. Verifique se os comandos “automatically show stages” e “activate first Scene” estão selecionadas. Essas funções permitem iniciar a tela preta automaticamente que é onde a animação será apresentada.

6) Em seguida ainda no menu *Preferences*, selecione a aba *Stage* e em *Stage size* (o que se encontra mais em cima) escolha a opção “full screen”. Logo abaixo na parte escrita *Stage 1* escolha a mesma opção em *Stage size* para “full screen”. Essas opções fará com

que o seu vídeo passa em tela cheia para melhor visualização, mas se preferir poderá indicar o tamanho do vídeo que preferir.

7) Pressione Ok e feche o programa

Iniciando as animações

1) Volte agora para a pasta localizada no CD-ROM e na pasta “relatividade” execute o arquivo “anirelatividade”.

2) A animação será inicializada. Para sair dela pressione “Ctrl+G” e depois é só fechar o programa. A qualquer momento poderá ser utilizada as teclas de atalho:

M: menu principal

> (avançar)

< (retroceder)

Espaço (avançar)

Ctrl+G (sair)