



Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu, Mestrado Profissional em Ensino de Ciências
Campus Nilópolis

Erison de Oliveira Monçores

PRODUTO DIDÁTICO

UMA PROPOSTA PARA FACILITAR A PRÁTICA DOCENTE NO ENSINO DA TEORIA
DA RELATIVIDADE NO ENSINO MÉDIO

NILÓPOLIS- RJ
2014

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO À TEORIA DA RELATIVIDADE	3
2. O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE NA MECÂNICA CLÁSSICA	4
3. AS LEIS DE NEWTON	5
4. O ELETROMAGNETISMO	8
5. TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ EM UMA DIMENSÃO	10
6. APLICAÇÃO EM SALA DE AULA	11
REFERENCIAL	15

1. INTRODUÇÃO À TEORIA DA RELATIVIDADE

Mesmo que se compreenda que o significado de um conceito jamais será definido com precisão absoluta, alguns conceitos são parte integrante dos métodos da ciência, pelo fato de representarem, pelo menos por algum tempo, o resultado final do desenvolvimento do pensamento humano desde um passado assaz remoto; eles podem mesmo ter sido herdados e são, qualquer que seja o caso, instrumentos indispensáveis na execução do trabalho científico em nosso tempo.

(Werner Heisenberg)

O ensino de física delega a grandes personalidades da ciência um caráter de magos, que criam suas teorias a partir de um momento de iluminação, no entanto a criação de uma teoria se dá através de árdua pesquisa e evolução de ideias. Partindo deste pressuposto, é possível delinear o cenário científico em que Albert Einstein estava imerso em sua época. As teorias da mecânica clássica e do eletromagnetismo apresentavam um embate no qual uma teoria contradizia a validade da outra.

Einstein, munido de um arsenal de conhecimentos, gerados por outros cientistas de sua época e de uma grande curiosidade sobre o eletromagnetismo, encarou o desafio de compatibilizar as duas teorias. Sua genialidade não está somente no desenvolvimento da teoria, mas principalmente na ideia de uma teoria física unificada. Com poucos pressupostos Einstein constrói a Teoria da Relatividade e cria uma nova forma de se ver o mundo, não mais dividido em “o mundo mecânico”, governado pelas leis de Newton, e “o mundo eletromagnético” descrito pelas equações de Maxwell, mas um mundo em que as leis da física são válidas em quaisquer referenciais. Enfim, a teoria da relatividade, “salvou” todo o conhecimento produzido acerca da física revelando ao mundo que as incompatibilidades na época existente eram fruto de uma linguagem conceitual e matemática que não descreviam a realidade física por completo.

Simultaneamente aos estudos de Einstein, Hendrik Antoon Lorentz¹ desenvolve um conjunto de equações capaz de transpor as informações de um sistema de referencial imóvel para outro em movimento uniforme, mantendo a integridade das equações de Maxwell. Lorentz acreditava se tratar apenas de uma transformação de coordenadas, mas seu trabalho já revelava uma íntima ligação entre as coordenadas espaciais e o tempo. A transformação de Lorentz foi uma contribuição matemática fundamental na construção da Teoria da Relatividade.

¹Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) – Físico holandês. Professor de física e matemática na Universidade de Leyden. Ganhador do prêmio Nobel de física em 1902.

Em resposta ao trabalho de Lorentz, Henri Poincaré² analisou as propriedades de transformação de muitas grandezas físicas, mostrando a validade das transformações e suas propriedades. Poincaré uniu o grupo de transformações de Lorentz a teoria dos invariantes e representou a coordenada temporal como uma quarta dimensão imaginária no espaço, cunhando o termo espaço-tempo. O trabalho de Poincaré, *Sur la dynamique de l'électron* foi publicado de forma resumida pouco antes do trabalho de Einstein, em 1905.

Atualmente, um erro muito comum é associar os efeitos relativísticos apenas a grandes velocidades. Na realidade, a Teoria da Relatividade revela que o mundo é relativístico e seus efeitos podem ser observados no cotidiano. A limitada capacidade humana de observação pode prejudicar a detecção dos efeitos relativísticos, no entanto ao desenvolver a teoria, com uma matemática simples, é possível explicar fenômenos como o magnetismo e a óptica.

2. O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE NA MECÂNICA CLÁSSICA

O físico, matemático e astrônomo italiano Galileu Galilei (1564 – 1642) introduziu o princípio da relatividade no estudo da cinemática. Tal princípio surge da necessidade de uma descrição quantitativa do movimento e é bastante valioso para o desenvolvimento da Física. Para se descrever o movimento de uma partícula com precisão é necessário estabelecer um sistema de referência (ou referencial) a partir do qual a posição, velocidade e aceleração serão computadas. Ocorre que a descrição do movimento pode, em geral, depender da escolha do referencial, ou seja, não há uma correspondência unívoca entre o movimento de uma partícula e a descrição desse movimento. É este o problema que torna necessário o princípio da relatividade. Como exemplo pode-se citar a queda livre de dois objetos (bolas A e B). Se o referencial adotado for o ponto de partida da queda, será percebido um movimento uniformemente variado para a bola A até que ela encoste no chão. Se, por outro lado, o referencial adotado for a bola B, o movimento de A não será percebido. A distância entre a bola A e o chão continua diminuindo porém as versões sobre a queda da bola A serão diferentes. Em outras palavras, já que existem duas (ou mais) leituras de uma mesma realidade, deve ser possível traduzir uma leitura na outra. Essa tradução corresponde ao uso do princípio da relatividade *e resolve a controvérsia da descrição do movimento a partir de diferentes referenciais.*

² Henri Poincaré (1854-1912) – Matemático, físico e filósofo da ciência, Frances. Professor de física e matemática na Sorbonne durante 31 anos.

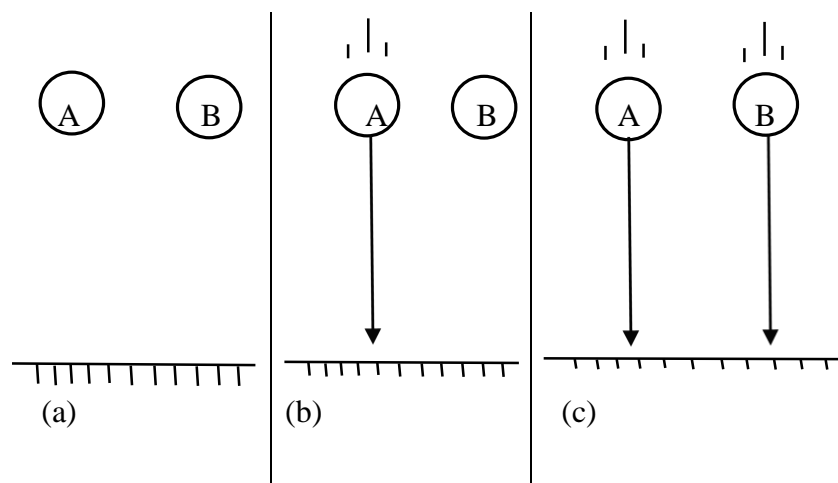


Figura 1: Duas esferas (A e B) em três situações; (a) ambas em repouso; (b) a esfera A em queda e a esfera B em repouso; (c) Ambas as esferas em queda livre.

3. AS LEIS DE NEWTON

Posteriormente, o físico e matemático inglês Isaac Newton (1643 – 1727), usou as ideias de Galileu para formular as leis que regem os movimentos na mecânica clássica – as Leis de Newton. Em seu Principia, Newton formula três leis para a descrição do movimento. A tradução do latim dessas leis para o Português segue abaixo:

** Lex I: Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.*

(Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.)

** Lex II: Mutationem motis proportionalem esse vi motrici impressae, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.*

(A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.)

** Lex III: Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem: sine corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales et in partes contrarias dirigi.*

(A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.)

Atualmente a lei I é conhecida como lei da inércia, a lei II como segunda lei de Newton e a lei III é a lei da ação reação. Destaca-se da problemática do princípio da relatividade, o caso onde os referenciais estão em movimento uniforme um em relação ao outro, uma vez que a uniformidade do movimento é algo válido em qualquer referencial. O valor da velocidade pode ser diferente, mas ela será sempre constante ou zero. Assim, esses referenciais são ditos referenciais inerciais, pois neles a primeira lei de Newton é obedecida.

Sendo mais rigoroso, para definir se um corpo (A) está ou não em movimento é necessário adotar um ponto a partir do qual será analisado o movimento, este ponto adotado passa então a ser chamado de referencial (S) do movimento, e todas as afirmações quanto ao movimento serão feitas com base nele (figura 2.1). Assim, o movimento de um corpo sempre é relativo ao referencial adotado. Quando um novo referencial (S') encontra-se em movimento uniforme, na direção x , com velocidade \vec{u} , em relação ao primeiro referencial (S), é possível efetuar uma transformação matemática e transpor as informações do movimento do corpo A do referencial S para o referencial S' . A restrição da velocidade constante vem por conta da lei da inércia. A ideia é a de que observadores em movimento relativo uniforme concordarão com esta lei. Assim a denominação referencial inercial deve ser entendida dessa forma. Referenciais em aceleração relativa podem ser tratados mas não vêm ao caso neste ponto do trabalho.

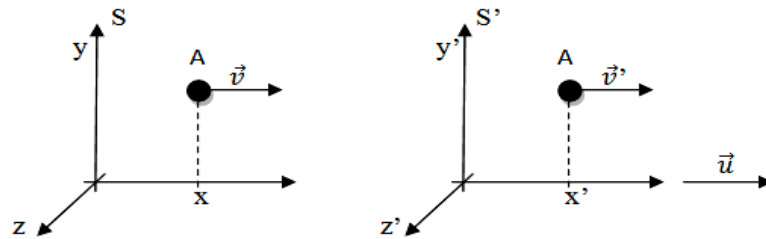


Figura 2: Partícula A movendo-se nos referenciais S e S', com eixos paralelos. O referencial S' move-se na direção x com velocidade \vec{u} .

A transformação matemática leva em conta as coordenadas do corpo no referencial S e a velocidade \vec{u} do referencial S' permitindo transpor as coordenadas do referencial S para o referencial S'.

$$\begin{cases} x' = x - u_x t \\ y' = y - u_y t \\ z' = z - u_z t \\ t' = t \end{cases} \quad (3.1)$$

Usando a notação vetorial para representar a posição e a velocidade de S' em relação a S, a equação acima fica:

$$\begin{cases} \vec{r}' = \vec{r} - \vec{u}t \\ t' = t \end{cases} \quad (3.2)$$

Nesta representação não há nenhuma distinção para o tempo nos referenciais adotados. Pode-se concluir que para a transformação de referenciais de Galileu, o tempo é absoluto e, por consequência, independente do referencial.

Para obter a velocidade da partícula em cada referencial basta efetuar a derivada temporal da posição, assim:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (3.3)$$

$$\vec{v}' = \frac{d\vec{r}'}{dt} \quad (3.4)$$

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{u}t \quad (3.5)$$

$$\frac{d\vec{r}'}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} - \frac{d(\vec{u}t)}{dt} \quad (3.6)$$

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u} \quad (3.7)$$

Aplicando novamente a derivada temporal a eq. (3.7) é possível determinar a aceleração.

$$\frac{d\vec{v}'}{dt} = \frac{d\vec{v}}{dt} - \frac{d\vec{u}}{dt} \quad (3.8)$$

$$\frac{d\vec{v}'}{dt} = \vec{a}' \quad (3.9)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a} \quad (3.10)$$

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = 0 \quad (\vec{u} \text{ é constante}) \quad (3.11)$$

$$\vec{a}' = \vec{a} \quad (3.12)$$

Multiplicando a eq. (3.3) pela massa da partícula obtemos a segunda lei de Newton.

$$m\vec{a}' = m\vec{a} \quad (3.13)$$

Ou ainda $\vec{F}' = \vec{F}$.

Isso permite concluir que se as leis de Newton são válidas para um referencial inercial, serão válidas para qualquer outro referencial inercial, pois seu formato matemático é invariante pela transformação de Galileu.

Consequentemente todas as leis que se originem das leis de Newton (mecânica clássica) possuem validade em qualquer referencial inercial.

4. O ELETROMAGNETISMO

Em 1865, James Clark Maxwell realizou uma das sínteses mais importantes da Física, revelando que a eletricidade, o magnetismo e a óptica poderiam ser descritas com um conjunto de quatro equações, conhecidas como equações de Maxwell.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Ampère-Maxwell})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Lei de Gauss Elétrica}) \quad (4.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss Magnética})$$

Estas equações descrevem o comportamento de campos elétricos e campos magnéticos, os quais regem a força eletromagnética que atua em partículas carregadas, ou força de Lorentz. Se uma carga Q está se movendo com velocidade \vec{v} numa região onde estão presentes um campo elétrico, \vec{E} , e um campo magnético, \vec{B} , a força \vec{F} que atuará sobre a carga é dada por:

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (4.2)$$

Neste ponto vale lembrar que uma carga em movimento uniforme gera um campo elétrico e um campo magnético. Esses campos são dados por:

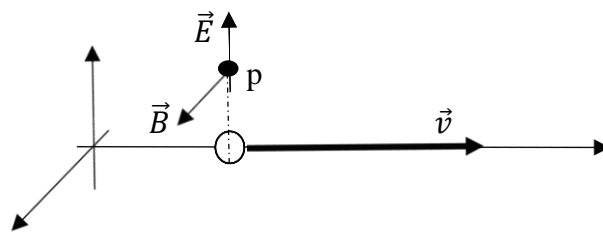


Figura 3: As leis de campo elétrico e magnético para uma carga $q (+)$, pontual em movimento uniforme.

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} ; \quad \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q}{r^2} \vec{v} \times \hat{r} \quad (4.3)$$

A partir desta síntese, é possível prever a existência de ondas elétricas e magnéticas no vácuo e ainda determinar a velocidade de propagação dessas ondas eletromagnéticas. Adotando

o vácuo como meio de propagação, assume-se que as ondas não sofram influência da distribuição de carga e as equações de Maxwell podem ser reescritas como:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla}_x \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla}_x \vec{B} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}\quad (4.4)$$

Aplicando o rotacional as eq. de Faraday e Ampère-Maxwell, temos:

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla}_x (\vec{\nabla}_x \vec{B}) = \frac{1}{\mu_0} [\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B}] = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla}_x \vec{E}) = -\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \\ \vec{\nabla}_x (\vec{\nabla}_x \vec{E}) = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla}_x \vec{B}) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \end{cases}\quad (4.5)$$

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \\ \nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \end{cases}\quad (4.6)$$

O conjunto de equações (4.6) satisfaz a equação de onda de d'Alambert³. Para uma onda que se propaga em uma dimensão esta se torna a equação de ondas que se estuda no curso de Física Básica:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}\quad (4.7)$$

Que resultam nas funções de propagação de onda para o campo elétrico e magnético, na direção x :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \end{cases}\quad (4.8)$$

A comparação entre as (4.8) e (4.7) fornece para a velocidade de propagação das ondas o valor:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}\quad (4.9)$$

A teoria desenvolvida por Maxwell previu a velocidade da onda eletromagnética compatível com a velocidade obtida experimentalmente para a propagação da luz (c), aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. A conclusão era inevitável: a luz é uma onda eletromagnética. Os valores que definem a velocidade da luz têm origem nas constantes ε_0 e μ_0 as quais definem

³ Jean Le-Rownd d'Alambert, matemático Frances (1750).

os campos elétrico e magnético na força de Lorentz. O que foi visto sobre referenciais inerciais na seção anterior deve se aplicar aqui. Assim os valores de ϵ_0 e μ_0 não podem depender do referencial, pois, do contrário, as forças seriam alteradas quando se passa de um referencial inercial a outro contradizendo o princípio da relatividade. Tem-se aqui a origem do segundo postulado da relatividade especial que afirma ser a velocidade da luz uma constante universal. Uma vez que a força tem que ter o mesmo valor nos diferentes referenciais inerciais, as constantes ϵ_0 e μ_0 não podem depender da escolha do referencial.

Partindo da teoria eletromagnética para a óptica, é possível estabelecer uma relação para o índice de refração (n) no meio, definido pela razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo (c) e a velocidade de propagação da luz no meio (v).

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (4.10)$$

Todas as leis da ótica, como a lei de Snell, a lei de Brewster, etc., podem ser derivadas das 4 equações (3.1). Aqui vale chamar atenção para um aspecto importante que é o da unificação das leis da Física. Percebe-se que as quatro equações de Maxwell detém um domínio fenomenológico extremamente amplo.

5. TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ EM UMA DIMENSÃO

Em uma tentativa de compatibilizar o eletromagnetismo de Maxwell com a mecânica, Lorentz formula um conjunto de equações que permitem manter a estrutura ondulatória que descreve a dinâmica eletromagnética ao se efetuar uma mudança de referencial. Esta invariância não se mantinha ao se aplicar a formulação da relatividade de Galileu, o que sugeria mudança nos valores das constantes elétricas e magnéticas, que claramente é incoerente. As equações de Lorentz receberam seu nome e foram chamadas de transformações.

Para se obter as equações da transformação de Lorentz basta analisar como as equações de Maxwell se comportam com relação a uma transformação geral de coordenadas. Mas para simplificar a matemática, utiliza-se no lugar das equações de Maxwell uma de suas soluções, isto é, a equação da onda no vácuo propagando-se na direção x com velocidade c :

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (5.1)$$

O objetivo é definir uma transformação linear⁴ de coordenadas x, t para um novo referencial, x', t' que se move com velocidade u em relação ao primeiro. Esta transformação se dá no conjunto de equações abaixo, a transformada de Lorentz entre dois referenciais em movimento relativo com velocidade u :

$$\begin{cases} x' = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}(x - ut) = \gamma_u(x - ut) \\ t' = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}\left(t - \frac{u}{c^2}x\right) = \gamma_u\left(t - \frac{u}{c^2}x\right) \end{cases} \quad (5.2)$$

Onde γ é chamado de fator de Lorentz e assume o valor:

$$\gamma_u = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \quad (\text{fator de Lorentz}) \quad (5.3)$$

6. APLICAÇÃO EM SALA DE AULA

Não há aqui a pretensão de criar um modelo de aula a ser seguido ou adotado como o correto, a sequência aqui é apenas um exemplo e cabe ao professor escolher a melhor forma de alcançar seu público, assim como a escolha de sequências didáticas, conteúdos e atividades.

Aula 1 (dois tempos de 50 min.)

- Tema: Introdução a teoria da relatividade
- Objetivos:

Compreender o princípio da relatividade de Galileu;

Expor a transformação do magnetismo e eletricidade em eletromagnetismo;

Evidenciar as incompatibilidades entre a mecânica clássica e o eletromagnetismo;

Expor a cenário em que a teoria da relatividade foi desenvolvida e a participação dos vários cientistas que buscavam resolver as incompatibilidades;

⁴ Linear, pois o espaço e o tempo não deixam de ter propriedades similares por conta de um observador estar em movimento. De outra forma, a densidade de pontos no espaço-tempo deve ser igual para os dois observadores. Melhor ainda, deve haver uma correspondência unívoca entre os pontos do espaço nos dois referenciais.

- Metodologia:

Aula expositiva;

Vídeo: Albert Einstein - Teoria da Relatividade - Dublado - Completo - Sem Cortes (1h e 30min.)

<https://www.youtube.com/watch?v=MdbIXZTZpmw>

- Avaliação:

Em sala de aula, os alunos serão avaliados a partir de sua participação e de seus questionamentos.

Os objetivos propostos para a aula serão avaliados após o término da aula e, caso não tenham sido atingidos, outras aulas e atividades serão utilizadas para que os objetivos sejam alcançados.

Aula 2 (dois tempos de 50 min.)

- Tema: Os postulados da teoria da relatividade
- Objetivos:

Apresentar os postulados da relatividade;

Compreender as consequências dos postulados;

Apresentar os paradoxos da relatividade;

- Metodologia:

Aula expositiva;

Vídeo: Telecurso2000 - Aula 50/50 - Física - Teoria da Relatividade (28min.)

<https://www.youtube.com/watch?v=nf32ejhzTNQ>

- Avaliação:

Em sala de aula, os alunos serão avaliados a partir de sua participação e de seus questionamentos.

Os objetivos propostos para a aula serão avaliados após o término da aula e, caso não tenham sido atingidos, outras aulas e atividades serão utilizadas para que os objetivos sejam alcançados.

Aula 3: (dois tempos de 50 min.)

- Tema: Transformações de Lorentz

- Objetivo:

Apresentar o formalismo matemático;

Analisar exemplos de dilatação do tempo e contração do espaço.

- Metodologia: Aula expositiva.
- Avaliação: exercícios

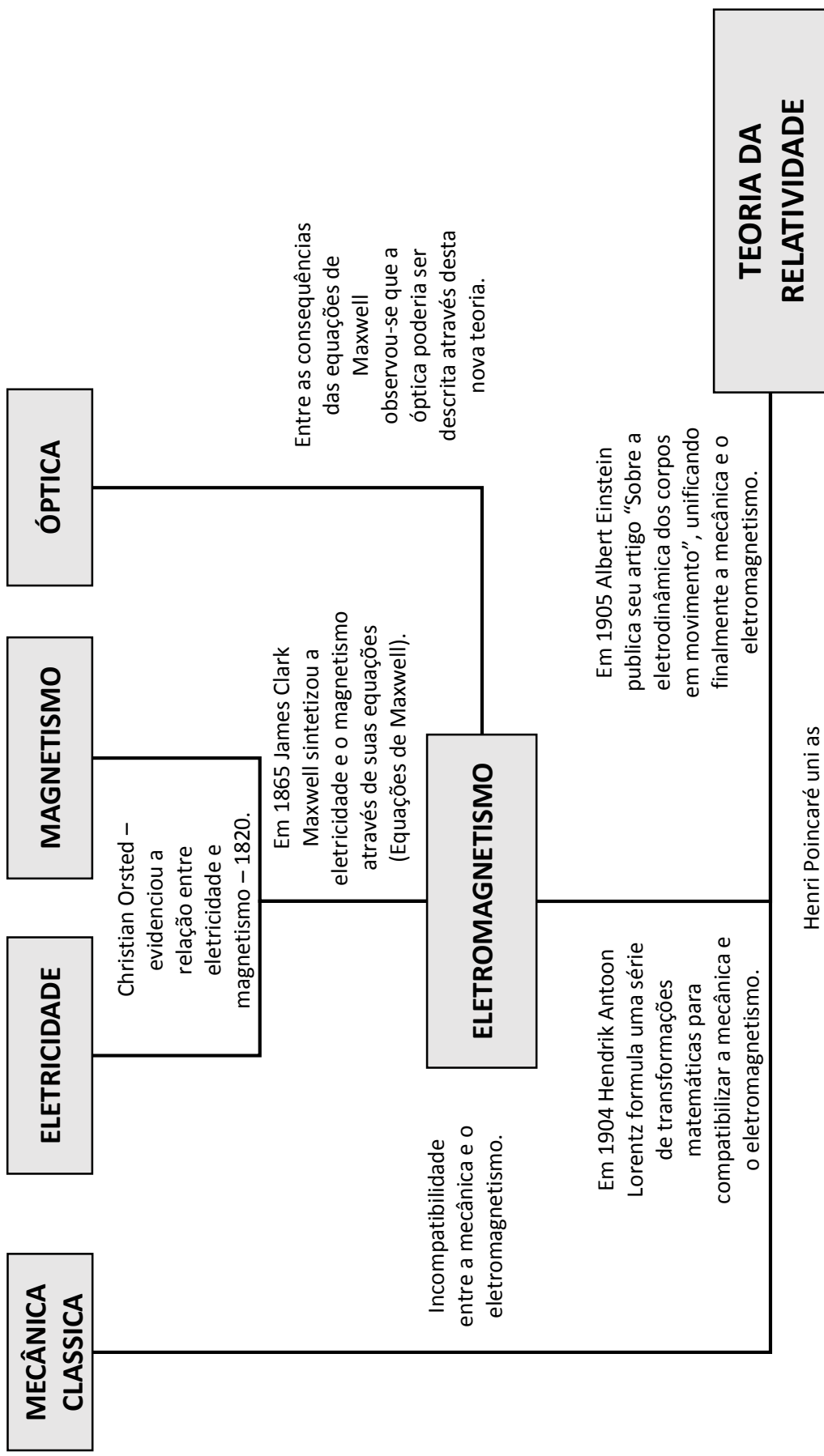
Aula 4 (dois tempos de 50 min.)

- Tema: Revisão
- Objetivo:

Montar um mapa conceitual sobre a teoria da relatividade juntamente com os alunos, incorporando os aspectos que eles destacarem revisando o conteúdo a partir do mapa elaborado. Um exemplo de mapa conceitual pode ser visto na próxima página.

- Avaliação:

Em sala de aula, os alunos serão avaliados a partir de sua participação e de seus questionamentos.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRETO, M. **Física - Einstein para o ensino médio**. Rio de Janeiro:EditoraPapirus, 2009.

EINSTEIN, A.; INFELD, L. **A evolução da Física**. Tradução: Giasone Rebuá. Rio de Janeiro:Editora Zahar, 2008.

EINSTEIN, A. **On the electrodynamics of moving bodies**. 30 jun. 1905. Tradução do original: Zur Elektrodynamik bewegter Körper, In: Annalen der Physik. n. 17, p. 891, 1905. Disponível em: <<http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/>>. Acessado em: 10 jun. 2012.

BARRETO, M. **Einstein para o ensino médio**. Campinas: Papirus, 2009.

BRASIL. **Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional**. Lei no 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Brasília: DF, 1996.

BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. Secretaria de Educação Básica. **Parâmetros curriculares nacionais para o ensino médio**. Brasília: DF, 2000.

GRIFFITHS, David J. **Eletrodinâmica**. Tradução: Heloisa Coimbra. São Paulo:Editora Pearson,ed.3, 2011.

HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. Tradução: Trieste Freire Ricci. Porto Alegre:Editora Bookman, ed. 9, 2008.

KENNEDY, Robert E. **A student's guide to Einstein's major papers**. USA: EditoraOxford, 2012.

KNIGHT, Randall D. **Física - Uma abordagem estratégica**. Porto Alegre:EditoraBookman, v.3, 2009.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica**. Rio de Janeiro:Editora Blucher, v.4, 1998.

RUSSELL, Bertrand. **ABC da Relatividade**. Rio de Janeiro:EditoraZahar, 2005.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **The Feynman lectures on physics** Massachusetts: Addison-Wesley, 1965. 3 v., v. 1.

MOSCA, G.; TIPLER, P. A. **Física para cientistas e engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro:LTC, 2009. 3 v.

THORNTON, S. T.; MARION, J. B. **Classical dynamics of particles and systems**. 5. ed. Belmont: Brooks Cole, 2003.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física moderna**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.