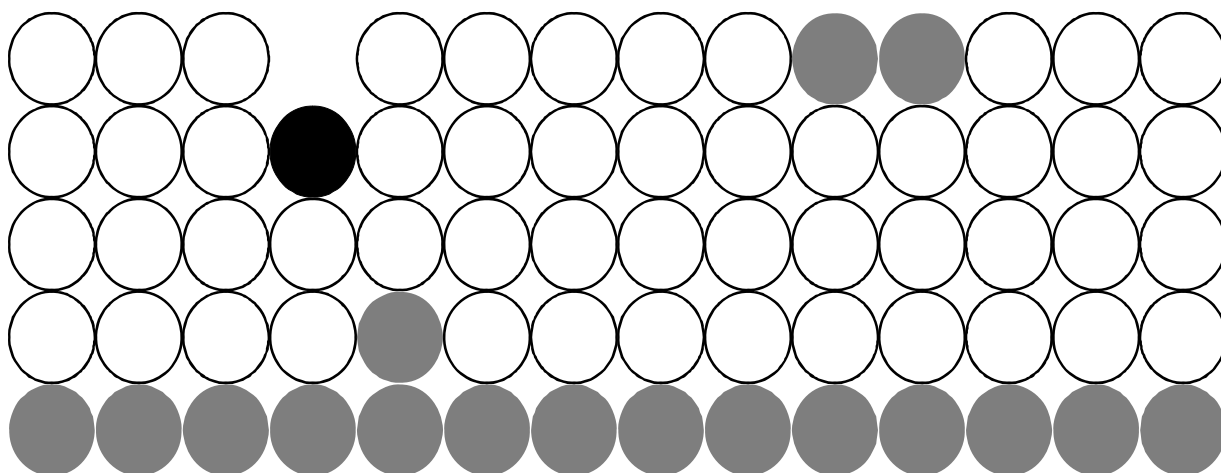


TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

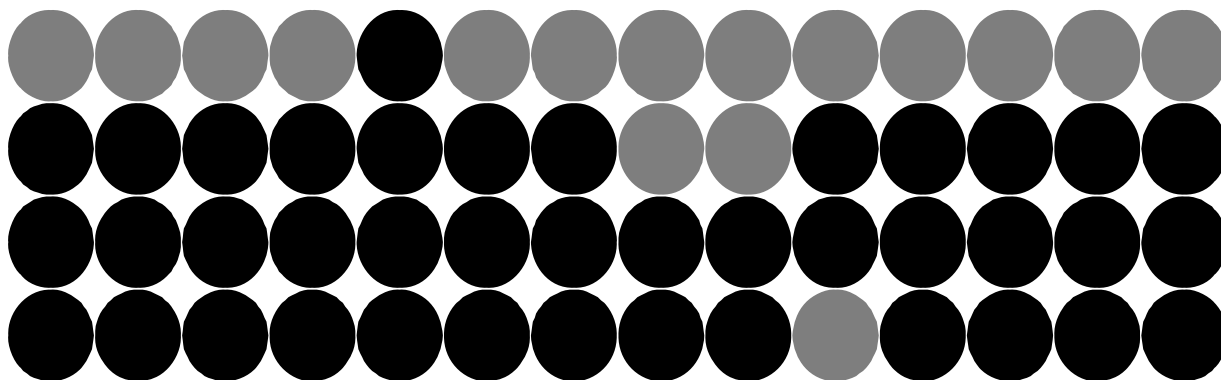
v.24 n. 2 2013

ISSN 1807-2763



Einstein e a Teoria da Relatividade Especial: uma abordagem histórica e introdutória

Melina Silva de Lima



Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Textos de Apoio ao Professor de Física, v.24 n.2, 2013.
Instituto de Física – UFRGS
Programa de Pós – Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Editores: Marco Antonio Moreira
Eliane Angela Veit

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Setor de Processamento Técnico
Biblioteca Professora Ruth de Souza Schneider
Instituto de Física/UFRGS

L732e Lima, Melina Silva de

Einstein e a Teoria da Relatividade Especial : uma
abordagem histórica e introdutória / Melina Silva de Lima –
Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, 2013.

50 p.; il. (Textos de apoio ao professor de física / Marco
Antonio Moreira, Eliane Angela Veit, ISSN 1807-2763; v. 24 ,
n. 2)

1. Ensino de Física 2. Relatividade especial 3. História da
ciência I. Título II. Série.

PACS: 01.40.E

Impressão: Waldomiro da Silva Olivo
Intercalação: João Batista C. da Silva

Textos de Apoio ao Professor de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física Mestrado Profissional em Ensino de
Física, IFUFRGS

EINSTEIN E A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL:
UMA ABORDAGEM HISTÓRICA E INTRODUTÓRIA

MELINA SILVA DE OLIVEIRA

2013

" A maioria dos livros sobre ciência e que se dizem destinados ao leigo procura mais impressionar o leitor (. . .) do que lhe explicar clara e lucidamente os objetivos e métodos elementares. Depois que um leigo inteligente tenta ler alguns destes livros, ele fica completamente desanimado. Sua conclusão é: eu sou idiota demais, é melhor eu desistir. Além disso, toda a descrição é feita, na maioria das vezes, de uma maneira sensacional que também repele um leigo"
Albert Einstein



"... educação é aquilo que fica quando você esquece o que a escola ensinou ..."

Albert Einstein

" Meu trabalho científico é motivado por um desejo irresistível de compreender os segredos da natureza e por nenhum outro sentimento. Meu amor pela justiça e meu esforço para contribuir para a melhoria das condições humanas são totalmente independentes de meus interesses científicos"

Albert Einstein

EINSTEIN E A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL: UMA ABORDAGEM HISTÓRICA E INTRODUTÓRIA

Resumo

Este trabalho constitui uma breve introdução à Teoria da Relatividade Especial e foi construído com o objetivo de ser aproveitado por aqueles que estiverem iniciando seu estudo no tema. Trata-se de um texto com vistas a uma abordagem introdutória da Teoria de Einstein, abordando também momentos de sua vida, assim como conceitos e proposições introdutórios e essenciais no que se refere ao tema. O princípio subjacente à abordagem aqui descrita é o da diferenciação progressiva com fins de criação de uma hierarquia que promova o processo de conceitualização de forma adequada à construção de subsunções nas estruturas cognitivas dos aprendizes.

Palavras-chave: Teoria da Relatividade Restrita, História, Aprendizagem, Física.

SUMÁRIO

Apresentação	5
1. Introdução e objetivos	7
2. Resumo Biográfico	10
2.1. De 1879 a 1896: infância e adolescência	10
2.2. De 1896 a 1900 : a vida na Politécnica e seus primeiros trabalhos	15
2.3. Em 1902 a vida começa a mudar	18
2.4. Outras considerações e a criatividade em Albert Einstein	20
3. Teoria da Relatividade Restrita (Especial)	24
3.1. Apresentação	24
3.2. Situação Histórica da Época	24
3.2.1. Mecânica (Aristoteles, Galileu e Newton)	24
3.2.2. Eletricidade e Magnetismo	29
3.2.3. Termodinâmica	35
3.2.4. Fenomenologia e Experimentações Tradicionais	36
3.3. Princípio da Relatividade Restrita	37
3.3.1. Os Experimentos Imaginários	37
3.3.2. As Transformações de Lorentz	37
3.3.3. A Coerência entre Transformações de Lorentz e as Equações de Maxwell	41
3.3.4. Comentários e Conclusões	42
4. Referências	43
Anexo – Textos de Apoio ao Professor de Física	44

Apresentação

" É impossível haver progresso sem mudança, e quem não consegue mudar a si mesmo não muda coisa alguma "
George Bernard Shaw

Este texto consiste, como o próprio título sugere, de uma breve introdução à Teoria da Relatividade Especial e foi construído para aqueles que estiverem iniciando seu estudo no tema. Portanto, serve a estudantes de graduação, especialização e mestrado em Física, Ensino de Física, Astronomia, Ensino de Astronomia, História das Ciências, Ensino de Ciências e afins. Um curso com vistas a uma abordagem introdutória da Teoria de Einstein aborda não somente conceitos e proposições básicos referentes ao tema, bem como o contexto histórico em que os mesmos estão inseridos, fazendo com que a própria história e encadeamento dos fatos, contados de forma simples e objetiva, mas sem perder aspectos fundamentais da mesma, sirvam para promover a aprendizagem significativa dos estudantes e fomentem nos mesmos asserções de valor que promovam a construção, em suas estruturas cognitivas, de subsunções adequados à teoria em si, mas que contenham uma elaboração hierárquica necessária.

O princípio subjacente a essa abordagem é o da diferenciação progressiva. Segundo Marco Antonio Moreira, “esse princípio, proposto por David Ausubel, em 1968, na obra *Educational psychology: A cognitive view*, é mais fácil para o ser humano aprender um corpo organizado de conhecimentos se tiver uma visão inicial do todo, isto é, dos principais conceitos, proposições (leis, por exemplo), modelos, equações (se for o caso) desse corpo de conhecimentos. Ou seja, uma visão inicial do todo antes de passar às partes. Essa visão inicial, introdutória, não é completa, não entra em detalhes, não usa representações complicadas. É algo para ser progressivamente diferenciado, elaborado, tornado significativo, através de exemplos, aplicações, novas formas de representação, sempre tendo o todo como referência” (MOREIRA, 2009).

O texto aqui apresentado utiliza-se do viés de uma apresentação progressiva e diferenciada com vistas ao estudo introdutório da Relatividade Restrita, considerando seus aspectos matematicamente básicos e os históricos. Pela sua natureza didática, o texto, com um dos elementos norteadores sendo a própria história de desenvolvimento dos conceitos relativos à Teoria da Relatividade Restrita (TRR), no que tange à diferenciação progressiva inicia-se com a situação histórica da época, passando pela descrição de como se encontrava a Mecânica e de como esta se desenvolveu com Aristóteles, Galileu e Newton. Passa-se então para a Eletricidade e o Magnetismo, com considerações essenciais (e que, portanto, serve para alunos que queiram iniciar seus estudos a respeito dos mesmos), seguindo para a Termodinâmica e alcançando a Fenomenologia e a Experimentação. Nessa linha de raciocínio, a TRR deve estar situada dentro da Física abordada na escola para que alcance seu potencial de significação. Cabe salientar que as referências misturam-se em novas e antigas, sem, contudo, perder seu caráter de ensino e explanação coerente no que tange à historicidade dos

fatos. Isso deve-se ao fato de que tal material foi inicialmente escrito em 2000, com atualizações progressivas. Não se encontra desatualizado, pois a TRR não tem mudado, assim como o Eletromagnetismo Clássico não mudou. Mesmo assim, foi cuidadosamente revisado em 2013 e atualizado.

1. Introdução e Objetivos

Assim como as demais ditas ciências ocidentais, a Física tem suas raízes no período introdutório da filosofia grega, quando ciência, filosofia e religião não se encontravam separadas. Os sábios da escola de Mileto preocupavam-se em descobrir a natureza essencial das coisas, a qual denominavam *physis* e, com isso, a visão monística dessa escola mantinha uma forte semelhança com as antigas filosofias chinesa e indiana, esta muito mais intensa na filosofia de Heráclito de Éfeso, o qual acreditava no eterno *devir*, em que toda e qualquer transformação no mundo seria resultado da "*interação dinâmica e cíclica dos opostos*", onde cada par de opostos era visto como uma unidade, a qual denominavam *logos*.

A unicidade de Heráclito foi dividida a partir da escola eleática que defendia um Princípio Divino, mais importante do que todos os outros seres, fossem estes, homens ou deuses. Esse "Princípio Divino" sofreu transformações gradativas, até ser conceituado como um Deus único e inteligente, acima de tudo e de todos, governando o mundo e seus objetos. Essas ideias originaram uma tendência de pensamento que originaria, mais tarde, a separação entre espírito e matéria, que culminou no dualismo reinante na filosofia ocidental.

Enquanto a ideia de divisão entre espírito e matéria ia se fortalecendo, filósofos foram-se interessando muito e quase unicamente pelo lado espiritual ou "mundo espiritual", em detrimento ao "mundo material". Essa foi a ideia propalada por Aristóteles e que se tornou a base da visão ocidental do universo por mais de dois mil anos, com o apoio da igreja em seu severo domínio, durante toda idade média.

Só com o Renascimento começou-se a indagar, e posteriormente a se desfazer, a influência aristotélica, com a difusão de um interesse, que antes não existia, em torno da natureza. E só no fim do século XVI, o estudo da natureza passou a ser feito através de um espírito verdadeiramente científico, a partir da criação e introdução de um método, por Galileu, que marcou a distinção entre a física mais antiga e a denominada física moderna.

Esse novo paradigma de pensamento teve como consequência uma "*formulação extrema do dualismo espírito/matéria*", que nasceu com Descartes (René Descartes) no século XVII. A visão cartesiana de mundo fez com que os cientistas tratassem a matéria como algo "morto", como um emaranhado de elementos (objetos) "*reunidos numa máquina de grandes proporções*". Tal visão, que foi denominada de **mecanicista** foi deveras sustentada por Newton (Isaac Newton), que concebeu suas ideias a partir daquelas (cartesianas), as quais foram tidas como *verdades absolutas* até fins do século XIX. As ideias newtonianas eram concomitantes à crença naquele Deus único, que impunha sua lei divina que estava acima de todas as coisas e, por isso, as leis da física clássica eram encaradas como as próprias leis do Deus onipotente e portanto, eternas e imunes a mudanças e às quais o universo encontrava-se submetido.

Apesar de ter sido considerada absoluta e reinante, a mecânica newtoniana era incompleta, e isso só começou a ficar claro com a descoberta dos fenômenos elétricos e/ou magnéticos. Com isso, viu-se que as teorias de Newton podiam, sim, ser aplicadas, mas

apenas e unicamente a um grupo limitado de fenômenos, essencialmente o movimento dos corpos sólidos. Dessa forma, o estudo das propriedades físicas de determinados fenômenos ao longo de uma estreita faixa, tornou a teoria, portanto, uma aproximação da realidade.

A mudança de paradigma da física do século XX demonstrou as limitações essenciais da mecânica de Newton, onde esta passa a ser válida apenas para *"objetos que consistem em grande número de átomos e exclusivamente para velocidades pequenas se comparadas à velocidade da luz"*. É então que a mecânica clássica cede terreno para a mecânica quântica e para a relatividade de Einstein, que é um dos enfoques principais do trabalho proposto.

Com isto, temos neste trabalho dois objetivos principais. Um deles é apresentar, de forma resumida e generalizada, um pouco da história de vida de Einstein, analisando ou pelo menos tentando abordar diversos aspectos que contribuíram para suas descobertas, mas principalmente, o que fez dele uma pessoa tão especial no que se refere à Física e consequentemente, à história da Ciência.

Outro objetivo é o de apresentar a Teoria da Relatividade Restrita (Especial) de uma maneira didática, mostrando-a na forma de uma abordagem histórica e sequencial, que explicitem os principais aspectos inerentes a sua formação e descoberta.

Para alcançar tais objetivos, fizemos uso das leituras e interpretações de diversas obras bibliográficas e/ou àquelas voltadas para temas mais específicos relacionados à própria Teoria da Relatividade Restrita ou qualquer outro tema que tenha relação direta ou indireta com a mesma.

Tentamos fazer uso de uma linguagem, mesmo do ponto de vista matemático, fácil e acessível àqueles que por ventura se interessem pelo tema e utilizem nosso trabalho, seja como leitura inicial ou não, para pesquisa ou mesmo por outro interesse.

Escolhemos, portanto, a abordagem da história dos acontecimentos na ordem cronológica em que surgiram, para que a leitura do mesmo seja uma forma de entender a maneira com a qual desenvolveram-se os fatos relacionados com o tema principal.

Como a vida de Einstein é ainda um objeto de muito interesse, utilizamos esse fato para abordá-la como introdução a este trabalho, não somente como objeto fomentador da leitura do mesmo, pois serve muito bem assim, mas também para que possamos, ao menos tentar entender ou pelo menos relacionar, diversos elementos que juntos possam explicar a sua heurística e sua consequente contribuição para a história da física e de das ciências, além, é claro, da relação com o objeto principal que é a abordagem à Teoria da Relatividade Especial (Restrita).

Para este último, resumimos a situação histórica da época, começando pela Mecânica, ou seja, de como ela se apresentava a Einstein, e também abordamos a Termodinâmica, a Eletricidade/Magnetismo e outros elementos indispensáveis para esclarecer de que maneira desenvolveram-se os fatos relacionados à Física, fazendo alusão, algumas vezes, à importância que estes tiveram para Einstein.

Por último, abordamos a Teoria da Relatividade Especial, propriamente dita, mostrando os elementos principais para um entendimento do tema, sem poder deixar de abordar uma matemática mínima e essencial para completarmos o nosso objetivo.

2. Resumo Biográfico

" Não podemos controlar o futuro mas podemos explorá-lo "
E. F. Schumacher

2.1. De 1879 a 1896: infância e adolescência

Somente alguém tão especial (para não dizer contraditório) poderia abalar as bases fundamentalistas do século XIX, discordando e apresentando com seus "experimentos imaginários" (gedanken experiment), uma "nova" e complementar física, inaugurando assim, uma nova forma de fazer ciência. Isso, sem dar qualquer importância aos seus contemporâneos, ou mesmo sem saber da existência da maioria deles e dos seus respectivos trabalhos.

Este, a que nos referimos, Albert Einstein, foi, sem dúvida, o mais importante físico de todos os tempos, e, por conseguinte, qualquer texto que descreva, por mais superficial que seja, quaisquer de seus trabalhos, poderia e/ou deveria falar um pouco sobre uma personalidade tão singular como a desse gênio.

Quando falamos de sua personalidade ambígua, referimo-nos às principais questões que nortearam sua vida e que têm pontos de vista extremistamente opostos, especialmente quando vindos de uma mesma pessoa. O pacificador que sugeriu a construção de uma bomba devastadora; o tímido e isolado homem que sempre preferiu a solidão, mas foi capaz de amar loucamente e de fazer sofrer mulheres diferentes; o humanista que recusou uma filha e a escondeu do mundo, mesmo tendo escrito em uma carta, pouco antes, que a amava (além de outras características e fatos marcantes da sua vida), era sem dúvida um homem muito especial que quebrou o grande paradigma da física e nos fez acreditar que tudo é relativo, inclusive ele mesmo.

Nascido em Ulm a 14 de março de 1879, quando completou um ano de idade seus pais mudaram-se com ele para Munique. O motivo da mudança foi o fato de seu pai, Herman Einstein, ter aceito o convite de seu irmão, Jakob, para trabalharem juntos numa fábrica de material elétrico montada por eles.

Não havia na família casos de intelectualidade dignos de chamar a atenção. Era uma família composta em grande parte por comerciantes e artesãos de origem judaica alemã. O próprio Herman foi um homem de negócios não muito bem sucedido, com épocas razoavelmente boas e outras de declínio total. Podia, no entanto, nos momentos de grande dificuldade financeira, contar com a ajuda de seu sogro e era o que ele fazia (BERSTEIN, 1973).

Einstein não foi considerado pelos seus familiares uma criança prodígio, ao contrário, só começou a falar com três anos de idade, mais ou menos quando sua única irmã, Maja, nasceu (BRIAN, 1998). O fato de não falar quase nada com essa idade preocupava seus pais, mas, mais tarde, falando a respeito disso, ele disse que "quando tinha entre dois e três anos,

ele queria dizer frases completas", para isso ensaiava a frase para si mesmo em voz baixa, mas só pronunciava se lhe parecesse boa (PAIS, 1982). Uma característica deveras singular para uma criança de três anos.

Timidez e introspecção eram características que ele apresentava desde criança, culminando com uma tendência ao isolamento, que ele nunca escondeu. Tanta introspecção, segundo ele mesmo, o fizeram, desde cedo, indagar a respeito dos mistérios que se escondem por trás dos acontecimentos naturais, que ele descreveu como se fossem "charadas matemáticas" que a natureza esconde (PAIS, 1982).

Outra peculiaridade era o fato de ignorar tudo que o aborrecia ou que ele não gostasse, mas, em compensação, era capaz de se concentrar como poucos quando se tratava de algo que o interessava. Um exemplo disso foi quando, ainda criança, depois de persistir por um bom tempo tentando construir um castelo de cartas, conseguiu chegar ao décimo quarto andar de tal castelo, quando, a maioria das crianças na média de sua idade, não conseguia passar do quarto, inclusive sua irmã (BRIAN, 1998).

Foi, contudo, aos quatro anos de idade que ele experimentou a primeira grande surpresa de sua vida, segundo ele mesmo relatou aos 67 anos. Foi quando seu pai lhe mostrou uma bússola. A emoção que ele sentiu é melhor demonstrada no trecho que segue:

" Impressão de assombro experimentei eu, sendo criança de uns quatro anos, quando meu pai me mostrou uma bússola. O fato de aquele ponteiro comportar-se de maneira tão determinada não se casava com a natureza dos acontecimentos possíveis de se localizarem no mundo inconsciente dos conceitos. Lembro - ou pelo menos, creio lembrar - que essa experiência produziu em mim uma impressão profunda e duradoura. Devia existir algo oculto por trás das coisas. O que a pessoa vê desde sempre não causa impressão desse tipo: ela não se preocupa com a queda dos corpos, com o vento ou com a chuva, com a lua ou com o fato de a lua não cair, nem com as diferenças entre matéria viva e não viva" (BERSTEIN, 1993).



A foto à esquerda mostra Einstein com a idade de quatro anos.

Fonte: <http://www.princetonol.com/> [C]

O fato de se impressionar e pensar a respeito de questões relacionadas com a forma com que as coisas se apresentam no mundo a partir da observação de uma bússola, já é algo que talvez mostre uma certa "diferença" entre o Einstein criança e a maioria das outras crianças, pois a maioria não teria tido outro sentimento que não fosse apenas o de simples curiosidade, mas jamais fariam qualquer relação com fatos "casuais" do mundo e uma bússola. Provavelmente, qualquer criança faria uso de tal instrumento como um brinquedo, esquecendo-se logo depois da existência desse objeto.

Também em sua infância começou a estudar música por ser obrigado, mas acabou herdando de sua mãe, Pauline, o gosto por ela. Foi aos seis anos que começou a acompanhar lições de violino, mas só depois de ter horrorizado uma professora com seus ataques de fúria, tendo a mesma desistido de dar aulas a ele, e tentando afugentar uma segunda, percebeu que ela era bem mais insistente, e acabou se rendendo.



Apesar do inicial contragosto ao estudo da música, ela o acompanhou durante toda sua vida e gostava de tocar violino, instrumento que aprendeu desde cedo. Foto ao lado.

Fonte: <http://www.geocities.com>

Apesar de alguns estudiosos acreditarem na provável existência de uma relação entre a física teórica e a música, alguns psicólogos crêem que tal relação se trata de mera coincidência. Muitos físicos teóricos, no começo da carreira ficam em dúvida entre a física e a música, como foi o caso de Galileu (SCHENBERG, 1984). Talvez por isso, para muitos estudiosos, parece existir uma profunda relação entre a Física Teórica, a Física Matemática e a música, como foi o caso de Einstein. Por outro lado, temos excelentes físicos que não são muito sensíveis à música, excelentes músicos que sequer gostam de física e por aí vai. Por isso, é provável que não possamos afirmar a existência dessa relação.

Como possuía uma personalidade um tanto contraditória, segundo afirmam alguns autores, não é de se estranhar os ataques de raiva há pouco mencionados, que foram comuns até mais ou menos sete anos, em uma criança tão calma e um tanto deslocada. Apesar de ser considerado uma criança introspectiva pelos seus parentes, já que quando haviam outras de sua idade ele mostrava-se quieto e distraído, apresentava-se descontrolado muitas vezes e descontava seus acessos em sua irmã, que embora conhecesse bem e previsse esses momentos, às vezes não conseguia escapar deles, como quando acertou sua cabeça com uma enxada (BRIAN, 1998).

Foi somente quando Einstein completou sete anos que sua mãe resolveu colocá-lo em uma escola. Antes disso, tomava aulas em casa. Por prolongar seu isolamento de outras crianças, unida a sua própria tendência ao isolamento e com os ataques de fúria que sua irmã conhecia muito bem, Einstein foi visto por seus colegas de classe como *"uma anomalia que não demonstrava interesse nenhum pelos esportes (...). Para os professores era um idiota que se comportava de modo estranho e que não conseguia decorar nada"* (BRIAN, 1998).

Talvez estivesse habituado a um modo de vida muito diferente daquele que lhe era, então, apresentado na escola.

Era uma "prática educacional" punir, com tapas nas mãos, alunos que não "decorassem" as matérias, por isso, Einstein comparava seus professores da escola primária a sargentos do exército e recebia os tapas com um sorrisinho no rosto, o que incomodava muito seus professores. Depois de dois anos na escola primária, ele já demonstrava talento para a matemática e para o Latim, e somente para isso, recebendo tabefes nas mãos e queixas furiosas dos seus professores (BRIAN, 1998).

Se por um lado, detestava a escola e alguns professores, por outro tinha o incentivo de seu tio, Jakob, que lhe ensinou, por volta de seus doze anos de idade, álgebra e geometria. Quando Jakob chegava com novos problemas matemáticos para que Einstein os resolvesse, ele gostava muito, especialmente quando conseguia a solução. A forma com que seu tio lhe ensinava álgebra, também contribuía para que o então, menino, Einstein se interessasse pelo assunto. Jakob a descrevia como sendo *"... uma ciência divertida em que saímos à caça de um pequeno animal cujo nome não sabemos. Por isso o chamamos de X. Quando o capturamos, damos-lhe o nome certo"*. Entre outras coisas, seu tio ensinou-lhe o Teorema de Pitágoras, que Einstein conseguiu demonstrar depois de muito esforço, mas só conseguiu realmente entender a estrutura lógica da geometria euclidiana depois que ganhou de presente um manual sobre o assunto, que, segundo o próprio Einstein, foi sua segunda grande surpresa quando criança.

" Aos doze anos de idade, experimentei uma segunda sensação de assombro, de natureza inteiramente diversa - deveu-se a um livrinho de geometria euclidiana plana, que me veio às mãos no começo de um ano letivo. Ali haviam afirmações como, por exemplo, as referentes às intersecções das três alturas de um triângulo em determinado ponto, que não eram evidentes, mas poderiam ser demonstradas com tal segurança que se colocavam para além de qualquer dúvida. Essa clareza e certeza causaram-me uma sensação indescritível. E não me perturbou o fato de o axioma ter de ser aceito sem prova. Bastava-me poder construir demonstrações a partir de proposições cuja validade não parecia discutível. Lembro-me que meu tio me falou do Teorema de Pitágoras, antes que o sagrado livrinho me caísse nas mãos. Depois de muito esforço, consegui "demonstrar" o teorema, com base na similaridade de triângulos.(. . .). Os objetos com que lida a geometria não se afiguravam diferentes dos objetos da percepção sensorial, "que podem ser vistos e tocados". Essa primitiva idéia (. . .) apoiava-se, obviamente, no fato de que a relação dos conceitos geométricos para com os objetos da experiência direta (barras rígidas, intervalo finito, etc.) estava, inconscientemente, em mim". (BERSTEIN, 1973).

Certamente esse livro contribuiu bastante o estimular a estudar sozinho, dos doze aos dezesseis anos de idade, o Cálculo Diferencial e Integral. Tal autodidatismo, que aliás era característico nele, contribuíram, sem dúvida para construção de uma nova forma de ver a ciência e de sua heurística singular. Aliando-se ao seu isolamento natural, esta experiência o fez, contudo desconhecer algumas "convenções" científicas.

Além de matemática, durante esse tempo Einstein lia as fascinantes hipóteses de Kant (Emmanuel Kant), uma leitura nada fácil para um pré-adolescente. No entanto, ele se extasiava ao ler os trabalhos do filósofo do século XVIII, que tinha ideias um tanto "bizarras", em se tratando da época. Uma das afirmações que Kant fazia era a de que todos os planetas, ou já tinham sido ou eram habitados. Outra ideia de Kant, essa ainda mais ousada, era a da não existência de Deus. Desviando as polêmicas, Einstein concordava com o filósofo em vários aspectos, entre eles, que a forma de acabar com as guerras mundiais seria com a adoção de um governo também mundial (BRIAN, 1998).

Quanto à religiosidade, era o único aluno judeu do *Gymnasium Luitpold*, em Munique, escola católica de onde recebeu os mesmos ensinamentos religiosos dados aos outros alunos, juntando-se ao fato de sua família não ser também muito religiosa ou apegada a rituais do judaísmo, Einstein também não tinha qualquer apego aos rituais da sua ou de qualquer outra religião, alheio, portanto, a práticas religiosas (BERSTEIN, 1993). Excetuando-se a fase dos seus onze anos em que viveu com intensa religiosidade, quando compunha várias canções em honra a Deus e as cantarolava na ida e vinda da escola (PAIS, 1982).

Um dos únicos rituais judaicos praticados pela sua família, com uma versão bem própria, era a prática do antigo regime do Sabbath, que consistia em convidar um judeu pobre para participar de uma refeição junto à família, que aconteciam às quintas-feiras. O agraciado era um estudante judeu, nascido na Rússia, Max Talmud. Este mesmo rapaz deu a Einstein, alguns livros de ciência popular¹, e conversava com ele sobre diversos assuntos. Tais diálogos o agradavam muito (BERSTEIN, 1973).

Voltando aos estudos escolares, se ele comparava seus professores da escola primária a sargentos, os do ginásio lhe pareciam tenentes. Definitivamente, não gostava da escola. Odiava o *Gymnasium*, especialmente pela forma "mecânica" com que eram ensinadas as disciplinas.

Quando tinha quinze anos de idade, sua família transferiu-se para Milão (Itália), pois os negócios do pai haviam fracassado, mas Einstein ficou morando em Munique para que não prejudicasse seus estudos. Essa era a chance que tinha de livrar-se de uma vez por todas do *Gymnasium*, e o fez. Longe da família, atormentado com a perspectiva do serviço militar, visto que já estava com quinze anos, e não suportando mais ficar na escola, conseguiu que um médico da família atestasse que ele deveria ficar com sua família em Milão, devido a uma depressão nervosa (PAIS, 1982), e obteve, a seguir, uma declaração do professor de

¹ Esse mesmo rapaz escreveria mais tarde, um livro cujo título era: "The relativity Theory Simplified and the Formative Period of its Inventor"

matemática que atestava que os conhecimentos avançados na matéria lhe permitiam estudar na Universidade sem o diploma do *Gymnasium* (BERSTEIN, 1973).

Finalmente livre da escola e inspirado pela paisagem e pela arte italiana, Einstein passou a estudar sozinho e se preparar para os exames de admissão do Instituto Federal de Tecnologia (ETH), ou Escola Politécnica Federal de Zurique. Em outubro de 1895 prestou tais exames, mas foi reprovado (Pais, 1982). Como obteve excelente resultado nas provas de matemática, o diretor da Politécnica lhe aconselhou que tirasse o diploma (equivalente ao diploma de ensino médio) em uma escola cantonal suíça e depois prestasse os exames novamente (Berstein, 1973); Seguindo o conselho do diretor, Einstein matriculou-se em uma escola em Aarau, na parte de língua alemã da Suíça, se hospedando na casa da família Winteler, com quem dava-se muito bem (PAIS, 1982).

Pela primeira vez ele gostava da escola. Lá encontrou excelentes laboratórios de Física, onde pode estudar e fazer experiências, além de um ensino mais "livre", e obteve sempre excelentes notas. Pouco antes da morte ele escreveu:

"Esta escola me deixou uma impressão indelével, por seu espírito liberal e a consideração espontânea dos professores, que de maneira alguma se baseava na autoridade externa" (PAIS, 1982).

Talvez por estar passando por uma nova fase, inclusive no que diz respeito à escola, Einstein estivesse tão feliz e por isso mais confiante. Um breve ensaio escrito por ele em 1895 e intitulado *Mes projets d'avenir* (Meus projetos para o futuro) retratem tal animação:

"... Se tiver a sorte de passar nos exames, irei para o ETH, em Zurique. Ficarei lá quatro anos para estudar matemática e física. Penso tornar-me professor (. . .) escolhendo a parte teórica. Eis as razões que me levaram a esse projeto. Acima de tudo está a predisposição para o pensamento matemático abstrato, a [minha] falta de imaginação e habilidade prática. Os meus desejos também me inspiraram a mesma resolução. Isso é muito natural: uma pessoa gosta de fazer coisas para as quais tem habilidade prática. Os meus desejos também me inspiraram a mesma resolução. Há também uma certa independência, de que gosto muito, na profissão científica." (PAIS, 1982).

Essa independência de que tanto ele gostava mostra-se novamente, e com uma confiança particular, que não costumava mostrar, mas que tinha. Tais convicções lhe serviram, por exemplo, para construção da Teoria da Relatividade, que será discutida no capítulo 3.

2.2 - De 1896 a 1900: a vida na Politécnica e seus primeiros trabalhos

Após um ano, em 1896, Einstein voltou a se candidatar à Politécnica e foi aprovado sem precisar fazer novamente os exames, pois já tinha o diploma da escola em Aarau. Ele passou de estudante alemão do ensino médio para estudante sem nacionalidade na Politécnica de Zurique. Estava, então, com dezesseis anos e já começava a pensar sobre a

Relatividade do Movimento. Essa pode ter sido a primeira fase do que Poincaré chamou de processo de criação matemática, em que a pessoa pensa sobre um problema, depois, em geral, o problema sendo difícil, ele não consegue resolver e o abandona, às vezes durante anos a pessoa não pensa muito sobre aquilo; e, de repente, no momento mais inesperado a solução vem (SCHENBERG, 1984). E é na quarta fase que se tem uma elaboração final da solução que já apareceu na consciência. Essa última fase nem todos conseguem desenvolver, mas no caso de Einstein foi possível, já que ele chegou à teoria da relatividade mais tarde, o que culminaria com a busca de uma demonstração rigorosa dos resultados obtidos intuitivamente, como descreve Poincaré na sua classificação da última etapa. Isso, claro, se considerarmos que tal teoria é verdadeira.

Mas, deixando de lado estas possíveis correlações, o fato é que a felicidade de Einstein culminou com as dificuldades financeiras por que estava passando sua família. A fábrica de seus pai e tio havia falido e a família perdia, então, grande parte de seus recursos. Foi então que se dissolveu a sociedade e cada um resolveu seguir seu caminho. Seu tio conseguiu emprego em uma firma e seu pai decidiu recomeçar uma nova fábrica em Milão, que faliu novamente dois anos depois (BRIAN, 1998).



Einstein ficou deprimido com a situação, especialmente pelo fato de não poder ajudar seus pais, e frequentemente escrevia a Maja, relatando sua tristeza em relação aos fatos ocorridos. A tristeza passou quando seu pai encontrou um emprego e ele passou então a, de vez em quando, ir a um concerto, um teatro ou um bate-papo com os poucos amigos, entre eles, Michele Angelo Besso, com quem continuou a amizade para o resto da vida (PAIS, 1982).

Gostava da Politécnica, mas, apesar disso, Einstein não era um frequentador assíduo das aulas, preferindo estudar o que tivesse vontade e não ter que acompanhar assuntos que muitas vezes não lhe interessavam. Trabalhou muito no laboratório de física, fascinado com as observações, embora seus trabalhos experimentais não fossem muito bem recebidos por seu professor de física, Weber (Heinrich Friedrich Weber), tendo, Einstein, sido repreendido algumas vezes por negligenciar seus trabalhos de laboratório (PAIS, 1982).

A negligência pelo trabalho do professor talvez tenha se dado pelo desapontamento com relação ao curso teórico ministrado por Weber, onde Einstein esperava aprender algo novo sobre a teoria de Maxwell, que o professor não só não ensinou, como provavelmente desconhecia o eletromagnetismo de Maxwell. Como, desde criança, Einstein não se preocupava em "agradar" seus professores, não seria dessa vez que o iria fazer. Passou a

estudar sozinho o que não poderia aprender nas aulas de Weber, inclusive as equações de Maxwell que foram tão importantes para seus estudos posteriores.

Outros professores, contudo, foram elogiados e considerados excelentes por ele, como Adolf Hurwitz e Hermann Minkowski (PAIS, 1982).

Que Einstein era diferente, seus mestres da Politécnica concordavam, afinal, apesar de sair-se bem nas notas finais de cada disciplina, não era um aluno extremamente dedicado como os professores esperavam e como se comportavam seus colegas. A maioria de seus professores não aprovava sua maneira exclusivista de ver as coisas e não encarava seu autodidatismo com bons olhos, ao contrário, achava que poderia ser uma espécie de desdém aos seus ensinamentos.

Segundo Brian (1998), Einstein não suportava a maioria daqueles professores aristocratas por considerá-los "irracionais e ignorantes". Por tal razão deixava muitos deles irritados com suas colocações e "falta de compromisso" com determinadas disciplinas, como acontecia com seu o instrutor de física, Pernet (Jean Pernet), quando Einstein jogava fora "as instruções oficiais, por ele fornecidas, de como conduzir uma experiência, sem fazer uma segunda leitura".

Da mesma forma que muitos professores não gostavam dele, outros o admiravam e o defendiam. Quando o próprio Pernet comentou com outro profissional da instituição sobre o que Einstein fazia, o outro lhe disse que os métodos de Einstein eram bastante interessantes e suas soluções sempre corretas, do que Pernet discordou (BRIAN, 1998).

Em 1900 conseguiu a graduação com mais três colegas estudantes com excelentes notas. Os três colegas conseguiram, imediatamente, serem aceitos como professores assistentes no ETH, mas Weber recusou o emprego a Einstein que ficou mais uma vez bastante desapontado com o professor e chegou ao final do ano desempregado. Nesse mesmo ano escreveu seu primeiro artigo, que tratava das forças intermoleculares. Tentou diversas vezes, sem sucesso, um lugar em algumas universidades. Isso o desencorajou e já estava sem muitas esperanças quando conseguiu um emprego provisório como professor em uma escola de ensino médio em Winterthur, onde encontrou grande prazer em ensinar (PAIS, 1982).

Em setembro de 1901 foi nomeado, por um ano, professor substituto em uma escola particular em Schaffhasen. Nessa época já havia se naturalizado suíço e não ostentava mais ser professor universitário. Continuava, no entanto, estudando e escrevendo trabalhos, pois a profissão de professor lhe deixava tempo para continuar seus estudos, como sempre só, embora escrevesse para alguns de seus antigos professores sobre os novos trabalhos. Nesse período estava trabalhando na teoria cinética dos gases e sobre o movimento da matéria em relação ao éter² (PAIS, 1982).

Como lecionava somente pela manhã, sobrava-lhe tempo para escrever, além de outros trabalhos, sua tese de doutoramento sobre a teoria cinética dos gases, que apresentou posteriormente, à Universidade de Zurique, pois nessa época o ETH ainda não conferia grau de doutoramento. O trabalho, no entanto, não foi aceito. Mais uma derrota para Einstein.

² Que será explicado em capítulo posterior.

2.3. Em 1902 a vida começa a mudar...

Os novos problemas que estava enfrentando, fizeram com que um seu amigo e colega da Politécnica, Marcel Grossmann, pedisse a seu pai que ajudasse Einstein, e ele o fez. Recomendou-o a Friederich Haller, chefe da repartição de patentes em Berna. Em 16 de junho de 1902, Einstein tornou-se perito técnico na repartição de patentes.

Antes de continuarmos com o contexto referido até então, iremos abordar algo mais sobre a intimidade de Einstein. Refere-se a sua vida pessoal e aos seus casamentos. Essa abordagem torna-se necessária não só pelo assunto em si, que gera interesse por si só, mas também com o objetivo de tentarmos buscar relações, ou analisar as já existentes, entre sua personalidade, seus trabalhos, o momento histórico ou quaisquer aspectos que possamos utilizar para esse fim.

Como já foi dito, Einstein terminou seus estudos no ETH em 1900, juntamente com três colegas que estudavam na mesma classe, mas não eram os únicos. Havia também uma aluna, a única mulher da classe, a colega Mileva Maric, quatro anos mais velha que Einstein, e apesar da idade, causou-lhe admiração e posteriormente ambos se apaixonaram (BRIAN, 1998).

Em 1896, ano em passou a integrar o corpo docente da Politécnica, Einstein namorava a jovem Marie Winteler, tanto seus pais quanto os da jovem aprovavam a união e os pais não só gostavam de Einstein como o acolheram em sua casa durante um período. Talvez por gostar tanto da família Winteler, é que Einstein, a partir de determinado momento não mais respondeu as cartas de Marie, provavelmente não sabia como lhe contar a respeito da colega Mileva (BRIAN, 1998).

Pauline, mãe de Einstein, não aceitava seu namoro com uma mulher mais velha e não gostava de Mileva, o que transtornava seu filho, que estava apaixonado. Com sua nova namorada, podia conversar sobre matemática e física e tudo aquilo que mais gostava, já que Mileva apreciava os assuntos e também estudava as mesmas coisas (PAIS, 1982).

Einstein e Mileva correspondiam-se através de cartas, nas quais ele relatava em detalhes nada sutis as conversas entre ele e sua mãe, chegando a escrever que Pauline havia dito que ele jamais poderia casar-se com sua amada por ele ser uma mulher velha, pouco feminina e pouco saudável, esta última característica referia-se ao fato de Mileva, por causa de um problema congênito nos quadris, ter um andar desengonçado (BRIAN, 1998).

Ao mesmo tempo em que escrevia com uma sinceridade que magoava Mileva, ele escrevia declarações de amor, muito parecidas, inclusive, com as que escrevia antes para Marie Winteler.

Einstein descrevia suas conversas nada amistosas com sua mãe, sobre seu relacionamento amoroso à Mileva, contando minuciosamente as impressões de sua mãe sobre sua namorada, fato que a magoava, devido à sinceridade com que Einstein descrevia tais diálogos. Teve várias e sucessivas discussões com seus pais, principalmente sua mãe, por causa de seu relacionamento com Mileva e apesar de todos os contratempos, casaram-se em outubro de 1901.

Antes disso, passaram por diversos problemas, principalmente pela falta de dinheiro e com a então incerteza de Einstein a respeito à obtenção da nacionalidade suíça, que só obteve em fevereiro de 1901 (BRIAN, 1998). Sobreviviam das aulas particulares que ambos davam e, enquanto isso, ele esperava ansioso que seus trabalhos fossem aceitos por alguma universidade.

Inúmeros problemas abalavam Einstein e os desestimulavam. Tentou por várias vezes ver um de seus artigos publicados, mas não obteve resposta. Enviou duas vezes consecutivas um mesmo trabalho a Wilhelm Ostwald, físico-químico da Universidade de Leipzig, entre estes, o que lhe daria o prêmio Nobel em 1909, mas que naquela ocasião não foram aceitos. Estava tão aflito que seu pai mandou uma carta a este mesmo professor, mas assim como Albert, não obteve, sequer uma resposta³ (BRIAN, 1998).

As coisas começaram a melhorar entre maio e junho, quando dois colegas de classe lhe indicaram para um trabalho temporário como professor de matemática em uma escola no norte da Suíça. Estava feliz na escola, não só por que gostava de ensinar matemática, mas principalmente, porque lhe sobravam as tardes para estudar e desenvolver seus trabalhos, entre estes, a teoria de Boltzmann sobre a teoria cinética dos gases (PAIS, 1982).

Quando o trabalho temporário acabou, estava disposto a conseguir qualquer emprego, principalmente porque aquilo que sua mãe mais temia aconteceu: Mileva estava grávida. Esconderam de Pauline e Herman o acontecido e Mileva foi para a Sérvia onde estava sua família, enquanto Einstein foi para Schaffhausen, cidade suíça, dar aulas em troca de aproximadamente trinta dólares mensais, que era a única coisa que havia conseguido (BRIAN, 1998).

Albert e Mileva se correspondiam constantemente e no sétimo mês de gravidez eles se referiam à criança pelo nome de "Lieserl", que era o nome que eles haviam escolhido caso fosse uma menina como queria Mileva, ou "Hanser", caso fosse um menino, como queria Einstein. Estavam, no entanto preocupados com a situação, pois escondiam a gravidez de Mileva, não tinham dinheiro e estavam separados. Foi então que seu amigo Marcel Grossmann lhe informou que a vaga no escritório de patentes estava para ser preenchida e que esta seria provavelmente sua (BRIAN, 1998).

Enquanto aguardava ansioso a possibilidade de poder trabalhar no tal escritório de patentes, sua mãe escrevia para os pais de Mileva, ofendendo-a e reiterando a sua posição contrária ao relacionamento da jovem com seu filho e, principalmente, um possível casamento (BERSTEIN, 1973).

Em meio a tantos contratempos, nasceu em fevereiro de 1902, Lieserl, a primeira filha do casal. Einstein, mostrava-se um pai amável e atencioso, escrevendo constantemente para saber de sua filha, se estava se alimentando bem, como era e dizendo que a amava mesmo antes de conhecê-la. Ao mesmo tempo enchia Mileva de esperanças ao falar de Berna e de como ela iria gostar da cidade (BRIAN, 1998).

³ Ostwald redimiu-se ao indicar, em 1910, Einstein ao Prêmio Nobel, embora ele só o tenha recebido em 1921.

Enquanto não recebia resposta sobre o possível trabalho, anunciou seus serviços de aulas particulares em um jornal, assim que chegou na cidade. Um dos alunos que conseguiu, Solovine, se transformou em seu amigo, pois compartilhavam de muitas ideias a respeito de filosofia, entre outras (PAIS, 1982).

Ainda escrevia constantemente a Mileva e dizia-lhe para ter um pouco mais de paciência. Com relação a sua família, não se sabe se souberam da existência da criança segundo afirma Denis Brian em *Einstein: a ciência da vida* (BRIAN, 1998).

Um fato, no mínimo curioso, é que depois de ter apresentado preocupação e afeto pela recém nascida filha, Einstein não mais se pronunciou a respeito da mesma, nas outras cartas e sequer voltou a tocar no nome de Lieserl uma semana depois, e novamente três mais tarde à carta em que dizia amar a filha e nem depois, como se ela tivesse morrido, o que não concordam os pesquisadores, pois em suas concepções, ele teria escrito dando-lhe os pêsames e mostrando-se triste, ou qualquer outra atitude que desse indício a um possível falecimento da criança (BRIAN, 1998).

Muitos acreditam que a filha de Albert Einstein tenha sido dada em adoção e indicam algumas cartas que mostram como evidência, segundo eles, dessa versão. Isso leva a crer que ela viveu, mas foi criada por outra família. Um dos indícios, segundo afirma Denis Brian é o fato de que em 1935, ao ser informado que, na Europa, uma mulher tentava convencer a todos de que era filha dele. Einstein, então, contratou um detetive para averiguar a veracidade dos fatos (BRIAN, 1998). O que indica que ele acreditava que sua filha estivesse viva.

2.4. Outras considerações e a criatividade em Albert Einstein

" (...) a ciência e a teoria científica são produtos históricos. Uma interpretação surge em dado momento, e não em outro qualquer, porque estão reunidas as diferentes condições para sua elaboração. Esta afirmação é ilustrada pela multiplicidade de casos em que as descobertas têm datas muito próximas, feitas por sábios que, segundo todas as probabilidades, ignoram os trabalhos respectivos" [18]

Rosmorduc (1983)

Nada mais natural que uma personalidade como Einstein seja objeto de estudo de várias pessoas em diversas áreas. A brusca mudança de paradigma⁴ (KUHN, 1970) que Einstein impetrou, por si só já é algo bastante razoável para despertar tanto interesse. Até seu cérebro, depois da morte, serviu para estudo e constantes pesquisas por parte de médicos e psicólogos. Estes últimos tentam até hoje analisar sua personalidade e as possíveis relações existentes

⁴ Segundo Kuhn, entende-se por paradigma, uma determinada teoria (poderíamos nos referir à mecânica clássica) em conjunto com determinados conceitos isolados como força ou elétron [B] sendo que os cientistas que desenvolvem pesquisas baseados no paradigmas de sua ciência, estão, na verdade, praticando a "ciência normal" [17], reciprocamente às revoluções científicas, onde não encontrando solução para determinados problemas, fazendo-se uso dos paradigmas vigentes, parte da comunidade científica apela para uma nova teoria antagônica àquela vigente[B]. Poderíamos considerar isso ao que usualmente chamamos de "quebra de paradigmas"

entre todo processo de desenvolvimento de vários aspectos relacionados ao histórico de sua vida.

Em busca de opiniões, estudos, enfim, textos que abordem qualquer elemento relacionado à *psiquê* de Einstein, podemos encontrar inúmeros temas abordando tal assunto sob diferentes narrativas e pontos de vista. Uma análise bastante curiosa diz respeito à criatividade de Einstein e seu processo criativo.

Segundo Irani Marchiori (estudioso do assunto) algumas características são inerentes às pessoas criativas: flexibilidade e fluência de ideias, pensamento inovador, grande sensibilidade, fantasia e/ou imaginação, inconformismo, independência de julgamentos, tendência a experimentação de novas experiências, uso bastante elevado de analogias e combinações incomuns, ideias elaboradas e ricas, preferência por situações de risco, motivação e curiosidade, senso de humor, impulsividade e espontaneidade, autoconfiança ou autoconceito positivo e sentido de destino criativo. Se tal afirmação é verdadeira, então não temos como negar, o que aliás já se sabe, que Einstein foi uma pessoa extremamente criativa. Se pudéssemos afirmar que para cada qualidade citada aumentasse o percentual de criatividade de um indivíduo, ou mesmo se tivéssemos como medir e comparar quantitativamente o percentual de criatividade de cada pessoa, então poderíamos arriscar dizer que Einstein era uma pessoa 100% criativa.

Isso por que, ele apresentava cada uma das qualidades acima citadas. Tudo isso é perfeitamente detectável se analisarmos muitas das inúmeras obras já escritas sobre ele, sejam estas escritas por pessoas que tiveram uma proximidade maior e por isso analisaram não somente seus trabalhos científicos, mas também sua personalidade e sua vida particular, ou por aqueles que estudaram apenas os trabalhos do cientista.

Segundo Marchiori (1996) o interesse por tais características criativas de personalidades científicas como Einstein tem sido pesquisado ao longo dos anos. Ainda, segundo ele, tais investigações têm intenção de detectar as principais características que são inerentes a esse grupo especial de pessoas, e, principalmente, objetivam compreender quais fatores influenciaram para o desenvolvimento de tais particularidades.

Entre as características citadas poderíamos incluir uma certa intuição, que pode ou não estar associada à tal sensibilidade de que trata Marchiori (1996). Isso, porque, ao longo da história da ciência pode-se observar algumas personalidades que conseguem perceber algo que está iminente e que, no entanto, outras pessoas não conseguem perceber. É o caso, por exemplo, do próprio Einstein. Ao descobrir a teoria da relatividade restrita, ele utilizou as transformações de Lorentz, que descobriu sozinho por não ter tido acesso aos trabalhos do mesmo. Mas, por que Einstein, e não Lorentz conseguiu chegar à teoria (SCHENBERG, 1984)? Ou então, Poincaré, que também poderia tê-lo feito, e, no entanto, morreu sem sequer entender completamente a teoria de Einstein?

Outro que chegou a resultados importantes, contando, entre outras coisas, com uma intuição fantástica, foi Maxwell. Segundo Mário Schenberg (físico brasileiro), Maxwell construiu uma teoria "incorreta", embora tenha chegado a resultados corretos. A teoria que ele chama de

incorreta é a teoria do eletromagnetismo. Schenberg afirmava, ainda, que as famosas equações de Maxwell podem ser escritas numa variedade diferencial não dotada de métrica riemanniana, não exigindo, portanto, tensor da métrica. O mais curioso, segundo afirma, é que, adotando esse mínimo de hipóteses -- admitindo só uma variável diferenciável quadridimensional -- compreende-se certos aspectos das equações de Maxwell⁵ (SCHENBERG, 1984).

A intuição que muitos físicos e matemáticos possuem e a qualidade com que se apresentam certamente torna a evolução dos conceitos científicos algo fascinante.

Já que estamos citando alguns exemplos de personalidades interessantes de serem investigadas sob o aspecto analisado, podemos nos referir a Descartes. O próprio Maxwell já havia afirmado que a fraqueza da física de Descartes estava no fato de que ele se baseava sobre um sistema de unidades, L e T (comprimento e tempo), não havendo massa, enquanto que o sistema de Newton era o M.L.T (massa, comprimento, tempo). No entanto, cem anos depois de tal afirmação, verificou-se que na mecânica quântica relativística, baseada no chamado grupo de Poincaré, há um sistema natural de unidades que não incluem a unidade de massa. Dessa forma, a teoria relativística confirma a intuição de Descartes (SCHENBERG, 1984).

Poderíamos citar outros exemplos, mas isso fugiria ao propósito do nosso trabalho. Vemos, contudo, que a história da ciência mostra que ideias aparentemente incorretas podem ser posteriormente válidas e que, nesses casos, haviam correspondido a profundas intuições.

Se somarmos a criatividade descrita por Irani Marchiori à intuição relatada por Schenberg, talvez possamos entender o sucesso de Albert Einstein.

No caso particular de Einstein, retomando as características antes citadas a respeito da sua criatividade, podemos citar alguns exemplos que podem corresponder às características antes descritas. Em se tratando de motivação e curiosidade, estas sempre estiveram presentes em sua personalidade. Um exemplo disso foi a grande surpresa que teve quando seu pai lhe mostrou uma bússola pela primeira vez. A curiosidade de entender, aos quatro anos de idade, o motivo por que o ponteiro movia-se daquela maneira o impulsionaram a indagar sobre a forma com que tudo se apresentava no universo, isso relatado pelo mesmo e descrito neste trabalho.

A tendência à experimentação de novas experiências o fizeram utilizar-se dos "experimentos imaginários", aliados ao pensamento inovador, estes o fizeram imaginar, aos dezesseis anos, como seria visto um raio de luz se o observador pudesse viajar àquela velocidade. Esse, inclusive foi o ponto que o impulsionou a escrever, mais tarde, sobre a teoria da relatividade.

O uso bastante elevado de analogias e combinações incomuns é algo que não necessita de análise, por estar claramente presente, inclusive no que já foi relatado, mas podemos lembrar que o uso de analogias era algo comum nos seus trabalhos. Basta lembrar da própria teoria da relatividade, onde fazia referência a observadores para substituir a ideia do referencial inercial.

⁵ Não entraremos em detalhes sobre o descrito, pois isto fugiria ao objetivo do trabalho.

A independência de julgamentos pode ser exemplificada no fato de Einstein elaborar seus trabalhos, muitas vezes em concomitância com seus contemporâneos, sem conhecer, no entanto, o trabalho dos mesmos, ou, muitas vezes, sem relevar ou dar importância a estes. Um exemplo é o experimento de Michelson-Morley. Apesar de conhecer o resultado, o próprio Einstein afirmou sobre neutralidade dos resultados de tal experimento nas suas pesquisas.

O senso de humor é mencionado em todas as suas biografias. Escolhemos um trecho que relata seu senso de humor, descrito por Abraham Pais em "Sutil é o Senhor...":

"Além da física, conversávamos também sobre outras coisas, (. . .). Um dia contei uma anedota a Einstein, uma anedota judia. Apreciou-a tanto que comecei a colecionar as melhores para a ocasião seguinte. Enquanto lhe contava essas histórias, ele mudava de cor. Subitamente, parecia mais jovem, quase um estudante travesso. Finda a anedota, descarregava um sorriso de contentamento, coisa que lembro com imenso prazer."

A impulsividade também pode ser constatada no trecho a seguir (do mesmo livro) e já foi comentada anteriormente:

". . . Todavia, também era temperamental. Podia explodir de cólera. Nesses momentos a face empalidecia, a ponta do nariz embranquecia e podia descontrolar-se. O pequeno e querido Albert chegou a arremessar objetos na irmã em várias ocasiões. . . "

"Mostrava-se tão aberto a ideias revolucionárias que, se ousava questionar os conceitos de tempo e espaço, por que não questionar os de energia? Einstein foi notável por sua persistência e inconformismo, pois conseguia trabalhar horas ou dias num mesmo problema. Alguns tópicos o interessaram tanto que por décadas ocuparam sua mente. Ele mesmo, certa vez, confessou a um colega que pretendia passar o resto de sua vida refletindo sobre o que era a luz. "⁶

Não se pode negar a relevância das características de criatividade comparadas às suas características pessoais, nem tampouco a possível existência de uma "intuição" agregada a algumas pessoas especiais como Einstein, mesmo acreditando que, se analisarmos muitas vezes o curso da história, podemos perceber que se àquelas pessoas não tivessem criado determinadas coisas, outras estariam aptas a fazer o mesmo num espaço de tempo relativamente curto. Como se algo devesse ser descoberto em determinado instante e não necessariamente por determinada pessoa, como acreditam alguns.

⁶ Irani Marchiori

3.TRR - Teoria da Relatividade Restrita (Especial)

"Na opinião dos especialistas é inócuo esperar
um futuro para a máquina voadora."
(W. J. Jackman e Thos H. Russel, doutores em ciência, 1910)

3.1 - Apresentação

A criação da sua Teoria da Relatividade Especial e posteriormente da Geral, talvez tenham se iniciado desde sua infância com a "preparação" nada comum por que passou no seu processo evolutivo pessoal. A alta motivação e curiosidade que sempre o impulsionaram aliadas a curiosidade incomum que sempre o acompanhou, desde criança, o fez também refletir pela primeira vez, aos dezesseis anos, sobre como uma pessoa veria um raio de luz se ela pudesse deslocar-se junto com o raio.

Essa divagação foi anotada detalhadamente em forma de ensaio, e mais tarde serviria de ponto de partida para a teoria da relatividade [A].

"Apesar de ser perguntado sobre como fora o único a ter pensado sobre a tal teoria, respondeu que a razão é que um adulto normal nunca teria parado para pensar sobre problemas de tempo e espaço" [A]. Em realidade, nem um adulto e nem um adolescente normal teriam ideias tão singulares e, ao mesmo tempo, tão relevantes para a ciência.

As concepções de Einstein, no entanto, fazem parte de uma história complexa e de uma ciência bem construída, que é a Física. Seria, portanto, no mínimo proveitoso, conhecermos a da época de Einstein, ou pelo menos entender os aspectos mais relevantes para que possamos compreender como se deu a construção da teoria da relatividade. Apresentamos, então, os temas principais relacionados à teoria, para que a leitura se torne mais agradável e proveitosa.

3.2. Situação Histórica da Época

"Há uma coisa que eu gostaria de lhe perguntar: Quando um matemático, empenhado na investigação de fenômenos e resultados físicos, chega à conclusões, não podem elas ser expressas em linguagem comum, de forma tão completa, clara e categórica quanto em fórmulas matemáticas? Em caso afirmativo, não seria uma grande vantagem expressá-las assim? (...) Penso que assim deve ser, porque sempre achei que o senhor poderia dar-me uma ideia perfeitamente clara de suas conclusões(...). Sendo isso possível, não seria desejável que os matemáticos empenhados no tratamento desses assuntos nos fornecessem os resultados nesses termos populares, úteis, manipuláveis, tanto quanto nos termos que são próprios e adequados a eles, matemáticos?"

(Michael Faraday em carta dirigida à Maxwell)

3.2.1. Mecânica (Aristóteles, Galileu e Newton)

A física começou a desenvolver-se como ciência específica a partir dos séculos XVI e XVII, sobre a imensa base de conhecimentos práticos e empíricos que a humanidade havia até

então acumulado. Foi nessa época que surgiram os primórdios da ciência física: primeiro na astronomia, com Copérnico, Tycho Brahe e Kepler, depois, na Mecânica, com Galileu (MACEDO, 1976).

A Mecânica é a parte da Física que estuda o movimento e suas causas, o que vem intrigando e aguçando a curiosidade de físicos e matemáticos há séculos. É uma das partes que mais se desenvolveram na física e tem, juntamente com as Equações de Maxwell (serão tratadas logo mais), uma construção teórica característica da ciência do século XIX (MACEDO, 1976). No século XIX, a mecânica newtoniana (mecânica clássica) imperava e seus postulados eram tidos como verdades absolutas até o surgimento da mecânica relativística.

A mecânica sofreu adversidades ao longo dos tempos devido às más interpretações de alguns estudiosos, especialmente os primeiros, e a problemas políticos e religiosos. Conforme Bassalo (1987), as ideias aristotélicas (de Aristóteles, filósofo grego, 384 - 322) geocêntricas contribuíram para isso. Para Aristóteles, os movimentos dos corpos eram sempre e somente relacionados à Terra (esta era considerada como sendo o centro do universo e fixa). Não se acreditava no vácuo e só existia um referencial inercial: a terra imóvel.

Não existia, para Aristóteles e os gregos da época, o conceito de relatividade do movimento, que só apareceu na Idade Média com Giordano Bruno e Galileu Galilei. Supunham os gregos que os corpos celestes eram compostos pelo que eles denominavam "quintessência", em razão de sua natureza especial, como pensavam. Acreditavam também, que estes corpos movessem-se em órbitas circulares perfeitas.

Tal cosmologia entraria em conflito mais tarde, devido às observações aos movimentos dos planetas, quando observados da terra em relação às estrelas "fixas", já que tais movimentos não apresentava características de ser uniforme, ao contrário, parecem "inverter periodicamente" o sentido da direção na sua órbita - movimento retrógrado. Para não contrariar seus princípios, os astrônomos gregos de época posterior adaptaram sua teoria dos movimentos circulares uniformes a complexas superposições de movimentos circulares (o que hoje estudaríamos nas séries de Fourier) (BERSTEIN, 1973).

A compreensão geral de movimento já dava sinais no século XVI, quando o conceito de velocidade instantânea e o de aceleração como variação temporal da velocidade, começaram a ser estabelecidos. Começa então a se descrever o movimento de um corpo em um campo de forças com o conceito de independência de movimentos. Esses estudos deram início à Cinemática (BASSALO, 1987). Neste mesmo século, Copérnico simplificou a descrição de movimentos que se fazia em termos de superposição dos movimentos circulares, através de uma mudança de referencial, colocando o sol como centro imóvel em torno do qual os planetas girassem ao seu redor.

No início desse mesmo século (XVI), conseguiu-se mostrar a equivalência entre os movimentos uniformemente variados e os movimentos uniformes, contanto que estes últimos fossem descritos com a velocidade média dos primeiros.⁷ Foi o matemático Oresme (Nicole

⁷ Este resultado ficou conhecido como Regra de Merton, por ter sido desenvolvido no Merton College, em Oxford [9].

d'Oresme) quem demonstrou que, em um movimento uniformemente variado, a distância percorrida aumenta com o quadrado do tempo, mas ele não chegou a lei de queda livre dos corpos, enunciada por Galileu em 1638 (BASSALO & CARUSO, 2013).

Mais ou menos meio século depois, Kepler abstraiu a ideia do princípio da descrição do movimento dos planetas em supostas órbitas circulares uniformes, mostrando que a órbita de Marte não correspondia a uma circunferência, mas sim uma elipse, com o sol em um dos focos. Devemos ressaltar, no entanto, que as conclusões a que chegou Kepler foram frutos de observações essencialmente empíricas e que, por isso, não explicavam uma série de questões: por exemplo, por que os planetas moviam-se segundo tais órbitas elípticas e nem o porque de outros objetos não se moverem segundo as mesmas órbitas.

Hoje já se sabe que, ao contrário do que supúnhamos, a ciência medieval era definitivamente mais desenvolvida. Um fato extremamente interessante é que nesse período foi criado um método, depois utilizado por Galileu. Por esse motivo, Galileu é considerado um elo de transição entre a Física Medieval e a Física Moderna.

Galileu também desempenhou papel muito importante na descrição e no estudo do movimento dos corpos celestes. Das contribuições que desempenhou, duas foram fundamentais: a primeira diz respeito à resistência do ar e sua conjectura de que na ausência desta, todos os objetos cairiam com a mesma aceleração. A segunda, é com relação à inércia dos movimentos (BERSTEIN, 1973).

Galileu utilizou o que foi chamado de método das "experiências ideais", utilizado depois por Einstein, mas com o nome de "experimentos imaginários" (gedanken experiment). Supôs uma situação em que, estando os efeitos de fricção todos eliminados, qualquer corpo que sofresse aplicação de uma força e se pusesse, por isso, em movimento, permaneceria no mesmo indefinidamente ou enquanto não sofresse uma outra força que alterasse tal movimento. Galileu observou então, que essa componente "inercial" estava presente em todos os movimentos observados comumente.

Atribui-se a ele a famosa Experiência da Torre de Pisa⁸. Conta-se que, quando era professor de física, tentando explicar a seus alunos as conclusões a que chegara sobre a queda dos corpos, convidou-os para um passeio até a Torre de Pisa, e subiu sozinho até o último andar da torre de onde deixou cair duas esferas (sendo uma cinco vezes maior que a outra). Contrariando as leis aristotélicas, as duas esferas chegaram ao solo no mesmo instante (CGP, 1974).

Além da dedicação nas pesquisas sobre queda livre, Galileu defendia (junto com Copérnico) o heliocentrismo e, usando o princípio da independência dos movimentos, chegou ao princípio da relatividade galileana utilizada posteriormente por Newton.

Para entendermos tal princípio, suporemos um navio em movimento uniforme e que três pessoas, duas no navio e uma no leito do rio, quando estiverem uma em frente da outra, deixem cair uma pedra da mesma altura. A trajetória que cada pessoa verá seguir, da sua

⁸ Muitos acreditam que tal experiência nunca foi realizada, outros, que foi realizada, mas não por Galileu, mas mesmo como lenda vale à pena ser citada.

própria pedra, será uma linha vertical e retilínea, mas a trajetória descrita pela pedra de um, visto pelo outro, será uma curva (BASSALO; CARUSO, 2013). Essa ideia principia a relatividade dos movimentos, que passariam, então a depender do observador, ou melhor, do referencial utilizado.

Segundo Bassalo e Caruso (2013), na relatividade galileana é enunciada a lei de composição de velocidades: "a velocidade de um corpo, em relação a outro em repouso, é igual a velocidade que ele tem em relação a um outro corpo que se desloque com velocidade constante em relação corpo parado, acrescida desta última velocidade"⁹. Além disso, também afirma que: as leis físicas de um sistema k, qualquer, serão igualmente válidas em relação a qualquer outro sistema de coordenadas, k', que, em relação a k, esteja em movimento retilíneo e uniforme (EINSTEIN, 1958), o que equivale dizer: o movimento dos corpos, que se movem uniforme e retilineamente, uns em relação aos outros, são regidos pelas mesmas leis (LANDAU, 1979).

A lei de composição de velocidades, mais a lei da inércia, formulada por Galileu, permitiram a Newton (Isaac Newton) elaborar o conceito de referencial inercial.

A lei da inércia nos diz que um corpo não influenciado por forças exteriores pode estar em repouso ou em movimento retilíneo uniforme. E, para darmos continuidade, vamos definir o conceito de referencial e, posteriormente, de referencial inercial:

Pode-se definir referencial como sendo um sistema de coordenadas em relação ao qual se descreve o movimento dos corpos. O referencial associa a cada ponto do espaço três coordenadas espaciais e uma coordenada temporal. Com elas, caracteriza-se qualquer acontecimento no universo, localizando-o no tempo e no espaço.

O referencial é *inercial*, ou *galileano*, quando a aceleração de qualquer corpo só provém de forças que sobre ele exercem outros corpos. Neste referencial, se o corpo estiver muito longe de qualquer outro, ou ele está em repouso, ou seu movimento é retilíneo e uniforme. Na mecânica clássica, para passar de um referencial inercial para outro utiliza-se uma *transformação de Galileu (galileana)*.

No quadro abaixo podemos verificar as principais transformações galileanas utilizadas na mecânica clássica:

Mecânica Clássica ou Newtoniana

	Transformações de Galileu $x_j = x'_j - vt$ $t = t'$
Velocidade	$v_j = \frac{dx_j}{dt}$
Momento	$p_j = m_o v_j$
Massa	$m = m_o$

⁹ Essa é a forma com que é enunciada hoje. Galileu não a enunciou dessa maneira.

Energia cinética	$E_k = \frac{m_o v^2}{2}$
Força	$F_j = \frac{dp_j}{dt}$

Independente da importância e das contribuições que tiveram os antecessores de Newton, foi ele quem revolucionou a mecânica clássica. Fez análise quantitativa e geral dos movimentos, mudando a forma de estudá-los, passando de uma análise geral, como antes se fazia, para dar ênfase ao estudo mais detalhado, ou mais restrito, utilizando dois pontos ao longo de uma órbita e não mais a órbita como um todo, inventando para isso (de forma concomitante a Leibnitz), o cálculo diferencial e integral.

Com a ajuda do seu cálculo diferencial, pode estabelecer taxas de variações precisas das distâncias percorridas ao longo de uma órbita, com distâncias infinitesimais, utilizando o conceito de limite. Passou a obter, assim, a velocidade em qualquer ponto da órbita, e com a taxa de variação das velocidades, obteve as acelerações e passou a relacionar força e aceleração, em uma equação que hoje conhecemos por $F = m \cdot a$ (BERSTEIN, 1973). Obteve posteriormente, uma expressão matemática para a força da gravidade e inseriu-a na equação que relaciona força à aceleração, resolvendo tal equação por meio das integrais que havia criado.

Para ele e seus seguidores, tanto para um referencial em repouso quanto para um referencial que se desloque a uma velocidade constante (v), a lei da força é a mesma (BASSALO; CARUSO, 2013).

A mecânica newtoniana, como já mencionado, reinou durante aproximadamente três séculos, até o surgimento da mecânica quântica e da teoria da relatividade einsteiniana. O universo de Newton, do tempo e do espaço absolutos e matemáticos, que eram governados pelo Deus único e verdadeiro, sofreu a primeira contradição quando do experimento de Fizeau (Armand Hyppolyte Louis Fizeau - 1819/1896) realizado em 1851, que determinava a velocidade da luz em um líquido parado e, depois, no mesmo líquido em movimento. Como na mecânica clássica, a velocidade da luz em um líquido em movimento é a soma da velocidade do líquido mais a velocidade da luz no líquido em repouso, esperava-se encontrar tal resultado, mas isso não ocorreu, o valor encontrado foi menor que o esperado (BASSALO; CARUSO, 2013). A completa explicação para o ocorrido só seria dada por Einstein na sua teoria da relatividade restrita.

A segunda "derrota" da relatividade clássica, ocorreu com a experiência de Michelson - Morley, que será abordada mais adiante.

Começavam aparecer, então, as limitações da teoria clássica, e as três primeiras décadas do século XX foram decisivas para a quebra do modelo newtoniano. Foram a teoria relativística de Einstein junto com a Física Atômica que detonaram o então adotado modelo.

Dois dos artigos de 1905, escritos por Einstein, deram início a duas tendências revolucionárias de pensamento: uma sobre a maneira nova de conceber a radiação

eletromagnética, que tornou-se característica da teoria quântica, e a outra, sobre a teoria especial da relatividade, construída de forma completa e quase unicamente por ele.

3.2.2. Eletricidade e Magnetismo: o Eletromagnetismo

A abordagem ao eletromagnetismo se faz necessária não apenas pela importância que representou aos estudos de Einstein para a elaboração de sua Teoria da Relatividade (trataremos apenas da restrita), como para explicar de forma mais didática alguns conceitos utilizados, assim como outros tópicos estão sendo também abordados neste capítulo com similar pretensão.

O fato de Einstein ter estudado o eletromagnetismo e, conseqüentemente, as equações de Maxwell, mesmo contrariando a opinião de seu professor da Politécnica, Weber, não foi à toa. Tais equações, que serão descritas aqui, marcaram também o estudo da eletricidade e do magnetismo pela descoberta de que a luz é uma onda eletromagnética, algo até então desconhecido.

Vamos apresentar um resumo da descrição das leis da eletricidade e do magnetismo e de forma reduzida, eficaz e eficiente, relatar estas leis que se apresentavam relacionadas a eles.

Até as duas primeiras décadas do século XIX, alguns cientistas desconfiavam da existência de uma relação íntima entre a eletricidade e o magnetismo. Entre 1864 e 1873, J. C. Maxwell trabalhou na formulação matemática das leis experimentais do eletromagnetismo e deu interpretações físicas para as componentes do quatérnio de Hamilton, que é uma entidade matemática composta de quatro componentes, um componente escalar e os três restantes constituindo a parte vetorial. Porém, foi Oliver Heaviside (físico e engenheiro eletricitista inglês, 1850-1925) quem escreveu as equações de Maxwell na forma conhecida hoje, com os operadores diferenciais.

Para começar, vamos definir o conceito de “campo” como sendo um conjunto de valores de uma grandeza física que, em uma determinada região do espaço, dependem de uma maneira unívoca e definida das coordenadas dos pontos do espaço e possivelmente do tempo; esta definição de campo não é o que se pode chamar de uma “definição completa” mas é suficiente para ser utilizada em um estudo superficial do campo elétrico e magnético, ou melhor, do campo eletromagnético.

O campo gravitacional de uma massa (m) pode ser definido a partir da equação:

$$\vec{F} = G \frac{m_1 m_2}{|\vec{r}|^2}$$

que é a Lei da Gravitação Universal, onde, $\vec{F}$ é a força gravitacional existente entre dois corpos cujas massas são, respectivamente, m_1 e m_2 , e o campo é dado por:

$$\vec{g} = \vec{F} / m_o$$

e desta forma, por analogia, com a relação anteriormente apresentada, podemos definir o campo elétrico $\vec{E}$ (com caráter vetorial) de uma carga pontual mediante a relação:

$$\vec{E} = \vec{F} / q_o = \frac{k \frac{q_1 q_o}{|r_{10}|^2}}{q_o}$$

onde $\vec{F}$ é a força elétrica entre a carga pontual q_o e de uma outra carga pontual q_1 , responsável pela produção do campo elétrico no ponto onde se encontra a carga q_o . Para determinar o campo elétrico produzido pela ação de diversas cargas pontuais devemos usar o princípio da superposição (entre vetores, pois o campo, tanto o elétrico como o já citado gravitacional, tem caráter vetorial). O vetor campo elétrico da distribuição de cargas discretas e pontuais em um dado ponto no espaço pode ser determinado mediante a seguinte soma vetorial:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{k \frac{q_i q_o}{|r_{io}|^2}}{q_o}$$

que é a soma vetorial dos campos elétricos criados individualmente por cada uma das n cargas consideradas. Para uma distribuição contínua de cargas, ficamos com:

$$\vec{E} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\sum_{i=1}^n \vec{E}_i \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\sum_{i=1}^n \frac{k \frac{q_i q_o}{|r_{io}|^2}}{q_o} \right] = \int d\vec{E}$$

Já o campo magnético pode ser definido considerando uma carga elétrica (q) movendo-se com velocidade ($\vec{v}$), em um ponto onde existe um campo magnético ($\vec{B}$) caracterizado pelo vetor indução magnética ($\vec{B}$). A força que atua sobre a partícula é dada por: (Observar que, daqui para diante, usa-se o símbolo $\times$ para representar o produto vetorial, uma vez que o símbolo $\wedge$ hoje representa o produto exterior).

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = q \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = q \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{dS_x}{dt} & \frac{dS_y}{dt} & \frac{dS_z}{dt} \end{vmatrix}$$

onde S é a função posição e $\vec{F}$ é conhecida como força de Lorentz.

Se uma carga (q) se encontra em uma região em que existe só uma componente do campo elétrico e uma do campo magnético a força total que atua sobre esta carga será a superposição da força elétrica ($q\vec{E}$) com a força magnética dada pela equação anteriormente apresentada ,

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

que, como já mencionamos, é conhecida como força de Lorentz.

Agora que já temos um certo conhecimento do que seja (ou pelo menos como se comporta) o campo elétrico e magnético, apresentaremos um resumo das principais leis do eletromagnetismo.

a) Lei de Coulomb – Lei que dá a força ($\vec{F}$) elétrica que age entre duas cargas elétricas puntiformes (q_1 e q_2) separadas por uma distância (r_{12}), no vácuo. Exprime-se analiticamente pela igualdade:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_{12}|^2}$$

b) Lei de Gauss – É também uma das leis fundamentais do eletromagnetismo, expressa pela equação:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

onde $\vec{E}$ é o campo elétrico que a carga (q) produz sobre a superfície (A) que a envolve. De uma forma análoga exprime-se a lei de Gauss para o magnetismo:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

onde $\vec{B}$ é o vetor indução magnética de um campo sobre a superfície fechada (A).

c) Lei de Ohm – Lei que se exprime pela proposição:

"... a queda de tensão elétrica (V) em um condutor percorrido por uma corrente de intensidade (i) é proporcional a esta corrente."¹⁰

¹⁰ A rigor, esta relação é a definição de R ($R=V/i$). A Lei de Ohm é válida se R for constante.

ou seja: $V= Ri$ onde a constante de proporcionalidade (R) é a resistência do condutor. Vale salientar que esta lei é satisfeita, entre limites bastante grandes de intensidade de corrente, por condutores metálicos.

d) Lei de Joule – Podemos enunciá-la assim: “... a energia dissipada por unidade de tempo em um condutor de resistência elétrica R, atravessado por uma corrente elétrica de intensidade (i), é dada pela expressão: $W = Ri^2$ ”

e) Lei de Ampère – Expressão que fornece a indução magnética de um campo magnético devido a um sistema de correntes elétricas. Analiticamente exprime-se pela relação:

$$\oint \vec{B}.d\vec{s} = \mu_o i$$

onde $\vec{B}$ é o vetor indução magnética e $d\vec{s}$ é o elemento de arco do circuito fechado ao longo do qual se estende a integral e que é atravessado pela corrente i. Isto equivale a dizer que, uma corrente percorrendo uma trajetória circular, produz uma força magnética de caráter exatamente semelhante à produzida por uma quantidade equivalente de material magnético [2].

f) Lei de Biot-Savart – Lei de Biot-Savart é a lei que “permite” calcular o vetor indução magnética ($d\vec{B}$) de um campo magnético devido a um elemento infinitesimal de corrente ($id\vec{s}$), a uma distância conhecida (r) deste elemento, ou seja:

$$d\vec{B} = \left(\frac{\mu}{4\pi} \right) \left(\frac{id\vec{s} \times \vec{r}}{|r|^3} \right)$$

onde $\vec{r}$ é vetor posição de $d\vec{l}$ em relação ao ponto onde $d\vec{B}$ é calculado

g) Lei de Faraday – Os resultados de um grande número de experiências podem ser resumidas por meio da associação de um campo elétrico:

$$E = - \frac{d\Phi}{dt}$$

a uma variação de fluxo magnético em um circuito fechado.

Foi Faraday quem demonstrou, empiricamente, a partir de 1831 que, sob determinadas circunstâncias, ímãs podem produzir correntes elétricas [2]. Devemos ressaltar que a lei descrita no texto é como se apresenta hoje, pois Faraday não tinha preparo nem intuição matemática para transformar suas descobertas em ideias matemáticas, ou uma teoria quantitativa. Era dotado de uma grande inteligência e de uma grande intuição física, mas aprendeu tudo sozinho, já que vinha de uma família pobre e, por isso, os únicos ensinamentos que recebeu foram primeiras aulas de leitura

e de aritmética ainda criança. Tornou-se autodidata e estudou sozinho durante toda sua vida.

h) Lei de Lenz – Lei que fixa o sentido da corrente induzida em um circuito por uma variação de fluxo magnético que o atravessa, e que pode-se enunciar da seguinte maneira:

“... a corrente induzida tem um sentido tal que induz um fluxo magnético que contraria a variação do fluxo indutor: se esta for positiva, o fluxo induzido opõe-se ao inicial; se for negativa, fluxo soma-se ao inicial”

Pode ser também enunciado de uma outra forma (análoga) :

“... o campo magnético associado a uma corrente induzida tende a restaurar o campo magnético indutor: se este cresce, o campo induzido tende a diminuí-lo; se ele decresce o campo induzido tende a aumentá-lo”

Pode ser representada pela equação: $\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$

onde N seria o número de espiras de um solenóide onde estivesse ocorrendo a indução.

i) Leis de Kirchhoff – Duas leis que permitem calcular as correntes e as tensões em circuitos formados por várias malhas e que contêm diversas fontes de força eletromotriz.

Enunciam-se assim:

Lei dos nós: “... a soma algébrica das correntes que saem e que chegam a um nó em um circuito é igual a zero”
(Matematicamente representada por: $\sum i = 0$)

Lei das Malhas: “... a soma das quedas de potencial elétrico ao longo de uma malha de um circuito é igual a zero”
(Matematicamente representada por: $\sum \varepsilon = \sum i R$)

Maxwell, depois de mergulhar nos relatórios das pesquisas empíricas elétricas de Faraday e colaboradores, procurou formular matematicamente uma teoria de eletricidade e de magnetismo que incluísse estas leis e as representasse de forma quantitativa.

Maxwell começou a formular esse conjunto de equações que recebem seu nome tão logo iniciou a carreira como professor, dando expressões quantitativas às linhas de força que Faraday já havia inventado anos antes.

Podemos, então, apresentar as equações de Maxwell na sua forma diferencial como sendo:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= \rho / \epsilon_0 \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\end{aligned}$$

Este conjunto de quatro equações, conhecido como Equações de Maxwell, descreve a estrutura dos campos eletromagnéticos (elétrico e magnético) (LIMA, 2000). Todo o espaço é cenário destas leis e não, como no caso das leis mecânicas, apenas os pontos em que estão presentes matéria ou cargas. Na mecânica, conhecendo-se a posição e a velocidade de uma partícula em um único instante e conhecendo-se as forças atuantes, toda a trajetória futura da partícula pode ser prevista. Na “teoria de Maxwell”, se conhecermos apenas o campo em um instante, podemos deduzir (através das suas equações) como o campo inteiro se alterará no espaço e no tempo. Em suma, as equações de Maxwell nos permitem seguir a “história do campo” assim como as equações da mecânica nos permitem seguir a “história das partículas materiais”. A evolução de qualquer sistema elétrico e/ou magnético ocorre seguindo os preceitos dos operadores diferenciais associados nas equações de Maxwell. Conforme afirma Bassalo (1987), na primeira equação descrita acima nota-se claramente que a divergência do campo elétrico está associada à densidade de carga na região de estudo do mesmo e de forma análoga o campo magnético não diverge, ou seja, todas as linhas de campo do campo magnético saem e voltam para o mesmo ponto indicando claramente o que percebemos desde a muito de forma empírica, ou seja, que não existem monopolos magnéticos. A terceira e quarta equações são muito claras ao evidenciar a associação existente entre a variação do campo elétrico e do campo magnético, ou seja, quando ambos variam com a posição e/ou tempo gera o outro.

Sendo assim, podemos atribuir a Maxwell a forma de descrever matematicamente o acoplamento do campo elétrico com o magnético bem como o comportamento dos mesmos (LIMA, 2000).

O físico experimental Heinrich Hertz confirmou a teoria eletromagnética de Maxwell em 1888, nove anos após a morte do mesmo, produzindo, através de alguns experimentos, ondas eletromagnéticas (de rádio) e captando-as.

Posteriormente, Maxwell chegou a, hoje conhecida, equação da onda eletromagnética no vácuo, que foi o primeiro indício teórico de a luz ser um fenômeno eletromagnético. Os

contemporâneos de Maxwell desacreditaram a teoria, acostumados como estavam aos modelos mecânicos apresentados por Newton, e, por esse motivo, passaram a falar em um meio designado por "éter", que acreditavam, permearia todo o espaço pelo qual as ondas eletromagnéticas poderiam se propagar (BERSTEIN, 1973). O próprio Maxwell tentou explicar seus resultados por meio da teoria mecânica e do éter, já que era difícil desvencilhar-se de um modelo tão imperante.

Afirma-se que Maxwell percebeu posterior e intuitivamente que os elementos estruturais de sua teoria eram os campos e não os modelos mecânicos, embora não propalasse isso. Mais uma vez, vemos a importância do papel de Einstein, que foi quem reconheceu com clareza tal fato, a respeito do éter, desfazendo-se do mesmo ao declarar que este não existia e que os campos eletromagnéticos eram, em verdade, entidades físicas capazes de percorrer o espaço vazio [19]. Veremos, logo mais adiante, como a ideia do "éter" foi combatida.

3.2.3 – Termodinâmica

Houve, no século XIX, duas grandes revoluções científicas. Uma foi a teoria eletromagnética, que acabamos de examinar, e a outra se deu no campo da termodinâmica (teoria dos gases, mecânica estatística, etc).

Havia uma certa física dominante no começo do século XIX, que ficou conhecida por alguns como Física da École Polytechnique. Nessa escola procurava-se desenvolver os problemas partindo do modelo newtoniano, mas alguns conceitos desse modelo estavam em desacordo com as ideias da École Polytechnique, sendo o estudo do calor o primeiro a abalar o esquema newtoniano (SCHENBERG, 1984).

A partir daí, a ideia dos fluidos começou a ruir, como aconteceu com o conceito de éter e o do fluido calórico (flogístico). A eliminação da ideia de fluidos fez surgir a de transformação do trabalho em calor. Os estudos sobre o calor levaram à fundação da termodinâmica. A criação da termodinâmica juntamente com a mecânica estatística foi fundamental para o desenvolvimento da mecânica quântica.

A Termodinâmica, que estuda os processos de transformação de energia e o comportamento dos sistemas nestes processos, baseia-se em três princípios fundamentais e que são denominados primeira, segunda e terceira leis da Termodinâmica (MACEDO, 1976). Enunciaremos logo mais estes princípios, como o são nos dias de hoje.

A Termodinâmica clássica é usualmente apresentada em termos de sistemas fechados, um tipo de sistema bastante diferente dos sistemas celulares orgânicos, que são sistemas abertos [A]. Por esse motivo, antes de enunciarmos os princípios da Termodinâmica, definiremos alguns conceitos que talvez se façam necessários para um melhor entendimento.

De uma maneira geral podemos classificar os sistemas da seguinte maneira:

1 - **Sistemas Isolados** regulados pela ciência formal (lógica e matemática);
nem matéria nem energia podem ser transportadas através de seus limites;

2 - **Sistemas Abertos e Fechados** regulados pela ciência empírica e identificáveis na natureza.

A. Sistemas abertos: nos quais matéria ou energia ou ambos podem ser transportados através de seus limites.(exemplos: célula viva, tempestade, bacias hidrográficas)

B. Sistemas fechados: nos quais a matéria não pode ser transportada através de seus limites, mas a matéria contida pode ser afetada por fontes externas de energia. (exemplos: refrigerador ou condicionador) [A]

Com isso, os princípios da termodinâmica são assim enunciados:

1ª) Primeira Lei da Termodinâmica (ou Princípio da Conservação de Energia)

Inicialmente considere-se um sistema e sua vizinhança, numa situação em que uma determinada quantidade de calor (Q) haja atravessado a fronteira entre os dois (por causa da diferença de temperatura entre eles). Além disso, considere que a fronteira entre ambos os sistemas mova-se neste processo, o que implica energia trocada na forma de trabalho. Com tais considerações a priori, “a variação da energia interna de um sistema é igual a diferença entre calor e trabalho trocados entre tal sistema e o meio exterior”. Com isto posto, a variação interna do sistema é representada pela fórmula: $\Delta U = Q - W$, onde W é o trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança. Ainda enunciando o primeiro princípio, este afirma que a energia interna (U) de um gás perfeito e monoatômico (isto é, apenas com movimentos translacionais) e sem interação potencial corresponde à soma das energias médias (E_c) de todas as suas moléculas e, pela Lei de Joule, é dada por:

$$U = E_c = \frac{3}{2}nRT$$

2ª) Este princípio ou Lei nos diz que *uma máquina térmica não pode funcionar sem uma diferença de temperatura e que ela nunca restitui integralmente, sob forma de trabalho, a energia que lhe foi cedida sob forma de calor*. Isso significa que $W = Q_1 - Q_2$, sendo Q_1 o calor absorvido e Q_2 o calor cedido.

3.2.4 - Fenomenologia e Experimentações Tradicionais

No pensamento grego antigo não se aceitava ou admitia a ideia de vazio. Os filósofos gregos em geral tinham uma espécie de "repugnância" à ideia e se indagavam que, sendo o vazio a representação do nada, como poderia o nada influenciar os processos físicos? Demócrito, no entanto, já formulava a ideia de átomos movendo-se no vazio, que é exatamente o modelo de gás de Maxwell e de Boltzmann, a menos dos conceitos probabilísticos (SCHENBERG, 1984).

O conceito de "éter" remonta a Descartes, que rejeitando a ideia de uma "ação à distância"¹¹, acreditou e afirmou que o "contato" entre sistemas físicos ocorreria através de um meio: o éter. Para ele, o calor e a luz, por exemplo, propagavam-se através desse meio.

Essa ideia perdeu importância quando do surgimento da teoria das partículas, já que a propagação intermediária de tais partículas não mais necessitava "da ação à distância". O éter, porém, não morreu aí, ao contrário, ressurgiria no século XIX, depois que os físicos deixaram de lado a teoria das partículas para apegarem-se novamente ao problema da ação à distância.

A teoria moderna já não fala mais dessa ação à distância, mas, na troca de "*quanta*"¹², e todas as forças conhecidas propagam-se por troca desse "pacote de energia". Em se tratando da luz, a teoria das partículas voltou também, mas de uma maneira muito mais bem elaborada e refinada.

Como já relatamos, a filosofia mecanicista teve total prevalência até o século XIX e, portanto, nada mais natural que os físicos posteriores a Maxwell buscassem um modelo mecânico para traduzir a propagação das ondas eletromagnéticas no espaço vazio. De acordo com essa visão mecanicista, uma carga elétrica oscilante causaria uma perturbação no "éter", e esta se propagaria de forma similar à propagação do som em um meio mecânico - por vibrações elásticas do material.

3.3. Princípio da Relatividade (Restrita)

3.3.1 - Os Experimentos Imaginários

Já citamos a utilização das "experiências idealizadas" de Galileu, análogas as que mais tarde foram utilizadas por Einstein com o nome de "experimentos imaginários". Resumidamente, tal método consiste em imaginar determinada experiência, e, de acordo com sua prática, vai-se tentando prever mentalmente o resultado sem realizar concretamente a experiência.

A primeira ideia de Einstein sobre a teoria da relatividade foi fruto de um "experimento imaginário" que ele idealizou aos dezesseis anos: imaginou uma onda plana movendo-se com a velocidade da luz e um observador movendo-se nas mesmas direção e velocidade. De acordo com a teoria pré-relativística, o observador deveria ver a onda luminosa parada. Isso pareceu absurdo para ele, que sentiu necessidade de rever os conceitos de espaço e tempo então adotados, para evitar o paradoxo da onda parada (SCHENBERG, 1984).

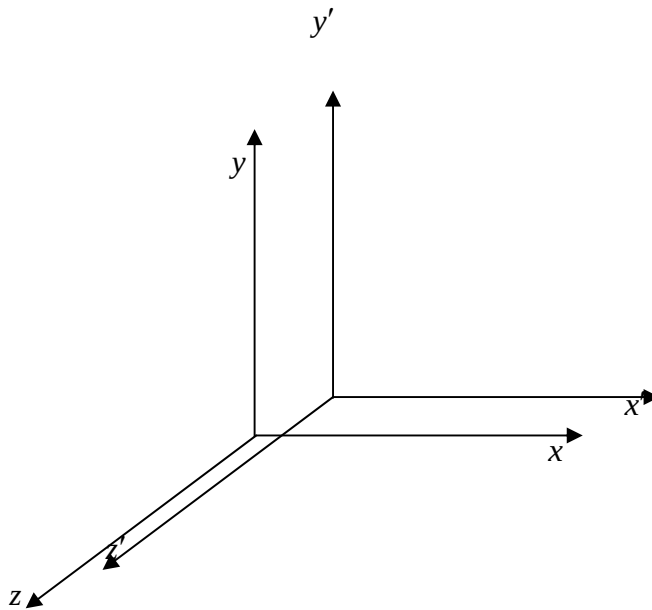
3.3.2 - As Transformações de Lorentz

Os postulados de Einstein eram incompatíveis com as transformações galileanas, incorrendo na existência de uma transformação que se adequasse ao eletromagnetismo. Foi

¹¹ Expressão que ele utilizava para a ideia de que os sistemas físicos podem interagir uns sobre os outros, independentemente de alguma forma de contato intermediário.

¹² Cada pacote de energia (quantum) possuiria uma quantidade de energia bem definida, dada por: $E=hf$, onde f é a frequência da onda e h a constante de Planck. Hoje o "quanta" que antes foi tido como um pacote, é a partícula mediadora de força eletromagnética chamada Fóton.

em 1904 que H. A. Lorentz descobriu uma transformação que deixava inalterada a forma das equações de Maxwell, desde que se alterassem também as componentes dos campos. Lorentz, no entanto, não descobriu as consequências transcendentais da relatividade, visto ainda acreditar na existência do éter. As *Transformações de Lorentz consistiam nas equações corretas para um referencial inercial linha que se desloca com módulo da velocidade v no eixo x em relação a um outro referencial inercial sem linha e que são dadas por:*



$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 = (tc)^2$$

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = r'^2 = (t'c)^2$$

$$x^2 - x'^2 = t^2 c^2 - t'^2 c^2 \quad \underline{\text{E1}}$$

$$y = y' \quad \underline{\text{E2}}; \quad z = z' \quad \underline{\text{E3}}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & 0 & 0 & T_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_{41} & 0 & 0 & T_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{bmatrix}$$

da expressão matricial obtemos as seguintes equações:

$$x' = T_{11}x + T_{14}t \quad \underline{\text{E4}} \quad \text{e}$$

$$t' = T_{41}x + T_{44}t \quad \underline{\text{E5}}$$

de E4 temos:

$$x' = T_{11}\left(x + \frac{T_{14}}{T_{11}}t\right)$$

$$x' = 0 \Rightarrow x + \frac{T_{14}}{T_{11}}t = 0 \Rightarrow x = -\frac{T_{14}}{T_{11}}t = vt$$

$$v = -\frac{T_{14}}{T_{11}} \quad \text{e} \quad x' = T_{11}(x - vt) \quad \underline{\text{E6}}$$

postulando $c' = c$, e, de E1, E4, E5 e E6 temos

$$\text{de } \underline{\text{E1}} \text{ temos } c'^2 t'^2 = t^2 c^2 + x'^2 - x^2, \text{ então: } t'^2 = \frac{t^2 c^2 + x'^2 - x^2}{c'^2} \Rightarrow t'^2 = \frac{x'^2}{c'^2} - \frac{x^2}{c'^2} + t^2$$

como em E6, $x' = T_{11}(x - vt)$, substituindo o valor de x' , temos:

$$t'^2 = \frac{T_{11}^2(x - vt)^2}{c^2} - \frac{x^2}{c^2} + t^2 \Rightarrow t'^2 = \frac{T_{11}^2}{c^2}(x^2 - 2xvt + v^2 t^2) - \frac{x^2}{c^2} + t^2$$

$$t'^2 = \frac{T_{11}^2 x^2}{c^2} - \frac{2T_{11}^2 xvt}{c^2} + \frac{T_{11}^2 v^2 t^2}{c^2} - \frac{x^2}{c^2} + t^2$$

$$t'^2 = x^2 \left[\frac{T_{11}^2}{c^2} - \frac{1}{c^2} \right] + x \left[-\frac{T_{11}^2}{c^2} 2vt \right] + \left[\frac{T_{11}^2}{c^2} v^2 t^2 + t^2 \right] \quad \underline{\text{E7}}$$

de E5 temos que: $t' = T_{41}x + T_{44}t$, se elevarmos ao quadrado, obtemos:

$$t'^2 = (T_{41}x + T_{44}t)^2 \Rightarrow t'^2 = T_{41}^2 x^2 + 2T_{41}xT_{44}t + T_{44}^2 t^2 \Rightarrow$$

$$t'^2 = x^2(T_{41}^2) + x(2T_{41} \cdot T_{44}t) + (T_{44}^2 t^2) \quad \underline{\text{E8}}$$

os coeficientes de x em E7 e E8 devem ser iguais, assim:

$$\frac{T_{11}^2}{c^2} - \frac{1}{c^2} = T_{41}^2 \quad \underline{\text{E9}}; \quad -\frac{T_{11}^2}{c^2} 2vt = 2T_{41}T_{44}t \quad \underline{\text{E10}} \quad \text{e} \quad -\frac{T_{11}^2}{c^2} v^2 t^2 + t^2 = T_{44}^2 \quad \underline{\text{E11}}$$

$$\text{de } \underline{\text{E9}}, \text{ temos: } T_{41} = \sqrt{\frac{T_{11}^2}{c^2} - \frac{1}{c^2}} = \frac{1}{c} \sqrt{T_{11}^2 - 1} \quad \underline{\text{E12}}$$

$$\text{de } \underline{\text{E10}}: T_{41}T_{44} = -\frac{T_{11}^2}{c^2}v \quad \underline{\text{E13}} \quad \text{e de } \underline{\text{E11}}: T_{44}^2 t^2 = \frac{T_{11}^2}{c^2}v^2 t^2 + t^2 \Rightarrow T_{44}^2 = \frac{T_{11}^2}{c^2}v^2 + 1 \Rightarrow$$

$$c^2 T_{44}^2 = \frac{T_{11}^2}{c^2}v^2 c^2 + c^2 \Rightarrow c^2 T_{44}^2 = T_{11}^2 v^2 + c^2 \Rightarrow T_{44} = \sqrt{\frac{v^2 T_{11}^2 + c^2}{c^2}} = \frac{1}{c} \sqrt{T_{11}^2 v^2 + c^2}$$

$$T_{44} = \frac{1}{c} \sqrt{v^2 T_{11}^2 + c^2} \quad \underline{\text{E14}}$$

multiplicando E12 por E14 e igualando a E13, ficamos com

$$T_{41} \cdot T_{44} = \frac{1}{c} \sqrt{T_{11}^2 - 1} \cdot \frac{1}{c} \sqrt{v^2 T_{11}^2 + c^2} = \frac{1}{c^2} \sqrt{(T_{11}^2 - 1)(v^2 T_{11}^2 + c^2)} = \frac{1}{c^2} \sqrt{T_{11}^4 v^2 + T_{11}^2 c^2 - T_{11}^2 v^2 - c^2}$$

e como $T_{41} T_{44} = -\frac{T_{11}^2}{c^2} v$ então:

$$-\frac{T_{11}^2}{c^2} v = \frac{1}{c^2} \sqrt{T_{11}^4 v^2 + T_{11}^2 c^2 - T_{11}^2 v^2 - c^2} \Rightarrow -T_{11}^2 v = \sqrt{T_{11}^4 v^2 + T_{11}^2 c^2 - T_{11}^2 v^2 - c^2} \Rightarrow$$

$$T_{11}^4 v^2 = T_{11}^4 v^2 + T_{11}^2 c^2 - T_{11}^2 v^2 - c^2 \Rightarrow 0 = T_{11}^2 c^2 - T_{11}^2 v^2 - c^2 \Rightarrow c^2 = T_{11}^2 (c^2 - v^2)$$

$$T_{11}^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2} \Rightarrow \frac{T_{11}^2}{T_{11}^2} = \frac{\frac{c^2}{c^2 - v^2}}{T_{11}^2} \Rightarrow 1 = \frac{c^2}{c^2 - v^2} \cdot \frac{1}{T_{11}^2} \Rightarrow 1 = \frac{c^2}{(c^2 - v^2) T_{11}^2} \Rightarrow$$

$$c^2 = c^2 T_{11}^2 - v^2 T_{11}^2 \Rightarrow \frac{c^2 T_{11}^2 - v^2 T_{11}^2}{c^2} = 1 \Rightarrow T_{11}^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = 1 \Rightarrow T_{11}^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow T_{11} = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$T_{11} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{E15}$$

de E14 ficamos com: $T_{44} = \frac{1}{c} \sqrt{v^2 T_{11}^2 + c^2}$

$$T_{44} = \frac{1}{c} \sqrt{v^2 \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)^2} + c^2} \Rightarrow T_{44}^2 = \frac{1}{c^2} \left(v^2 \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} + c^2 \right) \Rightarrow$$

$$T_{44}^2 = \frac{1}{c^2} \left(\frac{v^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} + c^2 \right) \Rightarrow$$

$$T_{44}^2 = \frac{v^2}{c^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} + 1 \Rightarrow T_{44}^2 = \frac{v^2}{c^2 - v^2} + 1 = \frac{v^2 + c^2 - v^2}{c^2 - v^2} \Rightarrow T_{44}^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2}, \quad \text{de}$$

forma análoga a

$$T_{11}; \quad T_{44} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Em E9 ficamos com: $T_{41} \cdot T_{44} = -\frac{T_{11}^2}{c^2} v$

$$T_{41} = -\frac{T_{11}^2 \cdot v}{c^2 \cdot T_{44}}, \text{ como } T_{41} = T_{44} :$$

$$T_{41} = -\frac{T_{11} \cdot v}{c^2} \Rightarrow T_{41} = -\frac{\left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot v}{c^2} = -\frac{v}{c^2} \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Segundo as Transformações de Lorentz, as medidas dos intervalos de tempo e de comprimento dependem do observador, em contradição com as Transformações de Galileu¹³.

Além disso, se analisarmos o comportamento do fator de Lorentz com a velocidade, para que esses efeitos sejam observados é necessário que a magnitude da velocidade (V) de um referencial em relação ao outro seja igual a uma fração apreciável da velocidade da luz, do contrário o fator de Lorentz tende à 1.

3.3.3 - Coerência entre as Transformações de Lorentz e as Equações de Maxwell

" Não há dúvida de que, se fizemos um retrospecto de seu desenvolvimento, a Teoria da Relatividade Restrita estava pronta para ser formulada em 1905. Lorentz já havia observado que as transformações que agora levam o seu nome são essenciais para a análise das equações de Maxwell, e Poincaré já tinha penetrado mais profundamente nessas conexões"

Albert Einstein

De certa maneira, a essência da Teoria da Relatividade está menos na relativização do espaço e do tempo e mais na concordância de que as leis da natureza devem ser independentes de seus referenciais. Esse é o pilar do espaço-tempo para Einstein (CARUSO & OGURI, 2006).

Enquanto que para Lorentz, um dos referenciais de suas transformações seria o éter, Einstein deriva as Transformações de Lorentz e reformula os primários conceitos de espaço e tempo, enunciados até então do seguinte modo:

- As leis da Física devem ser as mesmas em todos os sistemas inerciais de referências – Princípio da relatividade restrita.

¹³ Nesse limite clássico, todos os resultados de uma teoria relativística condicionada pelas transformações de Lorentz se igualam aos das teorias clássicas, para as quais as transformações de Galileu são válidas.

- A velocidade de propagação da luz no vácuo, designada por c , tem valor constante e igual a 299 792 458 m/s – Princípio da invariância da velocidade da luz.

Nesta época ainda se acreditava que a velocidade da luz poderia variar segundo a velocidade do sistema inercial adotado em relação ao éter, meio no qual c adquire um valor determinado por Maxwell. Tal crença persistiu mesmo após Maxwell já ter comprovado que

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}.$$

Partindo de tais postulados Einstein desenvolve uma teoria dinâmica, mais adequada que a teoria de Newton, para descrever o movimento de uma partícula carregada sob a ação de um campo eletromagnético, restabelecendo o princípio de que todo sistema de referência inercial é equivalente para a descrição dos fenômenos físicos. As relações entre as coordenadas espaço-temporais passam a ser determinadas pelas Transformações de Lorentz e não mais pelas de Galileu (CARUSO & OGURI, 2006).

Einstein também admite a homogeneidade e isotropia do espaço, assim como na teoria clássica. Como consequência, as transformações entre sistemas de coordenadas em referenciais inerciais distintos continuam sendo lineares (CARUSO & OGURI, 2006).

3.3.4 - Comentários e Conclusões

Quando a coordenada temporal é única para todo o referencial, ou seja, quando é independente das coordenadas espaciais e comum a todos os pontos do referencial, ele se diz *newtoniano*. Com uma boa aproximação, são *newtonianos* os referenciais que se empregam para descrever fenômenos correntes, pois para quase totalidade dos casos, o tempo é uma grandeza absoluta e única.

Como a TRR estabelecia não existir um sistema de referência privilegiado para as leis da Física, fossem elas mecânicas ou eletromagnéticas, a hipótese do éter deixava de ser necessária à teoria eletromagnética. Para Einstein, as equações de Maxwell, bem como a propagação de ondas no vácuo, não pressupunham qualquer imagem ou suporte material para que fossem validadas, embora o conceito de éter fosse necessário à teoria de Maxwell por possibilitar a interpretação dos campos eletromagnéticos como campos de deformações elásticas, em consequência de sua concepção mecanicista (CARUSO; OGURI, 2006).

Ao mesmo tempo em que o éter teria enorme rigidez para permitir a propagação da luz com altíssima velocidade e suportar oscilações de frequências altíssimas, esse modelo era incapaz de dar conta da ausência de ondas eletromagnéticas longitudinais.

Para Caruso e Oguri (2006), entre tantas consequências físicas e filosóficas sobre as hipóteses de Einstein, sobressaem-se aquelas que relacionaram intimamente espaço e tempo, exigindo o abandono de conceitos clássicos. Outra notável consequência da TRR refere-se à unificação, bem como a redefinição dos princípios de conservação de energia e de *momentum* em um único princípio.

4.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

"É impossível haver progresso sem mudança, e quem não consegue mudar a si mesmo não muda coisa alguma"
George Bernard Shaw

- BARROS, Alberto L. da Rocha. **Coleção Os cientistas: a grande aventura da descoberta científica - Einstein**. São Paulo: Abril, 1972.
- BASSALO (J. M. F.); CARUSO (F). **Einstein**. São Paulo, Livraria da Física, 2013.
- BERSTEIN, Jeremy. **As idéias de Einstein**. 2 ed.,São Paulo: Cultrix, 1973.
- BRIAN, Denis. **Einstein: A ciência da vida**. São Paulo: Ática,1998.
- CARUSO, Francisco & OGURI, Vitor: **Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos**, Rio de Janeiro: Campus, 2006. (ganhador do prêmio Jabuti 2007).
- (CGP) Coleção Grandes Personagens. **Galileu - o método científico no banco dos réus**. São Paulo: Abril Cultural, 1974.
- DUKAS, Helen & HOFFMANN, Banesh. **Albert Einstein - O lado humano**. Brasília: Ed.UNB,1984.
- EINSTEIN, Albert. et al. **Textos Fundamentais da Física Moderna**. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1958.
- EINSTEIN, Albert. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. São Paulo: Atlas,1991.
- KUHN, Thomas S. **A estrutura das Revoluções Científicas**. 5 ed., São Paulo: Perspectiva,1970
- LANDAU, L. & RUMER, Y. **O que é a teoria da relatividade**. São Paulo: Hemus,1979.
- LAKATOS, Eva Maria & MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de Metodologia**. 2005.
- LIMA, Melina. **Operadores Diferenciais e suas Aplicações** - monografia apresentada à UNIFACS como exigência parcial ao título de bacharel em matemática - 2000.
- MACEDO, Horácio. **Dicionário de Física Ilustrado**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1976.
- MARCHIORI, I. C. **O Professor Pré-escolar e o Ensino de Ciências na Educação Infantil**. Dissertação de Mestrado não publicada. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, SP: 1996.
- MOREIRA, Marco Antônio. **Breve introdução à Física e ao Eletromagnetismo**. Textos de Apoio ao Professor de Física ISSN 1807-2763. UFRGS, 2009, v. 20, n. 6.
- OSADA, Jun'ichi. **Evolução das idéias da física**. São Paulo: ed. da USP, 1972.
- PAIS, Abraham. **Sutil é o Senhor...: A ciência e a obra de Albert Einstein** 4 ed.,Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982.
- SCHENBERG, Mário. **Pensando a física**. São Paulo: Brasiliense, 1984.
- TENÓRIO, Robinson Moreira Tenório. **Computadores de Papel: máquinas abstratas para um ensino concreto**. São Paulo: Cortez, 1991.

9.1.2 - Sites na Internet.

- [A] <http://www.iis.com.br/~mporto/main.htm>
- [B] <http://www.socrates.if.usp.br/~fep156/introducao.html>
- [C] <http://www.princetonol.com/>
- [D] <http://www.geocities.com>

TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

- nº 1 Um Programa de Atividades sobre de Física para a 8ª Série do 1º Grau .
Rolando Axt, Maria Helena Steffani e Vitor Hugo Guimarães, 1990.
- nº. 2 Radioatividade
Magale Elisa Brückmann e Susana Gomes Fries, 1991.
- nº. 3 Mapas Conceituais no Ensino de Física
Marco Antonio Moreira, 1992.
- nº.4 Um Laboratório de Física para Ensino Médio.
Rolando Axt e Magale Elisa Brückmann, 1993
- nº.5 Física para Secundaristas – Fenômenos Mecânicos e Térmicos
Rolando Axt e Virgínia Mello Alves, 1994
- nº.6 Física para Secundaristas – Eletromagnetismo e Óptica
Rolando Axt e Virgínia Mello Alves, 1995
- nº7 Diagramas V no Ensino de Física
Marco Antonio Moreira, 1996
- nº.8 Supercondutividade – Uma proposta de inserção no Ensino Médio
Fernanda Ostermann, Letície Mendonça Ferreira, Claudio de Holanda Cavalcanti, 1997.
- nº.9 Energia, entropia e irreversibilidade
Marco Antonio Moreira, 1998.
- nº.10 Teorias construtivistas
Marco Antonio Moreira e Fernanda Ostermann, 1999.
- nº.11 Teoria da relatividade especial
Trieste Freire Ricci, 2000.
- nº12 Partículas elementares e interações fundamentais
Fernanda Ostermann, 2001.
- nº13 Introdução à Mecânica Quântica. Notas de curso
Ileana Maria Greca e Victoria Elnecave Herscovitz, 2002.
- nº.14 Uma introdução conceitual à Mecânica Quântica para professores do médio.
Trieste Freire Ricci e Fernanda Ostermann , 2003
- nº.15 O quarto estado da matéria
Luiz Fernando Ziebell, 2004
- v.16, n.1 Atividades experimentais de Física para crianças de 7 a 10 anos de idade
Carlos Schroeder. 2005
- v.16, n.2 O microcomputador como instrumento de medida no laboratório didático de Física
Lucia Forgiarini da Silva e Eliane Angela Veit, 2005

- v.16, n.3 Epistemologias do Século XX
Neusa Teresinha Massoni, 2005.
- v.16, n.4 Atividades de Ciências para a 8a série do Ensino Fundamental: Astronomia, luz e cores
Alberto Antonio Mees, Cláudia Teresinha Jraige de Andrade e Maria Helena Steffani, 2005.
- v.16, n.5 Relatividade: a passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein
Jeferson Fernando Wolff e Paulo Machado Mors, 2005
- v.16, n.6 Trabalhos trimestrais: pequenos projetos de pesquisa no ensino de Física
Luiz André Mützenberg, 2005
- v.17, n.1 Circuitos elétricos: novas e velhas tecnologias como facilitadoras de uma aprendizagem significativa no nível médio
Maria Beatriz dos Santos Almeida Moraes e Rejane Maria Ribeiro Teixeira, 2006.
- v.17, n.2 A estratégia dos projetos didáticos no ensino de física na educação de jovens e adultos (EJA)
Karen Espindola e Marco Antonio Moreira, 2006.
- v.17, n.3 Introdução ao conceito de energia
Alessandro Bucussi, 2006.
- v.17, n.4 Roteiros para atividades experimentais de Física para crianças de seis anos de idade
Rita Margarete Grala, 2006.
- v.17, n.5 Inserção de Mecânica Quântica no Ensino Médio: uma proposta para professores
Márcia Cândida Montano Webber e Trieste Freire Ricci, 2006.
- v.17, n.6 Unidades didáticas para a formação de docentes das séries iniciais do ensino fundamental
Marcelo Araújo Machado e Fernanda Ostermann, 2006.
- v.18, n.1 A Física na audição humana
Laura Rita Rui, 2007.
- v.18, n.2 Concepções alternativas em Óptica
Voltaire de Oliveira Almeida, Carolina Abs da Cruz e Paulo Azevedo Soave, 2007.
- v.18, n.3 A inserção de tópicos de Astronomia no estudo da Mecânica em uma abordagem epistemológica
Érico Kempe, 2007.
- v.18, n.4 O Sistema Solar – Um Programa de Astronomia para o Ensino Médio
Andréia Pessi Uhr, 2007.
- v.18, n.5 Material de apoio didático para o primeiro contato formal com Física; Fluidos
Felipe Damasio e Maria Helena Steffani, 2007.

- v.18, n.6 Utilizando um forno de microondas e um disco rígido de um computador como laboratório de Física
Ivo Mai, Naira Maria Balzaretto e João Edgar Schmidt, 2007.
- v.19, n.1 Ensino de Física Térmica na escola de nível médio: aquisição automática de dados como elemento motivador de discussões conceituais
Denise Borges Sias e Rejane Maria RibeiroTeixeira, 2008.
- v.19, n.2 Uma introdução ao processo da medição no Ensino Médio
César Augusto Steffens, Eliane Angela Veit e Fernando Lang da Silveira, 2008.
- v.19, n.3 Um curso introdutório à Astronomia para a formação inicial de professores de Ensino Fundamental, em nível médio
Sônia Elisa Marchi Gonzatti, Trieste Freire Ricci e Maria de Fátima Oliveira Saraiva, 2008.
- v.19, n.4 Sugestões ao professor de Física para abordar tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio
Sabrina Soares, Iramaia Cabral de Paulo e Marco Antonio Moreira, 2008.
- v.19, n.5 Física Térmica: uma abordagem histórica e experimental
Juleana Boeira Michelena e Paulo Machado Mors, 2008.
- v.19, n.6 Uma alternativa para o ensino da Dinâmica no Ensino Médio a partir da resolução qualitativa de problemas
Carla Simone Facchinello e Marco Antonio Moreira, 2008.
- v.20, n.1 Uma visão histórica da Filosofia da Ciência com ênfase na Física
Eduardo Alcides Peter e Paulo Machado Mors, 2009.
- v.20, n.2 Relatividade de Einstein em uma abordagem histórico-fenomenológica
Felipe Damasio e Trieste Freire Ricci, 2009.
- v.20, n.3 Mecânica dos fluidos: uma abordagem histórica
Luciano Dernadin de Oliveira e Paulo Machado Mors, 2009.
- v.20, n.4 Física no Ensino Fundamental: atividades lúdicas e jogos computadorizados
Zilk M. Herzog e Maria Helena Steffani, 2009.
- v.20, n.6 Breve introdução à Física e ao Eletromagnetismo
Marco Antonio Moreira, 2009.
- v.21, n.1 Atividades experimentais de Física à luz da epistemologia de Laudan: ondas mecânicas no ensino médio
Lizandra Botton Marion Morini, Eliane Angela Veit, Fernando Lang da Silveira, 2010.
- v.21, n.2 Aplicações do Eletromagnetismo, Óptica, Ondas, da Física Moderna e Contemporânea na Medicina (1ª Parte)
Mara Fernanda Parisoto e José Túlio Moro, 2010
- v.21, n.3 Aplicações do Eletromagnetismo, Óptica, Ondas, da Física Moderna e Contemporânea na Medicina (2ª Parte)
Mara Fernanda Parisoto e José Túlio Moro, 2010

- v.21, n.4 O movimento circular uniforme: uma proposta contextualizada para a Educação de Jovens e Adultos (EJA)
Wilson Leandro Krummenauer, Sayonara Salvador Cabral da Costa e Fernando Lang da Silveira, 2010.
- v.21, n.5 Energia: situações para a sala de aula
Marcia Frank de Rodrigues, Flávia Maria Teixeira dos Santos e Fernando Lang da Silveira, 2010.
- v.21, n.6 Introdução à modelagem científica
Rafael Vasques Brandão, Ives Solano Araujo e Eliane Angela Veit, 2010.
- v.22, n.1 Breve introdução à Lei de Gauss para a eletricidade e à Lei de Ampere Maxwell Ives Solano Araujo e Marco Antonio Moreira, 2011.
- v.22, n.4 Visões epistemológicas contemporâneas: uma introdução
Marco Antonio Moreira e Neusa Teresinha Massoni, 2011.
- v.22, n.5 Introdução à Física das Radiações
Rogério Fachel de Medeiros e Flávia Maria Teixeira dos Santos, 2011.
- v.22, n.6 O átomo grego ao Modelo Padrão: os indivisíveis de hoje
Lisiane Araujo Pinheiro, Sayonara Salvador Cabral da Costa e Marco Antonio Moreira, 2011.
- v.23, n.1 Situações-problema como motivação para o estudo de Física no 9o ano
Terrimar I. Pasqualetto, Rejane M. Ribeiro-Teixeira e Marco Antonio Moreira, 2012.
- v. 23, n.2 Unidades de Ensino Potencialmente Significativas UEPS
Marco Antonio Moreira, 2012.
- v.23, n.3 Universo, Terra e Vida: aprendizagem por investigação
Roberta Lima Moretti, Maria de Fátima Oliveira Saraiva e Eliane Angela Veit, 2012.
- v.23, n.4 Ensinando Física através do radioamadorismo
Gentil César Bruscatto e Paulo Machado Mors, 2012
- v.23, n.5 Física na cozinha
Lairane Rekovvsky, 2012.
- v.23, n.6 Inserção de conteúdos de Física Quântica no Ensino Médio através de uma unidade de ensino potencialmente significativa
Adriane Griebeler e Marco Antonio Moreira, 2012.
- v.24, n.1 Ensinando Física Térmica com um refrigerador
Rodrigo Pogliа e Maria Helena Steffani, 2013.
- v.24, n.2 Einstein e a Teoria da Relatividade Especial: uma abordagem histórica e introdutória
Melina Silva de Lima, 2013.

