

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS – CFM
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**MECÂNICA RELATIVÍSTICA: RUPTURA OU CONTINUIDADE?
AS CONSIDERAÇÕES DE KARL POPPER E THOMAS KUHN**

Welchy Leite Cavalcanti
Prof. Dr. Luiz O. Q. Peduzzi
Orientador

*Monografia apresentada no Curso de
Especialização em Ensino de Física da UFSC, como
requisito parcial à obtenção do título de
Especialista em Ensino de Física*

Florianópolis (SC)
Abril - 2001



03752339



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA

**“Mecânica Relativística: Ruptura ou Continuidade?
As considerações de Karl Popper e Thomas Kuhn”**

Monografia submetida ao Colegiado do curso
de Especialização em Ensino de Física do
Centro de Ciências Físicas e Matemáticas em
cumprimento parcial para a obtenção do título
de Especialista em Ensino de Física.

APROVADA PELA COMISSÃO EXAMINADORA em 26/04/2001

Dr. Luiz O. Q. Peduzzi – Orientador

Dr. Arden Zylbersztajn – Examinador

Prof. Dr. Maurício Pietrocola
Coordenador CEEF/CFM/UFSC

Welchy Leite Cavalcanti

Florianópolis, abril de 2001.

Aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Luiz O. Q. Peduzzi pela orientação, colaboração, sugestões, paciência, apoio e principalmente pelo carinho e confiança.

Ao prof. Dr. Maurício Pietrocola pela oportunidade de participar do curso de especialização em ensino de Física.

À querida e sempre prestativa Sandra.

A todos os professores e colegas do curso de especialização em Física.

Aos meus pais, irmãos e amigos.

E aos demais que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho meu sincero agradecimento.

SUMÁRIO

Resumo-----	iv
Introdução-----	vi
1-AS CONCEPÇÕES DE THOMAS KUHN E KARL POPPER SOBRE O DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO-----	01
1.1 O DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO SEGUNDO THOMAS KUHN- -----	01
1.1.1 A Natureza do Paradigma-----	02
1.1.2 Ciência Normal e Revolução Científica-----	05
1.2 O DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO SEGUNDO KARL POPPER--- -----	07
1.2.1 Teoria Científica Ou Não-Científica-----	11
1.3 DIFERENCIAIS ENTRE POPPER E KUHN-----	12
2-HIPÓTESES PARA O ÉTER: CRISE OU REFUTAÇÃO?-----	14
2.1 HIPÓTESE DE FRESNEL-----	14
2.2 EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY-----	19
2.3 POINCARÉ, LORENTZ E OS CONFLITOS NA FÍSICA-----	20
3-TEORIA DA RELATIVIDADE-----	29
3.1 OS POSTULADOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA--	29
3.2 A EXPERIÊNCIA MICHELSON-MORLEY E O PENSAMENTO DE EINSTEIN-----	31
3.3 AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ-----	34
3.3.1 Conseqüências das transformações de Lorentz-----	38
3.4 PARADOXO DO GÊMEOS-----	40
Conclusões e Perspectivas-----	42
Bibliografia-----	46

RESUMO

A história e a filosofia da ciência raramente são utilizadas nas aulas de física, porém são excelentes vias para o ensino de ciências, uma vez que permitem um ensino significativo, e capaz de desenvolver no aluno a criticidade.

Na concepção de ciência de Thomas Kuhn o conhecimento científico é caracterizado por conceitos como paradigma, ciência normal, revolução científica, incomensurabilidade, entre outros. Segundo Kuhn, a ciência possui períodos de ciência normal, caracterizados pela adoção de um paradigma vigente, onde a pesquisa científica está direcionada para articulação dos fenômenos e teorias já fornecidos pelo paradigma. Quando a ciência normal começa a fracassar na produção dos resultados esperados, surge um período de crise que, se não resolvida, conduz a uma revolução científica. Neste caso, há a substituição do paradigma problemático para um outro tendo início um novo período de ciência normal.

Para Karl Popper as teorias científicas devem ser constantemente submetidas à testes severos para fins de refutações na busca por teorias e conceitos verdadeiros. E quando uma teoria é refutada, esta é abandonada e pode surgir uma nova teoria que satisfaça com êxito todas as soluções já encontradas e explicadas através da teoria refutada, como também ter bons resultados para as falhas da teoria anterior. Sendo que a nova teoria incorpora a teoria refutada nos seus aspectos positivos para os resultados já encontrados.

A Física entre os séculos XIX e XX estava caracterizada por um certo questionamento a respeito dos conceitos newtonianos para o caráter da concepção para a luz, o espaço e o tempo. Inicialmente o domínio da visão corpuscular para a luz frente a sua interpretação ondulatória, que entram em conflito com diferentes explicações para resultados experimentais como a aberração estelar e a paralaxe, surgindo constantes modificações nas hipóteses para a natureza do éter, como a hipótese de Fresnel de arrastamento parcial do éter luminoso.

Muitos cientistas como Poincaré, Lorentz e FitzGerald se envolvem na formulação de hipóteses que permitam a estruturação e correlação de conceitos já estabelecidos, como o espaço, o tempo e o éter, com os novos resultados como o experimento de Michelson-Morley que não detectou nenhum “vento de éter”. São propostas formulações aparentemente semelhantes com o que mais tarde surgiria com a teoria da relatividade de Einstein. O que induz a muitos interpretarem a mecânica relativística como uma continuidade desses trabalhos anteriores.

Todavia, os conceitos de tempo e espaço se modificam com a formulação dos postulados da relatividade restrita, de onde questões como a contração do espaço, dilatação temporal, o abandono de éter e o limite para a velocidade da luz surgem como consequência. Evidenciando a teoria da relatividade como uma revolução científica de onde surge um novo paradigma onde espaço e tempo não são absolutos, e os conceitos do paradigma anterior amparados pela existência do éter são diferentes, pois o éter é abandonado.

Uma discussão sobre a teoria da relatividade, os conceitos e teorias envolvidos, considerando as concepções filosóficas de Popper e Kuhn e aspectos históricos é uma boa forma de apresentar ao aluno os elementos que abrangem a evolução do conhecimento científico.

INTRODUÇÃO

Se for traçado um esboço da forma como a ciência tem sido ensinada, notar-se-á, de modo geral, que ela é apresentada ao aluno como uma construção de grandes gênios que estruturaram e consolidaram o que é ou não verdade científica, uma ciência atemporal e neutra, o que distorce sua imagem real. Um dos fatores que contribui para essa desvirtuada descrição do processo e do produto da atividade científica é o relativo às fontes de conhecimento do aluno e do professor. As principais para o aluno são as aulas e os livros didáticos, sendo estes últimos manuais especialmente escritos para o estudante, e que geralmente apresentam apenas o que é considerado do interesse da ciência atual.

Para o professor, há diversos fatores que influenciam na sua forma de ensinar, mas a sua concepção de ciência é a principal responsável. Em geral, além do senso comum, o professor conta também com o livro didático para construir suas concepções. Como este livro é produto de um processo de transposição didática¹, onde o conhecimento científico passou da sua forma original para uma forma despersonalizada, descontextualizada, desincretizada, anacrônica e neutra como mostrado nos livros. O professor passa a ser um agente na perpetuação de uma ciência deturpada, e da super valorização dos conceitos atuais em detrimento ao caráter evolutivo da ciência, que propiciaria ao aluno um aprendizado mais significativo.

Uma forma de modificar este quadro apresentado acima seria a introdução da história da ciência no ensino, porém não da maneira caricaturada, ilustrativa, como muitas vezes surge, que apenas auxilia na sustentação desse distorcido perfil de ciência já citado. A história da ciência, integrada à filosofia da ciência, pode ser muito profícua na realização de um ensino significativo, que tenha capacidade de propiciar ao aluno o desenvolvimento do pensamento crítico, sendo as aulas de física uma forma de conhecer e entender o trabalho do

¹PINHO ALVES, José. *Atividade Experimental: do Método à Prática: Transposição Didática: Um Instrumento de Análise*. Tese (Doutorado em Educação)–Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000. p. 214-231.

cientista, os aspectos que influenciam e interagem com a ciência transformando seu objeto, assim como os aspectos sociais e econômicos. Por conseguinte, haveria por parte desse aluno um maior interesse pelo ensino de física, um acréscimo em sua cultura, e a capacidade de reconhecer nos fatos vivenciados o que é ou não científico, tendo critérios para fazer suas escolhas.

Com o presente trabalho, e dentro de suas limitações, espera-se estar contribuindo para enriquecer ou despertar a discussão em torno de conceitos, tais como revolução científica, paradigmas, ciência normal, refutações, que são extremamente importantes dentro da evolução da ciência, sendo muitas vezes subestimados pelos físicos, que tendem a se manter dentro de um quadro de conservadorismos e preconceitos, limitando o próprio desenvolvimento da ciência. Através do mesmo, pretende-se também construir parte do insumo de um referencial teórico para os professores de ensino de física que desejem incluir a história e a filosofia da ciência em suas aulas, ou almejem conhecer um pouco sobre o corpo estrutural e o desenvolvimento da mecânica relativística.

Para ilustrar tal propósito, foi abordada a transição entre a mecânica newtoniana e a relativística, evidenciando o desenvolvimento científico da teoria da relatividade. Nesse intuito utiliza-se as concepções de Karl Popper e Thomas Kuhn sobre o desenvolvimento científico, que contrastam, em alguns aspectos quanto à natureza epistemológica deste empreendimento científico. Ao discutir essa questão, pretende-se evidenciar que toda história tem uma interpretação orientada por pressupostos filosóficos.

O trabalho está sistematizado da seguinte forma: No primeiro capítulo, faz-se uma abordagem sintetizada sobre as epistemologias de Thomas Kuhn e Karl Popper, considerando seus principais aspectos, que nortearão as discussões filosóficas. No segundo capítulo, são apresentadas as contribuições de cientistas como Fresnel, Poincaré, Michelson, Morley e Lorentz, com o propósito de identificar os aspectos que nortearam o desenvolvimento científico da teoria da relatividade. O capítulo seguinte introduz alguns tópicos da teoria da relatividade, bem como as principais decorrências dos conceitos nela

envolvidos. Por fim, as conclusões obtidas através desse estudo e perspectivas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 1

AS CONCEPÇÕES DE THOMAS KUHN E KARL POPPER SOBRE O DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO

Neste primeiro capítulo são introduzidas as concepções de ciência de Karl Popper e Thomas Kuhn, que exerceram indubitável prestígio na filosofia da ciência. Ambos apresentaram idéias terminantes quanto ao caminho descrito pela pesquisa científica.

As questões apresentadas por esses filósofos são bastante discutidas ainda hoje, concordam em determinados aspectos, entretanto seu valor não está apenas na harmonia das formulações sobre o pensamento científico, mas notoriamente também nos pontos de divergência, devido a abordagem crítica que permitem. As idéias de Kuhn são analisadas por muitos como psicologia, sociologia da ciência; enquanto Popper tratou suas concepções sob à luz da lógica.

Em função do desejo por um aluno crítico, envolvido com as aulas, que saiba lidar com suas eventuais concepções espontâneas, que identifique as transformações do pensamento científico percebendo que as teorias científicas não são definitivas, entre outras coisas, é que se valoriza neste capítulo a apresentação das concepções filosóficas de Popper e Kuhn.

O conhecimento das filosofias de Popper e Kuhn pode ser utilizado para romper com o anacronismo perpetuado pelos livros didáticos, propiciando ao aluno a oportunidade de discutir, criticar e argumentar sobre as teorias e modelos que utiliza, e também entrar em contato com os debates, as questões que envolveram e ainda envolvem o desenvolvimento científico.

1.1 – O DESENVOLVIMENTO CIENTIFICO SEGUNDO THOMAS KUHN

Thomas S. Kuhn era estudante de pós-graduação em física teórica quando foi tomado de entusiasmo por uma primeira exposição à História da Ciência em um curso experimental onde a ciência física era apresentada para os

não-cientistas, mudando seus planos profissionais da Física para esse campo, o qual acabara de roubar sua atenção.

Durante três anos ficou como “Junior Fellow” da “Society of Fellows” da Universidade de Havard, tempo em que pode se dedicar e aprimorar seu estudo da história, e sobretudo estruturar suas precursoras idéias do desenvolvimento científico. Dizia-se fortemente influenciado por alguns grandes nomes, como Alexandre Koyré. Em seu último ano como “Junior Fellow” teve a oportunidade de fazer conferências para o “Lowell Institute de Boston”, onde pode testar suas concepções ainda em desenvolvimento. Em seguida lecionara História da Ciência, sendo que o estágio final na estruturação de suas concepções viria a realizar-se nos anos de 1958 e 1959 no “Center for Advanced Studies in the Behavior Sciences”, onde pode dedicar-se não somente às suas concepções, como também teve contato com a estrutura das ciências sociais confrontando-as com as características da ciências naturais que melhor conheceu devido à sua formação.

Em seu livro “A estrutura das revoluções científicas”, publicado em 1962, apresenta suas concepções sobre o desenvolvimento científico, critica o positivismo lógico e a historiografia tradicional, que dissemina e atribui um conhecimento científico iniciado pela observação neutra, pela indução, cumulativo, linear e definitivo.

1.1.1 A Natureza do Paradigma

Kuhn defende que o desenvolvimento científico ocorre em uma seqüência de períodos de “ciência normal”, onde alguns conceitos e teorias delimitam o seguimento do produto científico, interrompidos por “revoluções científicas”, onde essas teorias e conceitos passam por uma crise sem solução, sendo substituídos por um novo corpo de conceitos que dá início a um outro período de ciência normal. O conjunto de conceitos, teorias, compromissos de pesquisa partilhados pelos membros da comunidade científica durante o período de ciência normal é chamado paradigma.

Segundo Kuhn: *“Um paradigma é aquilo que os membros de uma comunidade partilham e, inversamente, uma comunidade científica consiste em homens que partilham um paradigma.”* (Kuhn, Thomas S., 1991, p.219). O sentido do termo paradigma, como fora empregado por Kuhn na primeira edição de seu livro, chegou a ser analisado por Margaret Masterman, e foram encontradas vinte e duas maneiras diferentes de formas para o emprego do termo. Então, em edições seguintes de seu livro *A estrutura das revoluções científicas*, Kuhn descreve que na maior parte do livro utiliza o termo paradigma em dois sentidos. Num deles o paradigma indica todos os valores, crenças, teorias, técnicas, métodos partilhados pela comunidade científica. Sendo que o outro sentido denota uma especificidade, uma solução concreta de um problema que pode substituir regras explícitas na solução de outros problemas num mesmo paradigma. Ao primeiro sentido, que é aplicado de forma mais geral, denominou por sociológico, o segundo sentido do termo rendeu diversas críticas e divergências.

Para explicitar o sentido do termo paradigma Kuhn sugeriu então o termo “matriz disciplinar”: *“disciplinar” porque se refere a uma posse comum aos praticantes de uma disciplina particular; “matriz” porque é composta de elementos ordenados de várias espécies, cada um deles exigindo um determinação mais pormenorizada.* (Kuhn, Thomas S., 1991, p.226). Kuhn indicou os principais tipos de componentes que formam uma matriz disciplinar. São eles:

Generalizações simbólicas: referente às expressões, fórmulas empregadas acriticamente pelos membros da comunidade científica, ora sob forma simbólica, como $F = ma$, ora por palavras como “dois corpos não podem ocupar o mesmo lugar no espaço”. Essas generalizações representam fortes pontos de apoio para comunidade, de onde partem para aplicações de técnica de manipulação lógico-matemática na solução de problemas. O poder de um paradigma aumenta com o número de generalizações simbólicas que seus praticantes possuem à sua disposição.

Paradigmas metafísicos: ou também partes metafísicas do paradigma, referem-se a compromissos coletivos, crenças em determinados

modelos que vão desde heurísticos até ontológicos, propiciando aos praticantes as analogias, ou metáforas aceitáveis para explicação, ou solução de um enigma. Também em função dessas crenças, desses modelos, são avaliadas e graduadas a importância das soluções dos problemas, ajudando a estabelecer a lista de quebra-cabeças não resolvidos. Kuhn evidencia que usualmente os membros da comunidade científica partilham os modelos, porém não é uma condição necessária.

Valores: Em geral os cientistas partilham desses valores, ainda mais que das generalizações simbólicas, ou dos paradigmas metafísicos(modelos). Dão a comunidade um sentimento de identidade, um carácter de unificação. Em geral os cientistas aderem melhor aos valores relacionados com predições, que devem ser acuradas e são preferíveis as quantitativas às qualitativas. Entretanto os valores também são utilizados no julgamento de teorias completas, que devem ser simples, dotadas de coerência interna, plausíveis e compatíveis com as demais teorias que estiverem sendo disseminadas no momento. Ainda há, na concepção de Kuhn, outros tipos de valores, como se a ciência deve ou não ter uma utilidade social.

Todavia, o aspecto de maior impacto dos valores partilhados é justamente quanto aos julgamentos, que variam de indivíduo para indivíduo isto é, a aplicação dos valores é afetada pelo carácter pessoal do indivíduo, denotando uma aparência subjetiva. Por esse aspecto Kuhn foi apontado como agente na glorificação da subjetividade, e até mesmo irracionalidade. Pois afirmara que os valores partilhados não são suficientes para impor a uniformidade em assuntos como a escolha entre teorias ou identificação de um período de crise. Entretanto, os valores são compartilhados, e representam tópicos do comportamento do grupo, apesar de não empregarem da mesma forma e intensidade utilizando nesse ponto fatores idiossincráticos. Ainda há nessa variável da individualidade funções essenciais para a ciência, pois:

“Se todos os membros de uma comunidade respondessem a cada anomalia como se esta fosse uma fonte de crise ou abraçassem cada nova teoria apresentada por um colega, a ciência deixaria de existir. Se, por outro lado, ninguém reagisse às anomalias ou teorias novas, aceitando riscos

elevados, haveria poucas ou nenhuma revolução.”(Kuhn, Thomas S., 1991, p.231).

Assim, a forma com que cada um aceita e adere aos valores, modifica sua forma de reagir às anomalias e identificá-las. Ou seja, na subjetividade, na maneira individual de aderir e interpretar os valores, os cientistas tornam-se críticos, e amortizam o aspecto dogmático que os valores podem trazer.

Exemplares: Neste quarto componente da matriz disciplinar Kuhn revela o paradigma de cunho mais restrito, ao qual ele mesmo denominou a questão onde o termo paradigma melhor se apropria. Neste se enquadram as soluções dos problemas encontrados na educação científica, nos exames, nos laboratórios, ou nos manuais científicos, e também soluções técnicas dos periódicos científicos. Tais soluções propostas, denotam como os cientistas devem realizar seu trabalho. De situações conhecidas parte para a procura de semelhanças entre elas e o problema que deseja resolver.

Dessa forma, um físico, por exemplo, no início de sua carreira começa aprendendo os exemplares e as generalizações simbólicas, na medida em que se desenvolve estas e outras generalizações cada vez mais são reafirmadas e exemplificadas através do exemplares.

1.1.2 Ciência Normal e Revolução Científica

A adesão da comunidade científica à matriz disciplinar, denota um período de ciência normal. Neste período a comunidade científica está envolvida na solução de novos problemas a partir dos exemplares definidos para o paradigma.

A ciência normal surge da confiança em um paradigma, que restringe a pesquisa científica a articulação, solução de problemas(quebra-cabeças), baseados nos fenômenos e teorias já fornecidos por esse paradigma. Segundo Kuhn, nesses períodos há reduzido interesse em produzir grandes novidades, seja no domínio dos conceitos ou dos fenômenos.

A concepção kuhniana revela um cientista resistente e com preconceitos, limitado pelas concepções do paradigma, com o intuito de forçar a natureza a encaixar-se à matriz disciplinar. Porém, ao restringir-se aos problemas em torno do paradigma, o cientista, livre da análise crítica das teorias, dos conceitos, faz sua investigação dessas especificidades de forma profunda e detalhada. E contribui para aumentar o alcance, a precisão e o poder do paradigma, centrando seus esforços nos problemas enfrentados pelos praticantes de sua área.

A ciência normal é bem sucedida, há a ampliação da acuidade e da precisão do paradigma, todavia, quando o paradigma fracassa na predição dos resultados, os problemas passam a ser anomalias, surgindo uma crise. De acordo com Kuhn: *"...crises são uma pré-condição necessária para a emergência de novas teorias."* (Kuhn, Thomas S., 1991, p.107).

Nesse período de crise, há algumas reações naturais dos cientistas, que apesar de perderem a fé no paradigma e passarem a considerar outras possibilidades, não renunciam facilmente ao paradigma em crise, ficam presos à sua resistência, ao conservadorismo. E somente admite-se a possibilidade do abandono de um paradigma quando há uma alternativa capaz de substituí-lo. Decidir rejeitar um paradigma implica em, simultaneamente, aceitar outro.

Os membros da comunidade científica que propõem o candidato a novo paradigma competem, entram em desentendimento com os defensores do paradigma vigente. A transição desse paradigma concorrente para o paradigma vigente é a chamada revolução científica, sendo que o resultado final de uma seqüência de "ciência extraordinária", separada por períodos de "ciência normal" é o conhecimento científico moderno.

A decisão por essa mudança envolve uma série de parâmetros, inclusive a persuasão, a influência que os membros que propõem o paradigma possuem dentro da comunidade, além das características racionais, lógico-matemáticas, ou científicas. É necessário convencer, expor argumentos que o façam, seja a previsão de solução de novos problemas, seja a solução precisa de problemas onde o paradigma anterior falhara. É fundamental gerar a crença no novo paradigma para que haja transição, e essa crença pode ser haurida em

razões fora do âmbito científico. De acordo com Kuhn: *“Não sabemos, por exemplo, quase nada sobre o que um grupo de cientistas está disposto a sacrificar a fim de lograr os ganhos que uma nova teoria invariavelmente oferece.”*(Kuhn, Thomas S., 1979, p.28). Por associar critérios não-científicos à escolha dos paradigmas Kuhn foi acusado de delinear uma imagem errônea da ciência, com um perfil irracional.

Kuhn primeiramente admitiu que os paradigmas vigente e concorrente eram incomensuráveis, por não se poder demonstrar a superioridade de uma teoria sobre outra em uma discussão. Depois passou a considerar que em debates inter-paradigmáticos os cientistas defensores de diferentes paradigmas conseguem fazer um processo de tradução da linguagem de seu paradigma. No entanto, a tradução não garante a conversão de paradigmas.

1.2 - O DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO SEGUNDO KARL POPPER

Nascido em 28 de julho de 1902 na Áustria, Karl Raimund Popper manteve suas atividades filosóficas e seus pensamentos sobre uma diversidade de temas, que vão desde a filosofia da música, a física até a teoria social; porém seus trabalhos mais significativos estão no campo da filosofia da ciência.

Karl Popper completou seus estudos na Universidade de Viena, defendendo tese sobre psicologia¹. Após concluir sua formação passa a viver como professor secundário de física e matemática. Em 1934 publica seu primeiro livro, *A lógica da pesquisa científica*, dividido em duas partes, uma apresenta o critério de demarcação entre ciência e não-ciência explorando o conceito de falseabilidade e a outra apresenta componentes de uma teoria científica, seus fundamentos epistemológicos e problemas implicados na testabilidade.

O livro apresenta uma série de argumentos que o fazem uma obra crítica do positivismo, todavia, em função de ter sido publicado em uma série destinada a divulgar o pensamento positivista, disseminou a errônea fama de um Popper positivista. Como ele mesmo afirmara: *“Ao escrever “Logik der*

¹ Tese com título: *“On the problem of method in the psychology of thinking”*.

Forchung”, meu desejo era o de desafiar amigos e opositores positivistas. Nesse particular, não deixei de ter algum êxito.”(Popper, Karl R. apud PELUSO, Luis Alberto, 1995, p.18). Em 1937, em razão de uma provável invasão à Áustria, considerando o poder na Alemanha já tomado por Hitler, Popper foge do nazismo dirigindo-se à Nova Zelândia, dedicando-se então ao ensino de filosofia. Terminada a guerra exerce função de professor de Lógica e metodologia científica na London School of Economics and Political Science na Inglaterra e em 1964 recebe o título “Sir”.

Há algumas peculiaridades da filosofia popperiana, sendo que uma das principais na discussão desse trabalho é o racionalismo crítico, onde todo o conhecimento é falível e corrigível. Dessa forma, o conhecimento se torna sempre a modificação de algum conhecimento anterior, apontando para a existência de um critério de demarcação para uma teoria ser classificada ou não como científica, e segundo tal critério a teoria deve estar exposta à refutabilidade, à testabilidade ou à falsificabilidade. Outros aspectos das concepções de Karl Popper também são tratados, como a possibilidade de encontrar o erro criticando as teorias e opiniões alheias e também as suas próprias, estando o conhecimento tradicional aberto ao exame crítico, e se necessário pode ser abandonado.

Na concepção popperiana, o teórico busca teorias provisoriamente verdadeiras, assim, nesta linha de pensamento, quais seriam os princípios de preferência adotados para a escolha entre as melhores teorias? Em seu livro *Conhecimento Objetivo*, Popper faz algumas considerações a esse respeito. O teórico interessado na verdade deve estar em busca também da falsidade, no intuito de descobrir se uma asserção é falsa. Como já citado, para Popper a refutação será sempre de interesse do cientista. Havendo esse interesse, é mister que descobrindo onde a teoria contém falhas o teórico proponha um problema novo. Por conseguinte, qualquer teoria nova deve não somente ter êxito onde a teoria refutada obtivera, como também onde esta falhara, ou seja, no aspecto em que fora refutada, sendo assim “melhor” que a anterior.

Havendo um tempo t onde essa nova teoria ainda não fora refutada por um novo teste, ela será, no mínimo nesse tempo t , “melhor” que a

anterior, sendo encarada como possivelmente “verdadeira”. No entanto o teórico deve estar interessado em avaliar essa nova teoria não apenas no sentido de talvez ser a “verdadeira”, mas principalmente em razão de poder ser falsa, sendo objeto de novos testes, novas tentativas de refutação, que tendo êxito estabelecem uma nova negação e conseqüentemente um novo problema teórico para a teoria posterior.

Em síntese, por uma série de razões o teórico terá interesse por teorias não-refutadas, em busca de uma teoria “verdadeira”, embora Popper acredite que o conhecimento final nunca será atingido. Esse aspecto seria a questão da preferência: quando as teorias concorrentes oferecem soluções para os mesmos problemas, será preferida a teoria não refutada à refutada, desde que a mesma explique com sucesso os êxitos e as falhas da teoria refutada.

Uma nova teoria, assim como suas antecessoras, pode ser refutada, e o teórico tentará ao máximo identificar qualquer teoria falsa dentre as concorrentes, devendo pensar e elaborar testes severos, situações de risco à teoria. Há assim, por parte do cientista, um demasiado empenho em testes na busca da falseabilidade da teoria. Surgindo um método de eliminação, que pode resultar numa teoria “verdadeira”. Existe um número finito de teorias propostas, em caso de refutação de todas é possível que não se consiga pensar a respeito de uma nova. Porém, como Popper afirma, em um determinado tempo pode haver mais de uma teoria não refutada, não se podendo saber qual deve ser preterida. O teórico, em sua busca incessante de testes para refutação deve mostrar a falsidade de algumas teorias eliminando-as. Contudo, essas teorias concorrentes, e concomitantes, podem não obter excelência na resolução para os mesmos problemas. Entretanto, por exigência do critério estabelecido, devem responder às falhas da teoria precedente, porém uma ou mais teorias novas podem fazê-lo. Nesse sentido o teórico deve buscar a mais testável das teorias e submetê-la a novos testes. A escolhida será a que tiver, ao mesmo tempo, o maior conteúdo de informações e a maior força explanativa.

Por exemplo, considera-se uma teoria em vigor A_1 , que deve estar sendo submetida a uma série de testes na busca de sua refutação. Supõe-se que em um determinado teste, para um problema P_1 , essa teoria falha. Nesse ponto

surge um problema novo, e a candidata a nova teoria deve resolver não somente P_1 como também ter êxito em todas às outras questões de A_1 . Em um mesmo tempo surgem n^2 teorias, as quais denominam-se B_n , que resolvem todos os problemas já resolvidos por A_1 e ainda o ponto onde essa desabara, P_1 . O teórico deve buscar entre as novas teorias B_n a mais susceptível a testes, submetendo-a a novos e novos testes. Nesse tempo a melhor das B_n testadas, que sobreviver aos testes, será considerada a “melhor” teoria.

De forma contraditória, apesar da nova teoria corrigir a velha teoria, para Popper ela também a contém, porém como aproximação.

Essas questões sobre testar teorias, refutá-las, propor novas teorias submetendo-as a testes severos é o chamado método crítico de Popper, que permite uma visão da ciência como algo dinâmico e aberto a debate e discussão. Nesse método só são considerados números finitos de teorias, que através da eliminação de concorrentes pode levar a teoria “verdadeira”. Num caso de infinitas teorias concorrentes, pode-se ainda aplicar o método, todavia ele será inconclusivo. Ainda nas condições já citadas de testes, é bem possível que não haja para uma teoria que falhou uma sucessora “melhor”, que satisfaça todas as exigências.

Popper admite que em questões como essas, onde se aplica a lógica pura, outros problemas podem surgir, como a própria crítica dos testes e a nitidez entre eles e a teoria pode não ser da forma como foi idealizada nessa discussão.

Na questão já discutida, muito foi citado sobre a “melhor” teoria, a “verdadeira”. Para Popper esse aspecto apelativo à idéia de verdade é apenas uma questão que ele chama idéia reguladora. Testa-se a verdade, eliminando a falsidade. Há uma busca pela verdade, mas ela não existe definitivamente, pois considerando a teoria escolhida entre as B_n testadas, não se afirma ser uma verdade demonstrada, porém é a que mais se aproxima da verdade. Como afirmou Popper: *“Vi que o que deve ser abandonado é a busca da justificação*

² Onde n pode ser qualquer número inteiro finito $n = 1, 2, \dots$; sendo que no caso $n = 1$ a nova teoria fora encontrada e será a “melhor” até que algum teste a refute.

no sentido de justificar a alegação de que uma teoria é verdadeira. Todas as teorias são hipóteses; todas podem ser derrubadas”(Popper, Karl R., 1975, p. 39)

1.2.1 Teoria Científica Ou Não-Científica

Popper também se preocupou na identificação e distinção de teorias científicas de outras não científicas, uma vez que seu racionalismo crítico exige que a teoria seja sempre colocada em teste na tentativa de refutação. Porém, qual seria essa teoria “avaliável”, exposta à refutabilidade?

“Por mais importantes que estes programas metafísicos tenham sido para ciência, eles devem ser distinguidos das teorias testáveis, nas quais o cientista usa de maneira diferente. Desses programas ele extrai seu objetivo – o que ele consideraria uma explicação satisfatória, uma real descoberta do que está “escondido na profundidade”. Embora empiricamente irrefutáveis, esses programas de pesquisa metafísica estão abertos à discussão; podem ser mudados sob a luz da esperança que inspiram ou dos desapontamentos pelos quais podem ser considerados responsáveis.”(Popper, Karl R. apud PELUSO, Luis Alberto, 1995, p.31).

Um positivista resolveria essa questão justificando com a ausência de significado de uma teoria metafísica. Apenas a ciência é conhecimento útil e necessário que correlaciona raciocínio e experiência. Na metafísica as conjecturas são geralmente inverificáveis.

Para Popper, conforme a citação acima, não significa que uma teoria não-científica seja sem significado. Não existe um método metafísico ou filosófico, ou seja, procedimentos através do quais se produzam teorias metafísicas. E o que distingue, o critério de demarcação, entre o científico e o não-científico é a refutabilidade.

A metafísica seria irrefutável por natureza, e a irrefutabilidade não consiste em um critério na determinação da verdade de uma teoria. Popper distingue dois sentidos para a irrefutabilidade. Em um deles denota a inexistência de meios puramente lógicos para refutar uma teoria metafísica, em

um outro sentido, se a teoria é empiricamente irrefutável, ela pode possuir uma grande força explanativa³, porém compatível com qualquer experiência possível, uma vez que a explicação para todo experimento se enquadra na teoria. Por mais explicativa que seja, coerente com tudo que tenta explicar, a teoria não pode ser tida como científica, ou verdadeira, se não for refutável. Assim como a incoerência, a irrefutabilidade não é suficiente para determinar a veracidade de uma teoria. Um teoria científica em determinadas condições deve apresentar no mínimo um falsificador, deve proibir acontecimentos, mesmo que sejam logicamente passíveis de observação, em contradição com a irrefutabilidade nas teorias não-científicas que não requerem, nem aceitam proibições.

1.3 – DIFERENCIAIS ENTRE POPPER E KUHN

Popper chegou a afirmar que as críticas de Kuhn às suas concepções sobre ciência foram as mais interessantes que encontrara. Um dos pontos de discussão entre as filosofias de Popper e Kuhn é a respeito da ciência normal. Embora Popper não discorde de sua existência, acredita haver muitas gradações entre um “cientista normal” e um “cientista extraordinário”. Exemplifica com Boltzmann, que foi um grande cientista, e muitas contribuições trouxe a ciência, sobretudo à física estatística. Entretanto, na concepção de Popper, Boltzmann não teria sido um “cientista extraordinário”, pois apesar de toda a genialidade de seu trabalho fora um seguidor de Maxwell, não preparando assim uma grande revolução, e nem tão pouco deve ser colocado entre os dogmáticos “cientistas normais”. Questões como essa sugerem a Popper a existência de um espectro de cientistas passando entre os dois extremos: o cientista normal e o cientista extraordinário.

A ciência normal de Kuhn foi bastante criticada. Para Popper, estar preso a um paradigma significa dogmatismo, e o mesmo não se classificaria como atributo das teorias científicas.

³ Termo utilizado por Popper para referir-se ao caráter explicativo de uma teoria frente à experiência.

CAPÍTULO 2

HIPÓTESES PARA O ÉTER: CRISE OU REFUTAÇÃO?

Com este capítulo, pretende-se contextualizar e preparar o leitor para ser introduzido nos aspectos principais da teoria da relatividade. São apresentados alguns elementos históricos, que podem ser interpretados por um adepto das concepções kuhnianas como um período de ciência normal com todo um zelo pelo paradigma vigente e em seguida uma crise antecedendo a revolução científica, já para um popperiano poderia ser apenas a constante refutação a que se deve submeter a teoria.

Alguns experimentos como o de Fizeau e de Michelson-Morley, a hipótese de Fresnel e a tendência em manter a existência do éter e outras características da ciência na época são apresentados para nortear o âmbito em que se formulará a teoria da relatividade.

São considerados os trabalhos de grandes cientistas como Poincaré e Lorentz no intuito de evidenciar a falácia dos grandes gênios, que coloca Einstein como ser todo poderoso que “descobriu” a teoria da relatividade. Logicamente o trabalho de Einstein tem grande mérito, porém além de ser resultado de sua brilhante capacidade e empenho como físico teórico, é também devido ao trabalho de outros cientistas anteriores e contemporâneos a ele; como também das questões conflitantes que envolveram a comunidade científica da época.

2.1 - HIPÓTESE DE FRESNEL

A estruturação da óptica ondulatória no século XIX era baseada na existência de um éter luminoso. Várias experiências foram realizadas e na tentativa de explicá-las surgiram diferentes hipóteses a respeito do éter. Cada teoria tinha uma proposta diferente sobre o comportamento deste fluido em relação aos corpos materiais, as teorias de maior peso foram de George Gabriel Stokes, Thomas Young e Augustin Jean Fresnel.

Entre 1725 e 1726, Bradley com o propósito de medir o fenômeno da paralaxe astronômica das estrelas fixas, observa uma variação na posição de uma estrela¹. A paralaxe é um fenômeno causado pelo movimento anual da Terra. Considere na figura (2.1) que uma determinada estrela E é observada sob um ângulo Z_1 , enquanto a Terra está na posição P_1 de sua órbita. Então, seis meses depois a mesma estrela é observada sob um ângulo Z_2 e a Terra está na posição P_2 . A diferença na medida desses ângulos, ou seja, na medida da posição da estrela em função da posição da terra é chamada paralaxe. Porém a variação encontrada na observação feita por Bradley era num plano perpendicular ao plano que a teoria previa para paralaxe. Este fenômeno ficou conhecido como Aberração das estrelas fixas, e estava relacionado com o movimento de translação da Terra. No caso da aberração, como apresentado na figura (2.2), o ângulo de aberração é o formado entre EP_1 e $E'P_1$.

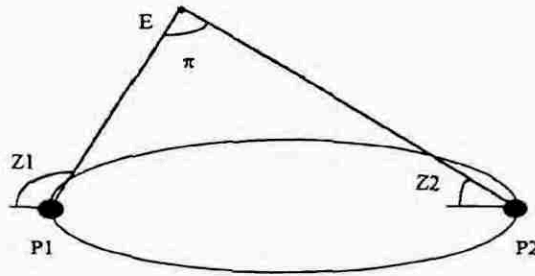


Figura 2.1 - Estrela E observada da Terra sob dois ângulos diferentes (Z_1 e Z_2), enquanto a Terra se encontra, respectivamente, nas posições P_1 e P_2 defasada em seis meses. (PIETROCOLA, Maurício. Ago/1993, p.159)

¹ Estrela Gama da constelação do Dragão.

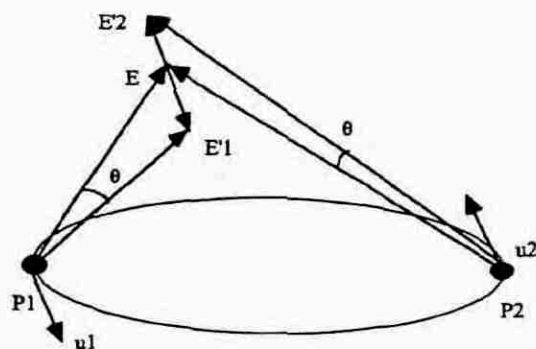


Figura 2.2 – A estrela E é observada a partir da terra. Nas posições P_1 e P_2 , \vec{u}_1 e \vec{u}_2 representam, respectivamente, as direções do deslocamento terrestre. A posição E'_1 é obtida a partir da composição da direção de propagação da luz emitida pela estrela na direção EP_1 e a velocidade \vec{u} de translação da Terra. (PIETROCOLA, Maurício. Ago/1993, p.160)

Nesta época, a teoria newtoniana da luz dominava o meio científico; assim, para explicar a aberração, Bradley, admitindo que a luz era composta por pequenos corpúsculos de matéria, aplicou as leis da mecânica dos corpos rígidos. A aberração foi explicada como a variação da trajetória de um corpo em função do movimento relativo ao observador, fazendo uma composição de movimento entre a direção de propagação da luz emitida pela estrela e a velocidade de translação da Terra. Dessa forma, o fenômeno da aberração determinou que a propagação luminosa poderia ser influenciada pelo movimento dos corpos materiais, variando de observador para observador, em função de seu movimento relativo. Dentro da visão corpuscular da luz, a aberração não seria um fenômeno estranho, pois seria uma consequência possível dentro da mecânica newtoniana.

No início do século XIX, com o “renascimento” da ótica ondulatória, surgem explicações para a aberração sob o ponto de vista ondulatório. Em 1804 Young propôs uma explicação para a aberração a partir da teoria da luz na concepção de Huygens e considerando que o éter era um meio que preenchia o espaço, sendo um fluido material, infinito, homogêneo e isotrópico que permeava todos os corpos. Todavia, Young precisou adicionar a proposição de que o éter era totalmente imóvel no espaço e não influenciado

pelo movimento da Terra. Young considerava que o éter penetrava um corpo material com quase nenhuma resistência, tão livre como o vento passando através das árvores. Com essa suposição é possível considerar que o éter não é perturbado pelo movimento da Terra, e assim a possibilidade de uma composição entre a velocidade de translação da Terra em sua órbita e a velocidade de propagação da luz.

A observação sistemática do fenômeno da aberração mostrou um ângulo de aberração idêntico para diferentes estrelas, o que implicaria na constância da velocidade da luz, uma incompatibilidade com a teoria corpuscular, pois neste caso a velocidade de propagação dos corpúsculos de luz no espaço dependeria das dimensões dos corpos emissores. Biot e Arago realizam um experimento e verificam a constância do ângulo de aberração para vários astros. Em 1810, Arago realiza uma nova série de experimentos utilizando a possibilidade de compor o movimento da Terra com a propagação da luz esperando observar uma desigualdade nas medidas dos desvios da luz, mais uma vez em vão, o resultado obtido torna a “sugerir” a constância da velocidade da luz.

A teoria de Young de 1804, sobre o éter totalmente transparente e imóvel não explicava o resultado dos experimentos de Arago em 1810. Por outro lado, a hipótese de um éter totalmente arrastado pelo movimento terrestre explicaria bem tal resultado, todavia não explicava a aberração.

Arago escreve a Fresnel na busca de uma possível conciliação entre os resultados da aberração e de seus experimentos de 1810 com a concepção ondulatória para luz. Em 1818, surge uma proposta para resolver tal questão, Fresnel, mesmo sem conhecer a hipótese de Young, propõe o éter imóvel no espaço, todavia, uma pequena parte dele sendo arrastada pelos corpos transparentes em movimento com a Terra. Apesar da semelhança com a proposta de Young, o fato de éter sofrer essa pequena influência do movimento terrestre explica a refração (resultados do experimento de Arago em 1810) e a aberração. Essa hipótese tornou-se conhecida como o arrastamento parcial do éter luminoso. A expressão encontrada por Fresnel para a propagação de uma onda luminosa no interior do éter foi:

$$v_p = c \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v \quad (2.1)$$

Sendo n o índice de refração do corpo que se move com velocidade v em relação ao éter. E o termo:

$$v_f = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v \quad (2.2)$$

Designa a variação da velocidade de propagação das ondas luminosas dentro de um meio transparente em movimento, e é conhecido como o coeficiente de Fresnel.

A teoria de Fresnel foi alvo de muitas críticas, inclusive a sua própria, pois em vários momentos notificou que o arrastamento parcial do éter não podia ser completamente incorporado às bases mecânicas da concepção ondulatória para a luz. Uma das falhas encontradas era que a quantidade de éter arrastado dependia do comprimento de luz incidente, apontando para uma lacuna deixada pela base mecânica que sustentava a teoria. Apesar disso, durante aquele século várias experiências corroboraram a fórmula de Fresnel como instrumento matemático para interpretação de fenômenos óticos, sem, no entanto, levar em conta seu significado físico. No final do século XIX a hipótese de Fresnel é incorporada pela teoria eletromagnética, sendo uma fórmula capaz de explicar resultados experimentais na primeira ordem de aproximação de v/c .

Outra hipótese surge em 1848 quando Stokes supôs que o éter encontrava-se “colado” à matéria, e compartilhando seu movimento. Propõe que o éter próximo a superfície terrestre seria totalmente arrastado enquanto o éter distante permaneceria imóvel, havendo portanto uma região de transição entre o éter móvel e o fixo. O éter seria rígido para luz, mas não ofereceria resistência aos planetas em seus movimentos. Com essa hipótese² era possível explicar a experiência de 1810, e com determinadas condições de contorno para a tal região de transição também explicara a aberração das estrelas fixas.

² A hipótese de Stokes implica em algumas condições dinâmicas entre o arrastamento de éter, e mais tarde (1887) Lorentz demonstra a incompatibilidade dessas condições.

Frente a tantas hipóteses, Fizeau, em 1851 realiza um experimento na busca de um hipótese “correta”. Fizeau mede o coeficiente de arrastamento do éter pela matéria, através da influência do movimento de uma corrente de água sobre a propagação da luz, essa corrente interfere e produz figuras de difração diferentes conforme o sentido da corrente de água. O resultado obtido aponta para a confirmação da fórmula teórica de Fresnel, induzindo a ratificação de um éter parcialmente arrastado.

2.2 - EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

Em 1881 Albert A. Michelson parte para a tentativa de determinação da velocidade v com que a Terra se move através do éter e, para tal fim, utiliza um aparelho chamado interferômetro(figura 2.1). Em 1887, juntamente com Edward W. Morley, realiza novas tentativas, utilizando o mesmo aparelho, porém com algumas modificações que o tornam ainda mais sensível.

O princípio envolvido no funcionamento do aparelho é o seguinte: de um ponto de uma fonte extensa S parte a luz que incide sobre um espelho semiprateado M , o revestimento de prata tem espessura o suficiente para transmitir metade da luz incidente e refletir a outra metade. Assim, a luz incidida sobre M divide-se em duas ondas, uma transmitida ao espelho M_1 , e a outra parte refletida alcança o espelho M_2 . Cada um desses espelhos, M_1 e M_2 , reflete a luz incidida que é enviada ao longo de suas direções de incidência, chegando ao olho do observador(luneta na figura 2.1). O intuito era medir o tempo de chegada dos feixes ao observador(luneta). Por acreditarem na existência de um éter, existiria o movimento da Terra em relação a ele gerando um “vento de éter”, por conseguinte, o tempo de chegada dos feixes seria diferente.

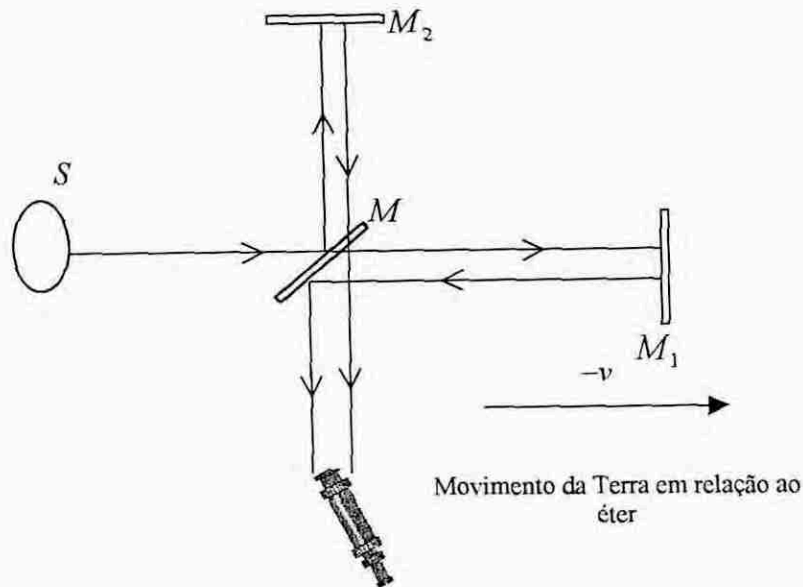


Figura 3.1 – Diagrama simplificado do funcionamento do interferômetro de Michelson.

Considerando que o movimento do éter em relação à Terra se desse sem arrastamento, como previa Fresnel, o interferômetro foi submetido a esse “vento de éter”, alinhando a direção de incidência ao espelho M_1 com a direção da velocidade da Terra, Michelson em 1881, não encontrou nenhuma diferença no tempos de chegada dos feixes.

Em 1887, ao realizar a experiência com Morley, Michelson obteve o mesmo resultado de 1881: nenhum “vento de éter” foi detectado. Mais um resultado experimental torna, assim, a evidenciar fortemente a constância da velocidade da luz.

2.3 - POINCARÉ, LORENTZ E OS CONFLITOS NA FÍSICA

Em 1902, no seu livro *A Ciência e a Hipótese*, Poincaré discute um pouco do estado atual da ciência na época. Para ele a ciência caminhara em

direção à unidade e à simplicidade, sendo que descobertas, fatos estranhos uns aos outros tendem a se organizar numa síntese; e os novos fenômenos que iam sendo revelados, pela própria observação, teriam que esperar muito para encontrar seu lugar nesta síntese, sendo até necessário, para dar espaço a eles, demolir uma parte desse “edifício” formado pelos fatos e conceitos já bem incorporados. Em contra partida, parecia existir indícios de mudanças e complexidades percebidas em conceitos e teorias até então consolidados com o espaço, o tempo e o éter, o que revela que a ciência parecia estar caminhando em direção à variedade e à complexidade. Parece haver vestígios de que a física passava por uma crise, de acordo com a concepção kuhniana; e quais seriam os conceitos que sobreviveriam (não-refutados) e até onde novos conceitos seriam introduzidos no “edifício” sem abalar seus alicerces, como determinaria Popper.

Poincaré era um cientista de caráter convencionalista, percebe-se isto quando ele cita:

“Pouco nos importa que o éter exista realmente: é um problema para os metafísicos. O importante para nós é que tudo se passa como se ele existisse, e essa é uma hipótese cômoda para a explicação dos fenômenos. Afinal, temos outras razões para crer na existência dos objetos materiais? Essa também é uma hipótese cômoda e que nunca deixará de o ser, ao passo que um dia virá certamente em que o éter será rejeitado, por inútil.” (Poincaré, Henri. 1988, p.157).

Abel Rey (1873-1940) filósofo positivista francês, classifica Poincaré quanto às tendências gnosiológicas como pertencendo à escola criticista. A escola criticista seria uma intermediária entre a escola conceptualista à qual pertenciam, segundo Rey, Mach e Duhem e a escola mecanicista ou neomecanicista à qual pertenciam Kirchhoff, Helmholtz, Thomson, Lord Kelvin, Maxwell, Lamor e Lorentz. Na escola criticista há a condenação da metafísica como esfera de problemas que se acham além das possibilidades da razão humana que é característica de Poincaré, percebida ainda na mesma afirmação sobre o éter, quando ele a completa afirmando que a existência do éter é problema para os metafísicos. Outro traço da escola criticista é a determinação da tarefa da filosofia como reflexão sobre a ciência e

em geral sobre as atividades humanas, a fim de determinar as condições que garantem e limitam a validade da ciência e em geral das atividades humanas.

Poincaré se preocupou com as questões a respeito da teoria do elétron e das hipótese de contração do espaço proposta por Lorentz, e sobre o fato das observações já realizadas para baixas velocidades mostrarem a constância da massa. Para Poincaré a natureza da matéria também consistia em um fator para a existência de uma crise:

“O atributo essencial da matéria é sua massa, sua inércia. A massa é o que, sempre e por toda parte, permanece constante, o que subsiste quando uma transformação química alterou todas as qualidades sensíveis da matéria e parece ter produzido um outro corpo. Portanto, se chegasse a demonstrar que a massa e a inércia da matéria não lhe pertencem, na realidade, que é um luxo de empréstimo com que ela se engalana, que essa massa, a constante por excelência, é, ela própria, suscetível de alteração, poderíamos dizer que a matéria não existe. Ora, é precisamente isso que se anuncia.”(Poincaré, Henri. 1988, p.177).

O instinto dos físicos, na época, levava-os a ainda acreditar na possibilidade de se determinar o movimento absoluto da Terra; Lorentz, a partir dos insucessos a esse respeito, admite essa impossibilidade de movimento absoluto como postulado e como consequência explica:

“ ... todo átomo material seria formado por elétrons positivos, pequenos e pesados, e por elétrons negativos, grandes e leves, e, se a matéria sensível não nos parece eletrizada, é porque os dois tipos de elétrons são aproximadamente em número igual. Nesse sistema, não existe verdadeira matéria, somente buracos no éter”.(Lorentz apud Poincaré, Henri. 1988, p.180).

Na afirmação de Lorentz encontra-se a necessidade, que não foi somente dele, mas da comunidade científica da época de conservar a teoria, em manter a “existência” do éter. Ou seja, surge com maior intensidade a tendência em manter o paradigma(Kuhn), que propriamente a busca incessante pela refutação, ou a própria refutação, de uma teoria que parecia desabar com testes a que estaria sendo submetida(Popper).

Uma grande contribuição de Lorentz à física foi sua interpretação atomística das equações de Maxwell em termos de cargas e correntes transportadas por partículas fundamentais, que chamou partículas carregadas em 1892, íons em 1895 e, então o que deu nome à teoria, chamou-as de elétrons. Em 1892 Lorentz publica seu primeiro artigo sobre a teoria eletromagnética atomística, a experiência de Michelson-Morley já fora realizada e Lorentz se mostrava preocupado :

“Esta experiência me intriga há muito tempo; por fim, só consegui pensar numa maneira de reconciliá-la com a teoria de Fresnel, que consiste na suposição de que a linha que une dois pontos de um corpo sólido, se inicialmente é paralela à direção do movimento da terra, não conserva o mesmo comprimento quando é subseqüentemente rodada de 90°.” (Lorentz apud Pais, Abraham. 1995, p.140).

E de acordo, com hipóteses de Lorentz, se o comprimento nessa última posição for l , então a hipótese de Fresnel é mantida se o comprimento na posição inicial for dado por :

$$l' = l \left(1 - \frac{v^2}{2c^2} \right) \quad (2.3)$$

A equação é conhecida como a contração de Lorentz-FitzGerald na segunda ordem de aproximação em v/c . Segundo essa hipótese de contração, o movimento das franjas não teria aparecido na experiência de Michelson-Morley devido a uma compensação entre o efeito da velocidade da Terra e a alteração do comprimento do braço do interferômetro na mesma direção. Para explicar esse resultado é necessária a existência do éter, pois Lorentz tinha suposto que as forças eletromagnéticas e as forças moleculares atuam por meio de uma intervenção do éter.

A citação de Lorentz sobre a conciliação entre a experiência e a teoria de Fresnel reafirma a segurança no paradigma, nos modelos (matriz disciplinar). Há uma preocupação em conciliar a experiência, os resultados com os modelos já consolidados.

Quem na verdade primeiro propõe a hipótese da contração foi FitzGerald em 1889³ :

“Li com muito interesse a experiência maravilhosamente delicada dos srs. Michelson e Morley para tentar decidir a importante questão de como o éter é arrastado pela Terra. O resultado parece ser oposto ao de outras experiências, mostrando que o éter só pode ser arrastado no ar numa extensão desprezível. Eu sugeriria que o comprimento dos corpos materiais se modifica (na direção de seu movimento no éter) de uma quantidade que depende do quadrado da razão entre as suas velocidades e a da luz. Sabemos que as forças elétricas são afetadas pelo movimento dos corpos eletrificados em relação ao éter, e parece ser uma suposição não improvável que as forças moleculares sejam afetadas pelo movimento e que, em consequência, o tamanho do corpo se altere. Seria muito importante que algumas experiências seculares sobre atrações elétricas entre corpos permanentemente eletrificados, como num eletrômetro de quadrante muito delicado, pudessem ser realizadas em zonas equatoriais, para se observar se existe alguma variação diária ou anual da atração - diária, por causa do fato de a rotação da Terra ser adicionada ou subtraída à respectiva velocidade orbital, e anual, de forma similar, para a sua velocidade orbital e o movimento do sistema solar.” (FitzGerald apud Pais, Abraham. 1995. p.139).

Percebe-se que FitzGerald já formulara a hipótese da contração, e acreditava na existência do éter; então os resultados obtidos posteriormente por Lorentz estão de acordo, e tanto Lorentz quanto FitzGerald salvam o éter devido a sua intervenção dinâmica. Todavia, Lorentz não conhecia esse artigo de FitzGerald em 1892, e em 1894 toma conhecimento da hipótese de contração de FitzGerald em um artigo de Lodge, de 1893; então escreve a FitzGerald e diz que havia chegado ao mesmo resultado e pergunta onde ele havia publicado suas idéias para que pudesse citá-las. FitzGerald responde a Lorentz alguns dias depois e diz que enviara seu artigo à Science, mas nem sabia se fora publicado, ainda afirma ter certeza de que a publicação do artigo de Lorentz é anterior a

³ Em seu artigo, publicado pela revista americana Science, com título “O éter e a atmosfera terrestre”. (FitzGerald apud Pais, Abraham. 1995, p.139)

qualquer publicação impressa dele. Ainda se mostra extremamente feliz com os resultados de Lorentz e por saber que o mesmo concorda com seus resultados:

"por que aqui, pelo contrário, alguns riem de mim por causa dessa idéia."(FitzGerald apud Pais, Abraham. 1995, p.141).

Num ensaio em 1895 tem início o caminho de Lorentz para as suas transformações, sua outra grande contribuição que relaciona um conjunto de sistemas de coordenadas de espaço-tempo (x', y', z', t') com outro (x, y, z, t) que se move em relação ao primeiro com velocidade constante v . Neste artigo de 1895, Lorentz demonstra o teorema dos estados correspondentes, onde um sistema em repouso em relação ao éter num sistema de coordenadas (x, y, z, t) tem seus campos elétrico e magnético, e deslocamento elétrico $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{D})$ como função de (x, y, z, t) e considerando um outro sistema (x', y', z', t') que está em movimento em relação ao primeiro com velocidade v , existe um estado correspondente no segundo sistema, para primeira ordem em v/c , onde seus campos elétrico, magnético e deslocamento elétrico $(\vec{E}', \vec{H}', \vec{D}')$ são as mesmas funções de (x', y', z', t') , assim como $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{D})$, são de (x, y, z, t) . Para isso propôs transformações, onde:

$$\vec{r}' = \vec{r} - v t \quad (2.4)$$

$$t' = t - v \frac{\vec{r}}{c^2} \quad (2.5)$$

$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{H}}{c} \quad (2.6)$$

$$\vec{H}' = \vec{H} - \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c} \quad (2.7)$$

Lorentz chamou t de tempo geral e t' de tempo local. Para ele havia um único tempo verdadeiro, que seria t . É realmente difícil interpretar realisticamente o tempo t' para Lorentz, para quem esse tempo tem apenas função auxiliar no sistema de referência em movimento, ou seja uma variável "fictícia".

Em seu artigo de 1895, introduz um postulado da força que uma partícula com carga e e velocidade v está submetida, $\vec{F} = e \left(\vec{E} + \vec{V} \times \frac{\vec{H}}{c} \right)$ que é conhecida como força de Lorentz.

Finalmente em 1904 escreve suas transformações definitivas⁴, fixando o valor de ϵ como um; junto com uma proposta sobre a forma e a estrutura do elétron com idéia fundamental baseada na contração das distâncias e na dilatação do tempo .

A teoria de Lorentz é sintomática de um período de crise com tentativas de manter um paradigma à luz do mecanicismo, e outro paradigma surgindo, que levou a física a abandonar uma visão onde os constituintes eram massas inerciais, discretas ou contínuas, que se movimentavam segundo as leis da mecânica, sob influência de forças de contato ou à distância; e apresenta uma visão eletromagnética onde as realidades físicas eram o éter eletromagnético e as cargas elétricas, e as leis da natureza eram redutíveis às leis do campo eletromagnético a partir das quais se tentava estabelecer as propriedades do éter e de sua interação com as cargas.

Em 1900 Poincaré tem nos seus trabalhos muitas questões sobre o éter; no discurso inaugural do Congresso de Paris de 1900 ele já perguntara:

“Existe realmente o éter ?”(Poincaré, Henri apud Pais, Abraham. 1995, p.145).

Mas percebe-se bem a necessidade que tinha, então, o éter de ser um suporte material:

“ Sabemos bem de onde nos vem a crença no éter. Se a luz leva vários anos para chegar de uma estrela distante até nós, durante esse período de tempo ela não mais estará na estrela e não estará, ainda, na Terra. Mas terá que estar em algum lugar e sustentada, por assim dizer, por algum suporte material.”(Poincaré, Henri. 1988, p.132).

⁴ Em 1899 Lorentz escreve as equações de transformação na forma: $x' = \epsilon\gamma(x - vt)$, $y' = \epsilon\gamma$, $z' = \epsilon\gamma$ e $t' = \epsilon\gamma(t - vx/c^2)$, onde ϵ é um fator de escala que ele afirmara ter que ser bem definido, que só seria determinado “por um conhecimento mais profundo dos fenômenos”.(Lorentz apud Pais, Abraham. 1995, p.143).

Essa exigência do éter como suporte é característica também de Lorentz, para quem o éter é um substrato para a propagação do campo, suporte para a propagação das ondas eletromagnéticas.

Em relação ao movimento absoluto; Poincaré postula o “princípio da relatividade” como uma lei geral da natureza, onde a impossibilidade de colocar em evidência experimental o movimento absoluto da Terra é uma lei geral da natureza, e a admite sem restrição. Sendo assim, a hipótese da contração de Lorentz-FitzGerald para explicar essa impossibilidade experimental fica sem sentido, já que postulou esse “princípio da relatividade”. No que diz respeito às transformações ele as deduz a partir do Princípio da mínima ação, uma preocupação mecanicista. Com Poincaré o tempo local é tratado como um conceito físico:

“Considere dois observadores em movimento relativo uniforme que desejam acertar seus relógios por meio de sinais luminosos. Relógios acertados deste modo não apresentarão o tempo verdadeiro, mas, em vez disso, mostrarão aquilo que podemos chamar tempo local. Todos os fenômenos vistos por um observador estão atrasados em relação ao outro, porém atrasados de igual modo, e, como exigido pelo princípio da relatividade, o observador não pode saber se está em repouso ou em movimento absoluto.”(Poincaré, Henri apud Pais, Abraham. 1995, p.146).

Poincaré nessa citação parecia estar próximo da teoria da relatividade, se não fosse sua observação afirmando que o raciocínio acima não era suficiente e, então seriam necessárias hipóteses complementares. Outra visão importante de Poincaré foi em relação à constância da velocidade da luz, em 1904 ele afirma:

“Os experimentos parecem teimar em sugerir a impossibilidade de detectar o movimento absoluto”(Poincaré, Henri apud Villani, A., mai/1981, p.35).

Então sugere a construção de uma nova mecânica com a velocidade da luz sendo um limite não ultrapassável. Todavia, não há o rompimento imediato com o mecanicismo, vê-se características de um Poincaré resistente a modificação do paradigma, porém preocupado como o abalo, os

“atentados” ao paradigma vigente, e demonstra mais uma vez sua preocupação com a instabilidade das teorias quando em seguida acrescenta :

“apresso-me a dizer que ainda não chegamos lá, e que nada ainda prova que os velhos princípios não vão emergir vitoriosos e intactos dessa batalha.”(Poincaré, Henri apud Pais, Abraham. 1995, p.146).

CAPÍTULO 3

TEORIA DA RELATIVIDADE

Neste capítulo são abordados alguns dos principais aspectos da teoria da relatividade no afã de caracterizar os aspectos e os conceitos físicos e matemáticos envolvidos na teoria de forma simples, sem a inclusão das ferramentas matemáticas mais complexas que envolvem a física teórica.

3.1 – OS POSTULADOS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Baseado na percepção de que a situação da Física não estava em condições de oferecer um modelo completo o bastante para a explicação de resultados importantes, Einstein formula os postulados da relatividade restrita, e conseqüentemente a inconsistência do movimento absoluto e a perda de função do éter, que não pode ser um referencial absoluto para o eletromagnetismo e já não é suporte para a radiação. Abandona-se o sistema preferencial de coordenadas em repouso absoluto da mecânica newtoniana em favor de um conjunto infinito de referenciais inerciais. O novo modelo é baseado inteiramente nos dois postulados¹ (Einstein, A. apud Bassalo, J.M.F., 1987):

Princípio da Relatividade :” *As leis pelas quais os sistemas físicos experimentam mudanças não são afetadas, se essas mudanças de estado são referidas a um ou outro de dois sistemas de coordenadas em movimento de translação uniforme*”.

Constância da velocidade da luz :”*Qualquer raio de luz move-se em um sistema ‘estacionário’ de coordenadas com a velocidade determinada c , quer seja o raio emitido por um corpo estacionário ou em movimento*”.

A impossibilidade de detectar o movimento absoluto está no princípio da relatividade, que afirma que esse movimento não tem significado físico. Uma necessidade imposta pelo princípio da relatividade é o abandono do éter, pois as ondas eletromagnéticas não precisam dele como suporte para se

¹ Einstein em seu artigo de junho/1905. Einstein apud Bassalo, 1987.

propagar, já que se o fosse necessário o éter seria um referencial privilegiado. Outro importante aspecto está no valor fixo da velocidade da luz independente do estado de movimento da fonte de emissão.

Também através desses postulados Einstein determina transformações lineares que são as próprias transformações de Lorentz, e então continua examinando os efeitos dessas transformações encontrando a contração de Lorentz-FitzGerald e um outro resultado que é a dilatação do tempo. Porém, não se pode afirmar, como esperaria Popper, que a teoria da relatividade einsteiniana é apenas uma continuidade de teorias anteriores, já propostas por Lorentz, FitzGerald ou Poincaré. Pois, para Lorentz e FitzGerald a contração seria um efeito real e dinâmico, considerando que as forças moleculares para um corpo em movimento uniforme seriam diferentes das forças para o mesmo corpo em repouso, enquanto com a teoria da relatividade restrita a contração é uma consequência dos dois postulados. Assim como Poincaré não aceita a identidade física entre os dois sistemas de referência considerados nas transformações de Lorentz, e para ele continua existindo um sistema em repouso. Ainda outra descontinuidade da relatividade restrita em relação a Poincaré, é que Poincaré não questiona o éter, nem o tempo absoluto da mecânica newtonina, que por sua vez, perdem o significado com a mecânica relativística. Esse e outros fatores, como a diferença nas atribuições dadas por Einstein e Lorentz à natureza do tempo nas transformações de Lorentz são aspectos demonstrativos da singularidade da teoria de Einstein e dos diferentes conceitos hauridos da teoria da relatividade.

Antes da teoria da relatividade de Einstein, a Física vinha apresentando sinais de que passara por uma crise, como evidenciou Poincaré, crise esta caracterizada pelos resultados experimentais encontrados por Bradley, Arago, Fizeau, Michelson-Morley, entre outros, que geraram diferentes hipóteses e constantes modificações sobre a natureza do éter evidenciando a instabilidade dos conceitos físicos envolvidos. Todavia, a teoria da relatividade se apresenta como um novo paradigma, oriundo dessa crise não solucionada, uma vez que rompe com conceitos da mecânica newtoniana como do espaço e o

tempo absolutos até então necessários, seja para Lorentz, Poincaré ou FitzGerald.

O fim do éter e a constância da velocidade da luz são elementos conseqüentes dos postulados e que rompem fortemente como os conceitos considerados anteriormente por Lorentz, Poincaré ou outros que propuseram teorias e modelos que estruturassem harmoniosamente as teorias existentes e os resultados experimentais encontrados.

3.2 – A EXPERIÊNCIA MICHELSON-MORLEY E O PENSAMENTO DE EINSTEIN

Um ponto muito discutido dentro da teoria de Einstein é se ele conhecia ou não o experimento de Michelson Morley antes de seu artigo de 1905 sobre a relatividade, no qual Einstein não fez qualquer menção ao experimento.

Em uma carta enviada a um historiador, escrita um ano antes de morrer, Einstein tocou pela última vez no assunto relativo a influência que obteve da experiência de Michelson-Morley:

“ O resultado de Michelson-Morley não teve influência considerável no meu desenvolvimento. Não me lembro nem mesmo se tinha conhecimento dele quando escrevi o primeiro artigo sobre o tema (1905). A explicação deve-se a que, por razões gerais, eu estava firmemente convencido da não - existência do movimento absoluto; meu problema residia em como reconciliar isso com nosso conhecimento da eletrodinâmica. Talvez assim seja possível entender por que razão, na minha luta pessoal, não desempenhou qualquer papel decisivo, a experiência de Michelson.”(Einstein, A. apud Pais, A., 1995, p.200).

Grandes cientistas, como Millikan, apontaram para uma ligação direta entre o princípio da relatividade e o experimento de Michelson-Morley:

“A Teoria da Relatividade Especial pode ser considerada...essencialmente uma generalização a partir do experimento de Michelson... Descartando todas as concepções a priori sobre a natureza da

realidade... Eisntein tomou como ponto de partida fatos experimentais cuidadosamente testados..., independentemente deles parecerem razoáveis ou não... Mas este experimento(M-M), depois de ter sido realizado com extraordinária habilidade e refinamento pelos seus autores, deu a resposta definitiva... que não existe nenhuma velocidade observável da terra em relação ao éter. Este incrível e aparentemente inexplicável fato experimental perturbou violentamente a Física do séc. XIX e por quase vinte anos os físicos... se esforçaram por torná-lo razoável. Mas Einstein nos chamou atenção: vamos aceitá-lo como um fato experimental estabelecido e tirar as suas inevitáveis consequências... Assim nasceu a teoria da Relatividade Especial” (Millikan, R. A. apud Villani, A., mai/1981, p.36).

Outra opinião afim é refletida a partir do seguinte comentário de M. Von Laue:

“O resultado negativo do experimento de M. M., forçou a teoria de Lorentz do éter estacionário a fazer uma nova hipótese, que conduziu à teoria da Relatividade. Dessa forma o experimento se tornou, por assim dizer, o experimento fundamental da T.R., porque é partindo dele que se atinge quase imediatamente a derivação das transformações de Lorentz, que contém o princípio da relatividade” (M. Von Laue, R. A. apud Villani, A., mai/1981, p.36).

Segundo Eisntein, os resultados experimentais que teriam exercido maior influência para seu pensamento seriam as observações da aberração estelar e as medidas de Fizeau sobre a velocidade da luz na água em movimento. Quanto ao experimento de Michelson-Morely, este só teria chamado sua atenção após 1905.

Sommerfeld afirmara, em uma obra publicada em 1923,² que Einstein em 1905, não conhecia o trabalho de Lorentz de 1904 sobre suas transformações. Já em sua visita ao Brasil em 1925, Einstein diz ao professor Azevedo Amaral, professor de Cálculo e Geometria Analítica da Escola Nacional de Engenharia,

² Livro editado pela Methuen and Company, Ltd. em 1923 e republicado em 1952 pela editora Dover, no qual foram reunidos alguns trabalhos de Einstein, Lorentz e Minkowski, com notas de Arnold Sommerfeld.

“O princípio da Relatividade restrita não foi lido nas equações de Lorentz, como afirmara Bergson; mas como resultado de longas meditações sobre a experiência de Michelson” (Einstein, A apud Bassalo, J M F, 1987).

Quando Azevedo Amaral perguntou a Einstein o que o levava à teoria da relatividade, ele responde que teria feito duas meditações fundamentais, uma teria sido aos 17 anos a respeito da possibilidade de se viajar com velocidade idêntica à da luz; a segunda meditação seria sobre a experiência de Michelson.

Quanto ao experimento de Michelson-Morley é bem provável que, mesmo que Einstein o conhecesse ele não o comentara porque o experimento realmente não teria tido qualquer influência em seu raciocínio, em sua caminhada até a teoria da relatividade. Porém, ele teria sido um ponto positivo em favor da sobrevivência e validade da teoria. Conforme Einstein³:

“Nunca é fácil falar do modo como cheguei à teoria da relatividade, pois várias complexidades ocultas motivam o pensamento humano, e elas agiram com pesos diferentes.” (Einstein, A apud Pais, A., 1995, p.152).

A reação da comunidade científica ao princípio da relatividade e forma como a mesma foi, e é, divulgada tanto nos artigos científicos, quanto em livros didáticos reafirma a visão kuhniana de como a ciência está sujeita não somente aos argumentos lógico-matemáticos e racionais mas também às subjetividades e mais ainda à persuasão. A maneira como a influência do experimento Michelson-Morley se relaciona com o princípio da relatividade introduz no ensino da ciência uma série de “achismos” e opiniões que contrariam os próprios relatos de Einstein sobre a influência que recebera de tal experimento. E o que finalmente é descrito nos livros didáticos é uma interpretação simplificada dos comentários e análises de grandes cientistas, geralmente privilegiando em enfoque empirista da ciência, colocando o experimento de Michelson-Morley na gênese da teoria da relatividade, e esta como um arcabouço teórico que sistematizou as concepções de Poincaré, Lorentz e FitzGerald, dando finalmente a resposta correta ao experimento.

³ Conferência de Kyoto em 1922; Einstein, A. apud Pais, A., 1995, p.152.

Enquanto poderia se estar utilizando a teoria da relatividade para nortear discussões sobre a evolução do conhecimento científico, o real âmbito em que a teoria da relatividade estava sendo formulada, e o significado do experimento Michelson-Morley para a teoria.

3.3 – AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ*

Considera-se dois sistemas de coordenadas Σ e Σ' (figura 3.1), que se movem um em relação ao outro, na direção x , com velocidade \vec{v}_x . Por simplicidade, considera-se apenas eventos localizados sobre o eixo x , sendo que no tempo $t = t' = 0$ as origens e eixos dos sistemas são coincidentes. Um determinado evento ocorre e em relação ao sistema Σ é determinado pelas coordenadas x e t ; este mesmo evento é registrado pelo sistema Σ' e dado pela abscissa x' e pelo tempo t' .

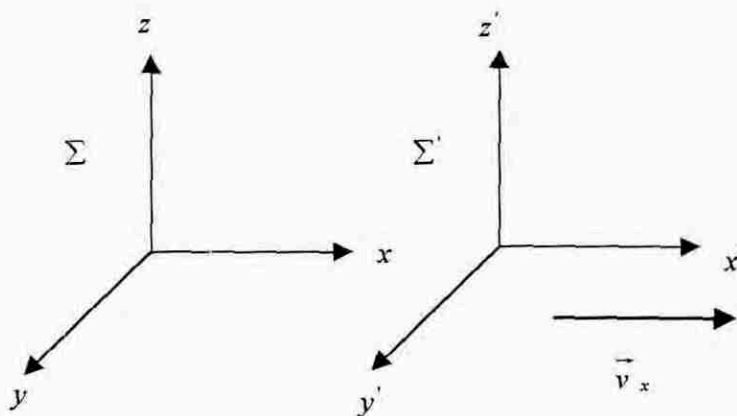


Figura 3.1 - Dois sistemas de coordenadas que se movem um em relação ao outro, na direção x , com velocidade uniforme \vec{v}_x .

* A leitura desta seção pode ser suprimida sem perda de continuidade ou prejuízo no entendimento do trabalho.

Procura-se determinar as equações de transformação que relacionam as coordenadas do espaço-tempo de um evento visto por um observador localizado em Σ , com as coordenadas do mesmo evento para um observador em Σ' . Nesse intuito serão considerados os postulados da relatividade e a hipótese da homogeneidade, ou seja, todos os pontos no espaço e tempo são equivalentes, assim o resultado de uma medida de comprimento ou de um intervalo de tempo não deve depender de onde e quando as medidas são realizadas.

Considera-se um sinal luminoso avançando ao longo de x positivo se propagando segundo a equação:

$$x = ct \quad (3.1)$$

Considerando os postulados da relatividade, o mesmo sinal luminoso deve também propagar-se em relação a Σ' com a velocidade c , e a propagação em Σ' é descrita por:

$$x' = ct' \quad (3.2)$$

As equações podem ser escritas como:

$$x - ct = 0 \quad (3.3)$$

$$x' - ct' = 0 \quad (3.4)$$

As coordenadas do espaço-tempo que satisfazem a equação (3.3) também devem satisfazer a equação (3.4). Dessa forma pode-se escrever:

$$(x' - ct') = \zeta(x - ct) \quad (3.5)$$

Sendo ζ uma constante.

Considerando o mesmo sinal luminoso se propagando ao longo de x negativo, obtém-se de forma análoga:

$$(x' + ct') = \eta(x + ct) \quad (3.6)$$

Onde η é uma constante.

Somando as equações (3.5) e (3.6) obtém-se:

$$x' = \frac{x(\zeta + \eta) - ct(\zeta - \eta)}{2} \quad (3.7)$$

E subtraindo essas mesmas equações (3.5) e (3.6) tem-se:

$$ct' = \frac{-x(\zeta - \eta) + ct(\zeta + \eta)}{2} \quad (3.8)$$

No intuito de simplificar os cálculos introduz-se as seguintes constantes:

$$a = \frac{(\zeta + \eta)}{2} \quad (3.9)$$

$$b = \frac{(\zeta - \eta)}{2} \quad (3.10)$$

Pode-se então substituir as equações (3.9) e (3.10) nas equações (3.7) e (3.8) eliminando as constantes ζ e η , encontra-se:

$$x' = ax - bct \quad (3.11)$$

$$ct' = act - bx \quad (3.12)$$

Sendo conhecidas as constantes a e b pode-se obter as coordenadas espaço-tempo do sistema de referência Σ a partir das coordenadas do sistema Σ' , e vice-versa.

Considerando a origem do sistema Σ' em $x' = 0$, das equações (3.11) e (3.12) é possível escrever:

$$\frac{x}{t} = v_x = \frac{bc}{a} \quad (3.13)$$

Sendo v_x a velocidade relativa dos dois sistemas.

Considerando um observador no referencial Σ observando o sistema Σ' , num determinado instante $t = 0$. Assim da equação (3.11) tem-se:

$$x' = ax \quad (3.14)$$

Nesse determinado instante $t = 0$, um observador em Σ' mede a distância entre dois pontos no seu referencial e encontra $x' = 1$, assim a partir da equação (3.14) pode-se escrever:

$$\Delta x = \frac{1}{a} \quad (3.15)$$

Fazendo o mesmo processo para um instante $t' = 0$, ou seja para um observador em Σ' , obtém-se a partir da equação (3.12):

$$t = \frac{bx}{ac} \quad (3.16)$$

Substituindo a equação (3.16) na equação (3.11), tem-se:

$$x' = ax - \frac{bcx}{ac} \quad (3.17)$$

Considerando a equação (3.13) e multiplicando o segundo termo da parte direita da equação acima por $\frac{ac}{ac}$, encontra-se:

$$x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) x \quad (3.18)$$

De acordo com a hipótese da homogeneidade para $t' = 0$ tem-se $\Delta x' = \frac{1}{a}$, assim a equação torna-se:

$$x' = \frac{1}{a} = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) x \quad (3.19)$$

Que pode ser escrita como:

$$a^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (3.20)$$

A equação acima juntamente com a equação (3.13) permite a determinação das constantes a e b :

$$a = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.21)$$

$$b = \frac{\frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.22)$$

Introduzindo as equações acima em (3.11) e (3.12), tem-se:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.23a)$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.24)$$

Que são as transformações de Lorentz, podendo ser estendidas a eventos fora do eixo x acrescentando:

$$y' = y \quad (3.23b)$$

$$z' = z \quad (3.23c)$$

Para velocidades muito pequenas comparadas à velocidade da luz, ou seja, para $\frac{v}{c} \ll 1$, as equações (3.23) e (3.24) de transformação de Lorentz podem ser escritas, aproximadamente, como:

$$x' = x - vt \quad (3.25a)$$

$$y' = y \quad (3.25b)$$

$$z' = z \quad (3.25c)$$

$$t' = t \quad (3.25d)$$

Essas equações (3.25), representam matematicamente as equações de transformações de Galileu. Que podem conduzir, se analisadas isoladamente, a uma evidência de continuidade entre a mecânica newtoniana e a relativística. Todavia, com um pouco mais de acuidade na interpretação desse resultado, nota-se que o diferencial entre as teorias está no processo de formulação dessas equações, nos conceitos nele envolvidos, e não somente no produto. Os conceitos a partir dos quais essas equações foram deduzidas são diferentes. Ao contrário do que prevê a mecânica newtoniana, o tempo aqui não é uma grandeza universal, absoluta, e as equações surgem como consequência dos postulados.

3.3.1 Conseqüências das transformações de Lorentz

Uma das principais conseqüências das transformações de Lorentz está relacionada com as dimensões de um objeto quando colocado em movimento em relação a observadores localizados em sistemas referencias diferentes. Considera-se uma haste delgada de coordenadas fixas num sistema de referência Σ' que se movimenta com velocidade \overline{v}_x em relação a um sistema de coordenadas Σ como apresentado na fig. 3.2.

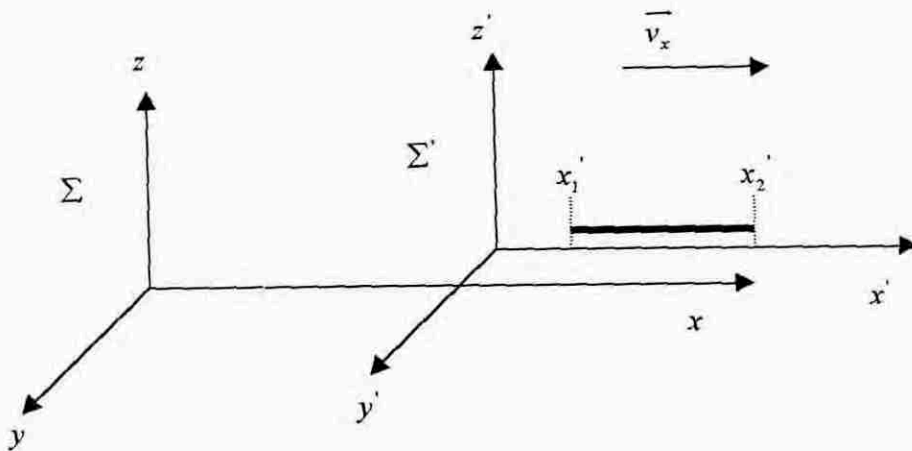


Figura 3.2 – Um haste em repouso sobre um sistema de referências Σ' , que se movimenta com velocidade \overline{v}_x em relação a outro sistema de referências Σ .

Utilizando as transformações de Lorentz, a relação encontrada entre a medida $(x'_2 - x'_1)$ do comprimento da haste para o observador em Σ' e a medida $(x_2 - x_1)$ obtida pelo observador no sistema Σ é a seguinte:

$$(x'_2 - x'_1) = (x_2 - x_1) \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (3.26)$$

O comprimento de um corpo medido em repouso em relação ao observador é máximo, e de acordo com um referencial em movimento esse corpo tem a medida de seu comprimento diminuída na direção do movimento por um fator $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. As medidas da haste ao longo dos eixos perpendiculares y e z não variam.

Como já foi discutido na primeira seção deste capítulo, esse resultado também fora encontrado por Lorentz e FitzGerald, todavia com explicações distintas, caracterizando a diferença de significado dos conceitos que surgem com os postulados da relatividade.

Outra consequência que aparece é a dilatação temporal. Supõe-se que inicialmente os dois sistemas Σ e Σ' tenham seus eixos e origens coincidentes nos instantes $t = t' = 0$, em seguida o sistema de referências Σ' é

colocado em movimento relativo ao sistema Σ com velocidade relativa \vec{v}_x , como apresentado nas figuras anteriores. Considera-se também, que cada observador localizado nos diferentes sistemas Σ e Σ' tenha um relógio. Em seguida a um determinado evento os dois observadores registram o intervalo de tempo desse acontecimento.

Seja dt o intervalo de tempo registrado pelo relógio em repouso em relação ao sistema Σ , e dt' o intervalo de tempo medido através do relógio em repouso em relação ao sistema Σ' , utilizando as transformações de Lorentz a relação entre as medidas para os intervalos de tempo no diferentes referenciais Σ e Σ' é dada por:

$$dt = \frac{dt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3.27)$$

Ou seja, a medida do intervalo de tempo registrada pelo observador em Σ é maior do que a atribuída pelo observador no referencial Σ' .

3.4 - PARADOXO DO GÊMEOS

Uma das peculiaridades previstas pela relatividade geral é o paradoxo dos gêmeos. Uma singularidade na teoria da relatividade que corrobora a existência de uma descontinuidade entre as teorias newtoniana e relativística, uma vez que esse paradoxo não existe a partir das considerações dos conceitos newtonianos.

Para compreender melhor tal questão considera-se dois irmãos gêmeos, sendo que em determinado momento de suas vidas um deles viaja para um planeta distante enquanto seu irmão permanece na Terra. Os gêmeos serão denominados, respectivamente, por $G1$ e $G2$. Após um dado período, $G1$ volta à Terra encontrando-se com $G2$. De acordo com a teoria da relatividade, o tempo passou mais devagar para $G1$, enquanto este viajara, que para seu irmão $G2$. Por conseguinte, o gêmeo que ficou na Terra estaria mais velho que seu irmão que retornou da viagem. Todavia, do referencial de $G1$, quem estaria em

movimento, viajando, seria seu irmão que permanecera na Terra, ou seja, para ele seu irmão é que estaria se movimentando, e portanto seria quem teria ficado mais jovem.

Assim um gêmeo estaria em repouso, ou em movimento retilíneo uniforme, enquanto o gêmeo viajante estaria em movimento sofrendo acelerações se afastando e voltando mais jovem ao encontro de seu irmão. Como determinar quem está se afastando? Parece existir uma contradição lógica, causada pela simetria entre as duas situações.

Considera-se que cada gêmeo carrega consigo um relógio, sendo que esses relógios foram sincronizados no sistema de origem dos gêmeos. O fato é, se o gêmeo *G1* permanecesse sempre com velocidade constante e em linha reta ele jamais se encontraria com seu irmão *G2*. Porém ao retornar para casa *G1* necessita mudar sua velocidade, e justamente no fator de que um dos relógios mudou de velocidade é que se encontra a não-simetria da situação.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Entre os séculos XIX e XX, como apresentado no capítulo II, havia indícios de uma crise na Física em relação aos conceitos de espaço e tempo e a natureza do éter. Essa era a visão de grandes representantes da Física, como Poincaré, que também demonstrou sua preocupação nesse sentido. Seu cunho convencionalista o fazia prosseguir, apesar de sua percepção dos sinais de uma crise séria da Física; para ele, estavam vivendo o período das dúvidas, perante as ruínas dos velhos princípios. Segundo Poincaré, não era a natureza que impunha os conceitos de espaço e tempo, mas éramos nós que os dávamos à natureza. Para ele, isto mostrava o porquê da falência de antigos princípios, já que estes eram imagens da natureza segundo a consciência do homem e não uma cópia ou “fotografia” da natureza. Tornando claro que estava aberto o espaço à uma revolução científica, nos termos da concepção kuhniana. Uma vez que a crise já existia, restava saber se realmente haveria um novo paradigma capaz de tomar o lugar dos conceitos e teorias que vinham se apresentando insuficientes e problemáticos.

Muitos são os pontos de desigualdades entre as teorias de Poincaré, Lorentz e Einstein, apontando mais uma evidência de um clima favorável às revoluções científicas e às rupturas epistemológicas. A forma de perceber o éter de diferentes maneiras até ser eliminado pela teoria de Einstein é um desses pontos de quebra entre as teorias.

A tendência em manter uma continuidade, as diversas reformulações na hipótese do éter, a segurança nos conceitos de espaço e tempo absolutos mostram o porquê as teorias de Einstein tiveram sua aceitação demorada, em virtude das numerosas tentativas de “segurar” o arcabouço formado pelos consolidados conceitos e teorias. O experimento de Miller¹, em 1921, é mais uma tentativa de afirmar a existência do éter. Sobre ele Einstein

¹ Experiência feita por Miller em abril de 1921 tem como resultado um vento de éter. Essa experiência chega ao conhecimento de Einstein em 1921 em sua visita à Universidade de Princeton.

comenta²: "*Raffiniert ist der Herr Gott, aber boshaft ist er nicht*".(Einstein, Albert apud Pais, Abraham. 1995, p.128).

Historicamente, a ciência tem caminhado em busca de leis imutáveis e verdades absolutas. Os períodos de crise, e as revoluções científicas em particular, contribuem para que essas verdades não se tornem mitos e acabem permanecendo apenas como verdades, que são construções humanas e, desta maneira, sujeitas a abalos e contestações. Ao contrário do que prevê Popper, nos anos que precedem a teoria da relatividade de Einstein e mesmo depois, não há uma incessante busca pela refutação, e sim a insistência em manter o paradigma do espaço e tempo absolutos e o éter, embora já desgastados com os resultados experimentais encontrados

Um ponto que aparentemente conduz à existência de continuidade é a aproximação das transformações de Lorentz para velocidades pequenas comparadas à da luz, pois recai nas transformações de Galileu. Entretanto, apesar da coincidência nas equações, os conceitos envolvidos são diferentes, modificaram o paradigma, ou seja, os conceitos utilizados como pontos de apoio pela comunidade científica.

É evidente que as inferências feitas neste trabalho referem-se apenas às concepções de Popper e Kuhn. O estudo deste tema do ponto de vista de outros epistemólogos abre novas e instigantes perspectivas para outros trabalhos. A interpretação e análise da teoria da relatividade através da epistemologia de Lakatos é um exemplo. O conceito de cinturão protetor do programa lakatosiano pode ser considerado nas explicações que envolvem as reformulações para a hipótese do éter; a segurança nos conceitos newtonianos de espaço e tempo não como um período de resistência ao paradigma típico da ciência normal e uma consecutiva crise desses conceitos e teorias como aqui realizados segundo a concepção kuhniana; porém sim, como determina o cinturão protetor de Lakatos, uma forma de evitar a refutação prematura dos conceitos newtonianos e de hipóteses auxiliares como a existência do éter.

Também um proveitosa discussão epistemológica pode ser obtida com o estudo das concepções de Gaston Bachelard, como o conceito de rupturas

² "O Senhor é sutil, mas não malicioso"(Einstein, Albert apud Pais, Abraham. 1995, p.128)

epistemológicas, com o propósito de caracterizar o comportamento da comunidade científica frente ao surgimento de novos conceitos e teorias.

Outras questões como a adição relativística das velocidades, a relatividade da simultaneidade, sincronização de relógios em um referencial inercial, são pontos que não foram abordados no trabalho, e são excelentes elementos da relatividade para serem estudados e interpretados à luz da filosofia da ciência. Como o trabalho está voltado para temas relativos à relatividade restrita, um estudo posterior poderia ser dedicado também a relatividade geral, analisando questões como o paradoxo dos gêmeos, o efeito gravitacional da energia e o desvio para o vermelho.

Ainda elementos da teoria newtoniana poderiam ser melhor evidenciados através de um estudo como a experiência do balde. E em função de sua explicação para o fenômeno melhor evidenciar de que forma as concepções newtoniana e relativística se diferenciam, e se há realmente alguma possibilidade de continuidade; que em virtude dos elementos citados nesse trabalho, evidenciaram uma crise, e uma revolução científica com o surgimento da relatividade e os conceitos daí conseqüentes como novo paradigma.

Considerando a introdução da história e filosofia da ciência no ensino da física, seria bastante profícua a preparação de um módulo de ensino direcionado aos professores do ensino médio que desejem apresentar aos seus alunos a teoria da relatividade de forma contextualizada e correlacionada às concepções epistemológicas de Kuhn e Popper. Espera-se, enfim, de alguma forma estar contribuindo para despertar o interesse do professor do ensino médio para a importância e riqueza desse tema. Tendo em vista a ênfase que os Parâmetros Curriculares Nacionais vêm atribuindo à inserção da Física Moderna no ensino médio, deseja-se, no que se refere à Teoria da Relatividade, que o trabalho possa acrescentar elementos que facilitem também aos autores de livros didáticos uma transposição didática do saber sábio ao saber a ensinar, porém mais fiel do que aquela geralmente apresentada nos livros universitários. Nestes últimos há uma correlação indevida do experimento de Michelson-Morley com a gênese da Teoria da Relatividade. E assim, como a transposição didática é inevitável, almeja-se que os professores utilizem a história e a filosofia da

ciência para fazer o que Chevallard chama de “vigilância epistemológica”. Ou seja, refletir continuamente sobre o que seria possível fazer em prol de um ensino de qualidade.

BIBLIOGRAFIA

- ASSIS, André Koch Torres. Uma Nova Física. São Paulo: Perspectiva, 1999.
- BASSALO, José Maria F. A Crônica da Relatividade Restrita, In: *Crônicas Da Física*. Belém: UFPA. 1987, p.128 -161.
- EINSTEIN, Albert, INFELD, Leopold. A Evolução da Física. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.
- EINSTEIN, Albert. A Teoria da Relatividade Especial e Geral. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.
- EPSTEIN, Isaac. Revoluções Científicas. São Paulo: Ática, 1988.
- KUHN, Thomas S. A Estrutura das Revoluções Científicas. São Paulo: Perspectiva, 1991.
- KUHN, Thomas S. A Função do Dogma na Investigação Científica. In: MERTONS, R. K., KUHN, T. S., HAGSTROM, W.O. et al. *A Crítica da Ciência*. Rio de Janeiro: Zahar, 1979. p.53-80.
- KUHN, Thomas S. Lógica da Descoberta ou Psicologia da Pesquisa?. In: LAKATOS, Imre, MUSGRAVE, Alan. *A Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento*. São Paulo: Cultrix, 1979. p.5-32.
- KUHN, Thomas S. Reflexões sobre os meus Críticos. In: LAKATOS, Imre, MUSGRAVE, Alan. *Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento*. São Paulo: Cultrix, 1979. p.285-343.
- LAKATOS, Imre. O Falseamento e a Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica. In: LAKATOS, Imre, MUSGRAVE, Alan. *Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento*. São Paulo: Cultrix, 1979. p.109-243.
- LÉNINE, V.I. A Moderna Revolução Nas Ciências Da Natureza E O Idealismo Filosófico, In: Materialismo E Empiriocriticismo. Lisboa: Avante. 1982, cap. V, p.190-220.
- LOPES, Alice Ribeiro Casimiro. Bachelard: O Filósofo da desilusão. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis: UFSC, dez/1996, v.13,n.3, p.248-273.
- OSTERMANN, Fernanda. A Epistemologia de Kuhn. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis: UFSC, dez/1996, v.13,n.3, p.184-196.

- PAIS, Abraham. A Ciência e a Vida de Albert Einstein. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.
- PEDUZZI; Luiz O. Q. A teoria da relatividade especial: contexto histórico e conceitos básicos. In: As concepções Espontâneas, a Resolução de Problemas e a História e Filosofia da Ciência em um curso de Mecânica. Tese (doutorado em Educação) – Universidade Federal e Santa Catarina. Florianópolis, 1998.
- PELUSO, Luis Alberto. A Filosofia de Karl Popper. Campinas: Papirus, 1995.
- PIETROCOLA, Maurício. Fresnel e o Arrastamento Parcial do Éter: A Influência do Movimento da Terra sobre o Propagação da Luz. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis: UFSC, ago/1993, v.10, n.2, p.157-172.
- POINCARÉ, Henri. A Ciência e a Hipótese. Brasília: UNB, 1988. p.79-180.
- POPPER, Karl R. A ciência Normal e seus Perigos. In: LAKATOS, Imre, MUSGRAVE, Alan. A Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento. São Paulo: Cultrix, 1979. p.63-71.
- POPPER, Karl R. A Lógica da Pesquisa Científica. São Paulo: Cultrix, 1999.
- POPPER, Karl R. Conhecimento Objetivo. Belo Horizonte: Itatiaia, 1975.
- POPPER, Karl R. Conjecturas e Refutações. Brasília: UNB, 1994.
- RESNICK, Robert. Introdução à Relatividade Especial. São Paulo: Polígono, 1971.
- SILVEIRA, Fernando Lang da. A Filosofia da Ciência de Karl Popper: O Racionalismo Crítico. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis: UFSC, dez/1996, v.13,n.3, p.197-218.
- SPEYER, Eduard. Seis Caminhos a partir de Newton. Rio de Janeiro: Campus, 1995.
- VILLANI, A. A Visão Eletromagnética e a Relatividade. Revista de Ensino de Física. São Paulo: USP. vol. 7.n. 1, jun/1985. p.51 - 71.
- VILLANI, A. O Confronto Lorentz- Einstein E Suas Interpretações. Revista de Ensino de Física. São Paulo: USP. vol.3.n. 1, mai/1981. p. 31-43
- VILLANI, A. O Confronto Lorentz-Einstein E Suas Interpretações. Revista de Ensino de Física. São Paulo: USP. vol. 3.n. 2, jun/1981. p. 55-73.