



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
MESTRADO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E DA
MATEMÁTICA

**A HISTÓRIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL ANTES DE
EINSTEIN: ELABORAÇÃO DE UMA PROPOSTA PARA O
ENSINO SUPERIOR**

Alessandra Uchôa

Campina Grande
2013



ALESSANDRA UCHÔA

**A HISTÓRIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL ANTES DE
EINSTEIN: ELABORAÇÃO DE UMA PROPOSTA PARA O
ENSINO SUPERIOR**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como requisito para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins

Área de Concentração: Ensino de Física

Campina Grande
2013

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na sua forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL-UEPB

U17h Uchôa, Alessandra.
A história da relatividade especial antes de Einstein [manuscrito] : elaboração de uma proposta para o ensino superior / Alessandra Uchôa. – 2013.
69 f. : il. color.

Digitado
Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, 2013.

“Orientação: Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins, Departamento de Matemática.”

1. História da Ciência. 2. Formação docente. 3. Teoria da Relatividade. I. Título.

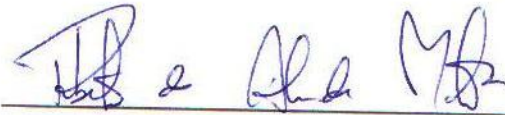
21. ed. CDD 530.11

ALESSANDRA UCHÔA

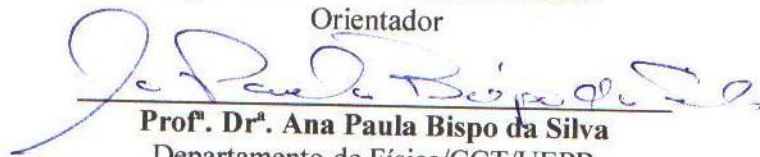
**A HISTÓRIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL ANTES DE
EINSTEIN: ELABORAÇÃO DE UMA PROPOSTA PARA O
ENSINO SUPERIOR**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como requisito para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins
Departamento de Física/CCT/UEPB
Orientador



Prof. Dr.ª Ana Paula Bispo da Silva
Departamento de Física/CCT/UEPB
Examinadora Interna



Prof. Dr. Breno Arsioli Moura
Centro de Ciências Naturais e Humanas/Universidade Federal do ABC
Examinador Externo

Dedico este trabalho aos meus avôs Epitácio Uchôa e Maria do Carmo Uchôa.

In Memoriam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter tornado possível a realização desse trabalho e por me manter firme diante das dificuldades surgidas durante o processo de realização do mesmo.

Ao orientador, Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins, agradeço os conhecimentos partilhados, o apoio constante, a paciência e generosidade e a transmissão de raros conhecimentos.

Agradeço à minha mãe, Elvira Carmen Uchôa, pelo carinho, pelo companheirismo, pelo seu amor, pela constante torcida e apoio. Obrigada, por ser essa mãe maravilhosa e guerreira. Muitos foram os desafios e dificuldades enfrentadas, mas a nossa união e fé só aumenta a cada novo obstáculo vencido.

Agradeço a José Wagner C. Silva pelo o apoio incondicional. Obrigada pelo seu amor, pelo seu carinho, pelos sorrisos, pela sua dedicação, pela sua compreensão e apoio. Obrigada Zé por estar comigo nos momentos difíceis e alegres. Obrigada por me fazer viver o amor verdadeiro.

E finalmente, agradeço ao Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática da UEPB, através do seu corpo docente, pelas contribuições acadêmicas que me impulsionaram a galgar os degraus dessa caminhada.

O Cristo não pediu muita coisa, não exigiu que as pessoas escalassem o Everest ou fizessem grandes sacrifícios. Ele só pediu que nos amássemos uns aos outros.

Chico Xavier

RESUMO

A relevância de ensinar conteúdos sobre as ciências tem se intensificado nas pesquisas educacionais das últimas décadas. Nesse sentido, a história e filosofia da ciência podem ser configuradas como sendo um interessante recurso pedagógico para tratar sobre a construção do conhecimento científico no ensino. Para subsidiar a nossa pesquisa, buscamos em Martins (1990; 2006), Matthews (1995), El-Hani (2006), elementos para entender o propósito dos estudos da História da Ciência, bem como justificar o seu uso no ensino da mesma. Na perspectiva da inserção da história da física moderna e contemporânea no curso de formação de professores, foi elaborado seis textos para ser aplicados para futuros professores de física. Os textos dos alunos contemplam os principais fatos históricos desde Aristóteles até Albert Einstein. Com este material pretendemos desmistificar a visão atual em que os créditos da teoria da relatividade especial são atribuídos somente a Albert Einstein, sem considerar, ou até mesmo diminuir, a contribuição de Poincaré, Lorentz e outros que foram de fundamental importância.

Palavra-Chave: História e Filosofia da Ciência, Teoria da Relatividade Especial e Transposição Didática.

ABSTRACT

The relevance of teaching about science has been an important issue for educational researches over the last decades. In this new approach, the use of history and philosophy of science is a promising pedagogical strategy to introduce them to treat about development of scientific knowledge in the context of education. To support our research, we in Martins (1990, 2006), Matthews (1995), El-Hani (2006), elements to understand the purpose of the study of the History of Science and justify its use in teaching science. In view of the insertion of the history of modern physics course in teacher training, was drafted six texts to be applied for future physics teachers. The student's texts include major historical events from Aristotle to Einstein. With this material we intend to demystify the current view that the claims of the theory of special relativity is attributed only to Albert Einstein, without considering, or even decrease, the contribution of Poincaré, Lorentz and others that were of fundamental importance.

Keyword: History and Philosophy of Science, Special Theory of Relativity and Didactic Transposition.

LISTA DE IMAGEM

1. Imagem1 – Isaac Newton	40
2. Imagem 2 – Aristóteles.....	41
3. Imagem 3 – Ptolomeu.....	41
4. Imagem 4 – Nicole de Oresmo.....	41
5. Imagem 5 – Galileo Galilei.....	42
6. Imagem 6 – Giordano Bruno.....	43
7. Imagem 7 – René Descartes.....	43
8. Imagem 8 – Fresnel.....	45
9. Imagem 9 – Stokes.....	46
10. Imagem 10 – Fizeau.....	48
11. Imagem 11 – Michelson & Morley.....	51
12. Imagem 12 – Miller.....	52
13. Imagem 13 – Henri Poincaré.....	56
14. Imagem 14 – Albert Einstein.....	66
15. Imagem 15 – Relógio da Torre (em Berna).....	67
16. Imagem 16 – Relógios sincronizados.....	67

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	6
RESUMO	8
INTRODUÇÃO	11
CAPÍTULO 1: A HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA NO CURSO DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES	13
1.1. Importância da história e filosofia da ciência na educação	13
1.2. A escolha do episódio histórico: por que a Teoria da Relatividade Especial?	19
CAPÍTULO 2: A TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA	23
2.1. O conceito de Transposição Didática	24
2.2. Os Saberes	25
2.2.1. O Saber Sábio	25
2.2.2. O Saber a Ensinar	26
2.2.3. O Saber Ensinado	27
2.3. Como o saber sobrevive	28
2.4. Obstáculos na transposição didática da História da Ciência	29
CAPÍTULO 3: A ELABORAÇÃO DO MATERIAL	31
<u>3.1.</u> Material da pesquisa.....	31
3.2. Material disponibilizado	344
CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS	1
APÊNDICE	39
TEXTO I: O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE NA MECÂNICA CLÁSSICA	40
TEXTO II: ÉTER	45
TEXTO III: EXPERIMENTOS PARA MEDIR A VELOCIDADE DA TERRA ATRAVÉS DO ÉTER	48
TEXTO IV: JULES HENRI POINCARÉ E A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL	56
TEXTO V: “SUR LA DYNAMIQUE DE L’ÉLECTRON”	60
TEXTO VI: EINSTEIN & POINCARÉ	66

INTRODUÇÃO

Minha trajetória como futura docente teve início em 2006 quando ingressei no curso de Licenciatura Plena em Física na Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, o qual concluí no primeiro semestre de 2011. Durante a Licenciatura, especificamente, nos dois primeiros anos, tive pouco contato com disciplinas que despertassem meu interesse em pesquisar a prática do professor, formação de professores e os processos envolvidos no ensino e na aprendizagem da Física.

Nos anos 2008 até 2011 participei como aluna de Iniciação Científica, não bolsista, junto aos projetos: História da Ciência e Ensino e Episódios Históricos e Ensino de Ciências: análises, contextos e aplicação em sala de aula (financiamento PROPESQ-UEPB), sob a coordenação e orientação da Prof^{ra}. Dr^a. Ana Paula Bispo da Silva. Agradeço profundamente a professora Ana Paula pelos ensinamentos prestados.

Durante esse período desenvolvi dois pequenos trabalhos de pesquisa relacionados às influências de Poincaré e de Lorentz no desenvolvimento da relatividade restrita antes de Einstein, que foram apresentados respectivamente na forma de pôster no Seminário Nacional de História da Matemática em 2009 (Bélem-PA) e no 12º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia em 2010 (Salvador-BA). E participei das atividades do grupo de pesquisa (GHCEN) e no final da graduação acabei fazendo a monografia sobre o tema “O éter e a teoria da relatividade de Poincaré”.

Após a graduação acabei ingressando na pós-graduação também na UEPB. No primeiro semestre de 2011, ingressei no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Estadual da Paraíba (Curso de Pós-Graduação *stricto sensu*, reconhecido pela CAPES desde a sua fundação em 2007).

O meu projeto de pesquisa para o mestrado foi elaborado, na perspectiva da inserção da História da Física Moderna e Contemporânea no curso de formação de professores, ou seja, propor textos sobre a história da teoria da relatividade especial, de uma forma que leve aos futuros professores de física a compreensão mais correta do processo de construção do conhecimento científico. Para elaborar essa pesquisa, buscou-se na didática da Ciência um instrumento teórico, a Transposição Didática.

Todas as etapas da construção dessa pesquisa foram realizadas sob a orientação do Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins.

A hipótese que sustentou essa pesquisa é de que uma abordagem histórica sobre a teoria da relatividade especial é capaz de propiciar ao estudante de física, uma visão geral sobre os mecanismos envolvidos na evolução do pensamento, os dilemas em torno do mesmo e as teorias que lhe serviram de base e principalmente que a relatividade especial foi um produto de construção de vários personagens. Consideramos a relatividade especial potencialmente significativo para os alunos de física e, principalmente, pelo interesse que despertou nos mesmos. A abordagem histórica e filosófica abre espaço para que sejam discutidos os meios pelos quais a ciência se desenvolve.

A utilização da História da Ciência como alternativa para o ensino das ciências, sobretudo na área da Física, nosso campo de atuação, vem ganhando espaço no meio acadêmico. Quando se busca utilizar a história e filosofia da ciência no ensino, antes de tudo, é necessário, segundo Forato (2009), superar ou compensar os obstáculos estruturais da abordagem histórico-epistemológica na educação científica.

Orientada por essa questão, organizamos o nosso trabalho em três capítulos. O capítulo 1 traz uma pequena discussão a respeito das razões da utilização da História e Filosofia da Ciência no Curso de Formação de Professores de Física. Para tanto recorri a referenciais sobre a utilização das histórias da ciência no ensino (EL-HANI, 2006; OLIVAL FREIRE, 2002; MATTHEWS, 1995; PEDUZZI, 2001, entre outros). No mesmo capítulo falamos das razões que nortearam para a escolha do episódio histórico teoria da relatividade especial. O referencial teórico para a construção da proposta é descrita no capítulo 2, a Transposição Didática. O capítulo 3 é destinado à elaboração do material.

Em cumprimento à finalidade do Mestrado Profissional em Ensino de Ciências, o presente trabalho deve resultar em um “produto educacional” elaborado com vistas à sua implementação no ensino. Tudo isso, através de ferramentas didáticas (uso de mídias audiovisuais, textos, jogo e etc.) que possibilitem um aprendizado mais coerente acerca da teoria citada, baseadas nos conhecimentos até então adquiridos através do presente estudo.

CAPÍTULO 1

A HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA NO CURSO DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES

A utilização da História e Filosofia da Ciência na educação científica é um discurso que perdura há algumas décadas, tanto no Brasil quanto em outros países. As pesquisas no âmbito do ensino de física indicam que o uso da História e Filosofia da Ciência (HFC) podem contribuir, dentre outros aspectos, na motivação do aprendiz e na construção do conhecimento. Além disso, o uso correto da História e Filosofia da Ciência também evidencia o processo lento de desenvolvimento de conceitos, até chegar às concepções atualmente aceitas, o que propicia um melhor aprendizado do próprio conteúdo da ciência pelo educando; se a meta dos cursos superiores é formar cidadãos críticos com formação cultural ampla, que compreenda a evolução do nosso entendimento de mundo, a história da ciência também pode contribuir para isso.

1.1. Importância da história e filosofia da ciência na educação

Os cursos de licenciatura têm sido objeto de várias pesquisas que procuram encontrar um meio de tornar os alunos mais motivados e facilitar o processo de aprendizado (MATTHEWS, 1994, 1995; SNOW, 1995; PEDUZZI, 1998; OSTERMANN, 2000; FREIRE Jr., 2002; PATY, 2002; TEIXEIRA, 2003, MASSONI, 2005, entre outros), principalmente no que se refere à formação de professores para a Educação Básica. As pesquisas têm mostrado a necessidade de formar professores mais críticos e conscientes do papel da ciência na sociedade e não apenas solucionadores de problemas.

A inserção da história e filosofia da ciência na educação foi discutida por diversos autores (entre eles, MATTHEWS, 1995, 1994; SIEGEL, 1979; MARTINS, 2007; EL-HANI, 2006; SEPULVEDA, EL-HANI, 2009, entre outros). Segundo Freire Jr. (2002), o volume de pesquisas nessa área, no Brasil, vem crescendo exponencialmente a cada ano, embora exista uma distância entre as proposições e as experiências práticas realizadas.

A associação entre as pesquisas em História e Filosofia da Ciência (HFC) e as pesquisas em ensino, mostram que o uso da História e Filosofia da Ciência podem contribuir na motivação do aluno na construção do conhecimento. Na dimensão que trata da formação de professores e as principais contribuições da História e Filosofia da Ciência ficam por conta das possibilidades de maior compreensão da natureza da ciência por parte dos docentes, uma vez que um grande número de pesquisas realizadas mostra que esses professores apresentam concepções *inadequadas* (ABD-EL-KHALICK E LEDERMAN, 2000) e *deformadas* (GIL-PÉREZ, 2001), que entram em choque com as epistemologias contemporâneas.

Matthews discute argumentos a favor da inserção da História e da Filosofia da Ciência (HFC) no ensino de ciências:

Os que defendem HFC tanto no ensino de ciências como no treinamento de professores, de uma certa forma, advogam em favor de uma abordagem contextualista, isto é, uma educação em ciências, onde estas sejam ensinadas em seus diversos contextos: ético, social, histórico, filosófico e tecnológico; o que não deixa de ser um redimensionamento do velho argumento de que o ensino de ciências deveria ser, simultaneamente, em e sobre ciências. (MATTHEWS, 1995, p. 166).

Acreditamos que a história e filosofia da ciência no ensino de ciência podem proporcionar para os estudantes uma concepção de que a construção do conhecimento científico não se dá de forma linear e principalmente que a ciência não é construída somente por gênios. O estudo dos episódios históricos nos oferece respaldo para que compreendamos quais os pontos convergentes e divergentes das teorias que os protagonizam. Além disso, nos capacita a olhar criticamente e sem anacronismo para as ideias de cada personagem. A História e Filosofia da Ciência permite discutir *a* e *sobre* a ciência, o que complementaria a compreensão do conceito (discutir a *ciência*) com os aspectos envolvidos na formulação, discussão, crítica e aceitação de conceitos e teorias (discutir sobre a *ciência*).

O documento oficial brasileiro, denominado Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN's), surgiu em 1996, como resposta à necessidade de uma referência curricular de qualidade para educação no Ensino Fundamental e Médio em todo o país.

Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais, tem ocorrido nas últimas décadas propostas de mudanças no Ensino de Ciências. Essas mudanças buscam uma

nova forma de concebê-lo, como resposta aos equívocos cometidos na educação, um desses equívocos é o enfoque do ensino de ciências voltado para a memorização. Os Parâmetros Curriculares Nacionais apresentam uma nova forma de imaginar a educação em ciências, que engloba a utilização da história da ciência no ensino.

- Compreender a Ciência como um processo de produção do conhecimento e uma atividade humana, histórica, associada a aspectos de ordem social, econômica, política e cultural;
- Identificar relações entre conhecimento científico, produção de tecnologia e condições de vida, no mundo de hoje e em sua evolução histórica, e compreender a tecnologia como meio de suprir as necessidades humanas, sabendo elaborar juízo sobre riscos e benefícios das práticas científico-tecnológicas; (BRASIL. MEC/SEF, 1998, p. 33).

Para que o conhecimento histórico que prevê os Parâmetros Curriculares Nacionais faça parte do Ensino Médio, é necessário que o professor, enquanto mediador do processo de aprendizagem, também tenha adquirido este conhecimento em sua formação.

Estudos na História e Filosofia da Ciência são um desafio para o professor, uma vez que raramente sua formação inicial contemplou estes campos de conhecimentos dedicados à natureza da Ciência. São estudos que proporcionam consistência à visão de Ciência do professor e uma distinção mais clara entre Ciência e natureza. [...] Ao mesmo tempo, o professor adquire subsídios para entender e dar exemplos da mútua dependência entre o desenvolvimento científico e tecnológico e da grande influência do conhecimento científico na modelagem das visões de mundo. (BRASIL. MEC/SEF, 1998. p. 89).

Além de conhecer os pressupostos gerais que norteiam a aplicação da História da Ciência ao Ensino¹, o futuro professor também deve conhecer elementos de História e Filosofia da Ciência, para poder contribuir na formação da cultura científica do aluno. A abordagem histórica e filosófica abre espaço para que sejam discutidos os meios pelos quais a ciência se desenvolve.

El-Hani (2006, p. 3) aprofunda que “(...) a formação de professores e pesquisadores tipicamente se limita aos aspectos teóricos e práticos das várias ciências e não fornece referenciais históricos e filosóficos necessários para suas práticas profissionais”.

¹ Pressupostos para aplicação de História e Filosofia da Ciência no ensino de Ciências podem ser vistos em no artigo de Pumfrey (1991).

A aplicação da História da Ciência deve acontecer sistematicamente com a Filosofia da Ciência, com o objetivo de ajudar na análise e principalmente na compreensão dos assuntos abordados. Entendemos que qualquer tipo de reflexão sobre a ciência, seja Histórica, Filosófica ou Didática, poderá ajudar numa formação crítica e mais humanista do educador.

Sendo assim, Matthews ainda ressalta (1995, p.165),

A história, a filosofia e a sociologia da ciência não têm todas as respostas para essa crise, porém possuem algumas delas: podem humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; podem tornar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; podem contribuir para um entendimento mais integral de matéria científica, isto é, podem contribuir para a superação do mar de falta de significação que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam (...).

Matthews (1994), fala da importância da história da ciência nos cursos de formação inicial como possibilidade de ampliar a visão de ciência por parte do professor. Consideramos, também, que a História e Filosofia da Ciência podem se constituir numa alternativa de explicar os significados de conceitos científicos, esclarecendo a construção histórica e a mutabilidade do conhecimento científico. Como consequência, acreditamos que a abordagem histórica de tais conceitos científicos pode ser uma alternativa didático-pedagógica capaz de ajudar na aprendizagem significativa destes conceitos.

A introdução da história da ciência tem sido recomendada na educação científica, pelo menos desde o início do século XX, como estratégia pedagógica que permite alcançar diversos propósitos formativos (LEDERMAN, 2007 *apud* FORATO, 2009, p.7).

Resumindo os vários aspectos da utilização de um ensino mais contextual, o fundador da revista *Science & Education*, Matthews mostra sete utilidades, que estão presentes em muitas obras a respeito da inclusão da História e Filosofia da Ciência no currículo de ciências:

1. A História promove melhor compreensão dos conceitos científicos e métodos.
2. Abordagens históricas conectam o desenvolvimento do pensamento individual com o desenvolvimento das idéias científicas.
3. A História da Ciência é intrinsecamente valiosa. Episódios importantes da História da Ciência e Cultura – a revolução científica, o darwinismo, a descoberta da penicilina etc. – deveriam ser familiares a todo estudante.
4. A História é necessária para entender a natureza da ciência.
5. A História neutraliza o cientificismo e dogmatismo que são encontrados frequentemente nos manuais de ensino de ciências e nas aulas.
6. A História, pelo exame da vida e da época de pesquisadores individuais, humaniza a matéria científica, tornando-a menos abstrata e mais interessante aos alunos.
7. A História favorece conexões a serem feitas dentro de tópicos e disciplinas científicas, assim como com outras disciplinas acadêmicas; a história expõe a natureza integrativa e interdependente das aquisições humanas (MATTHEWS, 1995, p.54).

Peduzzi (2001) defende como possíveis os benefícios da abordagem histórica em aulas de ciências. Acreditamos que a mesma não deve servir como uma panaceia, nem como um remédio para os problemas que estão presentes nas aulas de ciência. Entretanto, incorporá-la com cautela, por meio de bons recursos, pode contribuir de diversas maneiras, tais como:

- Incrementar a cultura geral do aluno, admitindo-se, neste caso, que há um valor intrínseco em se compreender certos episódios fundamentais que ocorreram na história do pensamento científico (como a revolução científica dos séculos XVI e XVII, por exemplo);
- Desmistificar o método científico, dando ao aluno os subsídios necessários para que ele tenha um melhor entendimento do trabalho do cientista;
- Mostrar como o pensamento científico se modifica com o tempo, evidenciando que as teorias científicas não são “definitivas e irrevogáveis”, mas objeto de constante revisão;
- Chamar a atenção para o papel de ideias metafísicas (e teológicas) no desenvolvimento de teorias científicas mais antigas;
- Contribuir para um melhor entendimento das relações da ciência com a tecnologia, a cultura e a sociedade (PEDUZZI, 2001, p.157-158).

Segundo Martins (1990), a História da Ciência pode contribuir em diversos âmbitos do ensino universitário, desde que isso ocorra por meio de materiais adequados e por professores preparados para tal. No caso particular da formação de professores de ciências, a discussão de episódios históricos pode facilitar a compreensão da Ciência como uma construção humana, que está sujeita a erros e acertos.

De acordo com Matthews (1995), não há indícios que possam alegar que o bom uso da história vinculada à ciência, possa trazer complicações para o entendimento do conhecimento científico. Pelo contrário, o mesmo menciona o sucesso do desempenho

do Projeto de Física de Harvard, como principal argumento contra as críticas levantadas por filósofos em determinadas épocas da história.

A integração da História e Filosofia da Ciência na educação foi proposta em diversos países, com intuito de buscar melhores resultados na educação em ciências, nos E.U.A., pela *American Association for the Advancement of Science* (AAAS) nos relatórios *Project 2061* (1989) e *The Liberal Art of Science* (1990); na Inglaterra, pelo *British National Curriculum Council* (NNC 1988); pelo *Science Council of Canada* (SCC 1984) e na Holanda, com o *PLON curriculum materials*.

As principais reformas curriculares de ciências foram feitas sem a participação de historiadores ou filósofos da ciência e algumas até sem o conhecimento de professores, com duas exceções: uma delas e o *projeto 2061* dos Estados Unidos (MATTHEWS, 1995).

Esses documentos oficiais descritos anteriormente têm a preocupação em estabelecer orientações, habilidades e competências no estudo de ciência, sob a perspectiva da História e Filosofia da Ciência, como sendo componente central para ensino de ciências. Como aponta Matthews (1995), foram desenvolvidas várias conferências e eventos que apontavam para uma aproximação da HFC com o ensino de Ciência:

O primeiro deles foi a realização da primeira conferência internacional sobre História, Filosofia, Sociologia e o Ensino de Ciências, na Universidade Estadual da Flórida, em novembro de 1989. O segundo, uma série de conferências patrocinadas pela Sociedade Europeia de Física sobre “A História da Física e o seu ensino”, realizadas em Páviacidade ao sul de Milão (1983), Munique (1986), Paris (1988), e Cambridge (1990). O terceiro, foi a conferência sobre História da ciência e o ensino de ciências, realizada na Universidade de Oxford em 1987 com o apoio da Sociedade Britânica de História da Ciência (MATTHEWS, 1995, p.166).

Apesar da inserção da História e Filosofia da Ciência no ensino de ciências não ser consensual, e sofrer críticas (MATTHEWS, 1995; KUHN, 1998; ABRANTES, 2002; FREIRE Jr., 2002). Mas, não encontramos resistências quanto à sua inserção na formação de professores de ciências. As objeções são relacionadas, em geral, na formação do cientista, do pesquisador em Física.

1.2.A escolha do episódio histórico: por que a Teoria da Relatividade Especial?

A teoria da relatividade especial é um dos tópicos da Física Moderna Contemporânea que mais influenciam os alunos de física na escolha da carreira científica. Apesar de ser um dos temas mais discutidos da Física Moderna Contemporânea na graduação em Física, o destaque dado a esse episódio histórico, nesta dissertação, tem um caráter pessoal.

A história da relatividade especial gera certo grau de estranheza e desconforto ao apresentar conceitos e ideias que fogem às concepções “clássicas” que encontramos nos livros acadêmicos, como por exemplo:

1. Em 1905, Albert Einstein, com apenas 26 anos, formulou a Teoria da Relatividade Especial (HALLIDAY, RESNICK & WALKER, 1993, p.125) **grifo nosso**.
2. (...) Albert Einstein propôs a teoria da relatividade restrita (...). Einstein surpreendeu o mundo científico ao mostrar que as velhas ideias a respeito da relatividade estavam erradas (...) (HALLIDAY, RESNICK & WALKER, 2003, p. 101) **grifo nosso**.
3. (...) A teoria relatividade restrita, desde a sua publicação por Einstein em 1905, tornou-se um lugar comum na física (...) foi Einstein quem anunciou a generalização decisiva abarcando todos os fenômenos físicos e não apenas a eletrodinâmica (...) (JACKSON, 1983, 388).

Os livros acadêmicos consultados não levam em consideração questionamentos históricos da relatividade especial ao apresentarem o conteúdo. O que se vê desses livros são concepções prontas e que devem ser aceitas como verdades sem nenhuma discussão, tornando o ensino de física doutrinário.

Conjuntamente a essa questão surge o encantamento, a história do episódio contribuiu para o entendimento de que a teoria não surgiu de forma mágica no ano de 1905 – a contribuição dada pelo Einstein é de ordem epistemológica, e não física. Ou seja, outros personagens, sejam cientistas, filósofos ou matemáticos, contribuíram para que a relatividade especial tivesse sucesso. A relatividade especial se desenvolveu gradualmente, com a contribuição de um grande número de pesquisadores, alguns dos quais totalmente obscuros para a grande maioria dos cientistas de hoje.

Diante do que foi dito no último parágrafo, o nosso estudo se dirigiu para abordar a contribuição de Jules Henri Poincaré (1854-1912) para relatividade especial. A História e Filosofia da Ciência também contribuem para uma concepção mais coerente acerca das pessoas que se dedicaram ao estudo do conhecimento, que hoje intitulamos como científico, ao longo do tempo. O cientista Poincaré deu contribuições nas mais variadas áreas de conhecimento da ciência: matemática, física e filosofia da ciência. Seus estudos em matemática abordaram desde o estudo de funções até a topologia algébrica que é lembrada como sendo a mais importante na teoria das equações diferenciais.

Poincaré foi um dos pesquisadores franceses mais influentes na história da física e da matemática dos séculos XIX e XX (MILLER, 1973; LOGUNOV, 1984; CUVAJ, 1968; SCRIBNER, 1973; GOLBERG, 1967; GIONNETTO, 1998).

Foi em 1905 (o mesmo ano em que Einstein publicou seu primeiro trabalho sobre relatividade) que Poincaré deu sua maior contribuição ao assunto, o mesmo escreveu dois trabalhos – um mais longo, que foi publicado na Itália (na revista *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*) e um mais curto, apresentando apenas os resultados mais importantes, que foi publicado na França (na revista da Academia de Ciências de Paris). O trabalho longo, embora enviado para publicação em meados de 1905, saiu publicado apenas no ano seguinte – depois do trabalho de Einstein.

Pode-se dizer que as principais contribuições de Poincaré ao desenvolvimento da teoria da relatividade ocorreram em resposta aos artigos de outros pesquisadores – especialmente Larmor e Lorentz. Estudando esses trabalhos, Poincaré apontou alguns de seus erros, aperfeiçoou vários pontos e propôs complementações às ideias apresentadas, ajudando a construir uma teoria mais clara e coerente. Foi Poincaré quem batizou as “transformações de Lorentz” com esse nome, e que as apresentou na forma pela qual as conhecemos hoje em dia.

Acima de tudo, Poincaré se preocupava com a *interpretação física* da teoria de Lorentz. Em 1904, publicou um trabalho no qual mostrava que as transformações de Lorentz implicavam uma quebra de sincronização dos relógios em diferentes referenciais, e que o resultado obtido era exatamente igual ao que se obtém fazendo a sincronização com o uso de sinais luminosos e assumindo que, em relação a todos os referenciais, a velocidade da luz é a mesma. Mostrou também que as transformações de Lorentz levavam à ideia de uma dilatação do tempo e discutiu o significado físico desse

efeito. Utilizando as mesmas transformações, mostrou que a velocidade da luz no vácuo era a velocidade limite que se poderia obter, utilizando composição de velocidades.

Por fim, nesse mesmo trabalho, Poincaré adotou uma posição de ruptura com a antiga física, propondo que seria necessário construir uma nova dinâmica geral, aplicável a todos os corpos (não apenas ao elétron) e que todas as leis físicas deveriam ser revistas, de tal modo a serem conciliadas com os resultados obtidos no eletromagnetismo e com o princípio da relatividade.

Outro aspecto também, que justifica a inserção da história da relatividade especial de Poincaré na graduação: é muito comum vermos os alunos de Física fazerem leituras de revistas e livro de divulgação científica² ou algum outro meio de divulgação, como por exemplo, o Wikipédia. Esses meios de divulgação científica, na área da Física e, principalmente, na história da ciência, são muitas vezes mal vistos pela comunidade científica, por distorcer e simplificar a ciência.

- 1- Albert Michelson, cujo brilhante experimento, executado com Edward Morley em 1887, foi fundamental para que se estabelecesse a não-existência do éter, jamais aceitou seus próprios resultados. O que supostamente deveria ter sido um mero teste para confirmar a existência do éter transformou-se num pesadelo. (GLEISER, 1997, p. 254)
- 2- A existência do éter é inconsistente com os dois postulados de Einstein (GLEISER, 1997, p. 276).
- 3- Michelson continuou a acreditar na existência do éter até o fim de sua vida, mesmo após a teoria da relatividade de Einstein ter elegantemente demonstrado que esse meio era completamente desnecessário (GLEISER, 1997, p. 254).
- 4- Esse resultado é resumido no princípio da relatividade, que diz que as leis da física são idênticas para passageiros se movendo com velocidades relativas constantes (GLEISER, 1997, p. 265).
- 5- (...) o alemão Albert Einstein (1879-1955), um obscuro funcionário do escritório de patentes de Berna, na Suíça, saiu do casulo com a publicação de seis textos científicos. Todos foram muito importantes. Mas dois deles, nos quais expõe a Teoria Especial da Relatividade, tornaram Einstein o maior gênio da ciência no século XX (REVISTA SUPERINTERESANTE,1999).

² Como por exemplo: a revista Superinteressante e o livro *A dança do universo: dos mitos de criação ao big-bang*, de Marcelo Gleiser (1997).

- 6- Éter não era detectado por nenhum dos experimentos realizados, a Teoria do Éter sofreu sucessivos acréscimos. Suas alterações mais significativas foram a hipótese do arrastamento do éter, a hipótese da contração de Lorentz e as transformações de Lorentz. Todas elas apontavam para uma questão simples: Se a Natureza se comporta como se o Éter não pudesse ser visto, então quais são nossas razões para acreditar na sua existência? Nos primeiros anos do século XX a Teoria do Éter já se encontrava enfraquecida e desacreditada por seus próprios idealizadores. Em 1905 Albert Einstein inaugurou o que hoje conhecemos por teoria da relatividade restrita. Por essa nova teoria, o Éter foi definitivamente abandonado e banido dos currículos (WIKIPEDIA, 2013)

Os alunos necessitam de informações consistentes acerca da História e Filosofia da Ciência. Não podemos deixar que esses assuntos sejam compartilhados entre os alunos pelos meios de divulgação científica equivocados. A maioria dos textos de divulgação científica mostra explicações tão obscuras que são até mesmo difíceis de serem interpretadas.

No ponto de vista prático, esses futuros professores de Física de ensino médio, em geral vão fazer uso desses textos de divulgação científica, seja no preparo de suas aulas, seja como ferramenta de ensino para ministrar ou complementar conteúdos, costumeiramente relacionado à História e Filosofia da Ciência. É importante, por isso, fornecer-lhes durante sua formação outra visão sobre a história da relatividade.

A hipótese que sustenta o nosso estudo é de que uma abordagem histórica de episódios é capaz de apresentar aos alunos os conceitos, e as teorias que lhe serviram de alicerce, como sendo produto da contribuição de vários personagens, desde as ideias do século II a.C até as contribuições presentes. Desta forma, eles poderão entender melhor os artigos das revistas de divulgação científica e compreenderão porque os cientistas fazem essas pesquisas, tendo um posicionamento mais crítico, perante esses artigos veiculados pela mídia.

CAPÍTULO 2

A TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA

Muitas teorias que provieram da didática Francesa são frequentemente utilizadas nas pesquisas sobre ensino de Física, como por exemplo: a Teoria da Transposição Didática (BROCKINGTON; PIETROCOLA, 2005; FORATO, 2009), Teoria do Contrato Didático (RICARDO; SLONGO; PIETROCOLA, 2003) e a Teoria dos Campos Conceituais (CRUZ; REZENDE JUNIOR; SOUZA CRUZ, 2005). Todas essas teorias possuem diferentes vertentes, mas têm como princípio: auxiliar os pesquisadores e professores na análise e compreensão de fenômenos que estão presentes no ensino-aprendizagem.

No meio acadêmico é considerado de forma unânime a necessidade de se adaptar o conhecimento, quando se trata de ensiná-lo, é necessário uma reestruturação do conhecimento científico, para que este possa estar presente em sala de aula. Exemplificando, a física feita nos grandes centros de pesquisa é extremamente complexa. Assim, para se ensiná-la nos cursos de licenciatura em física sem torná-la diferente demais, a única saída possível é adaptá-la. É importante ressaltar que a adaptação pelo qual o conhecimento passa não pode ser considerado como uma mera simplificação do saber de referência.

A simplificação da história da ciência pode acarretar um risco em termos de distorção histórica. É necessário selecionar episódios históricos bem delimitados sem incorrer em narrativas históricas muito superficiais. Essas simplificações (Forato chama de *obstáculos estruturais*) muitas vezes contribuíram para omissões/equívocos históricos e/ou conceituais, ocultando contextos, personagens, fatos e anacronismo (FORATO, 2009, p. 53). Mas os desdobramentos que dizem respeito a esta adaptação do conhecimento a ser ensinado, foram desenvolvidos por diferentes caminhos, um deles foi a Transposição didática.

Neste capítulo, faz-se um estudo sobre a Transposição Didática de Chevallard na tentativa de compreender esses processos de transformação desses saberes.

2.1. O conceito de Transposição Didática

O conceito de Transposição Didática foi estruturado inicialmente pelo sociólogo Michel Verret (1975) em sua tese de doutorado *Le temps des études*, na qual o autor faz um estudo a respeito da distribuição do tempo das atividades escolares e depois teorizado por Yves Chevallard na década de 80 (CHEVALLARD, 1991).

Em 1982, Yves Chevallard e Marie-Albert Joshua publicam um trabalho intitulado de: *Un exemple d'analyse de la transposition didactique – La notion de distance*. Esse trabalho retoma o conceito de Transposição didática e articula a análise das transformações sofridas pelo conceito matemático de distância. Estes autores examinam as transformações sofridas pela noção matemática de “distância” entre o momento de sua elaboração por Maurice Fréchet (1878-1973), em 1906, e o momento de sua introdução nos programas de geometria, em 1971, ao sistema de ensino básico francês (ALVES FILHO, 2000, p. 219).

A partir desse trabalho, o conceito de Transposição Didática passa a ser discutido, divulgado e utilizado na área de ensino de matemática, daí se estendendo para a área de ensino de ciências.

Em 1985, Chevallard publica a obra *La Transposition Didactique* (1985 - a primeira edição francesa), na qual sistematiza as suas reflexões a respeito da Transposição Didática. A publicação mais utilizada de Chevallard no Brasil é uma versão ampliada da primeira edição. A primeira versão do livro de Chevallard possui notas de um curso de verão que foi ministrado em 1980 – as notas do curso aparecem na edição de 1991, especificamente, nos capítulos 1 a 8 – e o prefácio: “Pourquoi la transposition didactique?” (1991, p.11-44). Neste prefácio, encontramos elementos que nos permitem compreender um pouco do contexto que permeou o desenvolvimento da Teoria de Transposição Didática.

A Transposição Didática está estabelecida em três níveis: o Saber Sábido, o Saber a Ensinar e o Saber Ensinado. Isto é, a Transposição Didática analisa as transformações ocorridas no Saber Sábido até se tornar um saber da sala de aula (Saber Ensinado). Estes três Saberes se apresentam de formas diferentes, sendo que a passagem de um Saber para outro tem que estar de acordo com o processo de Transposição Didática.

A Teoria da Transposição Didática pressupõe a existência de um processo, no qual “um conteúdo do saber tendo sido designado como saber sábio quando sofre, a partir daí, um conjunto de transformações adaptativas que o levam a tomar lugar entre

os objetos de ensino. O trabalho em tornar um objeto do saber a ensinar em objeto do saber ensinado é denominado Transposição didática.” (CHEVALLARD, 1991, p.45).

Na didática de Chevallard o termo “Saber” é usado no lugar do termo “Conhecimento” (*Connaissance*). O *savoir* (Saber) determina mais o objeto da Transposição Didática do que o termo “conhecimento”, que possui uma compreensão mais ampla e vaga.

Esses três saberes são produzidos pelo trabalho de diferentes sujeitos do conhecimento, pertencentes a distintos contextos epistemológicos, com valores e critérios de avaliação próprios e submetidos a diferentes tensões (PINHO ALVES, 2000).

2.2. Os Saberes

Vamos analisar, separadamente, cada nível do saber da Transposição Didática de Yves Chevallard.

2.2.1. O Saber Sábio

O Saber Sábio é a referência para os demais saberes, segundo a teoria da Transposição Didática. Os saberes (Saber Ensinar e o Saber Ensinado) são produtos de sucessivas transformações que ocorrem a partir do Saber Sábio. Segundo Alves Filho (2000, p.225) “Assim como o Saber Sábio é submetido a regras e linguagem específicas, o Saber a Ensinar também tem suas regras próprias”.

Este Saber pode ser denominado também de “conhecimento científico”, sendo apresentado aos componentes desta esfera através de pesquisas científicas e acadêmicas, que circulam através dos meios de comunicação (revistas, jornais, periódicos, dissertações, teses) especializados na área. O Saber Sábio possui especificidades intrínsecas deste ambiente em que ele é gerado.

O Saber Sábio está associado ao meio acadêmico, embora nem toda pesquisa científica possa ser considerada como sendo um Saber. O mesmo tem regras bem claras e específicas, com relação à sua produção e comunicação, para sua efetiva publicação faz-se necessária a análise e julgamentos, normas impostas pela comunidade científica

por meio da linguagem e regras peculiares, que grande maioria das vezes tornam o Saber inadequado para o meio escolar.

Os materiais históricos, o nosso Saber Sábido, não são de fácil localização, virtualmente ou fisicamente. O historiador da ciência usa várias fontes de informação em diferentes idiomas para construir a sucessão de processos históricos, como, por exemplo, artigos, livros, conferências, cartas e jornais. Na nossa pesquisa bibliográfica, foram encontrados, trabalhos em inglês, francês e alemão.

Na leitura desses materiais, o historiador da ciência não pode apenas captar o que autor queira dizer, mas o historiador tem que manter em mente que podem existir aspectos ocultos nas entrelinhas do texto. Em diversos momentos, o historiador vai refletir sobre o problema estudado e procurar novas fontes que possam responder a esses aspectos que chamou a sua atenção. Quando se inicia uma pesquisa histórica, não se pode saber o que será encontrado. A compreensão dessas obras históricas muitas vezes pode levar o historiador a hipóteses errôneas e até anacronismo.

Um segundo tipo de vício historiográfico seria o que Herbert Butterfield (1900- 1979) chamou de interpretação *whig* da História, que seria sinônimo de História da Ciência anacrônica e que consiste em “estudar o passado com os olhos do presente” (MARTINS, 2005, p.314).

A interpretação de obras históricas não é um aspecto trivial. A transposição didática é um conjunto de transformações que torna o Saber Sábido em saber ensinável.

2.2.2. O Saber a Ensinar

O Saber a Ensinar é a segunda fase dos saberes de Chevallard. Ao ser transposto para o ambiente de ensino o saber sábio transforma-se em outro tipo de saber, o saber a ensinar. Este trabalho de transposição do saber sábio em saber a ensinar recebe o nome de *Transposição Didática Externa* (CHEVALLARD, 1991). A *Didática Externa* se processa fora do ambiente escolar, fora da escola.

Assim, da mesma forma que o saber sábio segue regras previamente estabelecidas para ser legitimado pela comunidade científica, o saber a ensinar também tem condicionantes no contexto educacional. O texto do Saber a Ensinar é, portanto, autorizado didaticamente, legitimado por “uma concepção de aprendizagem, cujo

modelo ordenador é o texto do saber em sua dinâmica temporal” (CHEVALLARD, 1991, p. 73).

O Saber a Ensinar aparece nos programas, livros didáticos e materiais instrucionais. Podemos considerar como integrantes desta esfera os professores, políticos envolvido com educação, livros didáticos, divulgação científica, opinião pública, cientistas e intelectuais.

Os cientistas e intelectuais, mesmo não pertencendo a esta esfera de poder, também influenciam de maneira indireta, mas significativa, as decisões relativas ao “saber” que será processado e transformado. Aliás, estes grupos não só determinam as transformações, mas também o que do saber sábio deve ser alvo de transformações. A pressão exercida por esses grupos pretende melhorar o ensino e a aprendizagem (ALVES-FILHO, 2000, p.226).

No ambiente escolar o saber a ensinar sofre uma segunda transposição, esta chamada de *Transposição Didática Interna*.

2.2.3. O Saber Ensinado

Neste patamar, identifica-se a segunda transposição do Saber, que é diferente das anteriores (saber sábio – saber a ensinar), pelo fato de envolver elementos e características diferentes que norteiam a esfera do *Saber a Ser Ensinado*. Saber Ensinado representa o momento em que Chevallard (1991) chamou de Trabalho Interno da Transposição, quando o professor é responsável por esse momento de transformação do saber.

O saber que está presente nos livros didáticos e nos materiais instrucionais não coincide necessariamente com aquele lecionado pelo professor, esse saber vai passar por último processo de transformação ao chegar ao ambiente escolar.

A transformação do conhecimento visa um sequenciamento de aulas, nas quais emerge a imagem do professor, isto é, a figura do professor vai adequar o saber dos livros que vai para suas aulas. Neste nível, indica que quando o professor insere em suas aulas o Saber a Ensinar, o mesmo produz o Saber Ensinado. Deste modo, não há nada que garanta que o Saber Ensinado aos alunos corresponda ao que foi aprendido por eles.

O fato de o saber a ensinar estar definido em um programa escolar ou em um livro texto não significa que ele seja apresentado aos alunos desta maneira. Assim identifica-se uma segunda Transposição Didática, que transforma o saber a ensinar em “saber ensinado” (ALVES-FILHO, 2000, p.220).

2.3. Como o saber sobrevive

Como instrumento de análise, a Transposição Didática consegue refazer os caminhos percorridos pelo saber, do seu ambiente de origem (Saber Sábio) até chegar à sala de aula (Saber Ensinado). No entanto, para chegar ao professor, o saber tem que sobreviver antes no patamar do Saber a Ensinar, pois sabemos que nem todos os conteúdos presentes do Saber Sábio estarão inseridos no cotidiano dos cursos de licenciatura.

Entretanto, Chevallard (1991) mostra características relevantes que o saber deve apresentar para permanecer no saber a ensinar. Essas características são:

A primeira delas consiste em dizer que o Saber a Ensinar tem que ser **consensual**, não pode apresentar nenhuma dúvida, mesmo que seja momentânea, no seu status de “verdade” histórico ou moderno. Segundo Chevallard (1991, p.69), “O sistema de ensino parece não saber como avaliar aquilo que o aluno deve saber daquilo que a ciência ainda não sabe”.

O Saber a Ensinar para ser transposto deve buscar uma atualização. Nesse caso a atualização está de acordo com dois tipos: **A atualidade moral**: ligada ao currículo, mostrando se aquele saber que será transposto para os alunos é importante e relevante para a sociedade em geral e necessário à composição curricular. **A atualidade biológica**: O saber deve possuir uma atualidade em relação à ciência praticada.

O Saber a Ensinar deve ser operacional. O saber deve ser capaz de possibilitar a elaboração de atividades, tarefas e instrumentos que possibilitam uma avaliação, sendo possível formar uma sequência didática. Os saberes que não permitirem ter seu aprendizado avaliado não vão permanecer nas instituições de ensino; esses conteúdos são chamados de sem importância pelos alunos.

O processo de Transposição Didática deve permitir que haja uma Criatividade Didática. O Saber a Ensinar deve favorecer a criatividade didática, na elaboração de atividades voltadas ao contexto das instituições de ensino.

Finalmente, o Saber a Ensinar será considerado viável quando apresentar **terapêutica**, isto é, tiver sido validado com os resultados obtidos pela aplicação em sala de aula, que fornecerá os limites e as possibilidades didático-pedagógicas.

É importante não considerar essas características como regras para o ensino de história da ciência. A sobrevivência dos saberes deve ser considerada como atributos inferidos da análise dos saberes escolares presentes no sistema didático.

2.4. Obstáculos na transposição didática da História da Ciência

Apesar de todos os pontos positivos da inserção da história da ciência nas aulas de ciência, a pesquisadora Forato (2009) afirma que existem obstáculos estruturais a serem superados para inserção da história da ciência do ensino. Essa superação deve ocorrer por meio de ações e iniciativas na construção do saber ensinar e do saber ensinado. Os *obstáculos estruturais*, denominados por Forato (2009), são específicos da transposição didática da história da ciência para a educação científica. Isso quer dizer que a contextualização histórica encontra *obstáculos estruturais* de natureza distinta quando se pensa sua transposição didática para a educação (FORATO, 2009). Forato (2009, p.56) sintetiza os *obstáculos estruturais* em categorias.

Um dos primeiros obstáculos estruturais categorizado por Forato (2009) é a dificuldade de natureza estrutural, se refere à seleção do *conteúdo histórico* que contribua para a compreensão da natureza da ciência. A pesquisadora Forato utiliza a natureza da ciência para discutir a história da mesma para a educação científica, mas, os *obstáculos estruturais* podem ser utilizados em outras vertentes. O estudo de episódios históricos permite que o estudante aprenda como se dá o desenvolvimento da ciência, adquirindo elementos que enriquecem sua formação como ser humano.

O segundo obstáculos é o *tempo didático*, representa o tempo disponível ou número de aulas para abordar o conteúdo histórico selecionado em sala de aula; cabe ao professor gerenciar esse tempo. Nas palavras de Forato (2009, p. 51), “O *tempo didático* disponível varia de acordo com o ambiente educacional escolhido e em geral implicará em limitar a quantidade de conteúdo histórico possível de se abordar”. O terceiro obstáculo é a *simplificação* e a *omissão*. Assim, para se ensinar história da ciência sem torná-la diferente a mesma deve ser simplificada, tal simplificação é feita apenas para fornecer uma maior acessibilidade para os alunos. É natural considerar que essa simplificação ocorra. Mas muitas vezes a excessiva simplificação pode omitir aspectos importantes e correr risco de cometer a pseudo-história e com isso contribuindo para a má qualidade da narrativa histórica, mas é importante frisar que um relato aprofundado sobre história pode se tornar incompreensível para os discentes.

Segundo Forato (2009) o aprofundamento histórico da ciência e quais aspectos a serem omitidos, devem ser enfrentados com relação aos aspectos que variam de acordo

com o contexto, como o nível de escolarização dos alunos, dos objetivos pedagógicos e os aspectos mais importantes acerca dos conceitos necessários aos discentes.

O quarto obstáculo que não pode incorrer é o *relativismo*. Nas palavras de Forato (2009, p. 47), “É importante haver cuidado para não incorrer ou fomentar o *relativismo*, levando o aluno a entender, por exemplo, que as diferentes teorias existentes para explicar um mesmo fenômeno sejam apenas meras opiniões pessoais”.

O quinto obstáculo escrito por Forato (2009, p.52) é a *inadequação dos trabalhos especializados da história da ciência para o ensino*. Esse quinto obstáculo representa a excessiva complexidade das obras históricas.

Outro obstáculo na elaboração dos saberes da história da ciência é relatado por Forato (2009). Segundo Forato (2009, 52), “outro desafio que se enfrenta nesse processo diz respeito à tradição existente no ensino de ciências com o *uso ingênuo da história* presente nos livros didáticos. Elas se configuram como pseudo-história com todos os problemas daí decorrentes”. E por fim, o *professor é mal formado* a respeito da história da ciência, o docente não possui qualificação suficiente para trabalhar com seus alunos a história da ciência. Nas palavras de Forato (2009, p.53) “A falta de *formação do professor* é um dos maiores desafios a se enfrentar. Todos os obstáculos seriam minimizados se o professor tivesse sido preparado para lidar de modo consciente e crítico com todos esses obstáculos”.

CAPÍTULO 3

A ELABORAÇÃO DO MATERIAL

A pesquisa é composta por seis textos, que devem ser inseridas no ensino superior, especificamente, no curso de formação de professores em física. Esses textos permitirão uma releitura da história contada da física moderna contemporânea que encontramos nos livros universitários. Os textos produzidos nessa pesquisa trarão informações que muitas vezes são desconhecidas do alunado.

Desta forma, é possível levar essa área de conhecimento para o curso de formação de professores em física, tentando mostrar para esses futuros professores de física uma visão mais correta sobre história da relatividade especial. Além disso, acreditamos que esse fator histórico mostrará um pouco sobre a evolução da ciência, contribuindo, assim, para uma aproximação do educando com a história da ciência e pode contribuir para eliminar alguns estereótipos exteriormente inseridos na universidade e fortalecidos em outras disciplinas.

Além disso, a história da relatividade especial traz uma atualização do saber, através de uma nova visão, em que Einstein não pode mais ocupar o lugar do criador e gênio da relatividade especial. Atualmente, a relatividade especial encontra-se estruturada e solidificada na imagem de Einstein.

3.2. Material da pesquisa

No desenvolvimento desta pesquisa, foram estudadas obras primárias (Poincaré, Einstein, Lorentz, Maxwell, entre outros) e um número considerável de autores secundários (Martins, Giannetto, Logunov, Miller, Dugas, entre outros). As obras secundárias são artigos e livros de historiadores da ciência que se dedicaram ao estudo científico de um determinado episódio histórico ou personagem.

A pesquisa é composta por seis textos acerca da evolução da história da relatividade especial para futuros professores de física. Na preparação de matérias para alunos não se deve assumir que os mesmos conheçam a história da teoria da relatividade especial. Mas é imprescindível que o material leve o aluno a compreender um pouco desta história, desde os conceitos físicos envolvidos e as questões epistemológicas envolvidas na discussão.

Conscientes do obstáculo trazido pelo formalismo matemático que estrutura a teoria da relatividade especial, nós optamos por dar ênfase ao estudo qualitativo nos textos.

A elaboração dos textos foi, sem dúvida, um dos grandes desafios enfrentados, visto que, não é algo fácil levar um conhecimento histórico pouco explorado didaticamente à sala de aula, uma vez que, trabalhar com fatos históricos demanda muito tempo. Os textos para os alunos ficaram estruturado da seguinte forma:

O primeiro texto elaborado foi O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE NA MECÂNICA CLÁSSICA (APÊNDICE, p.40). A respeito da escolha do tema, encontramos nos livros universitários, divulgação científica e entre outros materiais instrucionais a predominância de algumas vertentes. Todos nós aprendemos na escola e na universidade que a Terra gira em torno do seu eixo e que, além disso, ela se move em torno do Sol. E que o modelo heliocêntrico foi desenvolvido pelo matemático, astrônomo e físico italiano Galileu, também aprendemos que com o aparecimento deste modelo a Terra deixa de ser o centro do Universo, dando início à astronomia moderna. Porém, não aprendemos que as primeiras sugestões de que a Terra se movia das quais se tem registro são de alguns filósofos pitagóricos. E, além disso, não aprendemos que o princípio da relatividade surgiu, há muitos séculos, como um modo de conciliar as aparências (tudo se passa como se a Terra estivesse parada) com a teoria astronômica que considerava que a Terra se movia.

Tornou-se imprescindível expor nesse primeiro texto a forma mais correta da contribuição de Galileu, Aristóteles e entre outros sobre as teorias heliocêntrica e geocêntrica. Nesse texto mostramos que Giordano Bruno publicou em 1584 um livro chamado *La cena de le ceneri*, nesse livro já aparece uma ideia semelhante ao princípio da relatividade dos movimentos; na universidade costuma-se denominar de “princípio da relatividade de Galileu”.

Dessa forma é possível apresentar aos discentes uma visão mais correta dos fatos sobre a história do princípio da relatividade da mecânica clássica. Esse texto pode começar a trazer um embate de ideias, e cremos que os alunos poderão realmente perceber as diferenças e rupturas trazidas durante a sua vida como estudante.

O segundo texto, consideramos como sendo uma base conceitual para os textos subsequentes, o texto aborda ÉTER (APÊNDICE, p. 45). O conceito de éter teve significativa relevância na relatividade especial. Não tem como discutir relatividade

especial sem falar, em algum momento, de éter e, principalmente, do experimento de Michelson e Morley que tentou detectar o movimento da Terra em relação ao éter. Mas, para entender o objetivo desse experimento e entre outros experimentos que tentaram detectar esse movimento, temos que compreender as teorias vigentes naquela época, sobre o comportamento deste éter em relação ao movimento da Terra.

O terceiro texto disserta acerca dos EXPERIMENTOS PARA MEDIR A VELOCIDADE DA TERRA ATRAVÉS DO ÉTER (APÊNDICE, p.48). Esse texto descreve alguns experimentos além de Michelson e Morley que tentou detectar o movimento da Terra em relação ao éter, como, por exemplo, Fizeau, Miller e Babinet. Um dos nossos objetivos desse texto é expor diretamente que os livros universitários, divulgação científica e entre outros materiais instrucionais, sempre expõem informações errôneas acerca do experimento de Michelson e Morley. Exemplificando, segundo essas informações, o experimento de Michelson e Morley provou a impossibilidade de medir a velocidade da Terra em relação ao éter e que com isso desencadeou o desenvolvimento da relatividade especial. Nas palavras de Martins (2012, p.54), “Essa versão da história da relatividade, bem como outras semelhantes, têm diversos defeitos. Em primeiro lugar, é muito simplista. A partir dela, parece que a ciência se desenvolve a partir de experimentos “cruciais”, sobre os quais é edificada uma teoria”.

O quarto texto é destinado ao estudo do personagem JULES HENRI POINCARÉ e sua relação com a relatividade especial (APÊNDICE, p.56). Esse texto aborda um pouco de sua biografia e mostra que o mesmo foi um dos pesquisadores franceses mais influentes na história da física e da matemática dos últimos séculos. A nossa escolha pelo personagem Poincaré, é simples, a história da elaboração do que hoje conhecemos como relatividade especial tem sido, injusta em seus créditos, podemos dizer dessa forma, com os vários cientistas que trabalharam nela. Queremos mostrar um personagem desconhecido pelos estudantes de física, mas que projetou, em 1905, a sua formulação do que hoje se conhece por teoria relatividade especial, incluído parte da dinâmica relativística.

O quinto texto trata da obra SUR LA DYNAMIQUE DE L'ÉLECTRON (APÊNDICE, p.60) de Poincaré (1906). Neste texto damos mais ênfase a alguns pontos da obra de Poincaré, a saber: Transformações de Lorentz, Contração de Elétrons e Gravitação. Mas, consideremos como parte integrante desses três pontos da obra de Poincaré a obtenção das Transformações de Lorentz com suas aplicações no

eletromagnetismo. Poincaré mostrou neste trabalho a unicidade das transformações de Lorentz, nelas fazendo pequenas ressalvas. Entre as inovações de Poincaré, está a introdução de uma quarta coordenada imaginária it , equivalente às três coordenadas espaciais, antecipando o trabalho de 1908 de Minkowski.

Finalmente, o sexto texto que trata de EINSTEIN & POINCARÉ (APÊNDICE, p.66). Optamos por fazer um pequeno esquema mostrando as semelhanças, diferenças e principalmente a contribuição de cada um para a teoria da relatividade especial. Outro aspecto relevante que relatamos no texto, não em forma de esquema, foi a análise da simultaneidade de Einstein e Poincaré.

É importante destacar que esses textos não podem ser considerados como um trabalho de pesquisa na área de história da ciência, não é objetivo desta dissertação.

3.2. Material disponibilizado

Com o intuito de tornar público este material histórico, usamos o *Google sites* como uma ferramenta de divulgação. Objetivamos que esse material chegue ao conhecimento dos professores universitários, para auxiliar em sua prática de ensino.

O material produzido para pesquisa compreende:

- a. Textos para o aluno;
- b. Referências complementares – em PDF.

Pretende-se que o *site* funcione como veículo educacional, que trará informações de qualidade sempre vinculadas à História e Filosofia das Ciências. Diante da democratização dos recursos tecnológicos, criamos o nosso *site* no dia 25-08-2012, ele pode ser acessado através do endereço <<https://sites.google.com/site/poincareearelatividade/>>.

CONCLUSÃO

Não gosto de conclusões. Conclusões são chaves que fecham (do latim *con* e *claudere*, fechar). Palavras não conclusivas, que deixam abertas as portas das gaiolas para que os pássaros voem de novo. Cada conclusão faz parar o pensamento. Como nos livros Agatha Christie: resolvido o crime, nada sobra em que pensar. E não adianta ler o livro de novo. Quando o pensamento aparece assassinado, pode-se ter a certeza de que o criminoso foi uma conclusão (ALVES, 2003. p. 26).

Partimos do pressuposto de que as nossas considerações finais não encerram nosso trabalho, pois acreditamos que essa pesquisa não chegou ao um fim.

Inúmeros são os trabalhos constantes na literatura específica sobre a inserção da história da ciência, mas sua presença é raramente detectada nas salas de aula. As dificuldades são muitas: professores sem formação específica, falta de materiais didáticos específicos, entre outras.

Nesta pesquisa, conseguimos desenvolver os textos sobre história da relatividade especial para ser inserida no curso de formação de professores em física. Embora, não tenhamos conseguido aplicar os textos, cremos que o material desenvolvido ficou estruturado, permitindo a sua aplicação.

REFERÊNCIAS

1. ABD-EL-KHALICK, F.; LEDERMAN, N. "Improving science teachers' conceptions of nature of science: a critical review of the literature". *International Journal of Science Education*, v. 22, n. 7, p. 665-701, 2000.
2. ABRANTES, P. "Problemas metodológicos em historiografia das ciências". In: SILVA FILHO, W. J. et al. *Epistemologia e Ensino de Ciências*. Salvador: Ed. Arcádia, 2002, p. 51-92.
3. ALVES-FILHO, J. P. "Atividades Experimentais: Do método à prática construtivista". Tese de doutorado, UFSC, Florianópolis, 2000.
4. ALVES, R. "Lições de feiticeira: meditações sobre a poesia". São Paulo: Ed. Loyola, 2003.
5. BRASIL. Secretaria de Educação Fundamental. "Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências Naturais". Brasília: MEC / SEF, 1998.
6. BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. 2006, "Serão as Regras da Transposição Didática Aplicáveis aos Conceitos de Física Moderna?" *Investigações em Ensino de Ciências* (On line), UFRGS - Porto Alegre - RS, v. 10, n. 3, p. 1-17, 2006.
7. CHEVALLARD, Y. "La transposition didactique: du savoir savant au savoir enseigné". *Grenoble: La Pensée Sauvage*, 1985.
8. CRUZ, F. F. de S.; REZENDE JUNIOR, M. F.; SOUZA CRUZ, S. M. S. C. de. "A teoria dos campos conceituais e as situações escolares". In: *ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS*. Atas do V ENPEC, N. 5 / Roberto Nardi e Oto Néri Borges (Orgs.) -- Bauru: ABRAPEC, 2005. CD-ROM.
9. CUAJ, C. "Henri Poincaré's Mathematical Contributions to Relativity and the Poincaré Stresses". *American Journal of Physics*. Nova Iorque, (1968). 36, pp. 1102-1113.
10. EL-HANI, C. N. "Notas sobre o ensino de história e filosofia da ciência na educação científica superior". In: Silva, C. C. (org.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. p. 3-21.
11. DUGAS, R. "A History of Mechanics". Nova Iorque, Dover Publications, 1988.
12. FORATO, T. C. M. "A Natureza da Ciência como saber escolar: um estudo caso a partir da história da luz". 2009. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Educação da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo.

13. FORATO, T. C. M. “A Natureza da Ciência como saber escolar: um estudo caso a partir da história da luz”. 2009. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Educação da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo.
14. FREIRE JR, O. “A relevância da filosofia e da história das ciências para a formação dos professores de ciências”. In: SILVA FILHO, W. J. et al. *Epistemologia e Ensino de Ciências*. Salvador: Ed. Arcádia, 2002, p. 13-30.
15. GIANNETTO, E. “The Rise of Special Relativity: Henri Poincaré's works before Einstein”. *Congresso di Storia della Fisica e dell'Astronomia*, XVIII, pp. 171-207, 1998.
16. GIL-PÉREZ, D. et al. 2001. “Para uma Imagem Não-deformada do Trabalho Científico”. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.
17. GLEISER, M. “A dança do universo. Dos mitos de criação ao big-bang”. 2. ed. São Paulo: *Companhia das Letras (Editora Schwarcz)*, 1997.
18. GOLDBERG, S. “The Abraham Theory of Electron: The Symbiosis of Experiment and Theory”. *Archives for the History of Exact Sciences*, vol. 7, pp. 7-25, 1971.
19. KUHN, T. S. “A estrutura das revoluções científicas”. São Paulo: Ed. Perspectiva, 1998.
20. LOGUNOV, A. A. “On the Article by Henry Poincaré ‘On the dynamics of the electron’ ”. *Hadronic Journal*. pp. 109-183, 1996.
21. MARTINS, A. F. P. “História e filosofia da ciência no ensino: há muitas pedras nesse caminho”. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* 24 (1): 112-131, 2007.
22. MARTINS, L. Al-Chueyr P. “História da Ciência: objetos, métodos e problemas”. *Ciência e Educação* (UNESP), São Paulo, v. 11, n.2, p. 305-317, 2005.
23. MASSONI, N. T. “Estudo de caso etnográfico sobre a contribuição de diferentes visões epistemológicas contemporâneas na formação de professores de Física”, Dissertação, Porto Alegre, Instituto de Física, UFRGS, 2005.
24. MATTHEWS, M. R. “História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação”. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 12, n. 3, p. 164-214, agosto 1995.
25. MATTHEWS, M. R. “Science Teaching – The role of history and philosophy of science”. London, Routledge, 1994.
26. MILLER, A. I. “A Study of Henry Poincaré's ‘Sur la Dynamique de l'Électron’ ”. *Archive for the History of Exact Sciences*, vol. 10, p. 207-328, Setembro 1973.

27. OSTERMANN, F. “História e filosofia da ciência no ensino de física”. mimeo, Porto Alegre, UFRGS, 2000.
28. PATY, M. “Ciência: aquele obscuro objeto de pensamento e uso”. In: Silva Filho, W. J. et al - *Epistemologia e Ensino de Ciências*, Salvador, Ed. Arcádia, 2002, p.145-154.
29. PEDUZZI, L. O. Q. “As concepções espontâneas, a resolução de problemas e a história e filosofia da ciência em um curso de mecânica”. 1998. 849f. Tese (Doutor em Ensino de Ciências Naturais). UFSC, Florianópolis, 1998.
30. _____. “Sobre a utilização didática da história da ciência”. In: PIETROCOLA, Maurício (org) *Ensino de física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora*. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2001 p. 151.
31. POINCARÉ, H. “A Ciência e a Hipótese. Brasília”, Universidade de Brasília, 1984. _____. “Sur la Dynamique de l'Électron”. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 1906 (sub. 23/07/1905), Palermo. *Anais*. Jan-1906. pp. 129-176.
32. Revista Super Interessante. *A descoberta que mudou tudo*. Rio de Janeiro, ed. Agosto, 1999. Site: <http://super.abril.com.br/ciencia/descoberta-mudou-tudo-438046.shtml>.
33. RICARDO, E.; SLONGO, I.; PIETROCOLA, M. “A perturbação do contrato didático e o gerenciamento dos paradoxos”. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 8, n. 2, 2003. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol8/n2/v8_n2_a4.html>.
34. SCRIBNER, C. Jr. “Henri Poincaré and the Principle of Relativity”. *American Journal of Physics*. Vol. 32, 1973.
35. SEPULVEDA, C.; EL-HANI, C. N. “Ensino de Evolução: Uma Experiência na Formação Inicial de Professores de Biologia”. In: Paulo Marcelo Marini Teixeira; Júlio César Castilho Razera. (Org.). *Ensino de Ciências: Pesquisas e Pontos em Discussão*. 1. ed. Campinas-SP: Komedi, 2009, v. 1, p. 21-45.
36. SNOW, C. P. “As duas culturas e uma segunda leitura: uma versão ampliada das duas culturas e a revolução científica”. São Paulo: Edusp, 1995.
37. TEIXEIRA, E. S. “A influência de uma abordagem contextual nas concepções sobre a natureza da ciência: um estudo de caso com estudantes de física da UEFS”. Dissertação. 130p. Salvador: UFBA/UEFS, 2003.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAIBA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE CIÊNCIAS E
MATEMÁTICA**

**A HISTÓRIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL ANTES DE
EINSTEIN: ELABORAÇÃO DE UMA PROPOSTA PARA O
ENSINO SUPERIOR**

Alessandra Uchôa

APÊNDICE

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como requisito para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins

TEXTO I

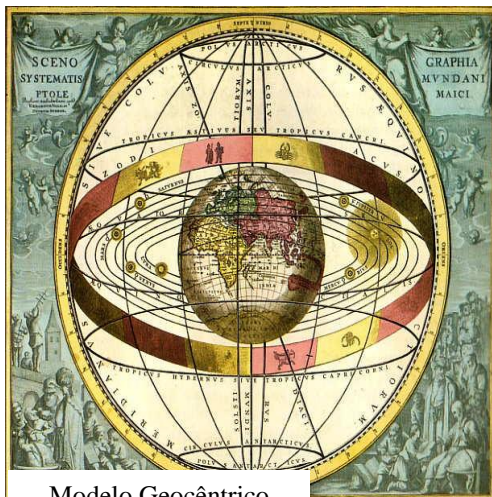
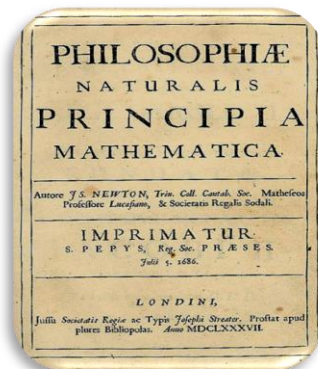
O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE NA MECÂNICA CLÁSSICA

O princípio da relatividade surgiu, há muitos séculos, como um modo de conciliar as aparências (tudo se passa como se a Terra estivesse parada) com a teoria astronômica que considerava que a Terra se movia. Todos nós aprendemos na escola que a Terra gira em torno do seu eixo e que, além disso, ela se move em torno do Sol. No entanto, não *sentimos* que a Terra está se movendo e não notamos ao nosso redor nenhum efeito desses movimentos.



A versão final do princípio da relatividade foi formulada por Isaac Newton (1642-1727). Newton chamou a atenção para a diferença entre os movimentos de rotação e de translação. Newton concluiu que a rotação produz efeitos *absolutos*. No entanto, o movimento de *translação* é comum a todas as partes de um sistema e não altera seus fenômenos internos. No entanto, a Terra gira, e Newton percebeu que essa rotação deveria, sim, produzir efeitos. A rotação não é suficientemente rápida para atirar para fora os corpos que estão na sua superfície; mas Newton calculou o efeito devido à rotação da Terra e indicou duas consequências observáveis: o período de um relógio de pêndulo deveria depender de sua latitude – ou seja, de sua distância angular ao equador; e a Terra deveria ser achatada, por causa de sua rotação. Além disso, um corpo que cai de uma grande altura tem o seu movimento perturbado pela rotação da Terra, e não cai seguindo a vertical (ou seja, a direção de uma linha de prumo).

Ele *calculou* esses efeitos, que foram confirmados depois de algumas décadas (MARTINS, 1989). Assim, através de medidas físicas feitas na própria Terra é possível determinar que ela gira, e medir sua velocidade de rotação. Já que era possível observar efeitos de rotação, Newton admitiu a existência de um *espaço absoluto*. As velocidades absolutas de *translação* não produzem efeitos, e todos os sistemas que estejam parados ou em movimento de translação uniforme através do espaço absoluto são equivalentes; mas as velocidades absolutas de *rotação* produzem efeitos.

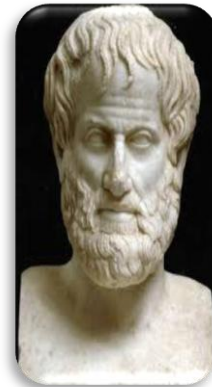


Modelo Geocêntrico

A análise de Newton, apresentada no seu livro “*Princípios matemáticos da filosofia natural*”, referia-se apenas aos fenômenos mecânicos (ou seja: aos movimentos de partículas materiais, submetidas a forças). Mas nem sempre se pensou que a Terra estivesse em movimento. Na Antiguidade pensava-se que ela estivesse parada (ver MARTINS, 1994a). Mas as primeiras sugestões de que a Terra se movia das quais se tem registro são de alguns filósofos pitagóricos. No século III a.C., Aristarchos de Samos propôs um sistema

heliocêntrico, isto é, o Sol estaria parado no centro do universo e a Terra (com todos os planetas) giraria em torno dele. Não conhecemos os detalhes de nenhuma dessas propostas e não sabemos se esses pensadores tentavam explicar o motivo pelo qual não sentimos nenhum efeito do movimento da Terra. Porém, a maior parte dos astrônomos e filósofos aceitava que a Terra estava parada no centro do universo, sem girar.

No século IV a.C. Aristóteles apresentou no tratado *Sobre o Céu* (*De Caelo*, II.14) um forte argumento experimental para mostrar que a Terra estava parada. Se jogarmos verticalmente para cima uma pedra (e se não houver vento) ela cairá exatamente no ponto de onde foi lançado, mesmo se ela for lançada a uma grande altura. Se a Terra estivesse girando, isso não poderia acontecer, porque a superfície da Terra (e a pessoa que lançou o objeto) se moveria, enquanto a pedra estivesse no ar; e, quanto ela caísse, a pessoa já não estaria no mesmo lugar e, portanto, veria que o objeto não retornou ao ponto de lançamento (ver MARTINS, 1986a). O pensamento de Aristóteles foi aceito por quase todos os pensadores, sendo repetido e apoiado desde Ptolomeu (século II d.C.) até Tycho Brahe (século XVI).



Costuma-se dizer erroneamente que: o pensamento aristotélico começou a ser deixado de lado principalmente a partir de Galileu, quando a forma de se fazer ciência passou a ser mais matemática e com a valorização das experiências de Galileu.

Além do experimento da pedra, foram citados outros fatos que pareciam indicar que a Terra estava parada. Se ela girasse, todos os objetos que estão em sua superfície deveriam ser atirados para longe, por causa de sua rotação rapidíssima. Se ela girasse, veríamos os pássaros e as nuvens passarem sobre nós, de leste para oeste, com grande velocidade, como os astros. Se ela girasse, seria mais difícil lançar uma flecha (ou dar um tiro de canhão) para leste do que para oeste. Enfim: não vemos nenhum efeito do movimento da Terra, e tudo indicava que deveriam existir certos efeitos, se ela girasse. Portanto, a conclusão mais razoável era a de que a Terra estava realmente parada.



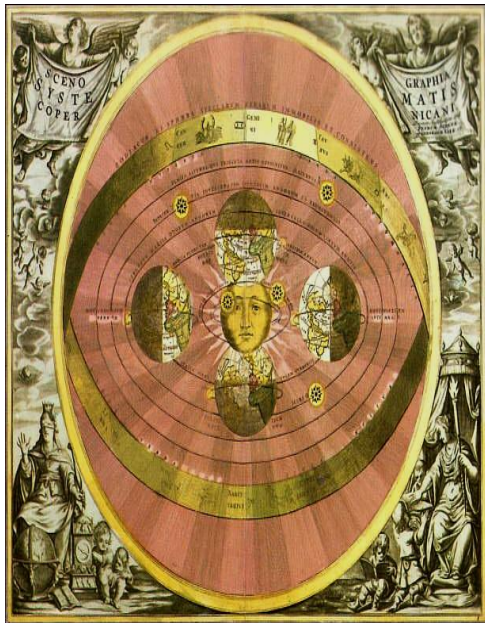
Ptolomeu (1952, I, 7) explicou que seria possível supor a Terra em repouso ou movimento, através do comportamento das estrelas (para estudar efeitos astronômicos). Mas, o mesmo esclarece que seria impossível detectar o comportamento da Terra através de fenômenos observáveis na superfície terrestre. O sistema adotado por Aristóteles permaneceu atuante por dois mil anos, mas, só apenas no século XVII, Copérnico propôs outro sistema chamado de Heliocêntrico (onde o Sol como centro do universo), mas, ele não conseguiu romper de forma significativa com o sistema geocêntrico de Aristóteles, que era a ideia dominante da época.

Se ela girasse, todos os objetos que estão em sua superfície deveriam ser atirados para longe, por causa de sua rotação rapidíssima. Se ela girasse, veríamos os pássaros e as nuvens passarem sobre nós, de leste para oeste, com grande velocidade, como os astros. Se ela girasse, seria mais difícil lançar uma flecha (ou dar um tiro de canhão) para leste do que para oeste. Enfim: não vemos nenhum efeito do movimento da Terra, e tudo indicava que deveriam existir certos efeitos, se ela girasse. Portanto, a conclusão mais razoável era a de que a Terra estava realmente parada.

Durante a Idade Média, vários pensadores discutiram a argumentação de Aristóteles. A maioria deles concordou com o filósofo, mas houve outros que se posicionaram contra ele. Nicole Oresme (1320-1382), no século XIV, defendeu a ideia de que era impossível saber se a Terra estava parada ou em movimento, por qualquer tipo de experimento que fosse realizado. Em primeiro lugar, ele alegou que os fenômenos celestes não nos permitem decidir nada, pois poderiam ser interpretados tanto supondo que a Terra se move como supondo que os céus se movem.



Apresentou para isso uma comparação, já feita antes por Witelo, a respeito de navios. Se dois navios estão se aproximando um do outro, no mar, os marinheiros de cada um deles pensam que é o outro que está se movendo. Se um navio se afasta do porto, as pessoas que estão no navio pensam que é o porto que está se afastando. Nossa tendência natural é pensarmos que estamos parados e que as outras coisas se movem – a menos que surjam fortes evidências de que somos nós que estamos em movimento.



Modelo Heliocêntrico

Galileo Galilei (1564-1642) foi um pensador que apoiou a teoria de Copérnico e também se viu obrigado a responder aos argumentos contra o movimento da Terra. Em 1616, Galileo escreveu sobre as marés, e defendeu que esses fenômenos provavam o sistema de Copérnico. Uma parte da análise de Galileo é semelhante à de Giordano Bruno e provavelmente foi inspirada pela leitura de sua obra. No entanto, em certo ponto Galileo apresentou um argumento novo. Ele propôs um tipo de experimento imaginário, no qual duas pessoas entrassem na cabine de um navio e fizessem vários experimentos lá dentro, tanto com o navio parado quanto em movimento. Afirmou, então, que todos os experimentos dariam exatamente o mesmo resultado, tanto no caso em que o navio estivesse parado quanto no caso em que ele estivesse se movendo rapidamente. Portanto, nenhum experimento realizado dentro da cabine do navio permitiria determinar se ele está se movendo. Da mesma forma, nenhum experimento na Terra permitiria saber se ela está parada ou em movimento (MARTINS, 1986).



O mesmo argumento foi apresentado por Galileo em 1632, na segunda parte de seu livro “Diálogo sobre os dois maiores sistemas do mundo, Ptolomaico e Copernicano”. Lá, ele argumenta que “o movimento comum é como se não existisse”; o movimento da Terra não é percebido por nós porque é comum a todas as coisas da Terra. No entanto, ele comenta que apenas movimentos *uniformes* não são percebidos. Se o navio oscilar ou parar de repente, as pessoas dentro da cabine vão perceber isso. Da mesma forma, se a Terra oscilasse para um lado e para o outro, isso produziria efeitos. Seria exatamente por causa disso que existiriam as marés – produzidas pela composição do movimento de rotação e de translação da Terra, que produziria um tipo de oscilação. A argumentação de Galileo não é totalmente coerente, e em diferentes partes de sua obra ele apresenta idéias diferentes (ver MARTINS, 1994b; MARTINS, 1998).

Copérnico supôs que o movimento de rotação da Terra era “natural”: tanto a Terra como um todo quanto suas partes (por exemplo, pedras e montanhas) têm uma tendência natural a girar em torno do seu eixo, dando uma volta por dia. Se tirarmos uma pedra do chão e depois a deixarmos cair, ela terá dois movimentos.

Um deles será o movimento vertical, para baixo; o outro será o movimento natural de rotação em torno do eixo da Terra, que fará com que a pedra acompanhe o movimento do solo. Assim, o único movimento que observaremos será o vertical e parecerá que a Terra está parada – mas ela estará em movimento. Por outro lado, o fato de que o movimento de rotação da Terra seja “natural” impede que os corpos em sua superfície sejam atirados para longe dela (ver MARTINS, 2003).

Costuma-se dizer erroneamente que: Galileo como sendo a figura central nos estudos sobre movimentos de corpos macroscópicos, e que o que mesmo defendeu e provou o sistema Copernicano, ou seja, ele mostrou evidências claras de que a Terra se move.

Antes de Galileu, Giordano Bruno (1548-1600), defendeu a astronomia de Copérnico, publicou em 1584 um livro chamado *La cena de le ceneri*, onde apresentou uma nova resposta ao argumento da pedra.

Em *La Cena de le Ceneri*, Giordano Bruno fala um pouco sobre de Copérnico, a saber:



“Era engenhoso e grave, elaborado, diligente e maduro; não inferior a nenhum astrônomo anterior a ele (...) muito superior a Ptolomeu, Hiparco, Eudóxo e a todos aqueles que caminharam depois entre as pegadas destes, superioridade que lhe vem de haver-se liberado de alguns pressupostos falsos da comum e vulgar filosofia, para não dizer cegueira. Não se afastou muito dela, porque ao ser mais estudioso da matemática que da natureza, não pôde aprofundar e penetrar até o ponto de poder arrancar completamente as raízes de princípios vãos e inapropriados e com isto anular totalmente todas as dificuldades contrárias, liberandose a si mesmo e aos demais de tantas vãs inquisições, e situando a contemplação nas coisas constantes e certas (GIORDANO BRUNO, 1584, p.15).

Suponhamos que um navio está se movendo rapidamente, descendo um rio. Se ele passar por uma ponte e uma pessoa, na ponte, soltar uma pedra quando o mastro estiver passado abaixo dela, a pedra cairá a uma certa distância atrás do mastro, porque o navio se move enquanto a pedra cai. Mas uma pessoa que esteja no mastro do navio soltar a pedra, ela cairá exatamente na base do mastro, e não para trás. Pois a pedra, antes de ser largada do topo do mastro, já possui uma “virtude impressa” e mantém a mesma velocidade do navio, além de adquirir uma velocidade de queda.

Podemos dizer que nessa obra de Giordano Bruno já aparece uma ideia semelhante ao princípio da relatividade dos movimentos. A proposta de Bruno é muito boa, sob o ponto de vista da física atual – mas era problemática, na época, pelos motivos já expostos. É importante comentar que nem Bruno nem qualquer dos pensadores dessa época se referiam ao “*princípio da relatividade dos movimentos*”. Esse nome começou a ser utilizado apenas no final do século XIX.



René Descartes (1596-1649) foi outro pensador que defendeu a teoria de Copérnico, mas de um modo um pouco diferente. Para Descartes, todo movimento é mudança de posição em relação a algum objeto (só existem movimentos relativos). Assim, cada corpo possui um enorme número de movimentos diferentes, em relação a cada objeto do universo. Porém, nem todos os movimentos possuem a mesma importância. Somente o movimento em relação ao meio imediato (aquilo que toca o corpo) produz efeitos físicos.

REFERÊNCIAS

- 1- MARTINS, Roberto de Andrade. “Galileo e o princípio da relatividade”. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* (9): 69-86, 1986.
- 2- MARTINS, R. A. “Galileu e a Rotação da Terra” Cad”. *Cat. Ens. Fís.*, v.11, n.3: 196-211, dez.1994a.
- 3- MARTINS, R. de A. “*O universo: teorias sobre sua origem e evolução*”. São Paulo: Editora Moderna, 1994b.
- 4- GIORDANO, B. “La Cena de le Ceneri”. In: *Dialoghi filosofici italiani*. A cura di Michelle di Ciliberto. 4ª edizione. Milano: Arnoldo Mondadori Editore, 2001, 1540 p., pp. 1-157 e 963-1027. (Collezione I Meridiani Classico dello Spirito).

TEXTO II

ÉTER

Ao ler ou ouvir a palavra éter quase imediatamente imaginamos da substância química, não é verdade? Bem, esse éter é totalmente diferente do que vamos falar neste Texto III. Parece meio estranho isso, não é verdade? Esse éter não observável ajudou a ciência a compreender alguns fenômenos, como, por exemplo, o comportamento ondulatório da luz, fenômenos térmicos e magnéticos.

As teorias da física no fim do século XIX postulavam que se as ondas de água têm que ter um meio onde propagar, que seria a água, as ondas sonoras também deveriam possuir um meio que seria o ar e tão quanto as ondas de luz tinham que possuir um meio, esse meio é o *éter*.

A busca pela verdade sobre o comportamento da natureza é um processo antigo. Ao longo da história da ciência, ocorreram mudanças, rupturas e divergências no modo de explicar os fenômenos naturais. A evolução da ciência não é linear.

A seguir e nos próximos textos você saberá um pouco da influência desse éter para ciência.

As teorias do éter

No início do século XX ainda existia algumas questões na Física que não estavam bem explicadas pelas teorias vigentes até então. Uma dessas questões era relativa ao comportamento do éter na terra.

O éter possuiu diferentes definições na evolução das ideias da Física. Para o filósofo Aristóteles (384 a 322 antes de Cristo), o éter representava o quinto elemento, além da terra, água, ar e fogo, que permitia explicar o movimento dos corpos celestes do universo (MARTINS, 1994, p.77). A palavra éter para Aristóteles está interligada à luz.

A definição de Aristóteles para o éter foi interpretada diferentemente nos estudos sobre o movimento, e o éter passou a ter um caráter menos metafísico, influenciando na análise de vários fenômenos. Para René Descartes (1596-1650), por exemplo, o éter era um meio perfeitamente elástico e também um transmissor de luz.

“O éter era um ente inobservável que em vários períodos históricos foi útil na construção de teorias e modelos que compunham as explicações científicas. Ele permitia compreender alguns fenômenos que não eram possíveis de compreender apenas com a explicação baseada em entes observáveis” (FORATO e PEITROCOLA, 2005, p.7).

Os fenômenos eletromagnéticos também levou a ideia do éter. Alguns pesquisadores como James Clerk Maxwell (1831-1879), Faraday (1791-1867), Thomson (1824-1907) acreditavam na existência de um meio (éter) que influenciava nas interações eletromagnéticas. Na busca pela unificação de teorias, como o caso do eletromagnetismo com a óptica, alguns fenômenos, como a interferência, seriam influenciados pelo movimento da Terra através do éter que poderia, teoricamente, ser determinada por alguns experimentos, como por exemplo: Michelson & Morley.

As tentativas de compreensão desses fenômenos acabaram influenciando diretamente no estabelecimento da Teoria da Relatividade Especial.

Fresnel e a teoria ondulatória da luz



Até o fim do século XVIII, quase todos os físicos aceitavam a teoria corpuscular, mas no início do século XIX começou importantes evidências favoráveis à hipótese ondulatória. Os principais responsáveis por essa mudança foram Thomas Young (1773-1829) e Augustin Jean Fresnel (1788-1827).

Fresnel admitia um éter em repouso, em todo o universo – ou seja, o movimento da Terra não afetaria o éter, e este não seria arrastado pela Terra. O éter seria capaz de atravessar todos os objetos, por mais espessos que fossem. Com uma hipótese desse tipo era fácil explicar, por exemplo, a aberração da luz das estrelas.

“Fresnel supôs que o éter preenche todos os espaços aparentemente vazios do universo, e que, nessas regiões, ele está em repouso. O éter não seria movido pelos corpos que se deslocam através dele, como a Terra, e nas regiões sem matéria, a luz se propagaria sob a forma de ondas em esse éter parado” (FORATO e PIETROCOLA, 2005, p.7).

O artigo de Fresnel, “Carta de Augustin Fresnel a François Arago sobre a influência do movimento terrestre em alguns fenômenos de óptica”, lançou as bases da *óptica ondulatória dos corpos em movimento*. Nas palavras de Poncaré (1902, p.127), “(...) o objetivo de Fresnel não era o de saber se existe, realmente, um éter, (...) e sim prever os fenômenos óticos”.

A luz seria uma onda do éter e sua velocidade em relação ao éter seria constante. Porém, dentro dos corpos transparentes, a velocidade da luz diminui,³ tornando-se igual a c/n , onde n é o índice de refração. Para explicar isso, seria necessário admitir que o éter sofresse alguma modificação nos meios transparentes. Para analisar o que poderia ocorrer com o éter, Fresnel parece ter se guiado por uma analogia com o som.

Se tanto a pressão quanto a densidade do éter variassem, seria difícil prosseguir com a análise. No entanto, pode-se supor que a pressão do éter é a mesma, dentro e fora dos materiais transparentes – ou seja, pode-se supor que há um certo equilíbrio de pressão do éter em todos os lugares. Alguns corpos, no entanto (os materiais transparentes), produziram algum tipo de atração do éter, ou condensação do éter, aumentando sua densidade. Fresnel concluiu que nos meios transparentes há uma maior densidade de éter.

Em seguida, Fresnel analisou o que acontece quando um corpo transparente se move em relação ao éter. Ele supôs que o *excesso de éter* fica preso ao material transparente e se move com ele; mas que uma parte do éter atravessa livremente o objeto.

Se isso fosse possível, não seria uma violação do princípio de relatividade, propriamente dita, pois estaríamos medindo uma velocidade relativa (a velocidade da Terra em relação a uma entidade física, o éter). A ideia defendida por Fresnel era de que os objetos passavam através do éter ou o éter passava por eles, supondo assim como válida a existência do éter para a sua teoria ondulatória da luz. Para provar que a teoria ondulatória da luz tem ligação com a doutrina do éter, foi considerado que todos os conceitos de movimento e também de repouso são relativos ao éter (WHITTAKER, 1960, p. 27).

Foi nesse período, como os trabalhos de Fresnel e de Thomas Young, que teoria ondulatória da luz ficou popular e a corpuscular ficou um pouco de lado (BUCHWALD, 1989). Foi aparte de 1820 até em meados 1830, a grande parte dos físicos da época estavam convencidos de que a teoria ondulatória da luz era a correta (SWENSON, 1972, p.15-21).

Stokes e o éter viscoso



George Gabriel Stokes (1819-1903) foi um matemático e físico que propôs outra maneira de interpretação para o éter. Stokes propôs, em 1845, uma nova teoria do éter, mais simples do que a de Fresnel.

³ Segundo a teoria corpuscular, a velocidade da luz deveria *aumentar* quando ela entrasse em um corpo transparente; mas, de acordo com a teoria ondulatória, ela deveria *diminuir*. Não havia experimentos, na época, que permitissem testar essa diferença. Apenas em meados do século XIX foram feitas medidas de velocidade da luz dentro da água – e os resultados confirmaram a teoria ondulatória.

O que podemos dizer a respeito da aberração das estrelas:

O astrônomo James Bradley (1693-1762) descobriu a existência desse fenômeno, quase por acaso, em 1728. Inicialmente, Bradley estava tentando observar a *paralaxe* das estrelas – uma outra mudança de posição aparente das estrelas, ocasionada pelo movimento da Terra em sua órbita. Quando Bradley estudou a posição de estrelas próximas ao polo celeste, ele observou que a posição das mesmas variava ao longo do ano; porém todas as estrelas mostravam os mesmos movimentos, e eles eram diferentes daquilo que se podia esperar no caso da paralaxe. Ele acabou pensando em alguma outra explicação, e chegou à ideia da aberração estelar.

É importante esclarecer

Tanto a hipótese do éter estacionário, quanto a do éter viscoso que seria totalmente arrastado pela Terra não ofereciam explicação para todos os fenômenos. Ou seja, alguns experimentos, que vamos ver posteriormente, mostravam que a hipótese de Fresnel era mais coerente do que a de Stokes; outros experimentos mostravam o contrário.

Esta nova interpretação de Stokes estava baseada na teoria na qual o éter luminífero seria totalmente arrastado pela Terra, diferentemente do que Fresnel propôs, de que os objetos passam através do éter ou vice versa.

*“Eu devo supor que a Terra e os planetas arrastam com eles uma porção do éter, de forma que o éter próximo às suas superfícies está em repouso relativamente a elas, enquanto sua velocidade [do éter] se altera à medida que nos afastamos dessas superfícies, até que, para distância não muito grandes, ele está em repouso no espaço” (G. G. Stokes, apud L. S. Swenson Jr, *The Ethereal Aether*, 1972 p. 24).*

A teoria de Stokes propunha que o éter seria semelhante a um líquido viscoso, que aderiria à superfície dos corpos, sendo quase totalmente arrastado pela Terra, ficando em repouso em relação a ela na região próxima ao solo. Tal arrastamento faz com que qualquer experimento óptico puramente terrestre independa do movimento da Terra, o que explica de forma direta e simples o resultado nulo dos experimentos de Bosovich, Arago e Babinet.

“Segundo ele [Stokes], o éter contido nas vizinhas da Terra seria completamente fixo em relação a sua superfície, enquanto que o éter distante da mesma continuaria imóvel no espaço. Haveria, no entanto, uma região de transição entre esta porção de éter fixo e o éter interespacial” (PIETROCOLA, 1993, p. 6).

Embora tivesse proposto sua nova visão a respeito do éter, o próprio Stokes mostrou que a teoria de Fresnel era de grande valor. Stokes analisou e verificou que, se a teoria ondulatória de Fresnel fosse válida, o movimento da Terra não poderia ser influenciado pelos fenômenos ópticos que envolveriam apenas os fenômenos de reflexão, refração e também o da aberração.

REFERÊNCIAS

- 1- FORATO, Thaís C. M.; PIETROCOLA, M. “O arrastamento parcial do éter de Fresnel como explicação científica”. In: V Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 2005, Bauru. A ata do V Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências do. Bauru: ABRAPEC, 2005. v. CD ROM.
- 2- HECHT, E. “OPTICA”/ Hecht, Eugene; Tradução José Manuel N. V. Rebardão –Lisboa: Abril 2002, p.22.
- 3- MARTINS, R. de A. “O universo: teoria sobre sua origem e evolução” - São Paulo: Moderna, 1994.
- 4- SWENSON JR, LOYD S. “The Ethereal Aether: A History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments, 1880-1930”. Austin: University of Texas Press, 1972.
- 5- WHITTAKER, E.T. “History of the theories of aether and electricity”, Los Angeles, Harper Torchbooks-Tomash Publishers, 1960. (The History of Modern Physics.) vol.1.
- 6- PIETROCOLA, Maurício. “A extensão do princípio de relatividade à óptica”. In: SEMINÁRIO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA, 1993, Caxambu. Anais SEMINÁRIO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA. Caxambu - MG : SBHC, 1993.

TEXTO III

EXPERIMENTOS PARA MEDIR A VELOCIDADE DA TERRA ATRAVÉS DO ÉTER

ARMAND HIPPOLYTE LOUIS FIZEAU (1819-1896)



As previsões de Fresnel foram confirmadas em 29 de setembro de 1851. Fizeau apresentou à Academia de Ciências de Paris, um experimento destinado a testar a hipótese do arrastamento do éter pelos corpos em movimento. A teoria do éter de Fresnel tinha aspectos estranhos e podia parecer até inútil, já que mostrava que não era possível detectar o movimento da Terra em relação ao éter.

“Várias teorias foram propostas para explicar o fenômeno de aberração no sistema de ondas. Primeiro foi Fresnel, e mais recentemente MM. Doppler, Stokes, Challis e vários outros, publicaram trabalhos importantes sobre este tema; mas parece que nenhuma destas teorias recebeu a plena aprovação dos físicos. De fato, na ausência de certas noções sobre as propriedades do éter luminífero e de a sua relação com a matéria ponderável, foi necessário a formulação de outras hipóteses que seja mais ou menos prováveis, mas nenhuma pode ser considerada como demonstráveis”(FIZEAU, 1851, p. 349).

Um ano antes, 1850, Jean-Bernard-Leon Foucault (1819-1869) e Fizeau realizaram as primeiras observações a respeito da velocidade da luz, através de métodos diferentes, que deram resultados concordantes. O princípio básico do experimento (FIG. 1) era fazer a luz atravessar um tubo com água em movimento, e medir a velocidade da luz nos dois sentidos, para ver se existia o arrastamento parcial da luz previsto por Fresnel. A aparelhagem permitia comparar as velocidades nos dois sentidos através de um fenômeno de interferência, sem precisar medir efetivamente as duas velocidades.

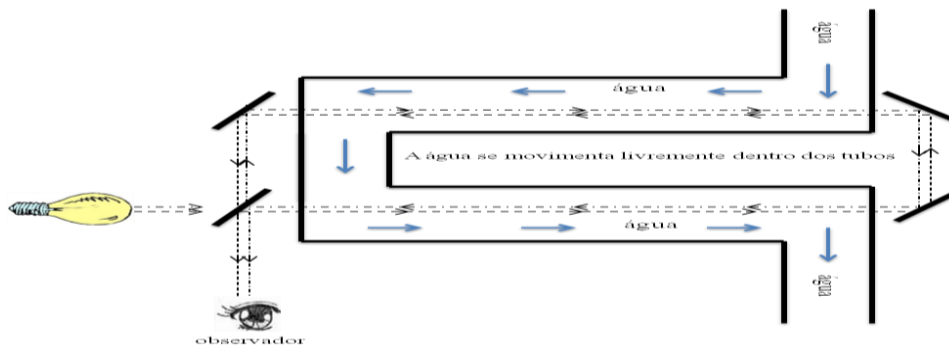


FIG.1: Esquema do experimento

Descrição do experimento, nas palavras de Fizeau:

“Eu vou tentar provar, sem a ajuda de figura, como foi à caminhada da luz deste experimento. O foco de uma lente cilíndrica, o raio de luz solar penetrou quase instantaneamente dentro da primeira luneta por uma abertura lateral muito próximo de seu foco. Um espelho transparente, cujo plano representa o eixo da luneta com um ângulo de 45 graus, foi enviado por meio de uma reflexão na direção do objetivo. Fora do objetivo, os raios tornar-se paralelos entre si, onde encontrei uma dupla fenda, cuja cada abertura corresponde à entrada de um dos tubos. Um feixe de raio muito estreito penetrou em cada tubo (...). Os dois feixes, sempre paralelos entre si, atingiram o objetivo na segunda luneta, é refratado, pelo efeito de refração, que foram agrupadas nas fendas. Lá eles encontram um plano refletor e um espelho perpendicular no eixo da luneta, e foi submetida a uma reflexão que os mandou de volta ao objetivo; mas, o efeito desta reflexão, os raios havia trocado seu caminho. Depois de cruzar novamente objetivo e tornar-se paralelos uns aos outros, eles entraram pela segunda vez nos tubos, mas, eles não foram trocados, como tinha acontecido por um dos tubos” (FIZEAU, 1851, p. 354).

“Após a sua segunda viagem através dos tubos, os dois feixes se cruzaram novamente na dupla fenda, retornando para primeira luneta e finalmente veio interferir a sua fenda passando pelo espelho transparente. Lá eles formaram mutuas franjas de interferência que é possível observar com um olho as divisões das franjas” (FIZEAU, 1851, p. 354).

O experimento de Fizeau proporcionou uma impressionante confirmação da teoria de arrastamento do éter de Fresnel. Como a teoria do éter de Stokes não previa o arrastamento do éter, ela foi deixada de lado por quase todos os físicos, a partir desse momento. Parecia, portanto, que tudo estava claro, em meados do século XIX: a luz era realmente uma onda do éter, e o éter se comportava, nos corpos transparentes, exatamente como Fresnel havia previsto.

“O sucesso desta experiência parece-me resultar na adoção da hipótese de Fresnel, ou ao menos na lei que ele encontrou para exprimir a modificação da velocidade da luz pelo efeito do movimento dos corpos (...).” (FRESNEL, 1851, p. 355).

Alguns anos depois, em 1859, Fizeau realizou outro tipo de experimento, no qual estudava a polarização da luz. Quando um feixe de luz polarizada incide obliquamente sobre uma lâmina de vidro, os planos de polarização dos feixes refletido e transmitido sofrem uma pequena rotação. Esse fenômeno já havia sido estudado no início do século, por Malus. O valor do ângulo de rotação do plano de polarização depende de alguns fatores geométricos (como a inclinação do vidro) e depende também do índice de refração do material. Ora, o índice de refração depende da

velocidade da luz no vidro; e, se a aparelhagem está na Terra, que se move em relação ao éter, a velocidade da luz no vidro depende da velocidade da Terra. Portanto, a rotação do plano de polarização da luz deveria depender do movimento da Terra através do éter.

Fizeau fez observações durante um ano, variando o horário de observação e tomando muitos cuidados experimentais. A partir de 2.000 observações que realizou, concluiu que havia efeitos sistemáticos, regulares, da ordem de grandeza prevista e com o sentido correto.

Fizeau era muito respeitado, e seu trabalho teve forte repercussão contra e a favor. O astrônomo Hervé-Charles-Antoine Faye (1814-1902) criticou o trabalho, pois Fizeau só havia levado em conta, o movimento orbital da Terra. No entanto, havia também um movimento do sistema solar como um todo em direção à constelação de Hércules, que havia sido detectado recentemente. Se esse movimento fosse levado em conta, já não haveria concordância entre a teoria e a experiência. O trabalho de Fizeau foi defendido por Louis Urbain Dortet de Tesson (1804-1879).

JACQUES BABINET (1794-1872)

Babinet apresentou uma nova proposta de experiência para detectar efeitos do movimento da Terra através do éter, utilizando o fenômeno de difração. A sua proposta encontra-se numa carta enviada à *Academia de Ciências de Paris* em 1862. Nas palavras Babinet:

“encontrado no desvio produzido pelas redes (de difração) um desvio constante que desde agora tornará sensível o deslocamento do micrômetro e o movimento da Terra no espaço qualquer que seja a natureza desse movimento” (BABINET, 1862, p.2).

O seu raciocínio foi o seguinte: quando se estudam fenômenos em que aparecem efeitos de aberração, reflexão e refração da luz, não se pode medir velocidade da Terra por compensação de efeitos. Porém, a deflexão da luz por rede de difração é um fenômeno físico diferente e independente desses e não deve ocorrer compensação. Babinet analisou o que deveria ocorrer com a luz desviada por uma rede de difração em movimento em relação ao éter, indicando que deveria haver uma variação do desvio angular proporcional à velocidade da Terra e que dependeria também do ângulo em que a luz é desviada.

“ (...) o interesse de Babinet pelos estudos do éter, assim como o de vários outros homens de ciência de sua época, visava a Astronomia” (Grifo nosso) (PEITROCOLA, 1993, p. 9).

Babinet apenas fez a proposta teórica do experimento, mas não o realizou. Dois anos depois, aparentemente sem ter conhecimento do artigo de Babinet, uma experiência equivalente a essa foi realizada pelo espectroscopista Anders Jonas Ångström (1814-1874). Ele utilizou uma rede de difração que produz um desvio maior do que o discutido por Babinet (63°) e previu que esse ângulo sofreria variações de até 20” de arco, por causa do movimento orbital da Terra. Ele mediu então a posição das raias espectrais do Sol, em diferentes horários, procurando variações de sua posição e comparando com a teoria.

Havia, assim, uma situação complexa na década de 1870. Por um lado, a teoria de Fresnel para o éter e seu arrastamento parecia bem confirmada, e essa teoria excluía a possibilidade de detectar o movimento da Terra através do éter por experimentos envolvendo apenas refração, reflexão e aberração da luz. Por outro lado, não era absurdo pensar que outros fenômenos

luminosos pudessem trazer evidências do movimento da Terra através do éter – e, aparentemente, Fizeau e Ångström haviam detectado fenômenos desse tipo.

EXPERIMENTOS DE MICHELSON & MORLEY

Albert Abraham Michelson (1852-1931) foi um físico norte americano, que ganhou o prêmio Nobel da Física no ano de 1907 por ter conseguido medir a velocidade da luz (Em 1873 ele obteve o resultado $c=299.853$ km/s – muito próximo de valor atual $c=299.793$ km/s). e contribuiu muito para a academia científica da época. Seus principais trabalhos são: “*Velocidade da Luz*” (1902), “*Estudos em Óptica*” (1927), “*No Movimento relativo da Terra e do Éter luminífero*” (1881) e “*O Movimento relativo da Terra e do Éter luminífero*” (1887).

Os trabalhos de Michelson, principalmente o dos 1881 e 1887, causaram grande impacto nos meios científicos da época. No final do século XIX, a comunidade científica considerava que a Física, a ciência em si, estivesse praticamente pronta, em que só haveria algumas considerações que logo seriam finalizadas. Uma dessas considerações existentes era sobre a propagação da luz, que não tinha uma explicação satisfatória ou coerente sobre o seu comportamento. A teoria ondulatória da luz estava em alta na época levando a crer que a luz se propagaria em um fluido que seria chamado de éter ou éter luminífero.

Alguns cientistas da época não entravam em consenso a respeito de *como* seria o éter, mas o mesmo não se podia dizer quanto à *existência* do éter: poucos questionavam se o éter existia mesmo ou não. O éter possuía ao mesmo tempo certas propriedades que eram necessárias para explicações referentes aos fenômenos luminosos; também não possuísse um corpo, forma ou contorno, fosse impalpável e também imponderável, onipresente no ar e também fosse imóvel para os corpos celestes.



Michelson – e depois Edward Williams Morley (1838-1923) também – propôs um experimento que permitisse determinar a velocidade da Terra em relação ao éter. Michelson realizou em 1881 uma construção de instrumento chamado de *interferômetro* com a finalidade de detectar o éter luminífero. Este experimento, realizado foi aperfeiçoado, levado a termo em 1887, com a devida colaboração de Morley um Químico norte americano. A diferença entre os experimentos realizados em 1881 e 1887 está apenas na sua precisão, mas mantendo a semelhança na montagem para detecção dos resultados. Enfatizando, o experimento realizado por Michelson tinha a função de verificar se a Terra se move em relação ao éter e se a velocidade da luz é sempre a mesma em relação a este éter. O fato de o éter ser totalmente imóvel em relação a qualquer referencial do universo estabeleceria um sistema de referência perfeito no espaço, capaz de permitir a determinação do movimento absoluto. Em 1886, Michelson conseguiu reproduzir o experimento de Fizeau – que não havia sido repetido antes – e obteve resultados que confirmavam a teoria de Fresnel.

Apenas no século XIX, com o impacto dos experimentos de Michelson & Morley (1887), Morley e Miller (1904 e 1905), e por Miller (1921), começou a surgir a ideia do princípio da relatividade para os fenômenos ópticos e eletromagnéticos.

Michelson não voltou a utilizar o interferômetro de 1887. No entanto, o seu colega Morley, com a ajuda de um estudante, Dayton Miller, realizou novos experimentos com o interferômetro. Em 1904 eles montaram o interferômetro sobre uma base de madeira e sobre uma base metálica, para testar se a eventual contração de Lorentz e Fitzgerald poderia depender do



Costuma-se dizer erroneamente que:

Os experimentos de Michelson e Morley representam a primeira prova sobre a inexistência de um éter luminífero.

Costuma-se dizer erroneamente que:

O experimento de Michelson & Morley é considerado como sendo a ponte para a Teoria da Relatividade.

material. Com os interferômetros de madeira e de metal observaram efeitos muito pequenos, cerca de cem vezes menores do que o efeito previsto pela teoria de Fresnel. Concluíram que esses interferômetros se contraíam ao se mover através do éter, como o antigo; ou que a velocidade do éter no laboratório onde o experimento foi feito era inferior a 3 km/s. Um ano após, 1905-6 realizaram novo experimento no alto da colina *Euclid Heights* de Cleveland (altura de aproximadamente 300 metros) para tentar detectar um vento de éter significativo. O experimento não foi publicado, na época, mas obtiveram um resultado positivo, que era previsto pela teoria de Fresnel. Na década de 1920, Miller construiu um interferômetro melhor, ele realizou esse experimento no alto Monte Wilson. Nessa nova versão do interferômetro Michelson & Morley, Miller conseguiu detecta efeitos positivos do movimento da Terra em relação ao éter.

2º- Experimento de Michelson & Morley de 1887

Em 1887, o experimento de Michelson foi aprimorado com a ajuda de Morley. Essas mudanças que ocorreram no experimento, que foi realizado inicialmente em 1881 por Michelson tinham o intuito de se evitar os erros que ocorreram na primeira montagem.

“No primeiro experimento uma das principais dificuldades encontradas foi girar o aparelho sem produzir distorção; e outra foi a extrema sensibilidade das vibrações” (MICHELSON & MORLEY, 1887, p.336).

Deixando de lado o experimento de 1881 – que não era conclusivo – agora, em 1887, Michelson dispunha de dois excelentes resultados. Um confirmava a teoria de Stokes para o arrastamento do éter por corpos transparentes; o outro refutava a teoria de Fresnel para o éter estacionário. Seria possível explicar os dois experimentos com uma única teoria? Aparentemente, não. Seria preciso elaborar uma nova teoria do éter, ou descobrir algum modo não muito evidente de conciliar uma das teorias existentes com os resultados obtidos. Michelson-Morley enfatizaram no seu trabalho de 1887, as dificuldades em estabilizar a interferência no primeiro experimento Michelson de 1881.

O segundo experimento fluuava em um pequeno fosso alagado com mercúrio representado pela Figura 1 (retirado do original). Michelson-Morley tomaram alguns cuidados que são adicionais para obter a precisão dos resultados experimentais, alguns desses cuidados foram os fatores naturais (ar, vento e etc.) e a extrema sensibilidade das vibrações do aparelho.

Mesmo com todos esses cuidados que eles tiveram para realizar o experimento - a sensibilidade do segundo experimento era dez vezes maior do que o dispositivo utilizado em Potsdam - não foi possível obter o resultado que era esperado; as medidas e os cálculos que foram efetuados não permitiam detectar o menor efeito que era proveniente da rotação terrestre.

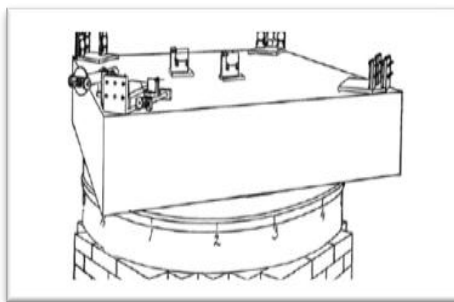


Figura 1. Ilustra o segundo experimento realizado por Michelson & Morley⁴

Mas este fenômeno não pôde ser observado por Michelson & Morley, o que os levou a concluírem que o éter não tinha qualquer efeito sobre a velocidade da luz (MICHELSON & MORLEY, 1887, p.338-339). Mas não de que o éter não existia.

“(...) qualquer movimento relativo entre a Terra e o éter, deve ser pequeno, muito pequeno o suficiente para refutar a explicação de Fresnel sobre a aberração. Stokes tem dado uma teoria sobre aberração que supõe o éter na superfície da Terra está em repouso com relação a este último, e só exige, além disso, que a velocidade relativa tem um potencial, mas Lorentz mostra que essas condições são incompatíveis para explicar a aberração” (MICHELSON & MORLEY, 1887, p.338-339).

A tentativa de Michelson de testar a teoria de Stokes

Michelson também procurou evidências de que a teoria do éter viscoso de Stokes pudesse ser correta. De acordo com essa teoria, o éter só seria totalmente arrastado a pequenas distâncias da superfície da Terra; a grandes distâncias, o arrastamento seria pequeno.

Em 1897, Michelson fez um novo experimento que é pouco citado pelos historiadores da ciência. Ele procurou detectar um vento de éter a uma certa altura sobre a superfície da Terra. Ele construiu um aparelho que pode ser descrito como um interferômetro *vertical*, retangular, constituído por tubos evacuados de grande comprimento. Realizando o experimento, Michelson observou efeitos irregulares e muito pequenos. O resultado obtido foi que as velocidades da luz no tubo superior e no tubo inferior poderiam ter uma diferença máxima de um bilionésimo da velocidade da luz (ou seja, $10^{-9} c$).

A conclusão final de Michelson foi que ou o éter é arrastado (de acordo com a teoria de Stokes) mas o arrastamento se estende até enormes distâncias da superfície da Terra; ou o éter não é arrastado (de acordo com a teoria de Fresnel) mas os corpos se contraem (como sugerido por Lorentz e Fitzgerald).

“Dever-se-á, com base nesse resultado, aceitar que o éter toma parte no movimento da Terra e, deste modo, que a teoria da aberração de Stokes é a teoria correta? As dificuldades que esta

⁴Figura obtida de Michelson, Albert Abraham & Morley, Edward Williams, "On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether", p.334.

teoria encontra na explicação da aberração parecem-se demasiado grandes para poder aceitar esta opinião e, pelo contrário, levaram-me antes a procurar a maneira de remover a contradição entre a teoria de Fresnel e o resultado de Michelson. Consegui isso com uma hipótese que tinha apresentado algum tempo antes e que, como depois vim a saber, também ocorrera a FitzGerald” (LORENTZ, 1895, p. 121).

Esse trabalho de Lorentz (1895) descreve o experimento de Michelson [5]. O autor propõe, para explicar esse resultado, a utilização da hipótese *ad hoc* para contração (chamada atualmente de contração de Lorentz-FitzGerald) longitudinal dos corpos em movimento. O pesquisador Poincaré (1906) destaca no seu trabalho que nenhum experimento, incluindo o de Michelson-Morley, obteve sucesso em detectar esse movimento.

“Parece que a impossibilidade de detectar experimentalmente o movimento absoluto da Terra é uma lei geral da Natureza; fomos levados naturalmente a admitir tal lei, a qual devemos chamar de Postulado da Relatividade, e admiti-lo irrestritamente” (POINCARÉ,1906).

Logo após, Poincaré prossegue falando da proposta de Lorentz e FitzGerald para o resultado negativo de Michelson e Morley. Nas palavras de Poincaré:

Uma explanação tem sido proposta por Lorentz e por FitzGerald, os quais introduziram a hipótese da contração experimentada por todos os corpos na direção de seus movimentos em conjunto com a Terra e proporcional ao quadrado da aberração {i.e. $(v/c)^2$ }; essa contração, a qual devemos chamar de Contração de Lorentz, se ajusta ao experimento de Michelson e todos os outros experimentos realizados até hoje (POINCARÉ,1906).

REFERÊNCIAS

- 1- MICHELSON, A. A e MORLEY, E. W, *The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*. AMERICAN JOURNAL OF SCIENCE. p. 332-345, 1887.
- 2- PIETROCOLA, M. *A extensão do princípio de relatividade à óptica*. In: SEMINÁRIO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA, 1993, Caxambu. Anais SEMINÁRIO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA. Caxambu - MG : SBHC, 1993.
- 3- LORENTZ, H. A. *A experiência inferencial de Michelson*, 1895. Extraído do artigo: Attempt of a Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Bodies.

TEXTO IV

“Pouco nos importa que o éter exista realmente; este é um tema para os metafísicos. O relevante para nós é que tudo ocorra como se ele existisse, e que esta hipótese se mostre cômoda para a explicação dos fenômenos” (POINCARÉ, p.157, 1902).

JULES HENRI POINCARÉ E A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL



Jules Henri Poincaré⁵ nasceu em 29 de abril de 1854, em Nancy na França e faleceu em 1912. Os pais de Henri Poincaré pertenceram a uma família de classe média alta. Seu pai, Leon Poincaré, foi professor de medicina na l'École Préparatoire de Médecine e na Faculté de Médecine em Nancy. Leon Poincaré é conhecido por ser um dos pioneiros da Medicina do Trabalho. Outro membro importante da família de Poincaré foi seu primo Raymond Poincaré (1860-1934), filho do seu tio Antoine, foi um político francês, ele foi presidente da França, de 1913 a 1920, durante a Primeira Guerra Mundial.

As habilidades matemáticas de Poincaré começaram a ser vistas quando ainda estudava no Liceu de Nancy, na França. Quando estudava no Liceu, venceu vários concursos na área da Matemática, em âmbito nacional. Nos anos de 1873 a 1875, Poincaré estudou na Escola Politécnica. Em 1879, obteve o seu Doutorado em ciências matemáticas sobre equações diferenciais. Em 1881, tornou-se professor na Universidade de Paris, a partir de 1886, passou a ocupar a cadeira de Física Matemática e Mecânica Celeste. Poincaré permaneceu em atividade na Universidade de Paris até o seu falecimento no ano de 1912.

Quando Poincaré tinha 33 anos, foi eleito para a Academia de Ciências e, em 1908, para a Academia Francesa. Recebeu ainda inúmeros prêmios, nacionais e internacionais. Poincaré participou da 1ª Conferência de Solvay, em 1911.



Imagem 1:1ª Conferência de Solvay, 1911

Durante a sua vida acadêmica Poincaré publicou mais de 500 trabalhos, entre livros e artigos, além de notas de aula. Lecionou a disciplina de Física-Matemática, por mais de 20 anos

⁵Biografia foi retirada do *Dictionary of scientific biography*.

na Universidade de Paris. Dentro da Física, Poincaré também deu várias contribuições em diferentes áreas,⁶ tais como: mecânica celestial, mecânica dos fluidos, óptica, eletricidade, termodinâmica, mecânica quântica, **Teoria da Relatividade**, cosmologia, topologia algébrica, problemas dos três corpos, entre outros.

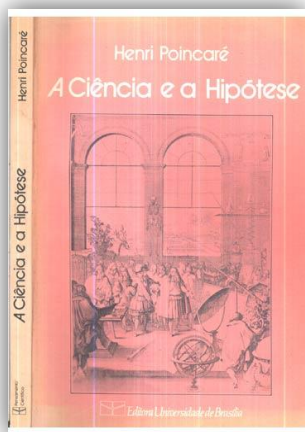
No final do século XIX e início do século XX, correu uma série de desenvolvimentos teóricos e também experimentais sobre a dinâmica do elétron, um desses desenvolvimentos teóricos estar presente na obra de Poincaré (1906). De acordo com Scribner (1964, p.672), “Para todos os contemporâneos de Einstein, o Poincaré parece ter chegado mais perto a respeito da Teoria Especial”. Muitos físicos desenvolveram trabalhos na mesma filosofia de Poincaré, um deles foi o de Larmor (1900), que chegou a relações praticamente idênticas às transformações de Lorentz para espaço e tempo.



Henri Poincaré foi um dos pesquisadores franceses mais influentes na história da física e da matemática dos séculos XIX e XX (MILLER, 1973; LOGUNOV, 1984; CUVAJ, 1968; SCRIBNER, 1973; GOLBERG, 1967; GIONNETTO, 1998).

A obra de Poincaré (1906) se caracteriza mais pelos métodos utilizados do que pelos resultados. O que se pode perceber de forma enfática na obra de Poincaré é que a sua obra não visa obter novas conclusões, mas sim consolidar as já obtidas por Lorentz e por outros (MILLER, 1973; CUVAJ, 1968; SCRIBNER, 1973; GOLBERG, 1967).

Uma das controvérsias mais marcantes na História e Filosofia das Ciências, é mostrar quem foi o devido “criador” da Teoria da Relatividade Restrita (GIANNETTO, 1998, p.171). As obras de Gionnetto (1998) e Whittaker (1953) trata do pensamento filosófico de Poincaré, dentro da concepção que Poincaré com sendo “criador” da Teoria, ou seja, de valores científicos que não “existem” e que ele faz “existir”. Segundo Martins (1994, p.131), os principais contribuidores para o desenvolvimento da Teoria da Relatividade foram Poincaré e de Lorentz, eles influenciaram profundamente para Física nas primeiras décadas do século XX.



A. Logunov reedita em 1984 a obra de Poincaré e atualizou sua apresentação, combinando com comentários modernos. Essa obra é moderna, ele realmente é a pérola da Física Teórica. Para Logunov a obra de Poincaré contém quase todos os fundamentos do que constitui a Teoria da Relatividade.

A contribuição de Poincaré para o que entendemos por Princípio da Relatividade ocorreu em três fases distintas: a primeira fase (1899) corresponde quando Poincaré falou de “lei da relatividade”, a segunda fase corresponde ao trabalho de 1900⁷ quando Poincaré propôs o “princípio da relatividade”, porém não o define completamente; a terceira fase foi em 1902, Poincaré apresenta uma definição mais formal do que seria o princípio do movimento relativo ou “princípio da relatividade”.

Em 1902, no seu livro “Ciência e hipótese”, Poincaré utilizou o nome *princípio do movimento relativo* (chamado por ele) para sua lei. Mas qual seria o motivo para aceitar esse princípio? Para Poincaré, ele seria simplesmente uma extrapolação dos

⁶Algumas de suas obras: *Électricité et optique* (1891); *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste* (1892-99); *Théorie mathématique de la lumière* (1892); *Leçons sur la théorie de l'élasticité* (1892); *Théorie analytique de la propagation de la chaleur* (1895); *Cinématique et mécanismes potentiel et mécanique des fluides* (1899); *Théorie du potentiel Newtonien* (1899); *Oscillations életriques* (1899); *Figures d'équilibre d'une masse fluide* (1902); *Cinématique et mécanismes* (1899).

⁷Apresentado no Congresso Internacional de Física, realizada em Paris (Paris, Gauthier-Villars, 1900), Tomo I, p. 1, pp.21, 22.

resultados experimentais obtidos durante o século XIX. Por mais que se tentasse, não se conseguia medir a velocidade da Terra em relação ao éter. Podia-se supor que os repetidos fracassos fossem devidos a um princípio fundamental, e que nenhum tipo de experiência, fosse qual fosse, permitiria jamais medir a velocidade de um sistema em relação ao éter; somente os movimentos relativos entre corpos materiais podem ser medidos.

“O PRINCÍPIO DO MOVIMENTO RELATIVO – Tentou-se, por vezes, relacionar a lei da aceleração a um princípio mais geral. O movimento de um sistema qualquer deve obedecer às mesmas leis, quer se dê em torno de eixos fixos, quer em torno de eixos móveis arrastados em um movimento retilíneo uniforme. É o princípio do movimento relativo, que se nos impõe por duas razões: em primeiro lugar, a experiência mais banal o confirma, em segundo, a hipótese contrária, repugnaria muito ao espírito. Portanto, vamos admiti-lo e considerar um corpo submetido a uma força. O movimento relativo desse corpo, com relação a um observador que se move com uma velocidade uniforme igual à velocidade inicial do corpo, deverá ser idêntico ao que seria seu movimento absoluto se ele partisse do repouso. Conclui-se, então, que sua aceleração não deve depender de sua velocidade absoluta; tentou-se, mesmo, a partir daí, uma demonstração da lei da aceleração. O princípio do movimento relativo é também muito interessante e merece, ele próprio, estudo. Tentemos, inicialmente, enunciá-lo de maneira precisa. Dissemos, acima, que as acelerações dos diferentes corpos que fazem parte de um sistema isolado só dependem de suas velocidades e de suas posições relativas e não, de suas velocidades e de suas posições absolutas, contanto que os eixos móveis aos quais esse movimento relativo se refere se movam uniformemente numa linha reta. Ou, se preferimos, as acelerações desses corpos só dependem de suas velocidades e de suas coordenadas e não, dos valores absolutos dessas velocidades e dessas coordenadas. Se esse princípio é verdadeiro para as acelerações relativas, ou melhor, para as diferenças de aceleração, combinando-o com a lei da reação, deduzimos que é também verdadeiro para as acelerações absolutas” (...) (POINCARÉ, 1902, p. 95-96).

Não se sabe se Einstein chegou a ler os trabalhos anteriores de Poincaré; é provável que não os tenha lido. Porém, sabe-se com segurança que Einstein e alguns amigos discutiram detalhadamente o livro *“Ciência e hipótese”*. De acordo com dois amigos de Einstein, Maurice Solovine e Conrad Habicht, Einstein leu esse livro de Poincaré entre os anos 1902 e 1903. Solovine⁸ foi o único que escreveu algo sobre essas reuniões. Nas palavras de Solovine: *“Este livro nos impressionou profundamente e nos manteve com a respiração suspensa durante várias semanas”* (EINSTEIN, 1956, p. VIII).

Assim, o princípio da relatividade de Poincaré não pode ser considerada uma teoria provisória em comparação à Einstein, mas sim uma teoria explicável aos desenvolvimentos

⁸SOLOVINE, Maurice. *Albert Einstein: letters to Solovine*. New York: Philosophical Library, 1987.

teóricos e experimentais sobre a dinâmica do elétron e uma revisão mais adequada da eletrodinâmica dos corpos. Einstein no mesmo ano da sua publicação de 1905, especificamente no mesmo volume do *Annalen der Physik*, publicou um documento que define a Teoria da Relatividade Especial como sendo uma contribuição de Lorentz e Poincaré (WHITTAKER, 1960, p.40).

Em 1920, Einstein aceitou a importância do éter na física de forma muito clara:

Recapitulando, podemos dizer que de acordo com a teoria geral da relatividade, o espaço é dotado de qualidades físicas; neste sentido, portanto, existe um éter. De acordo com a teoria da relatividade geral, espaço sem éter é impensável; pois em tal espaço não haveria propagação de luz, nem possibilidade de padrões de espaço e tempo (régua e relógios), nem portanto intervalos de espaço-tempo no sentido físico. Mas esse éter não pode ser pensado como dotado da qualidade dos meios ponderáveis, que consistem em partes que podem ser seguidas ao longo do tempo. A ideia de movimento não pode ser aplicada a ele (EINSTEIN, 1920, p.28).

REFERÊNCIAS

- 1- CUVAJ, C. *Henri Poincaré's Mathematical Contributions to Relativity and the Poincaré Stresses*. American Journal of Physics. Nova Iorque, (1968). 36, pp. 1102-1113.
- 2- GIANNETTO, E. "The Rise of Special Relativity: Henri Poincaré's works before Einstein". Congresso di Storia della Fisica e dell'Astronomia, XVIII, pp. 171-207.
- 3- LOGUNOV, A. A. *On the Article by Henry Poincaré 'On the dynamics of the electron*. Hadronic Journal. (1996), 19, pp. 109-183.
- 4- MILLER, A. I. *A Study of Henry Poincaré's 'Sur la Dynamique de l'Électron*. Archive for the History of Exact Sciences, vol. 10, p. 207-328, Setembro 1973.
- 5- POINCARÉ, H. *A Ciência e a Hipótese*. Brasília, Universidade de Brasília, 1984.
- 6- _____. *Sur la Dynamique de l'Électron*. Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, 1906 (sub. 23/07/1905), Palermo. Anais. Jan-1906. pp. 129-176.
- 7- SCHWARTZ, H. M. *Poincaré's Rendiconti Paper on Relativity. Part I*. American Journal of Physics. Nova Iorque (1971), vol.39, pp.1287- 1294.
- 8- SCRIBNER, Charles Jr. *Henri Poincaré and the Principle of Relativity*. American Journal of Physics. Vol. 32, p. 672.
- 9- WHITTAKER, E. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Los Angeles, Harper Torchbooks - Tomash Publishers, 1960. (The History of Modern Physics.) vol. 7.

TEXTO V

“SUR LA DYNAMIQUE DE L’ÉLECTRON”

Índice da Obra

- 1- Traduzindo a notação
- 2- Transformações de Lorentz
- 3- Transf. de Lorentz e o Princípio da mínima ação
 - 4- Grupos de Lorentz
 - 5- Ondas de Langevin
 - 6- Contração de elétrons
- 7- Movimento quasi-estacionário
- 8- Movimento arbitrário
- 9- Gravitação

A obra de Poincaré é bastante ampla e complexa, por causa disso, vamos abordar pontos relevantes da obra, a saber:

- 3- Transformações de Lorentz;
- 6- Contração de Elétrons,
- 9-Gravitação.

Em 1905 (o mesmo ano em que Einstein publicou seu primeiro trabalho sobre relatividade) que Poincaré deu sua maior contribuição ao assunto. Ele escreveu dois trabalhos – um mais longo, que foi publicado na Itália (na revista *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*) e um mais curto, apresentando apenas os resultados mais importantes, que foi publicado na França (na revista da Academia de Ciências de Paris). O trabalho longo, embora enviado para publicação em meados de 1905, saiu publicado apenas no ano seguinte – depois do trabalho de Einstein.

3 - TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ

As transformações de
Larmor

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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t\sqrt{1 - v^2/c^2} - x'v/c^2$$

Fitzgerald e Lorentz propuseram a hipótese de contração dos objetos para explicar o resultado negativo do experimento de Michelson e Morley. Essa contração foi posteriormente considerada uma consequência das transformações de Lorentz. Porém, Lorentz ainda não havia proposto suas transformações de coordenadas, nessa época.

Joseph Larmor (1857-1942), em 1893, publicou um trabalho sobre a teoria do éter. Larmor tinha como objetivo, a partir das equações de Maxwell, justificar os resultados negativos das experiências ópticas. Alguns anos depois, em

1900, Larmor publicou um livro intitulado “*Éter e matéria*”, o seu propósito neste livro era estabelecer as transformações de espaço e tempo que mantêm as equações de Maxwell invariantes.

É importante frisar que a ideia de éter é central na teoria eletromagnética de Maxwell. Maxwell tinha a certeza de que o éter existia e que era muito importante para sua teoria. Para ele, o campo magnético e o campo elétrico seriam modificações do éter, que adquiriam tensões e movimentos, por influência de cargas elétricas paradas ou em movimento (MARTINS, 2010).

Em 1895, Lorentz propôs sua primeira teoria do eletromagnetismo para sistemas em movimento, para efeitos de primeira ordem (v/c). Seu ponto de partida foi às equações de Maxwell. As equações foram escritas da forma atual, pela primeira vez, por Oliver Heaviside.

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \rho / \epsilon_0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\partial \vec{B} / \partial t \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} &= (\partial \vec{E} / \partial t + \vec{j} / \epsilon_0) / c^2\end{aligned}$$

No entanto, Heaviside, como Maxwell, assumiu que essas equações eram válidas apenas para a descrição de fenômenos descritos em relação a um referencial parado em relação ao éter.

Lorentz supôs que as mesmas equações deveriam ser válidas em relação a outros referenciais; e procurou as condições em que isso poderia ocorrer. Lorentz encontrou a densidade de força exercida pelo éter, que age sobre uma carga q em movimento em um campo eletromagnético (“força de Lorentz”):

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

Poincaré teve papel ativo nas discussões relativas à teoria de elétron de Lorentz a partir de 1899. Poincaré crítica às ideias expostas por Lorentz (1895), mas ele afirma que “*A teoria de Lorentz é muito sedutora; fornece uma explicação muito simples de certos fenômenos os quais as antigas teorias, mesmo a de Maxwell sob a sua forma primitiva (...)*” (1902, p.176). Poincaré crítica o trabalho de Lorentz (1902), mas define:

“A teoria de Lorentz é o que temos de mais satisfatório, (...). Essa teoria explica as correntes elétricas pelos movimentos de pequenas partículas eletrizadas. É, indubitavelmente, a que melhor explica fatos conhecidos, a que esclarece o maior número de relações verdadeiras, a que deixará mais vestígios na construção definitiva. (...). De qualquer maneira, graças a Lorentz, as leis da dispersão normal e anormal, a da absorção e os resultados de Fizeau estão interligados entre si e às outras propriedades do éter por laços que, sem dúvida, não mais se romperão. Note-se a facilidade com que o novo fenômeno de Zeeman encontrou seu lugar já preparado e, até mesmo, ajudou a classificar a rotação magnética de Faraday, que resistira aos esforços de Maxwell. Essa facilidade é uma boa prova de que a teoria de Lorentz não é um amontoado artificial destinado a se

dissolver. Provavelmente, ela será modificada, mas não destruída” (1902, p. 135).

Podemos dizer que a contribuição de Poincaré para teoria da relatividade especial ocorreu em respostas aos artigos de outros pesquisadores (Lorentz e Larmor). Poincaré apontou erros, aperfeiçoou vários pontos e propôs complementações às ideias apresentadas, ajudando a construir uma teoria mais clara e coerente.

Lorentz, em 1904, publicou um extenso trabalho intitulado de “*Eletromagnetic Phenomena in a System Moving with Any Velocity Smaller than that of Light*”, no qual propôs sua teoria exata da eletrodinâmica dos corpos em movimento. Lorentz apresentou sua transformação de coordenadas e tempo em duas etapas. Primeiramente, ele transformou do sistema S parado em relação ao éter para um sistema S' em movimento, utilizando as transformações da física clássica, a saber:

$$x' = (x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

O segundo passo, Lorentz transforma as coordenadas e o tempo do sistema em referência em movimento, utilizando as seguintes relações:

$$x'' = x' / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$y'' = y'$$

$$z'' = z'$$

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

Depois, Lorentz combinou os dois conjuntos de equações descritos anteriormente, obtendo a forma usual das transformações de Lorentz:

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

$$y'' = y$$

$$z'' = z$$

$$t'' = (t - vx/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Lorentz obteve também a transformação dos campos eletromagnéticos, que podem ser escritas da seguinte forma:

$$E'_x = E_x$$

$$E'_y = (E_y - v \cdot B_z) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$E'_z = (E_z + v \cdot B_y) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$B'_x = B_x$$

$$B'_y = (B_y + E_z \cdot v/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$B'_z = (B_z - E_y \cdot v/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Utilizando esse conjunto de equações, Lorentz mostrou que todos os efeitos se cancelam exatamente e que é impossível medir movimento da Terra em relação ao éter por fenômenos eletromagnéticos (e ópticos). Na opinião de Poincaré (1906): “*Essas equações admitem uma notável transformação descoberta por Lorentz, que é de nosso interesse, por explicar por que nenhum experimento é capaz de detectar nosso movimento absoluto em relação ao universo*” (POINCARÉ, 1906).

Analisando a alteração das forças eletromagnéticas quando os corpos se movem através do éter e supondo que as forças que mantêm a forma dos objetos sólidos se transformam do mesmo modo, Lorentz provou que os objetos devem sofrer contração dos seus comprimentos, quando se deslocam através do éter.

Em 1906 (quatro anos depois do livro “*A ciência e a hipótese*”), Poincaré mostrou que Lorentz não havia conseguido obter uma transformação adequada da densidade de corrente elétrica, e que era necessário introduzir essa pequena modificação para que todos os fenômenos eletromagnéticos fossem idênticos, em referenciais parados ou em movimento em relação ao éter.

Poincaré se propôs a completar a Teoria de Lorentz, dizendo:

“A importância da questão impeliu-me a reconsiderá-la; os resultados que obtive concordam com aqueles de Sr. Lorentz em todos os pontos importantes; fui levado a modificá-los e completá-los somente em pequenos detalhes; as diferenças, as quais são de importância secundária, serão vistas mais tarde” [grifo nosso] (POINCARÉ, 1906).

Poincaré batizou as “*transformações de Lorentz*” com esse nome. Delineando a ideia de Lorentz, ele expõe:

“A ideia de Lorentz pode ser sintetizada assim: Se for possível imprimir uma translação em comum a todo um sistema sem que qualquer fenômeno sensível {aparente no original} seja alterado, isso significa que as equações da eletrodinâmica desse meio não mudam sob certas transformações, as quais vamos chamar Transformações de Lorentz. [grifo nosso]; dois sistemas, um estacionário, o outro em translação, vêm a ser, portanto, a exata imagem um do outro” (POINCARÉ, 1906).

Poincaré prossegue:

“É necessário que se considere uma força especial que explique simultaneamente ambos; a contração (no eixo da direção do movimento) e a constância nos outros dois eixos. Tenho buscado determinar essa força e tenho concluído que ela pode ser representada por uma pressão externa constante agindo sobre o deformável e compressível elétron, cujo trabalho é proporcional à variação de volume desse elétron. Se adotarmos esse postulado da pressão constante, e se também assumirmos, como sugerido pelo experimento de Kaufmann, que toda inércia do elétron tem origem puramente eletromagnética, então a dinâmica do elétron pode ser construída em perfeito acordo com o Postulado da Relatividade. Isso é o que é mostrado aqui usando-se o princípio da mínima ação. (POINCARÉ, 1906).

Poincaré (1906) revelou a impossibilidade de um universo puramente eletromagnético e mostrou que as transformações de Lorentz formam um grupo (grupo de Lorentz). Um grupo (no sentido matemático) e que, embora tivessem sido deduzidas supondo-se que um referencial estava parado em relação ao éter e o outro em movimento, podiam ser aplicadas a dois referenciais inerciais em movimento em relação ao éter – ou seja, não era necessário fazer referência ao éter, para utilizar a teoria de Lorentz.

6 – A CONTRAÇÃO DE ELÉTRONS

Nesta seção Poincaré (1906), se põe a discutir especificamente a dinâmica do elétron. Nesse trabalho ele discutiu a teoria de Lorentz e analisou os vários outros modelos do elétron, a saber: Langevin-Bucherer e Abraham.

As teorias sobre os elétrons já tinham sido elaboradas antes da publicação dos trabalhos de Einstein (1905) e de Poincaré (1906). As principais são as de Max Abraham (1863-1927), Lorentz, Alfred Heinrich Bucherer (1863-1927) e Paul Langevin (1872-1946) e do Kaufman (1871-1947). Um dos propósitos dessas teorias era descrever a devida variação que ocorre da massa do elétron em alta velocidade. A outra, e associar a massa do elétron ao campo eletromagnético, integral ou parcialmente.

A contração de elétrons é um efeito *real*. Quando um corpo material se move, as forças moleculares se alteram por causa desse movimento e o objeto muda de tamanho e forma. Assim, se tivermos dois objetos idênticos, um parado e outro em movimento, aquele que está em movimento vão *realmente* se contrair e o outro vai continuar do mesmo tamanho.

Nas palavras de Poincaré (1906, p.65):

“Vamos considerar um elétron em movimento retilíneo e uniforme. Vimos que, com o auxílio das transformações de Lorentz, podemos reduzir o estudo do campo produzido por tal elétron, para o caso de um elétron estacionário; as transformações de Lorentz, portanto, transformam o estudo do movimento de um elétron real em movimento por um elétron ideal estacionário”.

A teoria de Langevin:

Langevin propôs, em 1905, um modelo para o elétron, semelhante ao de Lorentz, não obstante mantivesse o seu volume constante.

Experimento de Kaufmann:

Em 1901, ele mediu a razão e/m para elétron de baixa velocidade, isto é, conseguiu obter valores que concordavam com a Teoria de Lorentz.

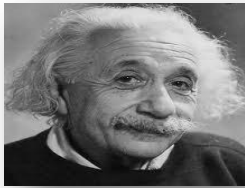
9-GRAVITAÇÃO

Poincaré também introduziu, nesse trabalho, a ideia de que o tempo pode ser manipulado como uma quarta dimensão, e mostrou a existência de invariantes relativísticos, como o intervalo espaço-temporal $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2$. Costuma-se atribuir esse passo a Hermann Minkowski, mas o trabalho de Minkowski foi desenvolvido apenas dois anos depois.

Por fim, Poincaré iniciou, nesse trabalho, a discussão sobre as consequências do princípio da relatividade no estudo da gravitação. Assim como os campos eletromagnéticos possuem diferentes valores quando medidos de diversos referenciais, o campo gravitacional também deveria ter equações de transformação análogas. Poincaré mostrou que isso teria consequências importantes e que introduziria uma alteração da força gravitacional agindo sobre corpos em movimento rápido. Provou que o efeito produziria um efeito de rotação do eixo das órbitas dos planetas (precessão do periélio) e calculou o efeito para o caso de Mercúrio. Existia, de fato, uma anomalia que já tinha sido detectada por Leverrier e por Newcomb, para o movimento de Mercúrio e de Marte. No entanto, o efeito que Poincaré calculou era aproximadamente um terço do efeito anômalo que havia sido observado. Somente com o desenvolvimento da teoria da relatividade geral, dez anos depois, houve uma concordância quantitativa entre a teoria e as observações astronômicas.

TEXTO VI

EINSTEIN & POINCARÉ



Em 1905 Einstein publicou dois artigos relacionados à teoria da relatividade. O primeiro artigo é mais extenso (**relatividade especial**), ele discutia a mecânica e o eletromagnetismo dos corpos em movimento.



O trabalho de Poincaré de 1905 (1906) tinha resultados que Einstein não conseguiu. Poincaré escreveu dois trabalhos – um mais longo, que foi publicado na Itália (na revista *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*) e um mais curto, apresentando apenas os resultados mais importantes, que foi publicado na França (na revista da Academia de Ciências de Paris).



Não aceitava o éter.

ÉTER

Aceitava o éter.

Tinha postulados claros e explícitos. Einstein se propõe a analisar a dinâmica dos corpos eletrizados de uma forma axiomática.

POSTULADOS

Sem postulados claros ou explícitos.

Deduções matemáticas simples.

DEDUÇÕES MATEMÁTICAS

Deduções matemáticas complexas, com muitas suposições.

Einstein mostrou que era impossível medir (experimentalmente) a velocidade da Terra em relação ao éter.

EXPERIMENTO

Poincaré mostrou que era impossível medir (experimentalmente) a velocidade da Terra em relação ao éter.

Einstein aceitava o princípio da relatividade

PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE

Poincaré (Lorentz) aceitavam o princípio da relatividade.

A única contribuição científica nova de Einstein em 1905 é a equação $E=mc^2$.

CONTRIBUIÇÕES

Planck corrigiu um erro na dedução que Einstein publicou em 1905 da relação massa-velocidade. Em 1907, Planck criou a termodinâmica relativística e chegou a uma relação mais geral do que $E=mc^2$.

- 1- Demonstração de que as transformações de Lorentz formam um grupo.
- 2- Introdução do intervalo relativístico $ds^2=dx^2+dy^2+dz^2-c^2dt^2$ e outros invariantes.
- 3- O estudo da dinâmica relativística de corpos extensos.
- 4- Os modelos do elétron e a investigação das consequências da aplicação do princípio da relatividade na gravitação.
- 5- Princípio da Relatividade.

A teoria se desenvolveu gradualmente, com a contribuição de um grande número de pesquisadores. A evolução da ciência é um trabalho coletivo e gradual, não é individual e instantâneo.

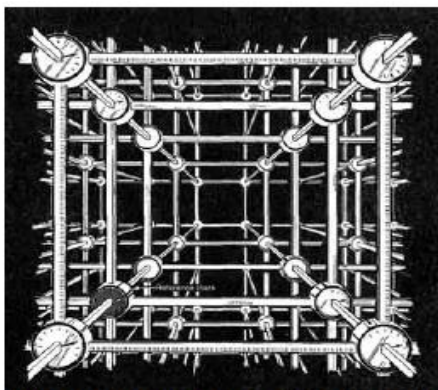
Quase todas as previsões científicas da “teoria” de Einstein já tinham sido publicadas por outros pesquisadores; ela não surgiu de forma mágica no ano de 1905. A teoria atingiu seu ápice nas mãos de Lorentz e Poincaré. O conteúdo empírico dessas duas teorias (Poincaré, Lorentz e Einstein) é idêntico. É preciso frisar que a principal diferença entre as duas abordagens é de natureza *epistemológica*, se manifestava tanto na questão da realidade dos efeitos relativísticos quanto no aspecto de aceitar ou negar o éter.

A SINCRONIZAÇÃO DE RELÓGIOS DE EINSTEIN E POINCARÉ

Quero destacar um ponto que julgo importante na comparação de Poincaré e Einstein sobre os fenômenos da relatividade: a relatividade dos intervalos de tempo ou simultaneidade da sincronização dos relógios. Antes de se discutir o assunto, há a necessidade de se definir claramente o que é simultaneidade: é a propriedade de dois eventos que ocorrem ao mesmo tempo em um referencial.

Os sistemas de relógios sincronizados através de sinais elétricos eram algo muito importante no final do século XIX, pois erros na sincronização dos relógios poderiam ser desastrosos para os trens que cruzavam os trilhos da Europa; na época a velocidade dos trens eram superiores a 150 km/h (MARTINS, 2005). Além disso, a sincronização de relógios através de sinais elétricos era também importante para comunicação em longa distância, por meio de sinais telegráficos. A Europa era “fábrica” de produção de equipamentos de precisão e coordenação do tempo, o sincronismo eficiente de relógios distantes era de extrema importância social e principalmente econômica. O historiador Peter Galison (2003) constatou que havia um grande número de patentes e diagramas relacionados à sincronização relógios ligados por sinais elétricos. Segundo Galison (2003, p. 34), “A coordenação de relógios aparecia nas páginas das revistas de Filosofia e até mesmo, de vez em quando, em publicação sobre Física”.

Outro aspecto importante da teoria da relatividade é a análise da simultaneidade.



Poincaré, em 1897 na França, estava se engajando na sincronização de relógios distantes, ele participava dos trabalhos do serviço de longitude. Em 1898, Poincaré havia falado sobre simultaneidade no seu artigo “La mesure du temps”. Poincaré diz na obra: “como os navegadores ou geógrafos determina a longitude (...). Eles carregam um cronômetro acertado para as horas de Paris” (1898, p.233). Ele argumenta nesse artigo sobre a dificuldade de estabelecer a simultaneidade de eventos distantes e conclui que isto pode ser estabelecido por convenção. Em 1900, Poincaré publicou um novo trabalho, no qual utilizou a expressão princípio do movimento relativo e interpretou fisicamente o tempo local de Lorentz: ele mostrou que essa variável representava o tempo medido quando os relógios eram sincronizados por meio de sinais luminosos.



Na conferência de Saint Louis, em 1904, Poincaré expôs:

Imagine dois observadores que queiram ajustar seus relógios por sinais ópticos; eles trocam sinais, mas como sabem que a transmissão da luz não é instantânea, eles cuidam de fazer as correções. Quando a estação B percebe o sinal vindo da estação A, seu relógio não deveria marcar o mesmo horário que o da estação A no momento em que emitiu o sinal, mas seu horário estará acrescido de uma constante que representa a duração da propagação. Suponha, por exemplo, que a estação A envia seu sinal quando seu relógio marca a hora 0, e que a estação B o percebe quando seu relógio marque a hora t. Os relógios estarão ajustados se a duração igual a t representar a duração da propagação; e, para verificar isso, a estação B envia, por sua vez, um sinal quando seu relógio marcar 0; então, a estação A deveria percebê-lo quando seu relógio marcasse t. Os cronômetros estão, então, ajustados. E de fato, eles marcam o mesmo horário no mesmo instante físico, mas sob uma condição, qual seja, que as duas estações sejam fixas. Caso contrário, a duração da propagação não será a mesma nos dois sentidos, uma vez que a estação A, por exemplo, move-se adiante para encontrar a perturbação óptica emanada de A, enquanto a estação B se afasta da perturbação emanada de A. Os relógios acertados desta maneira não marcam, entretanto, o tempo verdadeiro; eles marcam o que podemos chamar de tempo local, de tal forma que um deles anda devagar em relação ao outro. Pouco importa, uma vez que não temos meios de percebê-lo. Todos os fenômenos que ocorrem em A, por exemplo, serão mais tardios, e todos serão igualmente assim, e o observador que averiguá-los não perceberá isso, já que seu relógio está devagar; então, assim como o Princípio da relatividade imporia, ele não terá meios de saber qual está em repouso ou em movimento absoluto (1904, p. 611-612).

Poincaré mostrou que o método mais conveniente de se sincronizar relógios distantes é exatamente utilizando sinais luminosos. Quando se usa a luz para sincronizar os relógios, qualquer medida da velocidade da luz fica “viciada” e não poderá indicar a velocidade “real” da luz. Por isso, quando a velocidade da luz for medida em relação a um referencial em movimento em relação ao éter, utilizando relógios sincronizados pela luz, as medidas vão indicar que a velocidade da luz é sempre a mesma, em todas as direções e sentidos. Mas isso não é uma medida “real”, é apenas o resultado de uma convenção adotada para o processo de sincronização dos relógios.

Na Suíça, Einstein estava rodeado dessa tecnologia dos relógios coordenados. A Suíça havia uma importante rede de relógios elétricos sincronizados. Mas, ele se familiarizou com as questões técnicas de sincronização de relógios quando trabalhava como perito no escritório de Patentes da Suíça, em Berna. Para Einstein não existe o éter, então todos os referenciais são idênticos. Então para cada referencial inercial, Einstein imaginou uma rede de relógios sincronizados através de sinais luminosos (MARTINS, 2005, p. 26). Se existir um referencial inercial no qual a velocidade da luz se propaga com a mesma velocidade em todas as direções e sentidos, a mesma coisa deve acontecer em todos os outros. Ou seja, se tivermos um referencial no qual uma fonte luminosa está *parada*, a velocidade da luz deve ser a mesma em todas as direções. Além disso, pelo segundo postulando (a velocidade da luz não depende da velocidade da

fonte), se houver uma fonte luminosa *em movimento* nesse mesmo referencial, a velocidade da luz continuará a mesma, e também será isotrópica. Portanto, nesse referencial, qualquer que seja o estado de movimento da fonte luminosa, a velocidade da luz é sempre a mesma e igual a c , em todas as direções. Pelo princípio da relatividade, o mesmo deve ocorrer em todos os outros referenciais.

Existe uma diferença *conceitual* entre as duas abordagens. As duas concordam que as medidas da velocidade da luz são sempre as mesmas, em todos os referenciais inerciais. Assim, nenhum experimento pode mostrar que uma das abordagens está certa e a outra está errada. Galison (2003) mostrou que a teoria da relatividade especial foi fortemente influenciada por preocupações técnicas sobre o processo de sincronização relógios distantes por meio de sinais com a velocidade da luz.