

MUDANÇA CONCEITUAL NA RELATIVIDADE ESPECIAL

SERGIO M. ARRUDA
Dissertação de Mestrado
Ensino de Ciências (Modalidade Física)
Orientador: Alberto Villani

Instituto de Física
Faculdade de Educação
Universidade de São Paulo

11 de dezembro de 2010

Abstract

Some scientific concepts are only partially understood by many physics undergraduate students, being in consequence weakly linked to their conceptual ecologies. We have observed that the light postulate of special relativity theory (SRT), for example, in spite of its intelligibility, it is not plausible to them, being accepted mainly due to “external pressure” of scientific community and to the authority of books and teachers. SRT too was not initially plausible to the scientific community. However the theory was highly plausible for Einstein. A study of einstenian program around 1905 reveals that light quantum hypothesis and the theory of light propagation were the central elements that made SRT plausible to him. Based on this historical fact, we propose a strategy that seems appropriate for teaching counterintuitive concepts like those of modern physics. Historical arguments, which made the concepts or theories plausible in the past, are used to enhancing their “status”. The strategy is applied to SRT, particularly to the light postulate.

Resumo

Alguns conceitos científicos são apenas parcialmente entendidos por muitos estudantes da graduação em física, sendo em consequência fracamente ligados às suas ecologias conceituais. Nós observamos que o postulado da luz da teoria da relatividade especial (TRE), por exemplo, apesar de sua inteligibilidade, não é plausível para eles, sendo aceito principalmente devido à “pressão externa” da comunidade e à autoridade dos livros e do professor. A TRE também não foi inicialmente plausível para a comunidade científica. Entretanto a teoria era altamente consistente para Einstein. Um estudo do programa einsteniano por volta de 1905, revela que a hipótese do quantum de luz e a teoria da propagação da luz foram os elementos centrais que a tornaram plausível para ele. Baseados nesse fato histórico, nós propomos uma estratégia que parece apropriada ao ensino de conceitos contratintuitivos como os da física moderna. Argumentos históricos, que tornaram os conceitos ou teorias plausíveis no passado, são usados para aumentar o seu “status”. A estratégia é aplicada à TRE, em especial ao postulado da luz.

Agradecimentos

A todos os colegas pelo apoio e bom ambiente de trabalho que tivemos na Ala 2. Aos funcionários do IFUSP, particularmente à Lia, que sempre esteve tentando nos ajudar. Aos amigos do CRUSP: Ernesto, João, Serafim, Gilberto e Celoni, sem os quais a estadia no Bloco E não teria sido tão boa. Agradeço sobretudo ao Villani, que sempre se mostrou disposto a discutir comigo os problemas da dissertação. À CAPES e Universidade Estadual de Londrina pelo suporte financeiro.

A MEUS PAIS

Sumário

1	INTRODUÇÃO	8
2	MUDANÇA CONCEITUAL NA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL	10
2.1	O modelo de mudança conceitual de Posner e outros (MMC)	10
2.2	Problemas com uma MC na teoria da relatividade especial: revisão da literatura	15
2.3	Plausibilidade e aceitação do postulado da luz	19
2.4	Algumas abordagens à teoria da relatividade especial	22
2.5	Aceitação e plausibilidade da relatividade especial na história	26
	Notas	29
3	ELEMENTOS FUNDAMENTAIS DO PROGRAMA EINSTENIANO EM 1905	31
3.1	O problema fundamental do programa de Einstein em 1905 e os limites do eletromagnetismo	32
3.2	A essência da teoria de Maxwell e o quantum de luz	35
3.3	O problema do movimento absoluto no eletromagnetismo	41
3.4	Origens dos postulados	46
3.5	A revolução relativística	52
3.6	Evidências da consistência entre a TRE e a teoria do quantum de luz	55
	Notas	60
4	CONCLUSÕES	62
4.1	Esboço de uma estratégia geral para o ensino de física moderna	62
4.2	Aplicação da estratégia ao ensino da relatividade especial	66
4.3	Considerações finais/implicações gerais do trabalho	73

Notas	75
APÊNDICES	76
A. O problema da radiação do corpo negro	76
B. A teoria de Lorentz	84
C. O modelo de pensamento científico de Einstein	87
Notas	91
REFERÊNCIAS	93

Abreviações usadas

MC = mudança conceitual.

MMC = modelo de mudança conceitual de Posner e outros.

TRE = teoria da relatividade especial

PR = princípio da relatividade de Einstein

PL = princípio da constância da velocidade da luz

MM = experiência de Michelson e Morley

TQ = teoria quântica

MRU = movimento retilíneo uniforme.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O presente trabalho pode ser considerado como um esforço em dar consistência a uma antiga sensação sobre a relevância de se ler os trabalhos científicos de Einstein e de outros grandes criadores da física como Bohr, Planck, etc. Os artigos de Einstein, particularmente, eram muito belos. Alguns de seus trabalhos (lidos em inglês) mostravam a clareza, a consistência e a integração de seu pensamento. Tínhamos na época uma vaga intuição sobre a importância dos textos históricos para a formação do físico. Tais textos pareciam tratar de uma outra física, diferente, permeada de problemas, dificuldades, argumentos, dúvidas, etc, aparentemente muito mais profunda que a física encontrada nos livros-texto usuais. Em que consistia essa diferença? Porque parecia ser tão importante discutir com os alunos as idéias presentes nos artigos históricos? Não era apenas por uma razão cultural, para evitar uma formação árida ou excessivamente especializada ao aluno. A sensação que tínhamos era que a própria compreensão dos conceitos e teorias da física se tornaria superficial se não fossem discutidas as razões, motivações e problemas que explicavam as origens das teorias da física.

Necessitávamos de um referencial teórico para pensar esse problema e o modelo de mudança conceitual de Posner e outros oferecia certas idéias que pareciam apropriadas: um conceito físico pode ser inteligível para o aluno, embora inaceitável. Ou seja, o aluno pode entender e usar os conceitos na resolução de problemas apesar de eles serem contra-intuitivos ou pouco plausíveis. É como se houvesse dois níveis de compreensão: no primeiro nível o aluno está como que imerso na teoria, procurando entender seus conceitos e usá-los; num segundo momento ele se afasta e pensa nas razões pelas quais ele acredita nela. Muitas vezes o aluno aceita os conceitos físicos

porque estão nos livros e o professor os ensina. Entretanto, o desejável seria que ele tivesse argumentos científica e epistemologicamente fundamentados para justificar suas crenças. A nossa posição é que a história pode fornecer esses argumentos. Um estudo dos textos históricos pode revelar as principais motivações e os principais argumentos que deram a necessária sustentação e plausibilidade à teoria, permitindo que ela fosse aceita pela comunidade e se firmasse como uma teoria científica.

A relatividade especial de Einstein oferece um exemplo típico de uma teoria inteligível mas pouco plausível. Observa-se que os alunos do curso de física em geral não apresentam grandes dificuldades em usar os conceitos da teoria, embora muitos deles mantenham as concepções absolutas de tempo, espaço ou movimento, não aceitando realmente seus principais resultados. Nesse trabalho focalizamos particularmente o problema da aceitação do postulado da luz, que se choca com a adição de velocidades da mecânica, uma idéia fortemente enraizada em muitos alunos da graduação em física. Ao final, propomos uma estratégia geral que parece adequada para trabalhar o problema da falta de plausibilidade dos conteúdos de física moderna, que são quase todos distantes da realidade e por isso contra-intuitivos. A estratégia procura usar argumentos históricos para resolver esse problema.

A dissertação está estruturada da seguinte maneira. No capítulo 2, faz-se uma síntese do modelo de Posner e outros (sec 2.1) e em seguida o problema da mudança conceitual na TRE é analisado sob esse prisma (sec 2.2). A plausibilidade e aceitação do postulado da luz por alunos do curso de física são então discutidas (sec 2.3). Os principais enfoques aos postulados encontradas nos livros-texto são apresentados (sec 2.4) e o capítulo finaliza abordando como a questão da aceitação do postulado ocorreu na história, apontando que o PL só era inicialmente plausível para o próprio Einstein (sec 2.5). Procurando levantar as razões pelas quais a TRE era plausível para ele, no capítulo 3 fazemos uma análise histórica do desenvolvimento do programa de Einstein em torno de 1905. Os principais problemas e idéias que dirigiram a criação da teoria são discutidos (sec 3.1, 3.2 e 3.3), enfatizando-se particularmente a necessidade de que a teoria do quantum de luz seja levada em conta para que as origens da TRE sejam melhor compreendidas (sec 3.4 e 3.6). Finalmente, no capítulo 4 é delineada uma estratégia de ensino que visa tornar a teoria da relatividade especial plausível e são apresentadas as principais conclusões desse trabalho.

Capítulo 2

MUDANÇA CONCEITUAL NA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL

O tema da mudança conceitual na aprendizagem científica é atualmente uma das mais férteis linhas de pesquisa da área. Os referenciais teóricos sobre os quais se baseiam a maioria dos trabalhos sobre o tema podem ser separados em dois grandes grupos: os de fundamentação piagetiana, que fazem uso essencialmente da teoria da equilibração de Piaget (Rowell e Dawson, 1985), e os que, evitando fazer modelos sobre os processos cognitivos, adotam uma posição mais fenomenológica sendo às vezes chamados de Movimento das Concepções Alternativas (Gilbert e Swift, 1985; Millar, 1989). A esta última corrente faz parte o Modelo de Mudança Conceitual de Posner e outros (MMC), que parte de uma analogia entre o processo de aprendizagem e o desenvolvimento da ciência (Posner et al, 1982).

2.1 O modelo de mudança conceitual de Posner e outros (MMC)

O modelo de mudança conceitual de Posner e outros (MMC) [1] tem como principal pressuposto a existência das *preconcepções* ou concepções espontâneas, que são idéias intuitivas relativamente estáveis, parcialmente consistentes, úteis para a interpretação dos fenômenos cotidianos e que constituem o que se chama de “conhecimento do senso comum”. Devido a sua importân-

cia no processo de ensino/aprendizagem um estudo detalhado das concepções vem sendo feito há cerca de vinte anos tendo sido mapeados modelos espontâneos em quase todas as áreas da física [2]. Uma das características centrais das concepções espontâneas é a sua resistência a mudanças. Isso tem importantes consequências para o ensino de física, pois essa resistência poderia ser uma das principais causas para a não aquisição do conhecimento científico (Viennot, 1979). Sob essa perspectiva o problema central da educação científica seria o de promover uma mudança conceitual no aprendiz, ou seja, de criar condições para que o aluno abandone suas concepções, ou pelo menos limite o seu uso e adote como instrumento de interpretação do mundo as concepções aceitas pela comunidade científica. A particularidade do MMC em relação a outros modelos de mudança conceitual é o seu uso da história da ciência como fonte de inspiração para a compreensão da mudança conceitual na aprendizagem dos conceitos científicos.

A partir dos anos 60, as visões sobre o desenvolvimento da ciência começaram a se afastar de correntes mais empiristas, que enfatizavam a importância do teste experimental para a aceitação ou rejeição de teorias científicas. Os trabalhos de Kuhn dessa época, por exemplo, apontavam para o caráter conservador da ciência (Kuhn, 1959) e interpretavam o desenvolvimento científico como uma alternância entre um período denominado *ciência normal*, onde as pesquisas são determinadas por uma só teoria ou *paradigma* e o período revolucionário, onde o paradigma vigente é substituído por outro (Kuhn, 1962). Segundo a visão kuhniana, uma *revolução científica* se inicia com uma *anomalia*, isto é, uma gradual consciência na comunidade científica que o paradigma dominante não está conseguindo resolver certos problemas e que uma reestruturação das concepções existentes precisa ser efetuada. O resultado dessa crise é a emergência de um novo paradigma. No modelo de mudança conceitual de Posner e outros é feita uma analogia entre essa visão do progresso científico e o processo de aquisição do conhecimento. Como expresso pelos autores “às vezes os estudantes estão usando os conceitos existentes para tratar com os fenômenos novos” e em outras situações “os conceitos existentes são inadequados para permití-los compreender com sucesso um novo fenômeno”, o que pode levá-los a “substituir ou reorganizar seus conceitos centrais” (Posner et al, 1982). Esses dois padrões diferentes de mudança conceitual na aprendizagem são chamados no MMC respectivamente de *assimilação* e *acomodação* [3], com o objetivo de distinguir mudanças de pequena e larga escala (Strike e Posner, 1982). Portanto no MMC os termos *assimilação* e *acomodação* corresponderiam à *ciência normal* e *revolução*

científica da filosofia kuhniana. A função do paradigma seria desempenhada pelas concepções espontâneas e, de modo mais geral, pela chamada *ecologia conceitual*, ou seja, o conjunto das idéias que o aprendiz já possui no instante da aprendizagem [4]. Com esses termos e inspirados na história da ciência, os autores sugeriram quatro condições fundamentais para a ocorrência de acomodações: insatisfação com as concepções existentes e inteligibilidade, plausibilidade e fertilidade das novas concepções, das quais trataremos a seguir.

Como observado por Kuhn na história da ciência, no processo de aprendizagem o indivíduo também não tende a abandonar suas concepções até que ele se convença que mudanças menos radicais não funcionam. Assim, é razoável supor que para a ocorrência de uma acomodação é necessário que o indivíduo tenha “armazenado uma coleção de anomalias e perdido a fé na capacidade de seus conceitos correntes em resolvê-los” (Posner et al, 1982). Ou seja, uma pessoa deve primeiro ver uma concepção corrente com alguma *insatisfação* antes de seriamente considerar uma nova e a anomalia é a principal fonte de insatisfação para o indivíduo. Uma *anomalia* é experimentada quando o indivíduo tenta usar seus conceitos correntes numa nova situação (isto é assimilar alguma coisa) e não consegue. Ou seja, ele não consegue “dar sentido” a uma experiência nova (Posner et al, 1982). É semelhante à noção piagetiana de *desequilíbrio* ou conflito, que pode ser, por exemplo, a ocorrência de um evento inesperado, que não se “encaixa nas crenças existentes do estudante” (Dykstra, 1992) ou quando uma concepção, normalmente bem sucedida na interação com um certo domínio do mundo, “falha ao interpretar uma segunda porção do mundo” (Hashweh, 1986) [5].

Por outro lado, uma nova concepção só pode tornar-se uma candidata a substituta de uma concepção não satisfatória se for *inteligível*, isto é, conseguir fazer um mínimo de sentido para o aprendiz. Os autores separam a inteligibilidade em dois níveis: num primeiro nível, mais superficial, ela requer apenas a compreensão dos símbolos e sintaxe da linguagem; num segundo nível a inteligibilidade requer a construção de representações coerentes (na forma de proposições e/ou imagens) da teoria ou conceito.

Supondo que a nova concepção tenha sido entendida, a segunda condição que ela tem de satisfazer para que possa ser acomodada, diz respeito à sua *plausibilidade*. Os autores apontam dois critérios fundamentais usados para dar plausibilidade inicial para um novo conceito:

- ele resolve os problemas conhecidos (as anomalias);
- é consistente com outros conhecimentos do aprendiz, que podem ser

as suas suposições fundamentais (como crenças metafísicas e compromissos epistemológicos), experiências passadas e outras teorias.

Tanto na teoria inicial (Posner et al, 1982), quanto na sua versão mais recente (Strike e Posner, 1992), o modelo enfatiza a importância de credos metafísicos os quais podem ser decisivos na opção do aprendiz por uma assimilação ou uma acomodação do novo conceito.

Finalmente, se uma nova concepção além de inteligível e plausível for também *fértil*, isto é, conduzir a novas descobertas mostrando o seu potencial de ser estendida a novas áreas, então a acomodação será convincente [6].

Todo o processo de mudança conceitual se desenvolve tendo como cenário os conceitos já existentes do indivíduo. Esse conjunto pré-existente de idéias, a *ecologia conceitual*, influencia a seleção dos novos conceitos ou teoria, determinando a direção da acomodação. No modelo de mudança conceitual de 1982 são apontados os seguintes tipos de conceitos presentes na ecologia conceitual que são importantes para direcionar uma acomodação:

- anomalias: as características específicas das anomalias podem influenciar na seleção do novo conceito.
- analogias e metáforas: são usadas tanto na sugestão de novas idéias quanto na sua inteligibilidade.
- compromissos epistemológicos: tais como considerações sobre o que é uma boa explicação num determinado campo de conhecimento e/ou visões gerais sobre as características desejáveis de um conhecimento apropriado (como elegância, parsimônia).
- crenças e conceitos metafísicos: tanto a respeito da ciência (como simetria ou simplicidade das leis físicas), como em relação a conceitos específicos (p. ex. espaço absoluto).
- outros conhecimentos de outros campos ou teorias competidoras.

A importância da ecologia conceitual na mudança conceitual foi evidenciada desde o trabalho de 1982 (Posner et al, 1982). A ecologia influencia na ocorrência de acomodações determinando se as condições são possíveis de serem satisfeitas ou não. Inteligibilidade e principalmente plausibilidade são claramente dependentes das características gerais da ecologia conceitual e uma anomalia só produz insatisfação no indivíduo se ele a reconhece como tal e está comprometido com a redução das inconsistências de seu pensamento. Na versão de 1990 do modelo (Strike e Posner, 1992) essa importância é reforçada tanto na direção de “expandir as considerações a respeito da ecologia conceitual” no sentido de incorporar a esse conjunto de idéias outras atitudes que os estudantes têm a respeito da “natureza da ciência e da investigação

científica" e incluir as "percepções do aprendiz a respeito das tarefas da sala de aula", bem como investigar as relações entre o aprendizado científico e a crença na racionalidade do mundo físico, a qual pode influenciar no sucesso do aprendizado.

O modelo de Posner e outros foi posteriormente estendido por Hewson (Hewson, 1981). Foram introduzidos alguns termos novos que deram uma formulação alternativa à teoria inicial. A idéia central da teoria de Hewson é a de *status* de uma concepção, definida como o grau em que concepção preenche as condições de inteligibilidade, plausibilidade e fertilidade. Um conceito poderia ter dessa forma os seguintes status:

- nenhum status
- status I (inteligibilidade)
- status IP (inteligibilidade e plausibilidade)
- status IPF (inteligibilidade, plausibilidade e fertilidade)

Nesses termos o problema fundamental da educação científica seria o de abaixar o status das concepções alternativas e elevar o status das concepções científicas na mente do estudante. Os termos assimilação e acomodação da teoria inicial (que podem ser confundidos com os homônimos piagetianos) são denominados na teoria de Hewson *captura conceitual*, caso em que uma nova concepção é incorporada às concepções existentes e *troca conceitual*, quando a nova concepção conflitante com a antiga tem seu status aumentado em detrimento da existente.

O MMC traz diversas consequências para a pesquisa em ensino de ciências e para as atividades de ensino propriamente ditas. Suas implicações para o planejamento de estratégias de ensino são particularmente importantes. Uma revisão das principais estratégias para a promoção de mudanças conceituais é feita em Scott et al (1992). O artigo separa as estratégias em dois grupos: as baseadas no conflito cognitivo e sua resolução e as baseadas no desenvolvimento de idéias consistentes com o ponto de vista da ciência.

As do primeiro tipo incluem estratégias de fundamentação piagetiana que fazem uso de conflitos entre a estrutura cognitiva das crianças e um evento discrepante (Nussbaum e Novick, 1982a,b); estratégias que usam conflito entre dois sistemas representacionais da própria criança, ou seja, conflito entre duas estruturas cognitivas relacionadas à mesma realidade (Stavy e Berkovitz, 1980); estratégias que usam o debate entre aluno-aluno, aluno-professor e que visa confrontar as idéias dos alunos e o ponto de vista da ciência (Cosgrove e Osborne, 1985); que usam o debate e demonstração da situação física (Champagne et al, 1985); estratégias nas quais a resolução do

conflito é feita após a visão disciplinar ter sido introduzida (Rowell e Dawson, 1985). As do segundo tipo envolvem o desenvolvimento das idéias dos estudantes até o ponto de vista da ciência. Embora estejam classificadas em outro grupo, o conflito também é em geral levado em conta nesse caso, pelo menos potencialmente. Há estratégias que procuram desenvolver nos alunos uma compreensão qualitativa-intuitiva através do uso de analogias (Clement et al, 1987; Brown e Clement, 1989); estratégias que não querem substituir as teorias dos estudantes pelas teorias científicas mas permitir que eles tenham consciência de ambas através da comparação entre elas (Niedderer, 1987).

Na próxima seção vamos discutir alguns problemas com relação ao ensino da relatividade especial à luz do MMC. A teoria da relatividade especial foi a primeira teoria à qual o modelo foi aplicado. As condições para a ocorrência de acomodações para o caso da TRE são analisados em Posner et al (1982) e a influência da ecologia conceitual em Hewson (1982).

2.2 Problemas com uma MC na teoria da relatividade especial: revisão da literatura

Como alguns dos problemas de ensino/aprendizagem da TRE são interpretados através do modelo de Posner e outros? Em relação às condições para uma acomodação, vimos na seção anterior que a inteligibilidade requer num primeiro nível a decodificação da linguagem, isto é, a compreensão do significado dos termos, símbolos e sintaxe e, num segundo nível, a construção de uma representação coerente. Segundo Posner e outros, o primeiro aspecto da inteligibilidade da TRE não apresenta dificuldades para estudantes com conhecimento básico em álgebra [7]. O mesmo ocorre com a construção de uma representação coerente de partes da teoria, como os dois postulados, cuja inteligibilidade “não é particularmente problemática” (Posner et al, 1982). Entretanto surgem problemas com a inteligibilidade da teoria como um todo, isto é, quando se trata de imaginar um mundo em que tanto os dois postulados de Einstein como as suas consequências para as noções de espaço e tempo sejam verdadeiras. Ou seja, “é possível aplicar os postulados e fórmulas da relatividade especial de uma maneira superficial sem aquelas revisões necessárias das concepções de espaço e tempo...ou mesmo sem ter entendido todas as implicações de seus princípios” (Posner et al, *ibid*). O primeiro problema com o ensino da TRE é portanto a possibilidade que

os alunos tenham apenas uma compreensão superficial da teoria, não conseguindo operar uma revisão em seus conceitos centrais. Considerando que essa revisão é a revolução fundamental trazida pela TRE [8], esse ponto deve ser um dos principais em qualquer estratégia de ensino da teoria que vise a uma mudança conceitual.

Com relação ao problema da plausibilidade da TRE, podemos dizer que a teoria como um todo (postulados e principais consequências) não é inicialmente plausível devido principalmente às suas características contra-intuitivas, ou seja, por divergir da visão do senso comum, não encontrando suporte na ecologia conceitual do aluno. Isso pode ocorrer devido ao comprometimento do aluno com as noções absolutas de espaço e tempo (Posner et al, 1982) ou, no caso dos paradoxos (dilatação/contração), à compreensão insuficiente dos mesmos, considerados às vezes como tendo realidade apenas aparente (Hewson, 1982). A dificuldade em aceitar a “realidade” das consequências da TRE é também levantada por Angotti e outros que concluem que “os conceitos da relatividade são muito mais difíceis de aceitar e muito mais contrários à experiência, que a maioria dos livros-texto nos faz crer” (Angotti et al, 1978). Também poderão existir na ecologia conceitual do aluno certas idéias fortemente enraizadas, como o comprometimento com uma visão mecânica do universo (Hewson, 1982) ou com o movimento absoluto, como observado por Villani e Pacca em estudantes de pós-graduação em física (Villani e Pacca, 1987), que são obstáculos a uma mudança conceitual profunda. Provavelmente a questão da inteligibilidade global da teoria e sua falta de plausibilidade estão relacionadas, sendo ambas decorrentes principalmente do caráter contraintuitivo da TRE.

A relatividade também apresenta o problema de ser um conteúdo altamente elaborado, o que dificulta o uso de estratégias baseadas em conflito. Como vimos, no MMC uma concepção só é deslocada se há uma insatisfação com a concepção existente e existe uma nova concepção inteligível, plausível e frutífera. Portanto uma estratégia de ensino que vise uma MC deve procurar colocar dificuldades às concepções existentes através da criação de anomalias. Em certos casos entretanto, onde o conteúdo é sofisticado ou distante da realidade, pode ser difícil o uso dessa estratégia (Villani e Orquiza, 1993). Em relação à relatividade especial por exemplo, abordada no artigo de Posner et al (1982), essa questão é tratada rapidamente pois poucas evidências da “consciência de anomalias” foram observadas durante as entrevistas. O mesmo acontece dentro de uma estratégia piagetiana, com o problema de fazer com que os alunos atinjam o estado de “conflito sig-

nificativo" para conteúdos distantes da realidade. Dreyfus et al (1990), por exemplo, em relação à transmissão de traços hereditários, um conteúdo de biologia que se baseia em conceitos altamente abstratos como os genes (os quais não podem ser percebidos pelos sentidos), após encontrar que as principais concepções mantidas pelos estudantes reproduzem teorias de cientistas do séc XIX e conseguir produzir com dificuldade alguns conflitos, afirma que pode ser "bastante difícil senão impossível resolvê-los ao nível científico dos estudantes" (equivalente ao 1º ano do 2º grau, ou 16 anos de idade). Strike e Posner, na versão mais recente do MMC, também se referem à dificuldade em se criar anomalias quando as concepções são "fracamente conceitualizadas". Nesses casos poderá ser mais apropriado o uso de uma estratégia que substitua na ecologia conceitual do aluno aquelas idéias que dão sustentação à concepção (Strike e Posner, 1990).

A questão da influência do conhecimento existente (ecologia conceitual) na TRE é abordada em um artigo de Hewson (Hewson, 1982). O problema é tratado através de sua estratégia de abaixamento do status das concepções alternativas e levantamento do status das concepções científicas. O artigo focaliza principalmente as relações entre o conjunto C2 das proposições mais contraintuitivas da teoria (contração das distâncias e dilatação dos intervalos de tempo) e o conjunto de concepções C1, a aceitação da visão mecânica de mundo, evidenciada pelo comprometimento com a idéia de que objetos extensos de propriedades fixas (como comprimento e massa) são a realidade fundamental do universo e que qualquer explicação relativística pode (e deve) ser dada em última instância através de conceitos mecânicos. Em entrevistas com um professor de um curso introdutório de TRE, foi observado que o entrevistado havia inicialmente conciliado os dois conjuntos de concepções por meio de duas suposições auxiliares S: que a contração era um problema apenas perceptual, não ocorrendo realmente, e que a dilatação para qualquer relógio poderia ser explicada pela contração dos intervalos de tempo em relógios de luz. Segundo o autor, o uso dessa concepção auxiliar evidenciava a existência de um processo de captura conceitual (assimilação). O objetivo era transformar esse processo em troca conceitual (acomodação) através do abaixamento do status das concepções C1 e a elevação ou pelo menos a conservação do status do conjunto C2. No modelo de Hewson o abaixamento de status está diretamente relacionado à criação de insatisfação com a concepção existente. Isso foi conseguido ao se mostrar que as suposições auxiliares (aparência das contrações e explicação da dilatação em função de relógios de luz) eram desnecessárias. Isso mostrou também, segundo o autor,

a existência por parte do entrevistado de um compromisso com a parcimônia ou economia de conceitos na elaboração de teorias. Nesse caso a insatisfação foi causada pela falta de necessidade lógica das suposições auxiliares e não por uma anomalia. A mudança foi operada através de uma intervenção que abordava diretamente a questão do que deve ser a realidade na TRE, apresentando o ponto de vista que os eventos são os elementos fundamentais da realidade relativística, sendo os demais conceitos definidos a partir deles (o comprimento, por exemplo, pode ser entendido como a separação espacial entre dois eventos). Um outro elemento importante da ecologia conceitual realçado por Hewson é a motivação externa: o entrevistado foi em parte forçado a “achar a TRE plausível para que se sentisse fazendo parte da comunidade dos físicos”(Hewson, 1982).

Resumindo, podemos localizar na literatura as seguintes dificuldades com relação à aprendizagem da TRE. Em primeiro lugar, há problemas com a sua inteligibilidade global, isto é, em perceber todas as implicações de seus postulados e a conseqüente modificação da visão física de mundo, o que pode levar a uma compreensão superficial da teoria, como por exemplo a simples manipulação mecânica das fórmulas. Em segundo lugar, a teoria é não é inicialmente plausível, devido principalmente à natureza contraintuitiva de suas principais conseqüências (dilatação de intervalos de tempo e contração de distâncias) e também devido ao compromisso com certas idéias, como a visão mecânica de mundo ou o movimento absoluto. E em terceiro lugar o conteúdo é sofisticado o que dificulta a utilização de certas estratégias, como as baseadas na criação de insatisfação com as concepções existentes. Apesar disso, a maioria dos alunos acaba convivendo com esse desajuste entre entre os resultados da teoria e suas preconcepções. Afinal, como colocado por Hewson, se eles quiserem fazer parte da comunidade dos físicos têm de aceitar a teoria.

Esses dados questionam em parte o modelo do Posner e Hewson no que diz respeito à seqüência de abaixamento ou aumento de status: é possível passar da inteligibilidade à utilidade (ou uso) da teoria sem passar pela plausibilidade. A aceitação dos conceitos e teorias por pressão da comunidade de fato conferem uma “plausibilidade externa” que pode mascarar o verdadeiro problema: a falta de plausibilidade intrínseca da teoria da relatividade especial.

2.3 Plausibilidade e aceitação do postulado da luz

Nessa dissertação estamos particularmente preocupados com o problema de encontrar argumentos que possam dar suporte e plausibilidade ao postulado da luz, de modo que a aceitação dessa idéia por parte do aluno possa ocorrer através de argumentos racionais e não baseado na autoridade dos livros, do professor ou da comunidade. Entendemos que o postulado da luz (PL) ocupa uma posição central na TRE, no sentido de ser a peça fundamental do quebra-cabeça desvendado por Einstein e da revolução relativística. O PL é considerado aqui como o núcleo da teoria da relatividade especial, enquanto que o princípio da relatividade é a hipótese fundamental do programa relativístico como um todo [9].

O postulado da luz é formado pelo conjunto das seguintes proposições, que valem para todos os referenciais inerciais:

- a luz se propaga no vácuo com velocidade constante, independentemente do movimento do observador ou da fonte

- o valor da velocidade da luz no vácuo é igual a c , ou seja, 3.10^8m/s ;

- a velocidade da luz é a velocidade limite de propagação de sinais físicos.

Problemas com a plausibilidade do postulado da luz foram observados em alunos da graduação em física da Universidade Estadual de Londrina (5º período). Os alunos estavam cursando a primeira disciplina de Física Moderna do bacharelado e tinham acabado de ter 8 aulas de introdução à TRE (Eisberg-Resnick, 1979, apêndice A). A observação foi feita com base num questionário e em entrevistas com 3 alunos (gravadas em vídeo) através das quais pudemos fazer um levantamento preliminar sobre as dificuldades em aceitar o postulado da luz, o que será tratado a seguir. A entrevista também tratou de outras questões sobre as quais falaremos no capítulo 4.

Em relação aos alunos entrevistados, pudemos observar que eles sentem dificuldade em aceitar a idéia que a luz se move em relação a qualquer referencial inercial sempre com a mesma velocidade, o que leva a uma compreensão distorcida do postulado da luz. As indicações sobre essa visão dos alunos foram levantadas através de duas questões que envolviam o uso da adição de velocidades:

Q1. Suponha que você está se movimentando para a esquerda, com velocidade igual a $0.6c$ em relação a um referencial em repouso, e emite luz (ou fótons) na direção oposta dando uma “pis-

cada" numa lanterna. Com que velocidade você veria a luz saindo da lanterna?

Q2. Pela teoria de Maxwell, a luz é uma onda eletromagnética sempre em movimento no éter (ou no vácuo) com velocidade constante. Suponha que alguém emite luz com uma lanterna e você sai correndo atrás do feixe até atingir a velocidade da luz. Você acha que seria possível observar uma onda eletromagnética em repouso? [10]

FER, 22, por exemplo, respondendo a Q1 diz: "Eu entendo que a velocidade da luz é constante independente do referencial, do movimento do referencial. Eu veria ele [o fóton] com velocidade c ". "A partir do momento que eu to indo para cá [para a esquerda] com $0,6c$ e sairia o fóton para lá [para a direita] com c , eu pegaria a velocidade $c + 0,6c$. Só que a velocidade da luz, pelo que a gente aprendeu, é a velocidade limite do universo. Então eu não conseguiria visualizar uma velocidade maior". Para o caso em que tanto o fóton como ele se movimentam para o mesmo lado, ele responde: "Já para cá [o fóton emitido para a esquerda], eu estaria trabalhando menos da velocidade limite, então eu acreditaria que ele estaria a $0,4c$ ".

Em relação à questão Q2, ele responde que "veria uma onda parada", fazendo uma analogia com "dois carros em movimento um ao lado do outro andando à mesma velocidade", a partir do que se desenvolve o seguinte diálogo:

S (Sergio): "Veria a luz parada?"

F: "Isso"

S: "Mas a luz não anda sempre com velocidade c ?"

F: " c . É. Digo, assim pelo referencial. Mas se algum outro observador, digamos vendo, veria tanto eu como a luz com velocidade c . Para mim não. Para mim ela estaria..."

S: "Congelada?"

F: "Congelada. Lado a lado com ela, eu teria atingido a velocidade dela. Andando à mesma velocidade dela eu estaria vendo, acredito, ela parada. Como se ela estivesse parada."

Posteriormente na entrevista, a questão foi retomada. Conversávamos sobre a natureza corpuscular e a ondulatória da luz. Ele entendia a luz como formada por duas coisas diferentes, "o fóton e a onda", sendo que o movimento do fóton cria a onda. Foi perguntado então se ele, movimentando-se com a mesma velocidade do fóton e vendo-o em repouso, conforme ele havia

respondido anteriormente, veria ou não uma onda?

F: "Não eu conseguiria ver o fóton e a onda, porque para mim o fóton estaria em repouso, mas ele tem uma certa velocidade, né. Essa velocidade criaria essa onda. Só se o fóton tivesse velocidade zero".

S: "Mas o fóton tem sempre uma certa velocidade?"

F: "Sempre está na velocidade c ".

S: "Agora em relação a você..."

F: "Ele está parado em relação ao meu referencial. Mas não em relação a um referencial em repouso".

S: "Então tem um referencial absoluto, em relação ao qual o fóton anda com velocidade c ? Como fica o postulado da luz?"

F: "Vai contra o segundo postulado. Isso aí eu não consigo aceitar no 2º postulado. Se eu conseguir atingir a mesma velocidade que ele [o fóton], como ele poderia estar parado?"

O conjunto das concepções de FER a respeito do postulado da luz parece ser o seguinte: ele aceita apenas a idéia de velocidade limite; mantém um referencial absoluto em relação ao qual a luz se move sempre com velocidade c ; em relação a um referencial móvel vale a lei de adição de velocidades de Galileo. O problema de FER é mais um problema de plausibilidade do postulado da luz de que de inteligibilidade. Ele entende o princípio em linhas gerais e sabe usá-lo, mas não aceita suas implicações com relação à adição de velocidades porque se choca com as suas concepções.

O problema de TER, 25, com o PL parece ser o mesmo que o de FER. Ele não aceita o postulado porque não consegue imaginar como mediria sempre a velocidade da luz como c : "minha cabeça se recusa a aceitar essa idéia; fica esquisito", ele diz. "O PL contradiz alguma idéia sua?", é perguntado. "Contradiz...a medição de velocidades". O terceiro entrevistado, JOS, 22, também tem dificuldades em aceitar a adição de velocidades relativística e também demonstrou clareza, com relação à questão Q1, na separação entre a resposta relativística e a sua resposta.

Procuramos também ter alguma idéia de como os alunos justificavam o PL. Em um seminário sobre as origens do postulado, proferido à mesma turma, perguntamos a eles porque aceitavam, ou acreditavam ou como justificavam o postulado da luz da teoria da relatividade de Einstein. Dos 10 alunos que responderam por escrito a pergunta, a grande maioria deles (cerca de 80%), disse que aceita ou que eles "acreditam na validade" do PL porque até hoje ele não foi "desmentido pela experiência" e que o postulado é "uma verdade baseada em dados experimentais". Outras respostas fornecidas: o PL é

consequência do PR (20%); toda teoria física precisa de uma “grandeza absoluta” para a sua sustentação (20%); acredita na TRE porque ela explica uma “grande quantidade de fenômenos” (10%). Embora o objetivo fosse apenas fazer um levantamento preliminar sobre os principais critérios de validação de teorias científicas usados pelos alunos, pudemos observar uma tendência ao uso de uma filosofia da ciência semelhante ao “falseacionismo dogmático” ou “ingênuo” ou ao “empirismo clássico” (Lakatos, 1979) [11]. Parece entretanto que o PL, bem como muitos outros conceitos da física moderna e mesmo da física clássica são aceitos devido à autoridade do livro ou do professor, como observado nas entrevistas. Publicamente o aluno age como se acreditasse, mas tem consciência dos conflitos entre a teoria científica e suas idéias, podendo até apontar algum dos buracos em sua formação. FER, por exemplo, diz: “o que faltou no curso, ou se teve foi muito superficialmente que eu não consigo me lembrar, é como se chegou nessa velocidade c ; porque essa velocidade c . Fica assim falha algumas definições: a velocidade c , o vácuo, a onda eletromagnética, que torna para a gente as coisas muito abstratas”. E completa: “o difícil é trazer o 2º postulado para a realidade”.

Podemos esperar que a distância entre os conceitos da física moderna e a realidade ou a experiência imediata seja uma das principais dificuldades para o aprendizado significativo desses conteúdos. Um dos entrevistados (JOS) chegou a quantificar essa dificuldade: 30% para a parte de contas e 70% para os conceitos. Um outro aluno (TER) sugere que o curso de Estrutura da Matéria deveria ser relacionado aos cursos anteriores de física básica, para que “o choque não fosse tão grande”.

2.4 Algumas abordagens à teoria da relatividade especial

De certa forma a importância de dar plausibilidade aos conceitos da TRE é intuitivamente reconhecida pelos professores. Isso pode ser percebido por exemplo em relação a alguns dos enfoques à teoria adotados em certos textos. Algumas dessas abordagens são analisadas em Dorling (1979). O autor separa as várias maneiras de estabelecer os princípios da relatividade e da invariância da velocidade da luz em duas categorias. A primeira, que pretendendo abordar a questão historicamente, discute a controvérsia sobre o arrastamento do éter, a experiência de Michelson-Morley (MM) e a invari-

ança da velocidade da luz, obtendo desse “fato experimental” o princípio da relatividade. E a segunda, que considera que a controvérsia sobre o arrastamento é uma história interessante porém desnecessária à compreensão da teoria. No que segue, vamos discutir duas abordagens ao ensino da TRE usando parcialmente a classificação feita por Dorling no artigo citado, introduzindo pequenas modificações necessárias para acomodar outros textos e propostas de curso que analisamos.

A abordagem via problema do deslocamento em relação ao éter é a usualmente encontrada nos livros texto de relatividade. Nesse enfoque, a TRE, ou os seus postulados fundamentais, são apresentados como respostas aos problemas referentes ao movimento em relação ao éter, o que culminou com o experimento de Michelson-Morley, discutido em geral com um certo detalhamento. Vamos a alguns exemplos.

O “Berkeley Physics Course”, Vol 1, Mechanics (Kittel et al, 1962), trata no Capítulo 10 do problema da medição da velocidade da luz e a experiência MM, enfatizando as raízes experimentais do princípio da constância da velocidade da luz no vácuo (PL). No capítulo seguinte, o livro abre com a afirmação: “O resultado nulo do experimento de Michelson-Morley sobre a detecção do arrastamento do éter pode ser entendido somente fazendo uma revolucionária mudança em nosso pensamento; o novo princípio que precisamos é simples e claro: a velocidade da luz é independente do movimento da fonte ou do receptor. Isto é, a velocidade da luz é a mesma em todos os sistemas de referência em movimento uniforme com respeito à fonte. Todas as consequências da TRE seguem dessa nova suposição, a qual deve ser adicionada às nossas suposições anteriores que o espaço é isotrópico e uniforme e que as leis fundamentais da física são idênticas para quaisquer dois observadores em movimento uniforme relativo” (p.245).

A mesma justificativa para a introdução dos postulados é apresentada por R. Resnick em “Introdução à Relatividade Especial”, 1971 (edição original de 1968). No capítulo 1, após discutir a relatividade galileana, o problema do movimento absoluto no eletromagnetismo, a experiência de MM e as tentativas de FitzGerald-Lorentz de superar o problema, a seção 1.9 (os postulados da TRE) é iniciada com: “em 1905, antes que muitas das experiências que discutimos tivessem sido executadas, Albert Einstein aparentemente desconhecedor de vários trabalhos anteriores importantes sobre o assunto, forneceu uma solução para o dilema que fazia frente à Física” (p.39), discutindo em seguida os dois postulados. O “dilema” a que se refere o autor é a necessidade, decorrente dos problemas do éter, de modificar a mecânica e as transfor-

mações de Galileu para que o PR pudesse ser estendido ao eletromagnetismo.

Na mesma linha segue French em "Relatividade Especial", 1974 (edição original de 1968). No capítulo 2 ele discute o problema do arrastamento do éter, a experiência de MM, etc, para no capítulo 3 perguntar: "Porque deu o experimento de Michelson-Morley um resultado nulo? Tratava-se de uma questão que preocupava algumas das mentes mais lúcidas do final do século XIX"(p. 71), discutindo em seguida a hipótese da contração de FitzGerald-Lorentz e a solução proposta por Einstein.

Poderíamos citar muitos outros autores que adotam o mesmo enfoque [12]. Em geral todos eles atribuem a Einstein a criação da teoria. Entretanto justificam a introdução dos postulados como decorrente das tentativas de se resolver o problema do arrastamento do éter. Isto é falso historicamente, como veremos no capítulo seguinte, pois esse problema, embora fundamental dentro do programa eletromagnético de Lorentz, Poincaré e outros, não tinha a mesma importância dentro do programa unificador einsteniano em 1905. É bem provável que esse enfoque tenha se inspirado na reconstrução histórica feita por Whittaker em "A History of the Theories of Aether and Electricity" publicado em 1951-3, onde ele atribui a criação da TRE a Lorentz e Poincaré considerando-a como uma resposta a um dos mais "intrigantes problemas da filosofia natural do final do sec XIX", ou seja, "a determinação do movimento relativo entre a terra e o éter"(Whittaker, 1989, p.27). Nesse livro o trabalho de Einstein é considerado apenas como uma "amplificação" dos trabalhos dos outros autores. Atualmente, principalmente depois do artigo de Holton "On the Origins of the Special Theory of Relativity"(Holton, 1960), há consenso entre os historiadores que a análise de Whittaker estava equivocada. [13]

Uma das abordagens não históricas que destacamos aqui poderia ser chamada de abordagem "experimental" à TRE, por utilizar a possibilidade de fundamentar experimentalmente alguns dos resultados notáveis da teoria como a dependência da massa com a velocidade e os fenômenos da contração de distâncias e a dilatação temporal. Em geral esse enfoque se baseia no filme "The Ultimate Speed"(Bertozzi, 1964) e em experimentos de medição de tempo relativístico com mésons (Frisch e Smith, 1976). O livro de French, citado acima, inicia o capítulo 1 discutindo a dinâmica relativística a partir do filme de Bertozzi e no capítulo 4 usa o experimento com mésons para tratar o fenômeno da dilatação e a contração. O mesmo filme e experimentos semelhantes também são usados no Berkeley Physics Course, mas onde o enfoque experimental foi explorado de maneira mais ampla parece ter sido

no curso "Relatividade Especial: Módulo para Ciclo Básico"(IFUSP), coordenado pelo professor Rüdinger (Rüdinger, 1980). A partir do filme de Bertozzi e das experiências com mésons os principais tópicos da dinâmica e cinemática relativísticas são desenvolvidos. O curso possuía uma metodologia própria com forte preocupação em relação a objetivos atitudinais (Angotti et al, 1978).

A primeira abordagem considerava a TRE como uma resposta ao problema do movimento em relação ao éter, ou mais especificamente, como decorrente do experimento de Michelson e Morley. Entretanto, como já comentado, esse problema não era fundamental dentro do programa einsteniano e as razões e o contexto em que a relatividade foi criada foram outros. Apesar disso esse "folclore", como o episódio é chamado por Holton (Holton, 1969), persistiu durante muito tempo na comunidade científica, tendo influenciado a "história"da TRE contada nos livros didáticos. Isso pode ter sido causado pelo fato de a teoria de Einstein ter sido no início confundida com a de Lorentz. Entretanto Holton fornece uma outra explicação de cunho didático que parece bastante razoável: "quase todo livro-texto de ciência necessita valorizar um raciocínio indutivo claro e não ambíguo", pois espera-se que um estudante "possa aceitar mais facilmente uma teoria controversa como a de Einstein se for mostrado a ele que Einstein, ou pelos menos os seus leitores, se convenceram com base em algum experimento inequívoco"(Holton, 1969). Portanto a vinculação entre a TRE e o experimento MM teria sido enfatizada para facilitar o convencimento dos alunos, ou para dar plausibilidade à teoria, o que pressupõe que o raciocínio indutivo parece encontrar suporte na ecologia conceitual do aprendiz. Uma razão semelhante parece ter influenciado a abordagem experimental, que "deduz"os principais postulados da TRE de certos resultados experimentais (como a experiência de mésons). Nesse caso a plausibilidade é tratada como a consistência com o "método científico"usualmente entendido como um método que permite obter as leis fundamentais da Física por generalização de resultados e procedimentos empíricos, cujos pressupostos epistemológicos são em última análise idênticos ao do caso anterior.

Antes de passarmos à seção seguinte, vamos mencionar rapidamente algumas outras abordagens à TRE. O programa de integração entre espaço e tempo, iniciado por Minkowski (Minkowski, 1908) é um outro enfoque à TRE usado por muitos autores como Synge (Synge, 1956), Ugarov, a partir do capítulo 4, (Ugarov, 1979) e Landau e Lifchitz em "Teoria do Campo"(Landau e Lifchitz, 1966). A abordagem do espaço-tempo é elegante e concisa e por

outro lado mais abstrata que a einsteniana, o que a torna mais apropriada para cursos que privilegiam o formalismo da teoria [14]. Às vezes, alguns autores preferem desenvolver a TRE diretamente, assumindo a validade dos postulados básicos sem se preocupar com uma justificativa para isso. A introdução dos postulados também pode ser precedida de uma discussão sobre sistemas de referência e relatividade galileana, como no livro "Special Theory of Relativity" de Ugarov, citado acima, com o provável objetivo de evidenciar uma certa continuidade entre a teoria de Einstein e a mecânica newtoniana. Outras abordagens que merecem ser mencionadas são: a de Sears e Brehme em "Introduction to the Theory of Relativity", que faz uso dos diagramas de Brehme (Sears e Brehme, 1968); a de Janossi em "Theory of Relativity Based on Physical Reality", que parece ser uma tentativa de desenvolver consistentemente a eletrodinâmica de Lorentz (Janossi, 1971); e as abordagens axiomáticas, como em Reichenbach (1969) e Bunge (1967).

2.5 Aceitação e plausibilidade da relatividade especial na história

Os historiadores da ciência têm considerado a gênese da TRE de duas maneiras. A primeira delas, que deriva do livro de Whittaker já mencionado (Whittaker, 1989), enfatiza a continuidade entre os trabalhos de Lorentz, Poincaré e Einstein. Como vimos, nesse enfoque a TRE é considerada como uma resposta às dificuldades que a teoria de Lorentz vinha enfrentando em relação ao problema do deslocamento da terra em relação ao éter, tendo a experiência de Michelson e Morley desempenhado um papel fundamental na gênese da teoria. Por não considerar a TRE como uma ruptura em relação à física clássica, essa tese é chamada de evolucionária. A outra visão, a revolucionária, atribui a Einstein a criação da teoria realçando o caráter inovador e a coerência fundamental de seu trabalho. Essa é a visão defendida por Holton (1960), Goldberg (1969), Hirose (1976), Zahar (1973) e outros. Nessa visão a TRE é considerada uma revolução científica, no sentido de uma mudança fundamental em relação à física clássica, particularmente em relação aos conceitos de tempo e espaço, tendo os seus fundamentos sido colocados no artigo "Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento" de Einstein (Einstein, 1905c) [15]. No presente trabalho a gênese da TRE é considerada sob esse último prisma, apesar de uma leitura dos trabalhos de Einstein

no período evidenciem a continuidade dos mesmos em relação a física da época. Isso é particularmente visível no desenvolvimento de seu programa estatístico-quântico, apesar da revolucionária hipótese do quantum de luz proposta em 1905. Nesse sentido, os trabalhos iniciais de Einstein devem ser considerados mais como uma tentativa de resolver alguns problemas que ele via na física da época do que um deliberado afastamento da mesma [16].

Se olharmos para a história do desenvolvimento da TRE, podemos ver que a compreensão e aceitação da teoria não foi imediata. Segundo Illy, as razões principais para a sua aceitação por volta de 1910-11 foram a sua “coerência com os princípios da mecânica clássica e a sua semelhança com a teoria de Lorentz”(Illy, 1981). Mesmo Planck ou Minkowski, os principais responsáveis pelos desenvolvimentos posteriores da TRE e pela sua defesa perante a comunidade científica, não a separavam completamente da teoria do elétron (Villani, 1985). Após 1911, o sucesso da TRE deveu-se principalmente à incapacidade da teoria de Lorentz de dar conta dos fenômenos quânticos (Nugaev, 1985; Villani, 1985) e ao desenvolvimento do programa relativístico com a relatividade geral. As principais resistências apresentadas pela comunidade à plena aceitação da TRE foram a sua aderência à visão eletromagnética, em especial à hipótese do éter e a dificuldade em aceitar a radical modificação nos conceitos de espaço e tempo. Para ilustrar esse ponto vamos reproduzir as palavras de um físico da época: “Eu não acredito que exista alguém que possa afirmar verdadeiramente que ele é capaz de conceber o tempo como função da velocidade ou sustentar com convicção que seu ‘agora’ é o ‘futuro’ de um outro ou ainda ‘passado’ de um outro”(Magie, 1912; citado por Villani, 1985). Guardadas as diferenças, podemos dizer que a TRE, devido a razões muito semelhantes, era tão inaceitável ou pouco plausível para a comunidade científica da época como é atualmente para os estudantes. Em resumo, a TRE foi posteriormente considerada plausível devido principalmente à sua semelhança com a teoria de Lorentz e mostrou-se fértil ao ser estendida por Planck, Minkowski e pelo próprio Einstein. A teoria do elétron por sua vez mostrou-se insuficiente para dar conta do problema da emissão e absorção da radiação e foi abandonada.

Podemos dizer que a única pessoa para a qual inicialmente a TRE fazia sentido era o próprio Einstein. Para descobrir as razões que a tornavam plausível para ele temos de analisar o desenvolvimento de seu programa de pesquisa até 1909, que formava uma estrutura extremamente autoconsistente e fértil. Einstein percebia com clareza as principais dificuldades da teoria do elétron e do programa eletromagnético, que eram o problema com a radiação

no interior de uma cavidade (radiação do corpo negro) e o problema do movimento absoluto no eletromagnetismo. O primeiro desses problemas o levou à hipótese do quantum de luz e subsequentemente ao abandono do éter e o segundo à elaboração da TRE, num processo que começou com a elevação da invariância da velocidade da luz e do princípio da relatividade à categoria de postulados fundamentais, seguido de uma reanálise da teoria clássica da medição do tempo, uma tarefa em que ele provavelmente foi ajudado pela crítica de Mach ao mecanicismo (Hirosige, 1976). Com a nova teoria, Einstein conseguiu resolver o problema do deslocamento em relação ao éter e certas assimetrias da teoria eletromagnética, de uma forma mais econômica, sem recorrer a um número muito grande de hipóteses auxiliares como a teoria de Lorentz.

Antes de levantar os elementos fundamentais do programa de Einstein durante o processo de criação da TRE, vamos fazer algumas considerações gerais sobre o desenvolvimento de seu pensamento. Em primeiro lugar, a unificação de toda a física - em particular da mecânica e do eletromagnetismo - era o propósito geral da carreira einsteiniana (Klein, 1967) e, provavelmente, a questão fundamental da física desde Maxwell. Em busca de uma teoria unificadora Einstein foi guiado pela termodinâmica. Ele separava as teorias da física em dois tipos: as *teorias construtivas*, "que tentam construir uma representação dos fenômenos complexos a partir de algumas proposições relativamente simples- como a teoria cinética dos gases, por exemplo - e que fazem modelos sobre constituintes fundamentais; e as *teorias de princípio*, cujo "ponto de partida e fundamento não são constituintes hipotéticos mas propriedades gerais empiricamente observáveis dos fenômenos, princípios dos quais as fórmulas matemáticas são deduzidas tal que elas se aplicam a todo caso que se apresente", como por exemplo a termodinâmica. "O mérito das teorias construtivas está em seu alcance, adaptabilidade e clareza; o das teorias de princípio em sua perfeição lógica e segurança de seus fundamentos"(citações de Einstein, 1950, p.54). Einstein procurava portanto uma teoria de princípio, o que explica a forma com que a TRE foi estruturada.

Por outro lado, uma leitura dos trabalhos científicos e filosóficos de Einstein revelam como uma das características fundamentais a unidade de sua visão de mundo que, como apontava Born, "... não pode ser dividida em compartimentos estanques"(Born, 1959). Essa integração entre as contribuições de Einstein à física, em particular dos seus trabalhos iniciais, tem sido enfatizada por diversos autores desde o trabalho de Holton (Holton, 1960). No caso da mecânica estatística e teoria quântica essa característica é bastante

visível, ficando aparentemente os trabalhos sobre o programa relativístico como alguma coisa à parte. Entretanto, como veremos ao longo desse estudo, a TRE também resultou do projeto unificador einsteniano e de sua concepção física do mundo.

A integração e as diversas relações entre as contribuições de Einstein em 1905 tem sido comentada por diversos autores. Destacamos Miller (1976) e Nugaev (1985, 1988), o qual mais recentemente tem enfatizado a necessidade de considerar os trabalhos de Einstein sobre a teoria quântica para que a criação da TRE seja melhor compreendida. Isto também está visível em alguns textos do próprio Einstein como na Conferência de Salzburg (Einstein, 1909) e nas “Notas Autobiográficas” (Einstein, 1959, 1982). Embora, como apontado por Feyerabend (1974), possam surgir dificuldades se nós tentarmos delinear com precisão o programa unificador einsteniano, uma análise de seus principais trabalhos sobre a TQ e a TRE entre 1904 e 1909 pode pelo menos apontar os problemas e os passos fundamentais dados durante o desenvolvimento desse programa e evidenciar a conexão entre suas idéias quânticas e relativísticas, o que tem implicações para o ensino da TRE, como veremos.

Notas

[1] O modelo é exposto em Posner et al (1982), Strike e Posner (1982) e Hewson (1981).

[2] Trabalhos pioneiros na área: Driver (1973); Malgrange, Saltiel e Viennot (1973).

[3] Assimilação e acomodação também são termos piagetianos e, embora tenham semelhanças, não devem ser confundidos com os termos do MMC, como enfatizado pelos próprios autores.

[4] O conceito de ecologia conceitual, emprestado de Toulmin (Toulmin, 1972), foi introduzido em oposição à visão empirista do conhecimento que assume como principal pressuposto que as pessoas podem aprender alguma coisa mesmo na ausência de conceitos prévios (Posner et al, 1982).

[5] Um dos itens da agenda de pesquisa apontada por Dykstra é a investigação da natureza do desequilíbrio. Em particular ele pergunta se a noção de insatisfação do MMC não seria mais útil para o ensino que a de desequilíbrio (Dykstra, 1992).

[6] Também na história da ciência, como enfatizado por Lakatos em sua

metodologia dos programas de pesquisa (Lakatos, 1979) e por Kuhn em relação aos paradigmas (Kuhn, 1978), uma nova teoria no início representa apenas uma promessa de novas descobertas.

[7] Obviamente podemos esperar que a decodificação da linguagem ou a compreensão do formalismo se torna mais problemática se está sendo usada a formulação tetradimensional da TRE. Aliás, o problema da inteligibilidade do formalismo matemático parece ser um dos principais problemas do ensino de física no 2º grau.

[8] A revolução relativística poderia a princípio ser separada em duas partes: a obtenção das equações de Lorentz e a revolução conceitual propriamente dita trazida por uma nova teoria do espaço e do tempo. Entretanto, como veremos adiante, ela faz parte de uma sequência de mudanças conceituais em conceitos centrais da física.

[9] Em relação à posição do PR na TRE, Bunge não considera o postulado como constitutivo da teoria, mas como um princípio heurístico que “não acarreta a TRE, mas ajuda a suprimir as asserções que não se conformam com ele” (Bunge, 1967, p.183). Ao que parece, essa era também a posição de Einstein que se referia ao postulado como “um princípio de restrição para as leis naturais” (Einstein, 1949).

[10] A questão Q2 é o mesmo problema da perseguição de um raio de luz levantado por Einstein em 1890, do qual trataremos na seção 3.3.

[11] Obviamente que uma pesquisa sobre que “epistemologia espontânea” os estudantes de graduação apresentam, tem importância para o planejamento de estratégias de MC, principalmente se o problema principal sob foco estiver relacionado com a questão de aumentar a plausibilidade da nova teoria, como é o caso aqui.

[12] Exemplos Rindler (1960); Moller (1952); e inclusive Kuhn, em suas considerações a respeito da revolução relativística (Kuhn, 1978, cap.6).

[13] Para Dorling esse enfoque é decorrente do próprio Einstein, que na introdução do artigo de 1905 deixa entender que o PR seja decorrente do “insucesso das experiências feitas para constatar um movimento da terra em relação ao meio luminífero” (Einstein, 1905c).

[14] Sobre as diferenças entre a abordagem einsteniana e a de Minkowski ver Lucas e Hodson (1990).

[15] Maiores detalhes sobre as teses evolucionárias e revolucionárias sobre as origens da TRE podem ser encontradas em Villani (1991).

[16] Ver, por exemplo, McCormach (1970b).

Capítulo 3

ELEMENTOS FUNDAMENTAIS DO PROGRAMA EINSTEINIANO EM 1905

No início de 1902 Einstein começa a trabalhar nos fundamentos da mecânica estatística. De 1902 a 1904 ele publica três trabalhos, desenvolvendo o formalismo da teoria e redescobrimdo em parte alguns resultados que já haviam sido publicados por Gibbs em 1902 (Klein, 1973; Kuhn, 1978b; Mehra, 1975). Uma das idéias principais de Einstein no período era considerar o fenômeno da flutuação como um instrumento interessante para explorar o mundo molecular. No trabalho de 1904 ele chega a uma expressão da flutuação de energia e aplica essa expressão à radiação, obtendo resultados consistentes com a pesquisa sobre o comportamento da radiação térmica no interior de uma cavidade. O desenvolvimento posterior de seu trabalho toma três caminhos: investigação sobre a natureza da radiação e suas consequências para o programa eletromagnético; a aplicação da teoria da flutuação para conseguir dar plausibilidade à idéia de átomo (movimento browniano); e a busca de uma teoria unificadora que resultou na relatividade especial.

Nesse capítulo vamos discutir as mútuas relações e implicações entre o programa quântico e o relativístico em 1905, ou seja, entre a “hipótese heurística” de Einstein sobre a natureza da radiação e a TRE. O objetivo dessa análise é caracterizar os principais elementos de seu pensamento que deram sustentação teórica (plausibilidade) aos postulados da nova teoria e definiram as “condições de contorno” para a criação da relatividade especial.

3.1 O problema fundamental do programa de Einstein em 1905 e os limites do eletromagnetismo

O problema fundamental [1] do programa einsteniano em 1905 está colocado em seu artigo "Sobre um Ponto de Vista Heurístico à respeito da Criação e Conversão da Luz"(Einstein, 1905a), que foi o primeiro de uma seqüência de trabalhos importantes para a Física publicados no mesmo ano [2]. Einstein começa o artigo apontando para a "existência de uma diferença formal essencial entre a visão teórica que os físicos tiraram dos gases e outros corpos materiais e da teoria de Maxwell dos processos eletromagnéticos no chamado espaço vazio". Em particular, enquanto a "energia é uma função contínua no espaço para todos os fenômenos eletromagnéticos", inclusive a luz, para um corpo material ela "pode ser escrita como uma soma sobre átomos e elétrons". Dessa forma, como Einstein expressaria mais tarde, "a energia cinética e a energia do campo aparecem como coisas essencialmente diferentes"(Einstein, 1982, p.41), pois o número de graus de liberdade do sistema é finito no primeiro caso e infinito no segundo. Esse "dualismo"ou "diferença formal essencial", que tornaremos mais explícito abaixo, representava um estado de coisas altamente insatisfatório para Einstein.

A mecânica e o eletromagnetismo se estruturaram em torno de dois modelos diferentes a respeito dos constituintes fundamentais do universo: para a mecânica a realidade é formada por corpúsculos discretos ou partículas, dotados de massa e movimento e que interagem entre si através de forças de contato (como numa colisão) ou à distância (como na atração gravitacional); para o eletromagnetismo a noção fundamental é a de campo ou continuum através do qual as ações ou ondas (entre cargas elétricas, p. ex.) são transmitidas por contiguidade. Essas duas concepções fundamentais para a natureza última das coisas - partícula ou campo - definem o tipo de formalismo matemático da teoria. Assim se a entidade é do tipo partícula as equações básicas são derivadas totais em relação ao tempo. Na mecânica a equação fundamental é a segunda lei de Newton, que no caso unidimensional é dada pela expressão:

$$\frac{md^2x}{dt^2} = F(x, v, t) \quad (3.1)$$

onde x , v e $\frac{d^2x}{dt^2}$ são respectivamente a posição, velocidade e a aceleração

da partícula em um certo instante de tempo, m é a sua massa e $F(x, v, t)$ é a expressão da força que atua sobre ela no mesmo instante. Por outro lado, se tratamos com campos (ou ondas) eletromagnéticos no vácuo e na ausência de fontes, as equações fundamentais são as equações de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.2a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (3.2b)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.2c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.2d)$$

onde \mathbf{E} e \mathbf{B} são os campos elétrico e magnético, c é a velocidade da luz no vácuo ($= 300.000 \text{ km/s}$) e ∇ é o operador nabla, definido por:

$$\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k} \quad (3.3)$$

Vemos que as equações de Maxwell são derivadas parciais em relação à posição e ao tempo.

A tabela 3.1 resume as diferenças essenciais entre a mecânica e o eletromagnetismo, que representava o motivo da insatisfação geral de Einstein com a física da época.

Como expresso por M. J. Klein, “a pesquisa por um fundamento unificador para toda a física” caracteriza a carreira toda de Einstein (Klein, 1967). Mas diferente de Lorentz e outros que propunham uma “concentração de esforços em problemas cuja soluções poderiam assegurar uma física unificada baseada somente nas leis e conceitos eletrodinâmicos” (McCormach, 1970a), para Einstein nem o eletromagnetismo nem mecânica constituíam uma base segura para uma unificação. Suas dúvidas à respeito da possibilidade da mecânica oferecer uma base segura vieram da leitura da crítica de Mach a esse programa feita em “The Science of Mechanics” (Mach, 1949), cuja influência Einstein expressaria posteriormente (Einstein, 1982). Nós não vamos tratar desse ponto aqui [3]. Quanto ao eletromagnetismo, suas conclusões após a leitura dos artigos de Planck o convenceram da inaplicabilidade da teoria para todo o espectro, como discutiremos abaixo.

	MECÂNICA	ELETROMAGNETISMO
concepção básica	a natureza última é do tipo corpúsculo	a natureza última é do tipo contínuo
equações fundamentais	derivadas totais em relação ao tempo	derivadas parciais em relação à posição e tempo
variável independente	tempo	posição e tempo
tipo de interação	ação à distância	ação através de campos
energia cinética	soma sobre partículas (finitos graus de liberdade)	função contínua (infinitos graus de liberdade)

Tabela 3.1: MECÂNICA E ELETROMAGNETISMO: DIFERENÇAS FUNDAMENTAIS

Porque, para Einstein, o eletromagnetismo não era uma base suficientemente segura para uma unificação? A resposta para essa questão está no mesmo artigo sobre o quantum de luz, onde ele coloca que apesar da teoria ondulatória ter sido “excelentemente justificada para a representação de fenômenos puramente ópticos”, ou seja, difração, reflexão, refração e dispersão- “ é bastante concebível que uma teoria da luz envolvendo o uso de funções contínuas no espaço leve a contradições com a experiência, se aplicada a fenômenos de criação e conversão da luz”(Einstein, 1905a). Essa contradição é explorada por Einstein aplicando a teoria de Maxwell ao problema da radiação do corpo negro, como indicado abaixo.

Consideremos a radiação presente no interior de uma cavidade de paredes refletoras [4]. Planck havia conseguido mostrar que numa situação de equilíbrio entre a radiação e os osciladores vale a seguinte relação:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}U \quad (3.4)$$

onde $u(\nu, T)$ = energia por unidade de volume no intervalo de frequência entre ν e $\nu + d\nu$, U = energia interna média do oscilador de frequência ν e c = velocidade da luz no vácuo.

Por outro lado, pelo teorema da equipartição [5], a energia média por oscilador seria dada por:

$$U = \frac{R}{N}T. \quad (3.5)$$

Juntando as duas últimas equações, Einstein conclui que a lei de radiação do corpo negro de acordo com a teoria eletromagnética clássica seria dada pela (posteriormente chamada) lei de Rayleigh-Jeans:

$$u_\nu = u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{R}{N}T \quad (3.6)$$

“Essa relação, escreve Einstein, não só deixa de concordar com os experimentos como também mostra que em nossa representação não há nenhuma possibilidade de uma distribuição definida de energia entre o éter e a matéria”, pois a densidade de energia no interior da cavidade, dada por:

$$u = \int u_\nu d\nu = \frac{R}{N} \frac{8\pi}{c^3} T \int \nu^2 d\nu = \infty \quad (3.7)$$

diverge, ao invés de tender à lei de Stefan-Boltzmann:

$$u = aT^4 \quad (3.8)$$

Por outro lado, continua Einstein, no limite em que $\frac{\nu}{T} \Rightarrow 0$, a lei de Rayleigh-Jeans, eq. (3.6), pode ser obtida da lei de radiação de Planck:

$$u_\nu = \frac{A\nu^3}{e^{B\nu/T} - 1} \quad (3.9)$$

o que permite Einstein concluir que “quanto maior for a densidade de energia e maior o comprimento de onda da radiação, mais utilizável é a base teórica usada ...; para pequenos comprimentos de onda e baixa densidade de radiação [6], entretanto, a base falha completamente”.

3.2 A essência da teoria de Maxwell e o quantum de luz

Nos dois séculos que se seguiram à criação da mecânica, o seu formalismo e seus procedimentos gerais foram aplicados, melhorados e estendidos a diversas áreas. Pelo menos até o último quarto do sec XIX ela era considerada por grande parte da comunidade científica como a base da física. Seus pressupostos fundamentais ou sua visão de mundo apresentava no entanto problemas

profundos. A principal dificuldade em relação à filosofia mecanicista era entender a ação à distância, ou seja, a possibilidade dos corpos poderem se afetar mutuamente sem um meio que possibilite a transmissão da ação. Essa deficiência do mecanicismo foi uma das principais motivações para que se procurasse desenvolver teorias em que a idéia da ação à distância não estivesse presente. A noção de um contínuo como o substrato fundamental do universo, através do qual ação ou a energia pudesse ser transmitida começou a ser elaborada numa forma consistente a partir de Faraday. Mais tarde, a provável existência das ondas eletromagnéticas sugerida por Maxwell em 1865 acrescentou um novo e poderoso argumento nessa direção. O meio transmissor foi chamado éter e caracterizado às vezes como “uma substância contínua preenchendo todo o espaço; que pode vibrar como luz; se manifestar como eletricidade positiva e negativa; que em vórtices constitui a matéria; e que transmite por contiguidade e não por impacto toda ação e reação de que a matéria é capaz”(Lodge, 1882, 1892, 1907; esta e as demais citações deste parágrafo foram extraídas de Goldberg, 1970); às vezes descrito, não tão detalhadamente, como “um sólido elástico, compressível e não gravitacional”(Kelvin, 1907); ou então não tão materialmente, como em Larmor (1900), para quem “tudo o que se sabe (ou talvez se precise saber) sobre o éter é que ele é definido por equações diferenciais”, sendo desnecessário explicar suas propriedades ou estrutura. Seja como for, apesar das diferentes caracterizações do éter, até as idéias de Einstein sobre a relatividade serem compreendidas e aceitas, o eletromagnetismo para a maioria dos físicos do início do sec XX era inconcebível sem a idéia do éter, que para alguns era “tão essencial como o ar que respiramos”(J. J. Thomson, 1909).

Para Maxwell, que se fundamentou na teoria da ação contígua dos fenômenos eletromagnéticos de Faraday, o campo eletromagnético era uma espécie de “estado mecânico de um meio dielétrico, que incluía o éter como caso especial”, permanecendo a matéria e o éter como a “mesma espécie de entidade”(Hirotsugu, 1969). Hertz, por outro lado, em seu trabalho “Electric Waves”(publicado originalmente em alemão em 1892), percebendo as dificuldades em interpretar o eletromagnetismo afirma que “a teoria de Maxwell é seu sistema de equações”(Hertz, 1962, p.21), sintetizando em seguida as diferentes “representações” dessa teoria aceitas na época (Hertz, *ibid*, 22-28):

- no primeiro ponto de vista a atração entre dois corpos é considerada como uma espécie de “afinidade espiritual”entre eles, uma ação à distância pura, como na lei de Coulomb e que exige para se manifestar pelo menos a presença de dois corpos.

- a segunda visão é praticamente idêntica à primeira necessitando, entretanto, de apenas um corpo para que a ação possa existir. É o ponto de vista da teoria do potencial.

- o terceiro ponto de vista afirma que as “ações entre corpos separados depende parcialmente de sua ação direta e parcialmente da influência do meio”. Ou seja, essa concepção realiza uma espécie de fusão entre a ação à distância e a ação por contiguidade. É a posição de Helmholtz.

- a quarta posição é a “concepção pura de ação através de um meio”, coincidindo, na opinião de Hertz, exatamente com a visão de Maxwell.

Com Lorentz, a noção de campo eletromagnético evoluiu para uma concepção mais próxima da atual. Seu trabalho inicial de 1892 (ver apêndice B), motivado diretamente pela eletrodinâmica de Hertz, tinha o objetivo de “trazer a teoria eletromagnética numa forma explicitamente análoga à da dinâmica e então por meio desse formalismo, junto com a hipótese de um éter estacionário, encontrar um método de tratar os fenômenos eletromagnéticos num corpo móvel” (Hiroisige, 1969). Na teoria de Lorentz (apêndice B) os constituintes básicos da Física são partículas carregadas e o éter estacionário. O campo eletromagnético é um estado dinâmico do éter e destituído de todas as qualidades mecânicas. Nesse sentido, com Lorentz, o éter tornou-se uma realidade física independente (Hiroisige, 1969).

Uma outra característica importante da visão de Lorentz sobre o eletromagnetismo é que para ele o *núcleo da teoria de Maxwell* era a propagação da ação eletromagnética através do éter com a velocidade da luz (McCormach, 1970a; Hiroisige, 1969). Porque a velocidade da luz deveria ter esse lugar proeminente na teoria de Maxwell? Das equações fundamentais do eletromagnetismo, eq (3.2), obtemos que os campos \mathbf{E} e \mathbf{B} satisfazem as seguintes equações:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 \quad (3.10a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \partial^2 \mathbf{B} / \partial t^2 \quad (3.10b)$$

As equações acima são equações de onda cujas soluções são campos ou ondas eletromagnéticas senoidais se deslocando com velocidade c . Uma das características de uma onda é que sua velocidade depende de parâmetros relacionados exclusivamente ao meio. No caso de ondas em uma corda, por exemplo, que são descritas por equações semelhantes às equações (3.10), a

velocidade depende da tensão a que a corda está submetida e de sua densidade. Portanto, no caso das ondas eletromagnéticas, a velocidade dependeria de parâmetros relacionados exclusivamente ao éter. Em 1865, Maxwell mostrou que a velocidade da luz seria dada por:

$$c = \frac{1}{(\epsilon_o \mu_o)^{1/2}} \quad (3.11)$$

onde ϵ_o = constante dielétrica e μ_o = permissividade magnética do vácuo. Portanto a velocidade da luz aparece na teoria de Maxwell como uma constante fundamental, tendo como soluções únicas para a eq.(3.10), campos se propagando com velocidade c .

Assim, se pudéssemos observar os campos em repouso, como colocado no paradoxo da perseguição de um raio de luz de Einstein (seção 3.3), significaria que as equações de Maxwell só valeriam para um sistema de referência especial, em repouso em relação ao éter e não universalmente, tendo, por isso, de serem modificadas. Einstein tentou, por algum tempo, esse caminho, sem sucesso. A outra possibilidade era assumir a validade das equações de Maxwell para sistemas em MRU em relação ao éter, o que implicava na constância da velocidade da luz para esses referenciais e no abandono do éter como referencial absoluto e como meio propagador. Mas como se poderia conceber naquela época uma onda eletromagnética sem um meio? Lembremos que essas reflexões foram feitas por Einstein antes de ele ter concebido a idéia de quantum de luz.

Logo após ter lido os artigos de Planck sobre o corpo negro, ficou claro a Einstein que o fato da emissão e absorção de energia se dar na forma de quanta de magnitude $h\nu$ estava em total contradição com a mecânica e o eletromagnetismo (Einstein, 1982, p.48). Nas suas Notas Autobiográficas, Einstein coloca que o seu interesse após a leitura do artigo não se relacionava com as conseqüências imediatas dos resultados obtidos por Planck, mas com a seguinte questão: "qual a conclusão geral a que se pode chegar partindo da fórmula da radiação, no que se refere à estrutura da radiação e, de um modo geral, no que se refere aos fundamentos eletromagnéticos da física?" (Einstein, 1982, p.50). Na busca por uma resposta consistente a essa pergunta, Einstein foi levado a inventar uma nova teoria para a radiação. Essa nova teoria está colocada no seu artigo sobre o quantum de luz, já citado (Einstein, 1905a).

Nesse artigo, depois de discutir as dificuldades do eletromagnetismo com a radiação em uma cavidade, Einstein pergunta: se o eletromagnetismo não consegue dar conta de fenômenos desse tipo como nós poderemos entender o

comportamento da radiação nesses casos? Sua resposta (Einstein, 1905a):

De fato, parece-me que as observações sobre a radiação do corpo negro, fotoluminescência e a produção de raios catódicos por luz ultravioleta...podem ser melhor entendidas através da suposição que a energia luminosa seja distribuída descontinuamente pelo espaço. De acordo com a visão considerada aqui...a energia...consiste de um número finito de quanta, localizados no espaço, que se movem sem serem divididos e que podem ser absorvidos ou emitidos somente por inteiro.

Para justificar porque a luz em regime de Wien, isto é, para pequenos comprimentos de onda e baixas temperaturas, poderia ser considerada como consistindo de quanta de energia, Einstein faz uso do princípio de Boltzmann:

$$S = \frac{R}{N} \ln(W) \quad (3.12)$$

cujos uso consistente implicava para ele em uma redefinição de probabilidade W [7].

Einstein define a entropia da radiação em uma cavidade de volume V (constante) pela expressão:

$$S = V \int \phi(u_\nu, \nu) d\nu \quad (3.13)$$

onde ϕ é uma função de u_ν e ν e, considerando em seguida a radiação em regime de Wien, ou seja, $\nu/T \Rightarrow \infty$, Einstein obtém uma expressão que dá a entropia em função do volume da cavidade:

$$S - S_o = \frac{U}{b\nu} \ln \frac{V}{V_o} \quad (3.14)$$

onde S_o é a entropia da radiação correspondente ao volume V_o .

Einstein considera, em seguida, "um número muito grande de pontos móveis (por exemplo moléculas) em um volume V_o ". Então, sendo V um sub-volume de V_o , "a probabilidade que num instante qualquer todos os n pontos móveis estejam (acidentalmente) no volume V " seria dada por:

$$W = \left(\frac{V}{V_o}\right)^n \quad (3.15)$$

de onde se obtém aplicando o princípio de Boltzmann:

$$S - S_o = \frac{R}{N} \ln(V/V_o)^n \quad (3.16)$$

Por outro lado, tendo em vista que a expressão para a variação da entropia para a radiação, equação (3.14), pode ser expressa por:

$$S - S_o = \frac{R}{N} \ln[(V/V_o)^{NU/Rb\nu}] \quad (3.17)$$

Einstein pôde concluir, por analogia com a equação (3.16), válida para um gás, que "se a radiação monocromática de frequência ν e energia U está confinada (por paredes refletoras) a um volume V_o , a probabilidade de que a um tempo qualquer a energia radiante total esteja em uma parte V do volume V_o será":

$$W = \left(\frac{V}{V_o}\right)^{NU/Rb\nu} \quad (3.18)$$

comparando essa expressão com a (3.15) ele conclui: "a radiação monocromática - nos limites de validade da fórmula de Wien - se comporta no sentido termodinâmico como se consistisse de quanta de energia mutuamente independente de magnitude $R/Nb\nu$ "[8], ou seja:

$$\varepsilon = \frac{R}{N}b\nu \quad (3.19)$$

Como em outros artigos, Einstein passa em seguida a analisar os fatos que dão suporte experimental à sua revolucionária conclusão. Ele mostra que a lei de Stokes (mudança na frequência da luz na fotoluminescência) e a ionização de gases por ultravioleta podiam ser consistentemente interpretadas através de sua hipótese. Entretanto, foi sua interpretação da "produção de raios catódicos pela iluminação de sólidos", ou seja, o chamado *efeito fotoelétrico* e principalmente pela predição da equação:

$$\Pi e = \left(\frac{R}{N}\right)b\nu - P \quad (3.20)$$

onde Π é o potencial limite e P a função trabalho [9] - completamente verificada em medições realizadas nos anos subseqüentes por Millikan - a conseqüência experimental mais importante da "ousada, para não dizer imprudente, hipótese de um corpúsculo de luz de energia $h\nu$ "(Millikan, 1916). Essa afirmação, feita após dez anos de trabalho experimental sobre a equação

(3.20), era uma opinião partilhada pela maioria dos físicos da época. A resistência ao quantum de luz era muito razoável, pois o “ponto de vista heurístico” sugerido por Einstein forçava uma revisão na muito bem estabelecida teoria eletromagnética de Maxwell-Hertz, construída ao longo de praticamente todo o século XIX. Para Einstein, esse foi o argumento decisivo para o abandono da idéia de um éter.

A concepção do quantum de luz e seus desdobramentos foram conclusões fundamentais do programa quântico einsteniano, defendidas por ele praticamente sozinho, até que a comunidade científica, ante as evidências experimentais, teve de aceitá-las por volta de 1924. Einstein jamais se afastou de suas idéias sobre a natureza da luz. A evolução dessas idéias o levaram em 1909 à natureza dual da radiação (Einstein, 1909) e em 1917 à emissão dirigida (Einstein, 1917), trabalhos que o ajudaram a completar a construção do conceito de foton [10].

É interessante observar também, a confiança de Einstein na mecânica estatística. Durante quase toda a sua carreira, mas principalmente por volta de 1905, a mecânica estatística deu o suporte teórico para as suas conclusões sobre a teoria quântica. O quantum de luz, por exemplo, é fundamentado através da aplicação consistente do princípio de Boltzmann à radiação em uma cavidade.

3.3 O problema do movimento absoluto no eletromagnetismo

Da interpretação da luz como uma perturbação que se propaga através de um meio contínuo todo penetrante, pode-se concluir que a radiação eletromagnética não tem realidade em si mesma, sendo uma manifestação do éter. O real, o existente é o éter. Por essa teoria a velocidade das ondas luminosas depende, como vimos, apenas da natureza e estado do éter, não tendo tudo mais (emissor, receptor, por exemplo) influência no valor da velocidade. Em particular o valor de c não pode depender do estado de movimento do emissor ou do receptor. Assim se o estado natural do éter é o repouso, hipótese central na teoria de Lorentz, a velocidade de propagação da luz será constante e igual a c (3×10^{10} m/s) apenas no referencial do éter. Uma consequência imediata desse fato é que nos experimentos em que fonte ou receptor se deslocam através do éter vale a lei de adição de velocidades de Galileo. Ou seja,

se um receptor se desloca com velocidade v , a velocidade da luz, v_R medida relativamente a ele será:

$$v_R = c \pm v \quad (3.21)$$

Isso pode ser testado experimentalmente, conforme mostra a figura 3.1 abaixo:

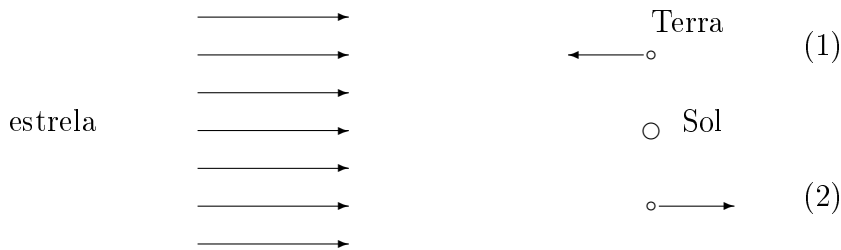


Figura 3.1: MOVIMENTO RELATIVO ENTRE A TERRA E O ÉTER

Consideremos o movimento da Terra ao redor do Sol. A velocidade da Terra está ora no mesmo sentido ora no sentido oposto ao da luz que vem das estrelas distantes. A diferença de tempo entre as posições (1) e (2) é de 6 meses. A velocidade da luz medida em (1) e (2) será, pela lei de adição galileana, respectivamente $c + v$ e $c - v$, dando uma diferença de $2v$ que poderia a princípio ser detetada. Isso envolve o difícil problema de medir a velocidade da luz.

Desde o Século XVII era discutido se a luz se propagava instantaneamente ou não. A solução veio com um engenhoso experimento idealizado por Röemer. Através de observações sobre eclipses da primeira lua de Júpiter ele demonstrou que para percorrer uma distância equivalente ao diâmetro da terra a luz tomaria menos de 1 segundo (Röemer, 1666). Seus resultados foram mais tarde confirmados pelas observações de Bradley sobre a aberração astronômica (Bradley, 1728). Medições da velocidade da luz em experiências de laboratório passaram a ser feitas somente no Século XIX por Fizeau, que

usou uma roda dentada em movimento (Fizeau, 1849) e por Foucault, que usou um espelho giratório (Foucault, 1862).

Um experimento que procurava medir a velocidade relativa entre a Terra e o éter baseado no fenômeno da refração foi realizado por Arago. Como sabemos, o índice de refração de um material transparente, por exemplo a lente de um telescópio, é definido na óptica por:

$$n = \frac{c}{c'} \quad (3.22)$$

onde c = velocidade da luz no espaço vazio e c' = velocidade da luz no meio. Suponhamos agora que o telescópio, fixo na Terra, se move na direção de uma estrela. A velocidade da luz no vácuo (ou no éter) relativamente à Terra será, pela fórmula galileana, igual a $c + v$ e nas lentes igual a $c' + v$. O índice de refração será portanto:

$$n' = \frac{c + v}{c' + v} = n'(v) \quad (3.23)$$

Ou seja, n' depende de v . Sendo n' diferente de n , na proporção dada pela expressão acima, a distância focal do telescópio vai variar proporcionalmente e este experimento pode ser usado para medir indiretamente a variação da velocidade da luz durante o ano e a velocidade da terra em relação ao éter. Em 1860, Arago efetuou o experimento. Focalizou uma estrela procurando detetar qualquer variação no foco do telescópio durante o ano. Os resultados foram negativos. O experimento não conseguia detetar nenhuma variação. Isso implicaria que $n = n'$, ou seja:

$$\frac{c}{c'} = \frac{c + v}{c' + v} \Rightarrow v = 0 \quad (3.24)$$

Portanto, ou não vale a lei de adição de velocidades de Galileo, o que contraria a mecânica newtoniana, ou o éter é arrastado com a Terra em seu movimento com velocidade tal que mantenha invariante o valor do índice de refração.

Em 1818 Fresnel sugeriu que o grau de arrastamento do éter depende do índice de refração do material, tal que se a velocidade relativa entre a Terra e o éter é v , a velocidade da luz no meio transparente será:

$$c' = v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (3.25)$$

O coeficiente entre parênteses foi chamado coeficiente de arrastamento de Fresnel e é exatamente suficiente para compensar as mudanças que deveriam ser observadas nos experimentos em que há movimento relativo entre a Terra e o éter.

A hipótese do arrastamento parcial de Fresnel também foi confirmada por experimentos do tipo interferencial (isto em experimentos nos quais a interferência da luz está envolvida), como o realizado por Fizeau em 1851, no qual luz passava através de uma corrente de água com fluxo no mesmo sentido e no sentido oposto ao do deslocamento da luz. Essa experiência também confirmou a hipótese de Fresnel.

Esses experimentos apesar de compatíveis com a teoria de Fresnel apontavam por outro lado para uma aparente impossibilidade de se medir absolutamente a velocidade da terra em relação ao meio luminífero e, o que era mais grave, colocavam em dúvida a própria existência de um éter.

Como esses experimentos eram em primeira ordem em v/c , ou seja as diferenças de tempo de percurso da luz nos dois sentidos era proporcional a v/c , pensou-se em planejar experimentos de segunda ordem. Um experimento desse tipo foi sugerido por Maxwell, assumindo que:

- o éter está em repouso
- a luz se propaga no éter em todas as direções com velocidade constante
- a Terra em movimento passa livremente através do éter sem perturbá-lo

Maxwell considerou que para um observador situado na terra a velocidade da luz teria valores diferentes para sinais emitidos paralela ou perpendicularmente à direção do movimento relativo entre a terra e o éter. Ele previa uma diferença no tempo de transmissão do sinal entre as duas direções da ordem de "uma centésima milionésima parte do tempo total de transmissão" (Maxwell, 1878).

Para fazer esse cálculo consideremos figura 3.2 em que AB e CD têm o mesmo comprimento l .

v é a velocidade da Terra em relação ao éter, aproximadamente igual a 30 km/s e c é a velocidade da luz em relação ao éter = 3×10^8 m/s. O tempo de ida e volta para o sinal em AB seria:

$$T_{AB} = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2l}{c} \gamma \quad (3.26)$$

onde:

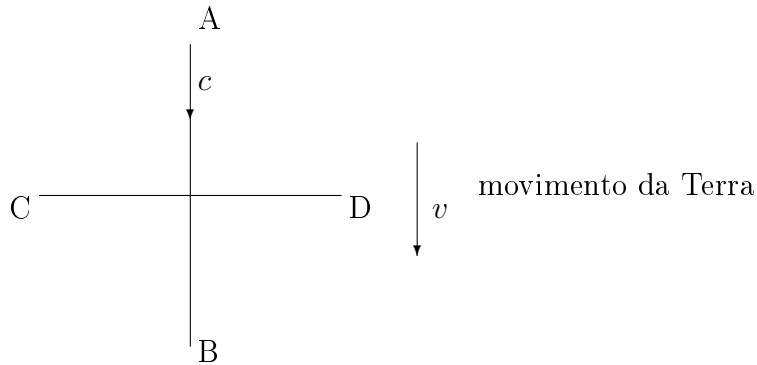


Figura 3.2: O EXPERIMENTO PROPOSTO POR MAXWELL

$$\gamma = \frac{1}{1 - v^2/c^2} \simeq 1 + v^2/c^2 \quad (3.27)$$

e portanto:

$$T_{AB} = \frac{2l}{c}(1 + v^2/c^2) \quad (3.28)$$

Para o trajeto CD, teríamos:

$$T_{CD} = \frac{2l}{c} \quad (3.29)$$

Portanto, chamando $\Delta T = T_{AB} - T_{CD}$, teríamos:

$$\frac{\Delta T}{T_{CD}} = \frac{v^2}{c^2} \quad (3.30)$$

que é da ordem de 10×10^{-8} , conforme previsto por Maxwell. É uma diferença pequena porém mensurável por métodos interferenciais, como na experiência de Michelson.

Entre 1880-1881, um notável instrumento que ficou conhecido por interferômetro de Michelson, foi projetado especialmente para realizar a experiência sugerida por Maxwell. No aparelho, um feixe de luz era dividido em dois por um vidro semi-espelhado (A) percorrendo depois trajetórias em ângulos retos. Os dois feixes refletiam (B e C) e faziam o percurso inverso interferindo

no mesmo ponto (D). A figura 3.3 mostra a situação. O sistema (fonte, espelhos, etc) foi montado sobre estruturas de madeira e sobre concreto apoiado em mercúrio e em aço. Diversas tomadas de dados foram feitas: em 1881, por Michelson; em 1887, por Michelson e Morley; em 1904 e 1905 por Morley e Miller; e em 1921 e 1924 por Miller. As experiências, descrição e análise dos instrumentos e resultados são discutidos extensamente por Miller (Miller, D. C., 1933).

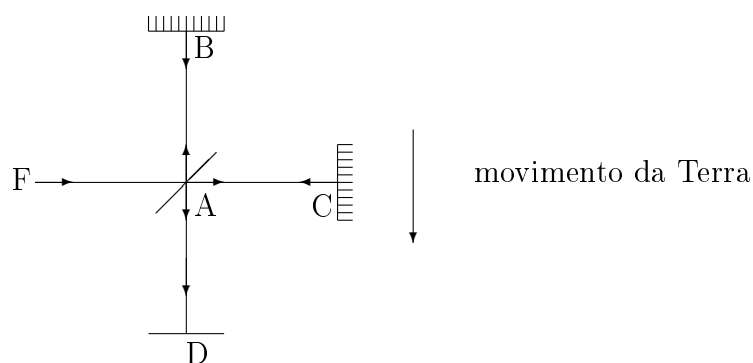


Figura 3.3: O EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

O interferômetro foi usado para detetar o movimento relativo entre a Terra e o éter. A hipótese do éter estacionário de Stokes [11] previa para a velocidade do “vento do éter” um valor igual ao da velocidade da terra, 30km/s. Todos os resultados obtidos desde 1881 até os realizados posteriormente por Miller deram resultados inferiores a 10km/s. Esses resultados, notadamente o de Michelson e Morley, “indicavam que a teoria do éter [de Fresnel] estava ou incorreta ou incompleta” (Miller, 1933). Os resultados desses experimentos, bem como de outros planejados para medir a velocidade relativa entre a terra e o éter, representavam uma séria anomalia para os físicos do final do século comprometidos com o programa eletromagnético.

3.4 Origens dos postulados

O problema do movimento relativo ao éter (ou o problema do “vento do éter”) era uma das principais questões que perturbava a física no final do século XIX

[12]. A preocupação de Einstein com o esse problema já vinha desde pelo menos meados de 1890 (Hirosgie, 1976; Paty, 1993, pp 68-73), quando ele descobriu o *paradoxo da perseguição de um raio de luz*, que lhe ocorreu com a idade de dezesseis anos e que contém em si o germe da TRE. O paradoxo é assim enunciado nas Notas Autobiográficas (Einstein, 1959, p.53):

Se eu persigo um raio de luz com velocidade c (velocidade da luz no vácuo), eu deveria observar esse raio de luz como um campo eletromagnético oscilatório em repouso. Entretanto, parece que não há tal coisa, seja com base na experiência ou de acordo com as equações de Maxwell. Desde o início pareceu-me intuitivamente claro que, do ponto de vista desse observador, tudo teria de acontecer de acordo com as mesmas leis válidas para um observador que estivesse em repouso em relação à Terra. Pois como poderia o primeiro observador saber, ou seja, ser capaz de determinar que ele está em movimento uniforme rápido?

A questão central levantada pelo paradoxo acima se refere à possibilidade de determinar absolutamente o movimento por meios eletromagnéticos. Na mecânica isso não era possível, mas pela teoria eletromagnética entendida como oscilações no éter seria perfeitamente possível a realização desse tipo de experimentos, como vimos. A relatividade do movimento também levava a certas assimetrias no eletromagnetismo que Einstein conhecia de seus estudos sobre a teoria de Maxwell [13].

O problema do movimento absoluto no eletromagnetismo aparece na Introdução do artigo fundamental sobre a relatividade (Einstein, 1905d), como uma "assimetria" que a eletrodinâmica de Maxwell conduzia quando aplicada a corpos em movimento, a qual em síntese aponta para a mesma dificuldade dos experimentos de movimento em relação ao éter e do paradoxo, discutidos acima. Tratava-se do seguinte.

Consideremos um ímã e um condutor em movimento relativo, conforme é mostrado na figura abaixo.

Pela teoria eletromagnética do começo do sec. XX haviam duas possibilidades:

(i) o condutor está fixo em relação ao éter e o ímã se movimenta com velocidade v para a direita. Portanto um observador em repouso em relação ao condutor descreveria a situação da seguinte maneira. Em cada ponto do espaço o campo magnético \mathbf{B} varia uniformemente com o tempo. Como, pela lei de Faraday:

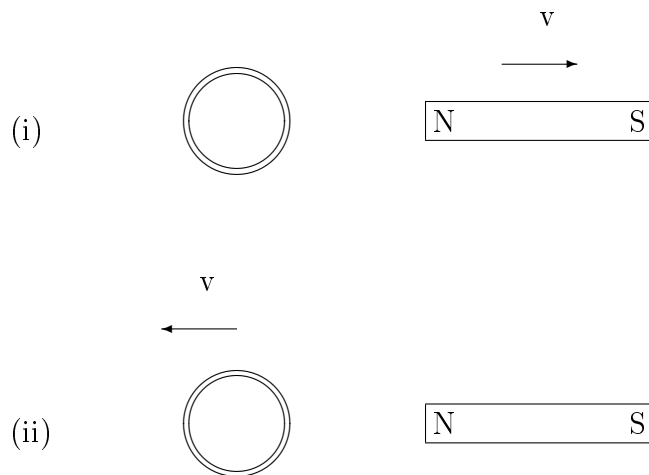


Figura 3.4: MOVIMENTO RELATIVO ENTRE UM IMÃ E UM CONDUTOR

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.31)$$

é criado um campo elétrico \mathbf{E} no espaço ao redor do imã. Esse campo, através da força de Lorentz:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3.32)$$

exercerá uma força igual a:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (3.33)$$

a qual dará origem a uma “corrente elétrica nas regiões onde estiverem porções do condutor”.

(ii) Por outro lado, se o imã está em repouso em relação ao éter e o condutor se movimenta para a esquerda com a mesma velocidade v , então “embora não se estabeleça em volta do imã nenhum campo elétrico”, cada carga q do condutor experimentará uma força eletromagnética dada por:

$$\mathbf{F} = \frac{q}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (3.34)$$

que produzirá “correntes elétricas de grandeza e comportamento iguais às que tinham no primeiro caso as produzidas por forças elétricas”. Portanto, no primeiro caso a corrente é produzida por um campo elétrico e no segundo por um campo magnético [14].

O problema ou a inconsistência apontada por Einstein, devia-se ao fato que do ponto de vista do experimento as duas situações são indistinguíveis, isto é, dependem apenas do movimento relativo entre o imã e o condutor. Entretanto, do ponto de vista teórico, conforme entendido na época, seria perfeitamente possível distinguir entre um e outro caso, já que em princípio poderíamos determinar se é o imã ou o condutor que está em movimento (absoluto) em relação ao éter [15].

“Exemplos desse gênero”, continua Einstein no artigo relativístico de 1905 (Einstein, 1905d), “bem como o insucesso das experiências feitas para constatar o movimento da Terra em relação ao meio luminífero, levam à suposição de que, tal como na Mecânica, também na Eletrodinâmica os fenômenos não apresentam nenhuma particularidade que possa fazer-se corresponder à idéia de um repouso absoluto. Pelo contrário, *em todos os sistemas de coordenadas em que são válidas as equações da mecânica, também são igualmente válidas as leis ópticas e eletrodinâmicas*, o que até primeira ordem de aproximação já está demonstrado” (Einstein, 1905c). A citação em itálico feita acima é o enunciado do **Princípio da Relatividade**, que Einstein ergue “à categoria de postulado” logo em seguida. Na sequência ele também introduz o **Princípio da Constância da Velocidade da Luz**, um postulado “só aparentemente incompatível com o primeiro”, com as seguintes palavras: *a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada, independente do estado de movimento da fonte luminosa*. Esses dois postulados, continua Einstein, “são suficientes para chegar a uma eletrodinâmica de corpos em movimento, simples e livre de contradições” que se baseia na “teoria de Maxwell para corpos em repouso” e na “cinemática do corpo sólido rígido”. Nessa teoria, “a introdução de éter luminífero revelar-se-á supérflua”, visto que não será necessário introduzir um “espaço em repouso absoluto” (Einstein, *ibid*).

Os postulados são posteriormente definidos na seção 2 do artigo, conforme reproduzimos abaixo:

1. *As leis segundo as quais se modificam os estados dos sis-*

temas físicos são as mesmas quer sejam referidas a um determinado sistema de coordenadas, quer o sejam a qualquer outro que tenha movimento de translação uniforme em relação ao primeiro.

2. Qualquer raio de luz move-se no sistema de coordenadas ‘em repouso’ com uma velocidade determinada c , que é a mesma quer esse raio seja emitido por um corpo em repouso, quer o seja por um corpo em movimento.

Aparentemente, se nós nos restringimos à Introdução do artigo relativístico de 1905, a TRE foi inventada para resolver dois problemas da eletrodinâmica: o primeiro (e aparentemente mais importante) era uma “assimetria” em sua descrição, um problema teórico sutil; o segundo seria o “insucesso” de algumas experiências, o que aliás já estava sendo resolvido por Lorentz, FitzGerald e Poincaré. Seriam entretanto esses problemas suficientemente fortes para que conceitos tão profundamente enraizados como os conceitos newtonianos de tempo e espaço tivessem de ser modificados, tendo além disso como consequência o abandono da teoria do éter (com todas as implicações que significariam um eletromagnetismo sem um meio propagador)? Decisões tão radicais como essas tomadas por Einstein teriam com certeza razões mais profundas, como será discutido a seguir.

Nas seções anteriores apontamos as duas principais dificuldades que a teoria eletromagnética do final do século XIX/começo do século XX. Por um lado, ela não conseguia dar conta do problema da radiação do corpo negro e dos fenômenos que envolviam absorção ou emissão de radiação pela matéria. Por outro, havia o problema do movimento em relação ao éter, que estava exigindo um número cada vez maior de hipótese arbitrárias para explicar a aparente impossibilidade de sua detecção. As duas dificuldades estavam relacionadas com a suposição da existência do éter e com a questão da natureza da luz.

Einstein resolveu a primeira dificuldade com a introdução do quantum de luz. A sua confiança nessa hipótese crescia à medida que a teoria quântica ia se consolidando e na conferência de Salzburgo ele mantém que “o próximo estágio do desenvolvimento da física teórica nos trará uma teoria da luz que pode ser entendida como uma espécie de fusão entre as teorias ondulatória e de emissão da luz” (Einstein, 1909), cujas razões ele expõe no restante do trabalho. O compromisso entre os modelos corpuscular e ondulatório para a radiação assumido por Einstein, revela a sua convicção nas duas teorias em suas respectivas regiões de validade, o que ele já expressara em 1905.

Portanto, com a introdução do quantum de luz, Einstein não via necessidade de substituir completamente a teoria de Maxwell que “havia sido excelente-mente justificada para a representação dos fenômenos puramente ópticos” e que provavelmente jamais seria abandonada (Einstein, 1905a).

Acreditamos que a partir dessa dupla convicção o pensamento de Einstein teria se desenvolvido da seguinte maneira. Se a radiação é de natureza corpuscular, a luz não é “uma sequência de estados de um meio hipotético mas, ao contrário alguma coisa tendo realidade independente, como a matéria”. Em consequência, “hoje nós podemos considerar a hipótese do éter como um ponto de vista obsoleto”, pois, “é inegável que há um extenso grupo de fatos concernentes à radiação que mostram que a luz possui certas propriedades fundamentais que podem ser entendidas mais facilmente do ponto de vista da teoria da emissão de Newton que do ponto de vista da teoria ondulatória”. As duas citações acima, que referem-se ao trabalho de 1909 (Einstein, 1909), apontam que a razão fundamental para o abandono do éter não foi o “insucesso” das experiências sobre o movimento em relação ao éter mas a outros problemas que a teoria eletromagnética vinha enfrentando que levaram-no a propor a hipótese do quantum de luz, cuja consequência imediata era dar realidade independente à radiação.

Com base no exposto acima as origens dos postulados fundamentais da TRE podem ser assim descritas. Como discutido na seção 3.3, para Lorentz o núcleo da teoria de Maxwell era a propagação da ação eletromagnética com velocidade finita e igual a c . Einstein também concordava com essa visão. Para ele, o princípio da constância da velocidade da luz (PL), ou seja, a propagação da luz “com velocidade fixa c com respeito a um sistema de coordenadas K em repouso em relação ao éter, independente do estado de movimento do corpo emissor” e que constituía a “essência da teoria de Lorentz” (Einstein, 1909), era o aspecto fundamental da teoria ondulatória, consequência direta das equações de Maxwell, que deveria ser mantido. Por outro lado, “o experimento de Michelson sugere a suposição que relativamente a um sistema de coordenadas se movendo junto com a Terra e, mais geralmente, relativo a qualquer sistema em movimento não acelerado, todos os fenômenos se processam exatamente de acordo com leis idênticas” (Einstein, 1909) que é o enunciado do princípio da relatividade. Sendo o éter uma suposição “supérflua”, como requerido pela teoria corpuscular da luz, a principal objeção à elevação do PL e do PR como princípios fundamentais fica excluída. Tendo a termodinâmica como protótipo de uma teoria de princípio, Einstein pode então assumir o PR e o PL como seus postulados fundamentais

e resolver a segunda grande dificuldade da física do início do sec. XX (ou seja, o problema do éter).

3.5 A revolução relativística

Em "Foundations of Physics" Bunge afirma que "nenhuma teoria física é livre de pressuposições: cada uma tem uma base constituída por um conjunto de idéias que são aceitas sem questionamento embora possam e devam se tornar sujeitas a críticas em outros contextos" (Bunge, 1967, p.85). Teorias sobre o espaço e o tempo são exemplos de pressupostos partilhados pelas teorias físicas que não são objeto de estudo de nenhuma delas em particular. Um dos principais aspectos da revolução trazida pela TRE foi a modificação que ela introduziu nessas teorias, mais especificamente, na teoria do tempo absoluto que constituía uma das idéias fundamentais sobre a qual se apoiava a mecânica newtoniana. A modificação proposta por Einstein foi necessária para resolver a aparente contradição entre PR e PL, por problemas com a lei de adição de velocidades de Galileo. Para discutir essa contradição faremos uso de uma citação de Einstein, extraída do artigo fundamental de 1909, ao qual já fizemos referência (Einstein, 1909), que serve também para demonstrar a convicção de Einstein sobre a importância da propagação da luz com velocidade constante no eletromagnetismo:

A partir de considerações superficiais, parece impossível reconciliar a essência da teoria de Lorentz com o princípio da relatividade. Pois de acordo com a teoria de Lorentz, se um raio de luz se propaga no vácuo, isso sempre ocorre com uma velocidade fixa c com respeito a um sistema de coordenadas K em repouso no éter, independentemente do estado do corpo emissor. Nós vamos chamar essa proposição de princípio da constância da velocidade da luz. De acordo com o teorema de adição de velocidades, esse mesmo raio de luz não se propagará com a velocidade c com respeito a um sistema de coordenadas K' que esteja em movimento de translação relativo ao éter. As leis de propagação da luz parecem então ser diferentes em relação aos dois sistemas de coordenadas, e disso parece seguir que o princípio da relatividade é incompatível com as leis da propagação da luz. Entretanto a lei de adição de velocidades é baseada na suposição arbitrária que

declarações referentes ao tempo bem como aquelas relacionadas com a forma dos corpos móveis tem um significado que é independente do estado de movimento do sistema de coordenadas usado. Pode-se ver, entretanto, que uma definição de tempo e da forma dos corpos móveis necessita da introdução de relógios que estejam em repouso com respeito ao sistema de coordenadas usado. Os conceitos acima devem portanto ser definidos separadamente para cada sistema de coordenadas e não é uma conclusão inevitável que para dois sistemas de coordenadas K e K' se movendo relativamente entre si essas definições dêem os mesmos valores de tempo t e t' para eventos individuais; é igualmente impossível dizer a priori que afirmações sobre a forma dos corpos válidas com respeito ao sistema de coordenadas K serão também válidas para o sistema de coordenadas K' . Disso segue que as equações de transformação correntemente usadas para a transição de um sistema de coordenadas a outro se movendo uniformemente em relação a ele são baseadas em suposições arbitrárias. Se essas são abandonadas então os fundamentos da teoria de Lorentz, ou mais geralmente, o princípio da constância da velocidade da luz no vácuo, torna-se reconciliável com o princípio da relatividade.

As teorias sobre o tempo podem ser separadas em três categorias (Arruda, 1983). A visão idealista, que considera o tempo apenas como uma idéia, não correspondendo a nada fora da mente como na filosofia da escola Eleática grega ou como uma forma de intuição, como em Kant, necessária para que a experiência dos sentidos possa ser apreendida pela mente. A visão realista, que considera o tempo como um fluxo real e independente da mente humana, cujo protótipo é a teoria do tempo absoluto de Newton: “o tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si só e por sua própria natureza, flui igualmente sem relação a nada externo e é chamado duração”(Newton, 1947). E a visão relacional, que considera que o tempo expressa uma relação entre eventos. A teoria de Einstein se encaixa nessa última categoria. Einstein observou que “todas as nossas apreciações em que intervem o tempo são apreciações sobre acontecimentos simultâneos”, ou seja, envolvem sempre uma comparação entre o que o relógio está marcando (por exemplo, a posição dos ponteiros ou um número, no caso de relógio digital) e o evento em questão (Einstein, 1905c). Como o relógio é um instrumento que produz uma sequência de eventos ordenados, essa sequência pode ser usada para ordenar os eventos

que ocorrem na natureza por comparação direta. Como observado por Einstein, essa definição é suficiente quando tratamos de eventos próximos do relógio, mas não funciona para acontecimentos distantes. Para esses casos é preciso que certas condições sejam estabelecidas.

Consideremos dois observadores situados em dois pontos distantes A e B, munidos de relógios e régua rígidas idênticos. Os dois observadores com seus instrumentos podem definir o "tempo de A" e o "tempo de B", por comparação direta dos eventos locais com os seus relógios, como discutido acima. Para definir um tempo comum a A e B é preciso entretanto sincronizar os dois relógios. Essa sincronização é feita através de sinais luminosos: um raio de luz parte de A no instante t_A , medido em A, reflete em B no tempo t_B , tempo de B, e volta a A no tempo t'_A , tempo de A. Então, segundo Einstein, os dois relógios são síncronos se:

$$t_B - t_A = t'_A - t_B \quad (3.35)$$

Essa definição de sincronismo assume, como apontado por Einstein, que "o tempo que a luz necessita para ir de A até B é igual ao tempo que ela necessita para ir de B para A", ou seja, que a velocidade da luz é a mesma em ambas as direções (não há direções preferenciais).

Com essa definição de sincronismo Einstein pode definir "tempo de um acontecimento" como "a indicação, simultânea desse acontecimento, que é fornecida por um relógio que satisfaz as seguintes condições: está colocado em repouso no local do acontecimento; é síncrono de um outro relógio em repouso, mantendo-se esse sincronismo em todas as determinações de tempo" (Einstein, 1905c)

A partir dessa nova teoria do tempo, Einstein pode deduzir as equações de transformação (equações de Lorentz), que são determinadas pelos dois postulados de sua teoria. As outras consequências, seguem logicamente.

O artigo "Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento" foi o primeiro artigo de Einstein sobre a TRE. O artigo está dividido nas seguintes partes:

Introdução.

I. Parte cinemática.

1. Definição de simultaneidade.

2. Sobre a relatividade de comprimentos e tempos.

3. Teoria de transformação das coordenadas e do tempo na passagem de um sistema em repouso para outro que está animado em relação ao primeiro

de uma translação uniforme.

4. Significado das equações obtidas, respeitante a corpos rígidos em movimento e relógios em movimento.

5. Teorema de adição de velocidades.

II. Parte eletrodinâmica.

6. Transformação das equações de Maxwell-Hertz para o espaço vazio. Sobre a natureza das forças eletromotrizes que surgem por efeito de movimento num campo magnético.

7. Teoria do princípio de Doppler e da aberração.

8. Transformação da energia dos raios de luz. Teoria da pressão de radiação exercida sobre refletores perfeitos.

9. Transformação das equações de Maxwell-Hertz tendo em conta as correntes de convecção.

10. Dinâmica do elétron (lentamente acelerado).

Na Introdução e nos duas primeiras seções Einstein expõe os fundamentos da teoria (os postulados e a sua teoria do tempo). Os outros pontos são deduzidos como consequência. A estrutura lógica do artigo poderia ser representada pela figura 3.5.

3.6 Evidências da consistência entre a TRE e a teoria do quantum de luz

Apesar de, à primeira vista os trabalhos de Einstein de 1905 não apresentarem evidências de sua conexão, uma investigação histórica mais detalhada revela certas relações entre eles as quais, principalmente no caso do quantum de luz e a TRE, Einstein deliberadamente não quis explicitar. Argumenta-se que isso não seria conveniente para ele, dado o caráter "bastante revolucionário" do seu "ponto de vista heurístico" sobre a radiação, o que poderia comprometer ou dificultar a aceitação da TRE (Nugaev, 1988). Em trabalhos posteriores entretanto, Einstein revela algumas dessas conexões. Em um trabalho já referido na seção anterior, a conferência proferida em Salzburg, 1909, sob o título "O Desenvolvimento de Nossas Visões em Relação à Natureza e Constituição da Radiação", cujo principal objetivo era argumentar em favor do que mais tarde veio a ser chamado de a dualidade onda-partícula para a radiação, Einstein menciona dois pontos de contato ou de concordância entre a ainda incipiente teoria quântica da radiação e a TRE. O primeiro diz

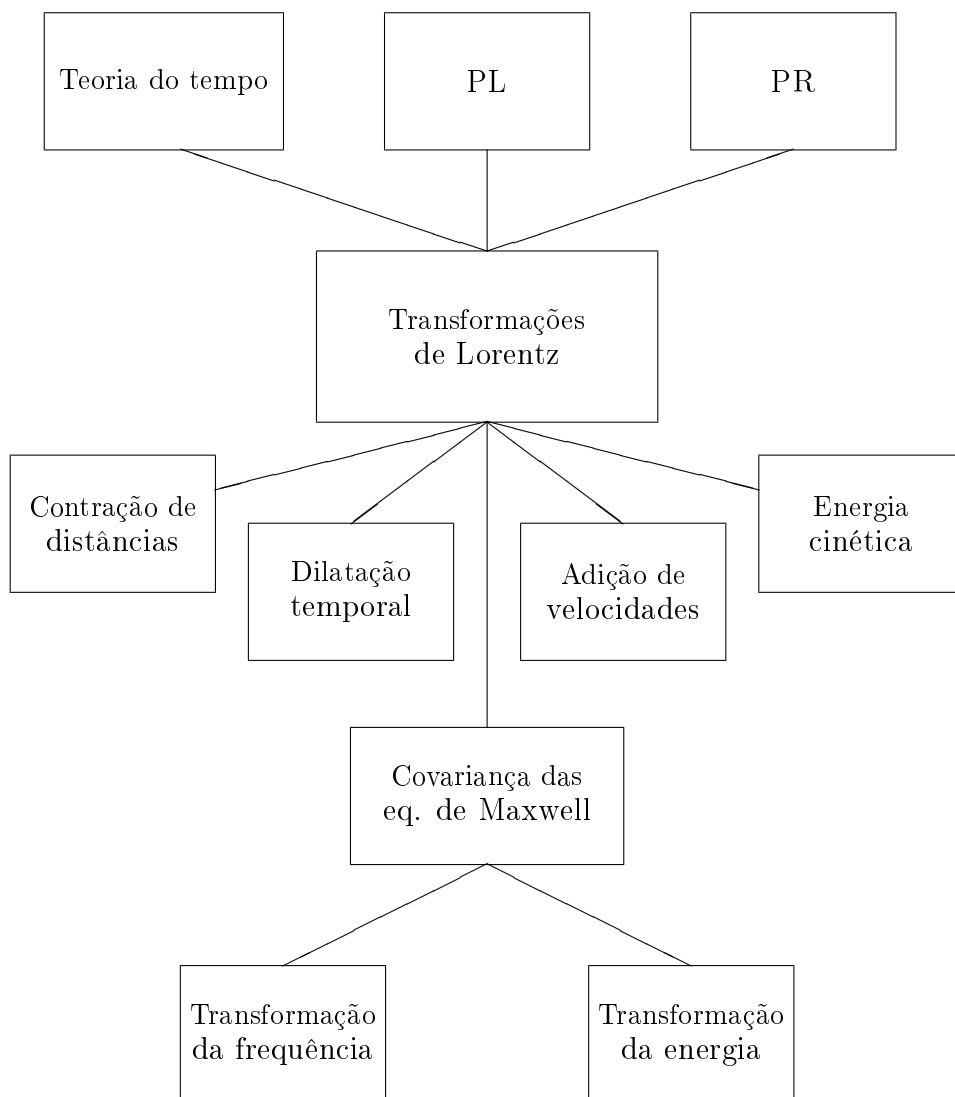


Figura 3.5: ESTRUTURA DO ARTIGO "SOBRE A ELETRODINÂMICA"

respeito à existência independente da radiação e ao conseqüente abandono da hipótese do éter, mencionada na seção anterior.

Mas a teoria quântica da radiação e a TRE demonstravam que também eram compatíveis num outro ponto: a transferência de "massa inercial" durante o processo de emissão/absorção de radiação, sintetizada pela fórmula $E = mc^2$. Com relação a esse ponto e ao discutido na subseção anterior, a existência independente da luz, Einstein escreve: "com relação a nossa concepção da estrutura da luz, em particular sobre a distribuição de energia no espaço, a teoria da relatividade não muda nada" (Einstein, 1909). Esse ponto será tratado em seguida. Há uma terceira conexão entre os dois principais trabalhos de Einstein em 1905 que pode ser percebida no próprio artigo relativístico, o que será tratado no final da seção.

É amplamente aceito pela comunidade científica que a expressão $E = mc^2$ foi deduzida primeiramente por Einstein no segundo artigo sobre a relatividade de 1905 (Einstein, 1905d), cujo título é "A inércia de um Corpo Será Dependente de Seu Conteúdo Energético?". Nesse artigo Einstein considera um sistema em repouso que emite "ondas planas" de mesma energia em sentidos opostos. Usando resultados deduzidos no artigo anterior (1905c) e algumas aproximações, Einstein chega à conclusão que "se um corpo perder uma quantidade de energia L em forma de radiação, a sua massa sofre uma diminuição de L/c^2 ", o que o leva a concluir em seguida que "a massa de um corpo é uma medida de seu conteúdo energético" (Einstein, 1905d).

Alguns historiadores mantêm que Einstein realmente não deduziu essa fórmula no artigo de 1905, visto que sua dedução era cíclica, ou seja, ele usou-a como pressuposto em sua dedução. Isso foi levantado por Ives em 1952 (Ives, 1952), para quem a primeira derivação correta da fórmula foi apresentada por Planck em 1907 e é partilhada por Jammer e outros [16]. Mais tarde essa crítica foi contestada por Stachel e Torreti, os quais argumentando em favor de Einstein aparentemente conseguem demonstrar que as críticas de Ives e Jammer não procedem (Stachel e Torreti, 1982) [17].

A fórmula $E = mc^2$ é uma aplicação direta dos postulados fundamentais da TRE à emissão de radiação, um fenômeno que para Einstein não podia ser descrito satisfatoriamente pelo eletromagnetismo clássico. Como vimos na seção 3.1, Einstein sugeriu uma teoria corpuscular da luz para explicar a fotoemissão e processos análogos. Portanto $E = mc^2$ é resultado da primeira aplicação da relatividade a um processo quântico.

Há uma outra evidência da conexão entre a relatividade especial e a teoria quântica discutida por Miller num artigo de 1976 (Miller, 1976) que revela

de maneira ainda mais notável a inter-relação e a consistência entre os dois principais trabalhos de Einstein em 1905.

Consideremos um observador infinitamente distante de uma fonte luminosa de frequência ν e se movendo relativamente a ela com velocidade v , como é mostrado na figura 3.3.

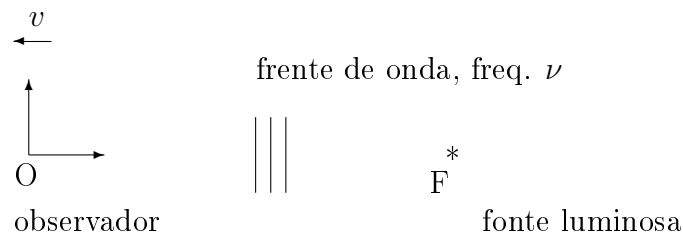


Figura 3.6: TRANSFORMAÇÃO DA FREQUÊNCIA

A velocidade relativa entre o observador e a fonte é v , cuja direção é a mesma da reta OF. Einstein demonstrou no artigo relativístico (1905c), seção 7, que a frequência ν' das ondas, observadas do referencial do observador, é dada por:

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \quad (3.36)$$

que é a expressão do “princípio de Doppler para velocidades arbitrárias”. Vemos que a equação (3.36) é a lei de transformação da frequência de uma onda luminosa entre dois sistemas inerciais, ou seja, sistemas que se movem relativamente entre si com velocidade constante.

Na seção 8 do mesmo artigo (1905c), Einstein faz o mesmo cálculo para a energia de um trem de ondas esférico que se propaga com velocidade c , como mostrado na figura 3.7.

Einstein mostra que a razão entre a energia E' , medida em relação ao sistema móvel e a energia E , medida em relação ao sistema em repouso, é dada por:

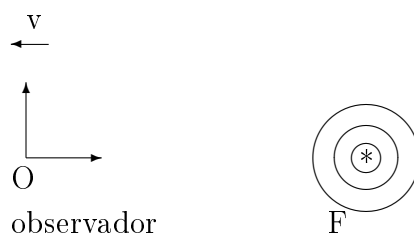


Figura 3.7: TRANSFORMAÇÃO DA ENERGIA

$$E' = E \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \quad (3.37)$$

Comparando (3.36) e (3.37) é fácil ver que:

$$\frac{E'}{\nu'} = \frac{E}{\nu} = \text{constante} \quad (3.38)$$

ou seja,

$$E = \text{const} \cdot \nu \quad (3.39)$$

que a fórmula fundamental da teoria corpuscular da radiação de Einstein.

Esse resultado expressa portanto uma notável consistência entre a teoria quântica e a relatividade. Einstein, entretanto, não procura deixar isso claro. Logo após deduzir (3.36) ele escreve apenas que “é digno de nota que tanto a energia como a frequência de um complexo luminoso [trem de ondas], se altera segundo a mesma lei com o estado de movimento do observador”, sem maiores comentários. Einstein ou simplesmente deixa subentendida essa conclusão para o leitor, como sugere Miller, ou deliberadamente não quiz que a ligação entre a TRE e o quantum ficasse clara. Pensamos entretanto que essa ligação, devido à importância que as questões quânticas tinham para Einstein, era extremamente relevante para ele.

Notas

[1] A análise que segue, com pequenas modificações, também foi publicada em Arruda (1992b). O artigo de Einstein sobre o quantum de luz é analisado em profundidade em Klein (1963).

[2] Os trabalhos de 1905 foram:

1. o artigo sobre o quantum de luz, completado em 17 de março, que levou Einstein a ganhar o prêmio Nobel (Einstein, 1905a).

2. a sua tese de doutoramento sobre uma nova determinação das dimensões moleculares, completada em 30 de abril.

3. o artigo sobre o movimento browniano, recebido em 11 de maio pelo Annalen (Einstein, 1905b).

4. o artigo fundamental sobre a relatividade, recebido pelo Annalen em 30 de junho (Einstein, 1905c).

5. o segundo artigo sobre a relatividade ($E = mc^2$), recebido em 27 de setembro (Einstein, 1905d).

6. o segundo artigo sobre o movimento browniano, recebido em 19 de dezembro.

[3] Sobre a influência de Mach em Einstein ver Holton (1968); Hirose (1976); Paty (1993).

[4] Uma síntese sobre a evolução do problema da radiação do corpo negro é feita no Apêndice A. Uma discussão mais extensa é feita em Arruda (1992a).

[5] A lei de equipartição atribui uma energia média igual a $kT/2$ a cada termo quadrático da hamiltoniana do sistema.

[6] Ou seja, $\nu \Rightarrow \infty$.

[7] "A originalidade do argumento de Einstein sobre o quantum de luz não está somente nas suas conclusões. Einstein centra o argumento na sua própria reinterpretação do princípio de Boltzmann, dando a esse princípio um significado físico mais preciso e um novo e maior limite de aplicação do que ele possuía antes" (Klein, 1963).

[8] Deve-se considerar que $U/\varepsilon = \text{número de quanta} = n$.

[9] Ver por exemplo, Eisberg e Resnick (1979), pp 55-56.

[10] Ver Klein (1964).

[11] A teoria de Stokes assumia que o éter era totalmente arrastado com a Terra em seu movimento. Entretanto o fenômeno da aberração astronômica (deslocamento aparente das estrelas) parecia indicar que a Terra se movia num éter estacionário. Fresnel sugeriu então um arrastamento parcial do éter.

[12] Kelvin, por exemplo, numa conferência proferida em 1900, dizia que "...a beleza e a clareza da teoria dinâmica, que assume que o calor e a luz são modos de movimento está no presente obscurecida por duas nuvens. A primeira...envolve a questão: como poderia a Terra se mover através de um sólido elástico, como é essencialmente o éter luminífero? A outra é a doutrina de Maxwell-Boltzmann da partição da energia"(Kelvin, 1900; citado por Jammer, 1966, p.14). Kelvin se referia na segunda questão ao problema do uso do teorema da equipartição na radiação em uma cavidade.

[13] Segundo Holton, Einstein muito provavelmente ficou sabendo desta assimetria através da leitura dos livros de Koppfl, muito conhecidos na época (Holton, 1969).

[14] Uma discussão detalhada sobre a geração de correntes elétricas por movimentos de condutores ou pela variação do campo magnético é encontrada no texto de Eletromagnetismo do GREF, cap 3 e Texto Complementar 5 (GREF, 1993).

[15] Um paradoxo bastante interessante que evidencia de maneira ainda mais notável os problemas com as mudanças de referencial no eletromagnetismo é discutido em Sears e Brehme, 1968, cap 10.

[16] Jammer, por exemplo, escreve em "Concepts o Mass": "É um curioso incidente na história do pensamento científico que a própria derivação de Einstein da fórmula $E = mc^2$... seja falaciosa"(Jammer, 1961, p 177).

[17] Einstein também deduz a fórmula $E = mc^2$ na conferência de Salzburg, com uma ligeira diferença.Enquanto que em 1905 ele considera a emissão de "ondas planas", em 1909 ele considera simplesmente a emissão de "radiação"ou "luz", numa terminologia mais compatível com a teoria emissiva.

Capítulo 4

CONCLUSÕES

4.1 Esboço de uma estratégia geral para o ensino de física moderna

O uso da história no ensino de física é um tema que preocupa os educadores há bastante tempo. A maioria deles defende o seu uso pela contribuição que ela possa ter na formação cultural e/ou político-social do cidadão, pela sua capacidade em fornecer elementos novos para a própria pesquisa científica ou para o planejamento de atividades de ensino [1]. Nós não pretendemos discorrer sobre esse assunto aqui, mas pensamos que esse trabalho forneceu outra linha de argumentação em prol do uso da história no ensino. Suas linhas gerais vão ser apontadas em seguida.

Uma teoria física é um objeto conceitual que surge e se desenvolve a partir de um programa de pesquisa. Sendo assim as razões que explicam sua existência podem ser levantadas pelo estudo do programa do qual é resultado. Esse estudo pode fornecer as principais motivações, problemas, compromissos epistemológicos e analogias fundamentais que dirigiram a invenção da teoria e portanto fornecer os principais argumentos através dos quais o autor faz a defesa de suas teses, procurando ligá-las a outras teorias e dar sustentação e plausibilidade à mesma. Uma parte substancial do trabalho científico consiste em arrumar bons argumentos para a nova teoria que está sendo proposta. Os trabalhos de Einstein são particularmente ricos nisso.

Entretanto, muito raramente o ensino de física, mesmo no 3º grau, está voltado a prover o aluno com argumentos sólidos que justifiquem a sua crença nas principais teorias. Vimos na seção 2.3 que o aluno muitas vezes aceita o

postulado da luz sem questionar (a comunidade toda aceita, porquê logo ele deixaria de fazê-lo?). Ao que parece outros conceitos da física também são aceitos da mesma forma. No caso da turma considerada no capítulo 2 (5o período do curso de Física, da Universidade Estadual de Londrina), observamos que os alunos em geral aceitam a teoria eletromagnética principalmente pela autoridade dos livros e do professor. FER, 22, por exemplo, ao ser solicitado a justificar porque a luz pode ser considerada uma onda eletromagnética, diz "...não consegui definir...não teria termos para justificar". Quando perguntado porque aceita ele responde: "Porque está nos livros e o professor está dizendo". JOS, 22, também não sabe porque a luz é uma onda. Dos entrevistados somente TER, 25, diz que acredita na teoria ondulatória da luz "...por causa dos experimentos", referindo-se à interferência e difração. A atitude de recorrer aos experimentos também foi utilizada em relação ao postulado da luz, que não teria sido "desmentido pela experiência" ou que ele seria uma "verdade baseada em fatos experimentais" (sec 2.3), um argumento que provavelmente busca suporte na idéia que o PL é decorrente dos resultados nulos do experimento de Michelson-Morley, ou que pode ser induzido através de experimentos, como os experimentos com mésons (sec. 2.4). O que queremos, entretanto, é que os conceitos sejam aceitos por razões físicas e não pelo argumento da autoridade.

Ao que parece, o ensino de física mesmo no 3o grau está mais preocupado com problema da inteligibilidade das teorias, ou seja, de entender a teoria, os seus símbolos e da sua utilidade, como fazer as contas, saber manipular as fórmulas, que com a sua plausibilidade, que envolve saber avaliar a teoria quanto a sua consistência, relevância, aplicabilidade, etc. O primeiro é uma espécie de imersão na teoria. O segundo pressupõe um afastamento, uma avaliação da mesma. Poderíamos dizer que no ensino de uma teoria o problema da sua inteligibilidade deve ser a primeira a questão a ser resolvida: primeiro o aluno tem de entender, decodificar a estrutura conceitual antes de poder refletir sobre ela. Depois dessa "imersão" na teoria ele pode então pensar se deve aceitá-la ou não. Entretanto, se a segunda parte não for realizada satisfatoriamente a compreensão dos conceitos ficará superficial.

Estarão os cursos de física mais dirigidos a formar espécies de "técnicos" do que pessoas que realmente pensem e avaliem o conhecimento que lhes é oferecido? Isso é o que parece, pois justamente a explicação dos porquês que as teorias são como são, porquê os conceitos foram definidos dessa ou daquela maneira, exatamente as razões e problemas que deram origem e estão por trás das teorias encontradas nos manuais, ou seja, exatamente as idéias mais

profundas que dão ou deram suporte e convicção ao seu criador e defensores, não é oferecido ao aluno. Não é de se estranhar que a compreensão que os estudantes têm da física seja em geral superficial. Os manuais tratam a física superficialmente e isso é fácil de notar: basta compará-los com os textos de Einstein, Bohr, Planck, Hertz, Boltzmann, Newton, Galileo, etc, os grandes criadores da física, para que a diferença entre profundidade e superficialidade seja imediatamente percebida.

Por outro lado, as pesquisas sobre concepções espontâneas têm revelado como característica fundamental desses conceitos a sua resistência a mudanças, como discutido no capítulo 2 desse trabalho. Poderíamos dizer que isso ocorre porque esses conceitos estão profundamente enraizados ou *entrincheirados* na ecologia conceitual do estudante, ou seja, eles têm uma grande quantidade de evidências que o suportam e são usados para diversas explicações em vários domínios (Chinn e Brewer, 1993). Em outras palavras, eles são altamente plausíveis e férteis. Muitos conceitos científicos, ao contrário, como os conceitos da física moderna, encontram-se fracamente ligados à ecologia do aluno. Talvez por serem “difíceis de trazer para a realidade”, ou por não terem sido abordados durante o curso, ou terem sido abordados “superficialmente”, como sugeriu um dos alunos entrevistados (seção 2.3). Seja como for, o estudo realizado nesse trabalho nos leva a propor uma *estratégia de ensino* que parece ser adequada a tais conteúdos. A estratégia faz uso da história da ciência para definir os conceitos centrais que devem ser abordados bem como o caminho como isso deve ser feito no sentido de promover uma mudança conceitual no aluno e tem o objetivo geral de diminuir o *status* dos conceitos existentes e aumentar o *status* dos novos conceitos, como na estratégia delineada por Hewson (sec. 2.1), focalizando em particular o aumento/diminuição da plausibilidade das novas/velhas concepções. Como a plausibilidade de uma teoria (para o cientista) decorre do fato dela resolver as anomalias e ser consistente com suas teorias e crenças, ela deverá depender essencialmente de argumentos, os quais deverão ser fornecidos pelo professor ao aluno.

Em linhas gerais, a estratégia a que nos referimos poderia ser separada em duas partes:

(i) Análise histórica da mudança operada na ciência pela criação da teoria, que envolve:

- determinação do caminho seguido pelo(s) inventor(es) da nova teoria e pela comunidade para a acomodação dos novos conceitos.

- levantamento dos conceitos centrais modificados ou introduzidos e de

quais argumentos deram plausibilidade à nova estrutura conceitual proposta.

(ii) Com base na informação levantada acima, definir a MC a ser atingida pelo estudante, ou seja, responder às questões:

- quais são os conceitos cujo status queremos que o aluno aumente/diminua e quais pré-requisitos ele precisa para conseguir isso?

- qual é o caminho conceitual mais apropriado para ele realizar isso?

A estratégia parece ser apropriada para conteúdos de física moderna, que em geral são pouco plausíveis para o aluno. Assim, por exemplo, para aumentar o status de certos conceitos da TRE (como o postulado da luz) propomos o uso dos argumentos eintenianos, os quais podem ser obtidos de um estudo do desenvolvimento de seu programa de pesquisa. A mesma estratégia poderia ser usada para conceitos da teoria quântica: os argumentos de Planck, para o quantum de energia; os de Einstein, para o quantum de luz; os de Bohr, para a teoria do espectro do hidrogênio; etc.

A importância da argumentação na ciência e no ensino de ciências foi levantada por D. Kuhn recentemente (D. Kuhn, 1993). A autora coloca que ultimamente tem-se reconhecido que não há como “separar a ciência da controvérsia, do argumento...não apenas as teorias mas mesmo os assim chamados fatos da ciência tornam-se construções argumentativas que devem ser introduzidas na arena do debate público...os cientistas estão bem conscientes que argumentos explicitamente justificados são necessários para convencer a comunidade científica e eles se acostumaram a pensar nesses termos”. Nesse artigo a autora também menciona algumas implicações para a educação científica. Destacamos em especial a defesa feita em relação à necessidade de introduzir no ensino “componentes epistemológicos”, pois uma “epistemologia ingênua” pode ser responsável pela “capacidade limitada de argumentação que as pessoas demonstram”. Outras pesquisas recentes também têm fornecido algumas evidências sobre a importância de que um ensino menos “rígido” [2] pode ter para um aprendizado significativo [3]. Chinn e Brewer (Chinn e Brewer, 1993), por exemplo, apontam para a importância de que os estudantes “participem de uma comunidade que regularmente debate teorias alternativas, discuta respostas a dados anômalos e avalie evidências e teorias”, para que os estudantes desenvolvam compromissos epistemológicos, tais como:

- uma compreensão explícita das relações entre teoria e evidência

- uma compreensão da necessidade de consistência entre as idéias teóricas e entre teorias e dados

- acreditar que a ciência se aplica tanto aos fenômenos cotidianos como

aos dados de laboratório

- uma compreensão da ciência como um processo contínuo de debate sobre teorias em evolução ao invés de um corpo de conhecimentos estático

Com base nas considerações feitas acima vamos esboçar a seguir uma estratégia de ensino que consideramos adequada à TRE.

4.2 Aplicação da estratégia ao ensino da relatividade especial

No capítulo 2, discutimos alguns dos problemas com o ensino da teoria da relatividade especial à luz do modelo de Posner e outros. Os problemas poderiam ser separados em dois níveis. Em primeiro lugar o conteúdo da teoria é sofisticado e os alunos apresentam alguma dificuldade com a inteligibilidade dos conceitos e com a manipulação das equações da teoria. Esse não é entretanto um problema crucial para a compreensão da TRE, pois os alunos (pelo menos no 3o grau) conseguem resolver os problemas propostos no final dos capítulos os quais em geral envolvem o uso das transformações de Lorentz. $E = mc^2$, etc, e passar nas provas. Num segundo nível se situa o problema da falta de plausibilidade da teoria, seu caráter contraintuitivo. Comentamos a respeito da incapacidade dos alunos em aceitar o postulado da luz e de revisar certos conceitos como tempo, espaço e movimento. Nossa principal preocupação nesse trabalho é com esse segundo problema. A estratégia, delineada na seção anterior que em síntese pretende aumentar a plausibilidade dos conceitos fornecendo sustentação à teoria através de argumentos históricos inteligíveis, parece adequada para tratar esse tipo de problema. Como exemplo, a estratégia vai ser aplicada em seguida à TRE, mais especificamente, ao problema da aceitação do postulado da luz.

1. Os passos dados na construção da TRE

Cada um dos passos apontados abaixo corresponde a uma etapa do processo einsteniano de resolução de seus problemas de pesquisa por volta de 1905.

(a) *Os limites da física clássica.*

As condições de contorno que Einstein tinha para a construção de uma nova teoria poderiam ser classificadas em dois tipos. Em primeiro lugar, ele tinha clareza sobre os limites da mecânica e do eletromagnetismo na época e, ao contrário de Lorentz e de grande parte da comunidade científica

que investiam no programa unificador eletromagnético, para Einstein nem o eletromagnetismo nem a mecânica ofereciam uma base segura para essa unificação. As restrições quanto à mecânica vinham da leitura da crítica feita por Mach em *The Science of Mechanics* e ao eletromagnetismo, devido à dificuldades com relação à uma teoria satisfatória da radiação, o que ele discute no artigo sobre o quantum de luz, escrito em 1905 alguns meses antes do artigo sobre a TRE.

(b) O alcance do eletromagnetismo: a propagação dos sinais eletromagnéticos com velocidade constante.

Por outro lado, Einstein assumiu, com Lorentz, que a essência do eletromagnetismo era a propagação da luz no éter com velocidade constante e que essa hipótese fundamental da teoria de Maxwell, uma teoria que “tinha sido excelentemente justificada para a representação de fenômenos puramente ópticos”, deveria ser mantida (Einstein, 1905a).

(c) um resultado fundamental de sua teoria: o quantum de luz.

Um outro resultado que atuou positivamente, no sentido de dar suporte, à criação da nova teoria foi a teoria do quantum de luz. O problema da natureza da luz foi umas das questões mais fundamentais da física para Einstein pelo menos até 1917. Suas conclusões sobre esse tema, a natureza corpuscular da radiação sendo a principal delas, foram referências fundamentais para suas reflexões sobre a questão relativística.

(d) O problema do movimento em relação ao éter.

O problema do movimento relativo ao éter era uma das principais questões que perturbavam a física no final do século XIX. A preocupação de Einstein com o esse problema já vinha desde pelo menos meados de 1890 (Hirose, 1976; Paty, 1993, pp 68-73) quando ele descobriu o paradoxo mencionado na seção 3.3. O problema do movimento absoluto no eletromagnetismo também aparecia em certas assimetrias entre um ímã e um condutor que Einstein conhecia de seus estudos sobre a teoria de, Maxwell, e nos experimentos sobre o movimento da Terra em relação ao éter.

(e) Origens dos postulados.

Para Einstein a questão do movimento em relação ao éter tocava no problema da natureza da radiação, por um lado e no problema de entender a velocidade da luz, o núcleo do eletromagnetismo, que surgia das equações de Maxwell como uma constante universal. Além disso os resultados negativos da experiência de Michelson de 1881 e de outros experimentos sobre o movi-

mento em relação ao éter eram conhecidos de Einstein. Durante anos Einstein tentou esclarecer o problema estudando e tentando modificar as equações de Maxwell, sem sucesso (Wertheimer, 1945, cap VII). Foi crescendo assim a convicção que como na mecânica também no eletromagnetismo não havia movimento absoluto, o que implicaria em abandonar a concepção de um éter. Por outro lado, em 1905 Einstein havia introduzido a idéia do quantum de luz, que era uma concepção altamente plausível para ele. Essa hipótese implicava em dar realidade à própria radiação e levava à rejeição de um meio propagador, o que estava em confronto direto com o eletromagnetismo. Assim, para manter o eletromagnetismo em sua região de validade, Einstein elevou o princípio da constância da velocidade da luz à categoria de postulado. Esse princípio retinha o ponto fundamental da teoria eletromagnética e ao mesmo tempo não contradizia experimentos que envolviam a medição da velocidade da luz em referenciais móveis. O segundo postulado segue da possibilidade de estender o princípio da relatividade galileano à eletrodinâmica em virtude da inexistência de um éter.

(f) A revolução relativística: uma nova teoria do tempo e do espaço.

Os dois postulados eram entretanto contraditórios. A resolução dessa inconsistência levou Einstein a uma reflexão sobre a questão da medição do tempo, à relatividade da simultaneidade e a uma nova teoria do tempo, o ponto central da modificação proposta pela TRE. A partir disso foi possível “construir uma eletrodinâmica livre de contradições” (Einstein, 1905c), ou seja, deduzir as equações de transformação, que retinham a forma das equações de Maxwell e as principais consequências da teoria: a contração das distâncias e a dilatação dos intervalos de tempo. A última contribuição importante de Einstein para a relatividade especial foi a relação massa-energia obtida no final de 1905 (Einstein, 1905d).

(g) Evidências da consistência da nova teoria.

Em primeiro lugar a nova teoria era consistente com a teoria de Lorentz, pois recuperava seus principais resultados, como as transformações de coordenadas, o que era um elemento importante para dar sustentação à teoria perante a comunidade científica. Ela apresentou também uma notável consistência com a teoria do quantum de luz, elaborada alguns meses antes, o que era um resultado muito importante dentro do pensamento de Einstein no período. A teoria do quantum, portanto, além de servir de guia para o desenvolvimento do pensamento de Einstein e para a criação da TRE, também dava o aval aos resultados da TRE ao se mostrar consistente com ela.

2. A rede conceitual de Einstein em 1905

Vimos no capítulo anterior que a revolução relativística pode ser vista dentro de um contexto mais amplo, em que não só as idéias de tempo e espaço sofreram modificações, com consequências igualmente revolucionárias para outros conceitos da mecânica, como também as concepções sobre a luz, o éter e a própria teoria eletromagnética foram reinterpretados. Além disso a radical suposição sobre a natureza corpuscular da radiação forneceu parte da base teórica necessária a Einstein para as modificações que levaram à TRE e às mudanças nos conceitos de espaço e tempo. Por outro lado, os trabalhos de Einstein continuaram a ser estendidos por Planck, na dinâmica relativística, por Minkowski, na teoria do espaço-tempo e posteriormente por Einstein com a relatividade geral. Cada um desses episódios, principalmente os dois últimos, também podem ser vistos como revolucionários, no sentido de terem introduzidos modificações significativas, formais e/ou conceituais, nas teorias da época. Podemos entender as contribuições de Einstein em 1905, portanto, como produtos do desenvolvimento de uma investigação que gerou, não apenas mudanças nos conceitos de espaço e tempo, mas uma *sequência interligada de mudanças conceituais* em idéias centrais da física do final do século XIX, as quais gravitavam principalmente em torno do problema da natureza da radiação e do problema do movimento absoluto no eletromagnetismo. Ou seja, estamos tratando nesse caso com uma estrutura conceitual mais ampla: não estamos mais focalizando uma teoria com contornos bem definidos, mas um programa de pesquisa (ou pelo menos parte dele), isto é, um encadeamento de teorias ou uma *rede conceitual* que compreende conceitos da TRE e da teoria quântica. As diversas relações entre a teoria do quantum e a relatividade podem ser melhor visualizadas através da figura C.3 (apêndice C, p.110).

Pensamos que essa integração do pensamento einsteniano é importante para o ensino da física porque reveladora da grande consistência, ou seja, da plausibilidade de seu pensamento, que é uma de suas características marcantes, como mencionado na seção 2.5.

No desenvolvimento do programa de Einstein pudemos identificar os seguintes tipos de argumentos que são considerados importantes para que uma teoria demonstre sua consistência:

- fundamentação: a nova teoria está fundamentada em outras teorias bem estabelecidas;
- consistência teórica interna: a nova teoria é consistente com outras

teorias dentro de um mesmo programa;

- consistência teórica externa: a teoria é consistente com teorias de outros programas de pesquisa;

- consistência com os experimentos: algumas consequências da teoria são compatíveis com os resultados experimentais.

Um outro tipo de elemento que deveria estar presente na lista feita acima, particularmente no caso de Einstein, são os compromissos epistemológicos e credos metafísicos, que têm importância tanto na aprendizagem como na construção do conhecimento pelo cientista. Assim nós temos de acrescentar mais um item à lista:

- consistência com credos epistemológicos, visões sobre a ciência ou sobre o método científico, partilhados pela comunidade ou adotados pelo cientista.

Vamos apontar em seguida os principais argumentos que deram sustentação à teoria do quantum de luz e à TRE em 1905.

A hipótese central da teoria do quantum de luz é a natureza corpuscular da luz sugerida por certas experiências envolvendo emissão e absorção da radiação. Dessa hipótese Einstein deduziu a expressão do efeito fotoelétrico verificada experimentalmente por Millikan em 1916. A teoria como um todo era extremamente plausível para Einstein em 1905 (e nem um pouco para a maioria dos outros físicos), cuja convicção crescia à medida em que a teoria quântica ia se consolidando. a plausibilidade do quantum de luz decorria fundamentalmente de quatro elementos:

- os resultados relativos ao problema da radiação do corpo negro, através da lei de Wien e a termodinâmica estatística através do princípio de Boltzmann forneciam a sustentação teórica e fenomenológica da teoria.

- além disso a teoria do quantum de luz estava inserida dentro do programa estatístico quântico de Einstein, mais especificamente, dentro de sua preocupação com a natureza da radiação. Há portanto uma forte ligação entre o artigo de 1905 e outros artigos de Einstein que posteriormente vieram dar sustentação à "hipótese heurística"[4].

- a teoria era consistente com os trabalhos de Planck de 1900 e também com a TRE.

- a teoria explicava a lei de Stokes e a ionização de gases e avançava na questão do efeito fotoelétrico prevendo uma equação que foi sendo confirmada durante dez anos até o veredicto final de Millikan em 1916.

Em relação à relatividade especial, suas hipóteses principais são os dois postulados e a teoria da medição do tempo, dos quais são deduzidas as transformações de Lorentz e demais consequências da teoria. Os principais argu-

mentos que davam plausibilidade para a TRE em 1905 no pensamento de Einstein eram:

- o eletromagnetismo de Maxwell-Hertz, cuja essência era a propagação da luz com velocidade constante no éter, era uma teoria firmemente estabelecida
- a hipótese do quantum de luz, com a qual a TRE mostrou-se consistente, também era uma teoria muito bem fundamentada e plausível

- os resultados da TRE, uma teoria de princípio, eram corroborados pelos principais resultados da teoria de Lorentz, uma teoria construtiva

- a TRE resolvia as anomalias teóricas (a assimetria imã-condutor, o paradoxo da perseguição da luz) e seus resultados eram confirmados pelas experiências interferenciais

- a nova teoria de medição proposta era compatível com a filosofia de Mach e sua crítica à mecânica

3. O aumento do status do postulado da luz

Como exemplo do uso dessa estratégia escolhemos o problema da plausibilidade do postulado da luz, comentado na seção 2.3. Para isso podemos usar para o convencimento do aluno uma idéia partilhada por Lorentz e Einstein que considerava a propagação dos sinais eletromagnéticos com velocidade constante e igual a c no éter como a essência da teoria da propagação eletromagnética da luz, que foi mencionada na seção 3.2. O reconhecimento da constante c como a velocidade da propagação das perturbações no éter é usualmente associado a Maxwell, embora Lorentz por caminhos diferentes também tivesse chegado a ele (Rosenfeld, 1957). A argumentação que leva a essa idéia apresentada abaixo é a usualmente encontrada em livros-texto e não reproduz exatamente o desenvolvimento histórico de nenhuma das duas linhas de pensamento.

Os pré-requisitos necessários para a compreensão da argumentação usada aqui são: as equações de Maxwell, equações de onda e conceitos gerais do eletromagnetismo. Tais assuntos devem ser trabalhados detalhadamente nos cursos anteriores.

§1. As equações de Maxwell abaixo, válidas para o vácuo, sintetizam o eletromagnetismo:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.1a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (4.1b)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (4.1c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4.1d)$$

onde \mathbf{E} e \mathbf{B} são os campos elétrico e magnético, c é a velocidade da luz no vácuo ($= 300.000 \text{ km/s}$).

§2. Das equações de Maxwell, obtemos que os campos \mathbf{E} e \mathbf{B} satisfazem as seguintes equações:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 \quad (4.2a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \partial^2 \mathbf{B} / \partial t^2 \quad (4.2b)$$

As equações acima são *equações de onda* cujas soluções, os campos \mathbf{E} e \mathbf{B} , são funções do tipo:

$$e^{i(\mathbf{kx} - \omega t)} \quad (4.3)$$

e que podem ser interpretados como ondas eletromagnéticas senoidais se deslocando com velocidade c .

§3. Uma das características principais de uma onda mecânica é que sua velocidade depende de parâmetros relacionados exclusivamente ao meio. No caso de ondas em uma corda, por exemplo, que são descritas por equações semelhantes às equações (4.2), a velocidade depende da tensão a que a corda está submetida e de sua densidade. Para as ondas eletromagnéticas Maxwell demonstrou que essa velocidade, a constante c das equações de onda, seria dada por:

$$c = \frac{1}{(\epsilon_o \mu_o)^{1/2}} \quad (4.3)$$

onde $\epsilon_o =$ constante dielétrica e $\mu_o =$ permissividade magnética do vácuo (na época, do meio). O valor de c coincide com o valor da velocidade da luz no vácuo, 3.10^8 m/s e c aparece na teoria de Maxwell como uma constante

fundamental. Com base nisso a propagação da luz com velocidade constante no éter pode ser considerada como a *essência* do eletromagnetismo.

Buscando uma indicação sobre a inteligibilidade desse argumento, nós o apresentamos a dois dos entrevistados citados na seção 2.3. Para FER, para quem “o valor de c é o pepino da história”, “a partir do momento que você conseguiu acatar o valor de c , igual você já mostrou por aqui [diz, apontando para o papel, onde o argumento é apresentado], e provavelmente eu vou perceber que isso aqui é realmente bem mais fácil de aceitar, você consegue realmente definir, trazer para a realidade alguma coisa. Fica mais fácil de entender. Seria mais fácil aceitar o postulado da luz e a relatividade inteira.” TER concorda: “provavelmente, se eu tivesse visto direito essas equações de Maxwell, seria uma argumentação a mais para eu acreditar...fica uma coisa menos jogada...”. Ambos disseram que não tinham visto essa argumentação nos cursos anteriores (Fis 3, Fis 4). Esses comentários dão-nos alguma indicação sobre a importância da argumentação de Maxwell ser bem discutida nos cursos de física anteriores ao curso de Física Moderna.

Além de providenciar, através do argumento apresentado acima, uma maior sustentação ao postulado da luz, nós deveríamos também procurar diminuir a “aderência” dos estudantes à adição de velocidades galileana, que é como vimos o principal motivo alegado por eles para a rejeição do PL. Isso é razoável, pois também para Einstein a superação da relatividade galileana era necessária para evitar a contradição entre os dois postulados (seção 3.5). Assim, ênfase deveria ser dada na crítica da teoria clássica do tempo, procurando mostrar que ela repousa sobre uma teoria de medida insatisfatória.

4.3 Considerações finais/implicações gerais do trabalho

As principais conclusões tiradas desse trabalho foram comentadas nas seções anteriores. Entretanto, o trabalho não ficaria completo sem que mencionássemos algumas observações de caráter geral e comentássemos, ainda que brevemente, algumas questões abertas por ele. Nos referimos basicamente a duas reflexões gerais suscitadas pelo trabalho as quais serão tratadas a seguir.

A primeira delas diz respeito à relevância da linha de pesquisa em mudança conceitual para a área de ensino de física e nos leva à conclusão que, devido à sua aplicabilidade para qualquer conteúdo, essa linha pode ajudar

na consolidação de grupos de pesquisa emergentes em de educação científica, os quais teriam com a priorização dessa linha melhores possibilidades de avançar academicamente.

O princípio fundamental subjacente a todos os enfoques sobre MC é o reconhecimento da existência das concepções intuitivas e o uso da sua metodologia de coleta de dados através de questionários, entrevistas, uso de gravadores e vídeos, etc. Nesse trabalho, o modelo de Posner e outros foi usado para analisar alguns problemas com o ensino da TRE e da física moderna. A estratégia geral de pesquisa em MC, entretanto também é usada em outros conteúdos em ensino de ciências. Vamos a alguns exemplos.

- na química: Hackling e Garnett, estudando a compreensão do equilíbrio químico e do princípio de Le Chatelier com estudantes de 17 anos (equivalente ao 3º ano do 2º grau) localizaram diversas concepções espontâneas (Hackling e Garnett, 1985). Posteriormente, elaboraram uma estratégia instrucional para superar as preconcepções usando micro-computadores e baseada no modelo de Posner e outros (Hameed et al, 1993).

- na geologia: Ross e Shuell recentemente publicaram um trabalho sobre concepções espontâneas de crianças sobre terremotos, fazendo perguntas sobre o que é um terremoto, qual sua causa, o que acontece com a terra quando eles estão ocorrendo, etc (Ross e Shuell, 1993).

- na biologia: Dreyfus et al, investigaram recentemente as dificuldades em se produzir conflitos significativos em conteúdos distantes da realidade, os traços hereditários, que se baseiam em conceitos abstratos como os genes (Dreyfus et al, 1990).

- na epistemologia: é possível também investigar crenças e idéias gerais que constituem a ecologia conceitual e que influenciam na aprendizagem, como o estudo sobre concepções espontâneas em epistemologia da ciência feito por Ryan e Aikenhead (Ryan e Aikenhead, 1992).

Os exemplos considerados acima são suficientes para demonstrar a aplicabilidade da metodologia de pesquisa em MC no ensino de ciências, no sentido de orientar as pesquisas tanto no ensino de ciências no 1º grau, como nas áreas específicas do 2º e 3º graus. Há possibilidades de trabalhos inéditos tanto no levantamento de modelos espontâneos em áreas ainda não cobertas como no planejamento de estratégias onde esse levantamento já foi feito. Muitas atividades e problemas que interessam diretamente a grupos de pesquisa em educação científica nos três graus de ensino podem ser vistos pelo ângulo da mudança conceitual, como por exemplo:

- atividades de pesquisa em ensino de ciências do 1º grau.

- pesquisa em ensino de física, química, biologia, matemática, geociências, etc, no 2º e no 3º graus.

- planejamento de estratégias nos três graus de ensino.

- fundamentação de trabalhos e projetos de extensão universitária.

Em relação a um provável desdobramento desse trabalho, temos a intenção de estudar a construção histórica e investigar o problema da plausibilidade do conceito de fóton. Durante as entrevistas com os alunos de Londrina, mencionada nas seções 2.3 e 4.2, pudemos observar as dificuldades mostradas por eles em relação à compreensão da luz como partícula e como onda, e também em entender a dualidade onda-partícula para a radiação. Essa dificuldade também é observada na história da ciência: a idéia de fóton foi uma das idéias que mais tempo demorou para ser aceita pela comunidade científica (Pais, 1979). A construção e aceitação do conceito de fóton é um longo episódio da história da física e um resultado do desenvolvimento do programa de pesquisa estatístico-quântico de Einstein, iniciado em 1902, provavelmente motivado pelos trabalhos de Planck sobre a radiação do corpo negro (Kuhn, 1978b; Navarro, 1991). Pensamos que a estratégia delineada na seção 4.1 se adequa perfeitamente a esse caso, podendo trazer resultados interessantes para o problema de ensinar a teoria quântica mais satisfatoriamente.

Notas

[1] Ver Zanetic (1990), cap 4.

[2] Rígido no sentido empregado por Kuhn na "Estrutura" (Kuhn, 1978) e em outros ensaios (Kuhn, 1989).

[3] Outros trabalhos que fornecem evidências que as concepções de ciência dos estudantes são fundamentais para um ensino significativo são citados pela autora: Carey et al (1989); Songer e Lynn (1991).

[4] Os principais artigos de Einstein inseridos dentro de sua preocupação com a natureza da radiação tratavam do quantum de luz (Einstein, 1905a), da dualidade da radiação (Einstein, 1909) e da emissão dirigida da radiação (Einstein, 1917).

APÊNDICES

A. O problema da radiação do corpo negro

A Mecânica Quântica surgiu das tentativas de se resolver o problema da radiação do corpo negro, durante o processo de criação de uma teoria da radiação térmica. O problema diz respeito à emissão e absorção de luz e calor pela matéria e consiste em linhas gerais em explicar teoricamente o espectro da radiação emitida por corpos aquecidos. A formulação exata do problema e os primeiros princípios da teoria clássica foram colocados por Kirchhoff em artigos publicados em 1859 e 1860. Os passos seguintes foram dados por Stefan e Boltzmann em 1879, 1884; Wien em 1893, 1896; Planck em 1897-1899; Rayleigh 1900; e novamente Planck em outubro e dezembro de 1900, que dando a solução definitiva ao problema iniciava o processo de construção da nova teoria através da introdução do conceito de quantum de energia.

(a) A lei de Kirchhoff

Em 1859 Kirchhoff, juntamente com Bunsen, trabalhava no problema da absorção e emissão de luz em comprimentos de onda definidos, comparando o espectro solar com o produzido por vapores quentes (chamas coloridas), quando descobriu ser o sódio “um dos constituintes básicos da atmosfera solar”(Kirchhoff, 1859). Esse trabalho o levou a pensar sobre o problema da absorção e emissão de radiação pela matéria, assunto que começou a ser tratado teoricamente por Prevost a partir do final do sec XVIII (1791). A linha de raciocínio adotada por Kirchhoff e outros que o seguiram, procurava tratar o problema da emissão a partir de considerações termodinâmicas e evoluiu na direção de uma teoria estatística do processo de emissão e absorção da radiação. As principais contribuições de Kirchhoff foram: o enunciado

da lei que leva seu nome e a colocação precisa do problema fundamental da radiação térmica, os quais serão tratados em seguida numa linguagem atualizada.

Uma cavidade é uma caixa de paredes adiabáticas, refletoras à temperatura T [1]. Definindo u_ν como a densidade de energia da radiação dentro de uma cavidade à temperatura T no intervalo de frequência entre ν e $\nu + d\nu$, a densidade de energia total (para todas as frequências) será:

$$u(T) = \int u_\nu d\nu \quad (A.1)$$

Em 1859 Kirchhoff mostrou que a densidade de energia u_ν , é função apenas da frequência e da temperatura, sendo independente da natureza das paredes da cavidade, ou seja:

$$u_\nu = u(\nu, T) \quad (A.2)$$

A proposição acima ficou conhecida como a lei de Kirchhoff e é uma consequência da segunda lei da Termodinâmica. O problema fundamental que uma teoria da radiação térmica tem de resolver consiste em descobrir a forma funcional de $u(\nu, T)$. Esse foi o desafio lançado por Kirchhoff em 1860 aos cientistas da época.

(b) lei de Stefan-Boltzmann

Em 1879, Stefan, analisando as observações sobre a taxa de esfriamento de um grande termômetro de mercúrio colhidas por Dulong e Petit, propôs que a densidade de energia da radiação emitida deveria ser proporcional à quarta potência da temperatura termodinâmica (Stefan, 1879). Embora ele acreditasse estarem suas conclusões baseadas em dados experimentais, sua descoberta foi em grande parte acidental, já que as evidências apresentadas por Stefan eram insuficientes para se concluir uma dependência tipo T^4 para a radiação emitida.

Na notação introduzida na seção anterior a lei de Stefan pode ser expressa por:

$$u = aT^4 \quad (A.3)$$

onde $a = 7,64 \text{erg/cm}^3 \text{K}^4$

A justificativa teórica para a lei da 4ª potência foi dada por Boltzmann em 1884, através da teoria da pressão de radiação, desenvolvida por ele no

mesmo ano. Segundo essa teoria, a pressão p exercida pela radiação de densidade de energia u é dada por:

$$p = u/3 \quad (A.4)$$

Combinando as leis da termodinâmica com a expressão acima Boltzmann conseguiu demonstrar a validade da lei de Stefan para uma cavidade diatérmica à temperatura T . A partir de então a lei ficou conhecida como a lei de Stefan-Boltzmann.

A lei de Stefan-Boltzmann passou por vários testes na virada do século, tendo os pesquisadores encontrado para a valores próximos do colocado acima. Embora essa lei não resolva o problema fundamental da radiação térmica, ela é importante pois limita as formas possíveis que $u(\nu, T)$ pode assumir ao impor uma convergência do tipo (A.3) à integral (A.1).

(c) As leis de Wien

Os passos seguintes no sentido de dar solução ao problema lançado por Kirchhoff foram dados por Wien. Estudando a contração adiabática de uma esfera perfeitamente refletora, Wien conseguiu mostrar em 1893 que a densidade de energia u_ν seria dada por:

$$u_\nu = \frac{4\pi}{c} \nu^3 F(\nu/T) \quad (A.5)$$

A expressão (A.5), chamada lei do deslocamento de Wien, se mostrou muito importante para o desenvolvimento posterior da teoria da radiação térmica, pois reduz o problema inicial à determinação de uma função de um argumento apenas, (ν/T) . Uma consequência imediata da lei do deslocamento é a relação:

$$\lambda_{max} T = b \quad (A.6)$$

que estabelece que o comprimento de onda λ_{max} , para o qual u_ν tem o valor máximo, é inversamente proporcional à temperatura absoluta T , o que foi confirmado por Lummer e Pringsheim em 1897, tendo encontrado para a constante b o valor $0,294\text{cm.K}$.

Após ter obtido (A.5) Wien procurou determinar $F(\nu, T)$. Partindo de uma sugestão de Michelson de que a fórmula clássica de Maxwell para a distribuição de velocidades das moléculas de um gás valem também para as

moléculas de um corpo negro emissor, Wien obteve que $u(\nu, T)$ deveria ser da forma:

$$u_\nu = \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu / T} \quad (\text{A.7})$$

A expressão (A.7) é a chamada lei de radiação de Wien. Foi publicada em 1896 e confirmada por Paschen e Wanner em 1899 na região do visível e para temperaturas acima dos 4000°C.

(d) A lei de Rayleigh-Jeans

A lei de radiação de Rayleigh-Jeans é dada pela expressão abaixo:

$$u_\nu = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 kT \quad (\text{A.8})$$

Para a dedução da fórmula acima, Rayleigh supôs ondas estacionárias para a radiação em equilíbrio no interior da cavidade e determinou o número de modos de vibração por unidade de volume num intervalo $d\nu$ de comprimento de onda. Assumindo o teorema da equipartição para cada modo normal, Rayleigh chegou (após uma pequena correção feita por Jeans), à expressão (A.8) publicada em junho de 1900.

A fórmula de Rayleigh-Jeans, embora concorde com a lei do deslocamento de Wien e com os resultados experimentais para regiões de baixas temperaturas, tem o problema grave da divergência da densidade total de energia u , uma situação que foi descrita por Ehrenfest como "catástrofe do ultravioleta" e explorada por Einstein em seu artigo de 1905 sobre o quantum de luz. Entretanto, a proporcionalidade entre ν e T , na região requerida pela lei foi estabelecida irrefutavelmente por Rubens e Kurlbaum em meados de 1900.

(e) Planck (out 1900)

Embora a lei de radiação de Wien fosse verificada por medições subsequentes à sua publicação e recebesse a aceitação da comunidade científica como uma expressão baseada na experiência, a dedução teórica apresentada por Wien não era considerada satisfatória. Possivelmente isso se devia ao fato que tanto Wien quanto os pesquisadores anteriores que trabalharam no problema da radiação térmica não quiseram supor um modelo específico para os radiadores, isto é, para o sistema físico que constitui a parede da cavidade e é responsável pela emissão e absorção da radiação presente em seu interior.

Planck entretanto, que foi atraído ao problema em 1897, partiu da hipótese simples de que os radiadores eram osciladores harmônicos unidimensionais, ou seja, dipolos elétricos oscilantes cuja teoria fora desenvolvida por Hertz em 1889.

Considerando um oscilador harmônico de massa m e carga e em interação com um campo elétrico monocromático na direção de seu movimento e de frequência ν , Planck conseguiu mostrar que a densidade de energia u_ν estaria relacionada com a energia média U do oscilador à temperatura T , por:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 U \quad (\text{A.9})$$

O que Planck pretendia era obter a lei de Wien de uma lei mais geral. O raciocínio seguido por ele possivelmente foi o seguinte: no interior da cavidade ocorre um processo irreversível, resultado da interação entre os osciladores e a radiação, que converge a um estado estacionário cuja distribuição de energia (chamada por ele de "distribuição normal") seria a distribuição do corpo negro. Tal processo deveria obedecer à 2ª lei da termodinâmica. Planck, que desde a sua tese de doutorado, considerava a entropia, ao lado do conceito de energia, "a mais importante propriedade de qualquer sistema físico", sendo que "todas as leis do equilíbrio físico e químico podem ser deduzidas de um conhecimento da entropia", procurou descobrir a expressão da entropia que conduzia à lei de radiação de Wien, obtendo:

$$S = \frac{U}{a\nu} \ln \frac{U}{eb\nu} \quad (\text{A.10})$$

onde a, b são constantes e e é a base dos logaritmos naturais.

Diferenciando duas vezes a equação (A.10), obtém-se uma expressão que se mostrou importante em desenvolvimentos posteriores e que também é uma consequência imediata da lei de Wien:

$$d^2 S/dU^2 = \text{const}/U \quad (\text{A.11})$$

Até 1899, Planck acreditava que somente uma equação do tipo (A.7), a lei de radiação de Wien, conduziria a uma expressão para S que satisfizesse a 2ª lei. Entretanto a proporcionalidade entre u_ν e T , requerida pela lei de Rayleigh-Jeans e estabelecida irrefutavelmente por Rubens e Kurlbaum, convenceu Planck da inaplicabilidade da lei de Wien a todo o espectro e o levou a buscar uma lei de radiação que se adequasse a ambas nas respectivas regiões de validade.

Em outubro de 1900, após Rubens ter comunicado a Planck seus recentes resultados, ele passou a procurar uma fórmula que concordasse com a lei de Wien para altas frequências e temperaturas e que levasse à proporcionalidade entre u_ν e T na região de baixas frequências. Matematicamente a situação era a seguinte:

A lei de Wien conduzia à equação (A.11), enquanto que a lei de Rayleigh-Jeans levava a:

$$d^2S/dU^2 = \text{const}/U^2 \quad (\text{A.12})$$

o que pode ser demonstrado pela definição de entropia e pela primeira lei da termodinâmica.

Para manter o compromisso entre as expressões (A.11) e (A.12), Planck precisava descobrir uma expressão que se reduzisse a elas nos limites $\nu \rightarrow 0$ e $\nu \rightarrow \infty$, o que significaria U pequeno ou U grande. A expressão mais simples é obviamente

$$d^2S/dU^2 = a/U(U + b) \quad (\text{A.13})$$

onde a e b são constantes.

“Essa interpolação”, escreveu Jammer, “embora elementar matematicamente, foi uma das mais significativas contribuições na história da Física, pois não somente levou Planck, na pesquisa pela sua justificativa lógica, à proposição do quantum de ação e à fundação da teoria quântica, como também continha certas implicações que, após serem reconhecidas por Einstein, afetaram decisivamente os próprios fundamentos da Física, bem como seus pressupostos epistemológicos”.(Jammer, 1966, p.18)

De (A.14), Planck obteve uma expressão para U :

$$U = \frac{\text{const.}\nu}{e^{c\nu/T}-1} \quad (\text{A.14})$$

onde c é uma constante. Substituindo a expressão acima na equação (A.10) obtemos a lei de radiação de Planck dada por:

$$u_\nu = \frac{A\nu^3}{e^{B\nu/T}-1} \quad (\text{A.15})$$

A fórmula acima foi imediatamente testada e confirmada por Rubens e por Lummer e Pringshein.

(f) Planck (dez 1900)

Embora a lei de radiação de Planck aparentemente estivesse correta, ela não passava de uma expressão empírica, uma "afortunada hipótese" segundo Planck, desde que sua suposição básica, a equação (A.13) não tinha uma justificativa teórica rigorosa. Buscar essa justificativa foi o que Planck fez em seguida.

Na procura por um significado físico para a fórmula que havia encontrado, Planck achou conveniente mudar o enfoque termodinâmico que ele vinha adotando, utilizando considerações estatísticas no tratamento dos osciladores semelhantes às adotadas por Boltzmann para encontrar a distribuição de velocidades (Kuhn, 1978b). No artigo "Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia do Espectro Normal" (Planck, dez 1900), lido no encontro da Sociedade Alemã de Física, Planck apresenta os resultados de "algumas semanas do mais extenuante trabalho de sua vida", em que o quantum de energia e a constante h são introduzidos. O procedimento adotado por ele é descrito resumidamente a seguir.

Consideremos um número grande de osciladores, N de frequência ν , N' de frequência ν' , etc., numa cavidade de paredes refletoras e imersos em radiação. Seja E_T a energia total do sistema, igual à soma da energia presente no meio eletromagnético e nos osciladores. Se E é a energia dos N osciladores, E' dos N' , etc., então:

$$E + E' + E'' + \dots = E_O \quad (A.16)$$

tal que $E_T - E_O$ é a energia do meio. Tem-se também que:

$$E = NU \quad (A.17)$$

onde U é a energia média de um oscilador.

O que se quer fazer é encontrar a distribuição de energia de cada grupo de osciladores e em particular dos N osciladores de energia E .

Seguindo Boltzmann, Planck postulou que a entropia desse grupo seria dada por:

$$S = k \ln W \quad (A.18)$$

onde W é a probabilidade termodinâmica, que dá o número de distribuições possíveis da energia E nos N osciladores.

Classicamente, E seria uma quantidade continuamente divisível e a distribuição seria possível de infinitas maneiras. É precisamente aqui que Planck rompe com a tradição (talvez, como mais tarde ele diria, “num ato de desespero”) considerando E composto de um número bem definido de elementos ou quanta de energia ε .

Se E é dividido por ε obtém-se o número P de elementos de energia:

$$E = P\varepsilon \quad (\text{A.19})$$

e a probabilidade W é o número de maneiras possíveis de distribuir os P elementos nos N osciladores.

Usando a teoria das permutações, Planck conseguiu obter a seguinte expressão para a entropia:

$$S = kN[(1 + U/e)\ln(1 + U/e) - (U/e)\ln(U/e)] \quad (\text{A.20})$$

através da qual obteve:

$$U = \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/kT} - 1} \quad (\text{A.21})$$

que ao ser comparada com a fórmula equivalente, (A.14) obtida pelo método termodinâmico, fornece:

$$\varepsilon = \text{const.}\nu \quad (\text{A.22})$$

ou, chamando essa constante de h :

$$\varepsilon = h\nu \quad (\text{A.23})$$

levando à lei de radiação de Planck na sua forma final:

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (\text{A.24})$$

Das curvas experimentais Planck determinou os valores de h , K , N_o (número de Avogadro) e da carga elementar e , obtendo resultados que diferem pouco dos atuais. Com isso Planck resolvia finalmente o problema da radiação do corpo negro, quarenta anos após ele ter sido formulado. Entretanto novas questões de profundo significado físico e de enormes implicações resultaram do seu trabalho com a introdução do quantum e da constante h .

B. A teoria de Lorentz

No final do sec. XIX Lorentz estava engajado no programa unificador da física em torno da visão eletromagnética da natureza, tendo trabalhado por vários anos na construção de sua principal teoria conhecida como teoria do elétron, cujas versões foram publicadas a partir de 1892. Em relação ao problema da eletrodinâmica dos corpos em movimento, pareceu-lhe conveniente desenvolver uma teoria em o éter fosse completamente permeável à matéria e estacionário. Na 1ª versão de sua teoria (de 1892) Lorentz assumiu que "...todos os corpos ponderáveis contém uma multitude de pequenas cargas positivas ou negativas e os fenômenos elétricos são produzidos pelo deslocamento delas...", as quais interagem com o éter criando perturbações que afetam as partículas vizinhas (citado por Goldberg, 1969). As partículas elétricas eram consideradas como corpos rígidos e as cargas negativas foram identificadas com os elétrons. Nesse mesmo trabalho Lorentz apresentou sua lei de força para cargas e campos, a *força de Lorentz*:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \frac{1}{c}\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (B.1)$$

A teoria foi aplicada por Lorentz a vários fenômenos tendo sucesso na explicação da dispersão da luz, transparência e opacidade dos materiais à radiação, criou modelos para condutores e isolantes, etc, além de prever novos fenômenos como o efeito Zeeman. Lorentz também conseguiu o que era um dos seus principais objetivos: a dedução do coeficiente de arrastamento de Fresnel (Golberg, 1969).

Três anos depois, Lorentz procurou simplificar a teoria de 1892. Até então ele tinha usado as transformações de Galileo para mudanças de coordenadas entre o sistema do éter (em repouso) e sistemas móveis. Com isso, as equações de Maxwell teriam a sua forma habitual apenas no referencial do éter. Em decorrência das fracassadas tentativas de medir a velocidade da Terra em relação ao éter para experimentos em 1ª ordem em v/c , na versão de 1895, ele propõe uma nova transformação para os intervalos de tempo, definindo o *tempo local* t' , isto é, o tempo do sistema móvel S' , que estaria relacionado ao tempo do sistema em repouso em relação ao éter, t , por:

$$t' = t - \frac{vx}{c^2} \quad (B.2)$$

Com a ajuda dessa nova variável temporal Lorentz foi capaz de provar o seu *teorema dos estados correspondentes*:

“Se, para um sistema de corpos em repouso, um estado do coisas é conhecido onde $P_x, P_y, P_z, E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ são certas funções de x, y, z , e t , então neste mesmo sistema, dado que ele se mova com velocidade v , um estado de coisas pode existir no qual $P'_x, P'_y, P'_z, E'_x, E'_y, E'_z, H'_x, H'_y, H'_z$ são as mesmas funções de x', y', z' e t' ”, onde t' é dado por (B.2) e onde P é o deslocamento elétrico, E a força elétrica e H a força magnética (citado por Schaffner, 1969). Esse teorema foi usado para dar conta dos resultados nulos dos experimentos de 1ª ordem e da aberração estelar. Com isso as equações de Maxwell se tornavam covariantes para 1ª ordem em v/c . Pela teoria de 1892, entretanto, seria possível a determinação de efeitos de 2ª ordem, o que revela que Lorentz não estava construindo uma teoria que incorporasse o “princípio da relatividade” (Goldberg, *ibid*).

Alguns experimentos de 2ª ordem estavam sendo realizados à época, com resultados igualmente nulos, o mais notável deles sendo o de Michelson e Morley (1887) e Lorentz reconhecia a incompletude de sua teoria de 1ª ordem. Com o experimento MM, a teoria do éter estacionário havia passado por um segundo teste, agora mais sensível e ainda assim falhado. A respeito disso Lorentz comenta: “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 teoria encontra na explicação da aberração parecem-me 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; citado por Schaffner, *ibid*). A hipótese considerava que quando o braço do interferômetro encontra-se na direção do movimento ele se contrai na proporção exatamente necessária para compensar a diferença de tempo entre os percursos dos sinais luminosos, de modo que o resultado nulo do experimento MM de 1887 fica explicado e a hipótese do éter estacionário é salva.

Lorentz fundamentava a contração numa *lei de transformação* para as forças moleculares: “...nós somos levados [à hipótese da contração]...se, primeiro, sem considerar o movimento molecular, assumimos que em um corpo sólido [isolado] as forças, atrações e repulsões, agindo sobre cada molécula, mantêm-se umas às outras em equilíbrio e, segundo...se aplicarmos a essas forças moleculares a lei [de transformação] que em outro lugar deduzimos para as forças eletrostáticas” (citado por Schaffner, 1969). A lei mencionada considera dois sistemas de referência, S , ligado ao éter e S' , que se move com

velocidade v constante e na direção do eixo- x do referencial S e cujo eixo- x' é coincidente com o eixo- x . Então, se F_x, F_y, F_z são as componentes da força de Lorentz no sistema S , as componentes da mesma força em relação a S' vão ser dadas de acordo com Lorentz por:

$$F'_x = F_x \quad F'_y = \frac{F_y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad F'_z = \frac{F_z}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (B.3)$$

Para esclarecer o significado das equações acima Lorentz compara o sistema S com um outro S'' "...obtido pela ampliação de todas as dimensões de S que estejam orientadas na direção x na razão de $\sqrt{c^2 - v^2}$ para v ; ou seja, entre as coordenadas x, y, z de um ponto de S e as coordenadas x'', y'', z'' do ponto correspondente de S'' nós postularemos as relações "(citado por Schaffner, *ibid*):

$$x'' = \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad y'' = y \quad z'' = z \quad (B.4)$$

Das equações acima se obtém a lei de transformação (B.3). Em resumo, assumindo que as forças moleculares que determinam a forma de um corpo se transformam de acordo com (B.2), Lorentz mostra que elas estarão em equilíbrio somente se o corpo encolhe na proporção de $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ para 1.

Para Lorentz a contração dos comprimentos era absoluta e não recíproca (como na teoria de Einstein), ocorrendo como resultado de uma translação em relação ao éter. Isso se devia obviamente à sua relutância em abandonar o éter como um referencial privilegiado.

Embora a teoria de Lorentz para 1ª ordem fosse vista como não problemática, as suas principais suposições que envolviam termos em $\frac{v^2}{c^2}$ (termos de 2ª ordem) eram consideradas duvidosas, como por exemplo a lei de transformação das forças, que não se fundamentava em nenhuma teoria conhecida. A teoria de 2ª ordem como um todo e em particular a hipótese da contração, estavam sendo testadas através de várias experiências. Lord Rayleigh em 1902 e Brace em 1904, procuravam efeitos de dupla-refração em sólidos e líquidos móveis, que a contração deveria produzir. O resultado de ambas as experiências foi nulo. Em 1903 Trouton e Noble investigavam o movimento de um condensador carregado em relação ao éter. Ele deveria apresentar algum torque que o forçaria a se alinhar com o movimento da Terra. Embora o objetivo da experiência não fosse testar a teoria de Lorentz, ela previa para o

experimento um resultado positivo. O experimento entretanto não mostrou nenhum torque.

Lorentz estava consciente dessas experiências e trabalhava no que seria a versão final de sua teoria de 2ª ordem, publicada em 1904 (Lorentz, 1904). A principal contribuição dessa teoria são as *equações de transformação*, apresentadas como postulados, sem justificativa. São a forma final das equações (B.3) e (B.4):

$$x' = klx \quad y' = ly \quad z' = lz \quad t' = (l/k)t - kl(v/c^2)x \quad (B.5)$$

com:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad e \quad l = 1 \quad (B.6)$$

e onde (x, y, z, t) são as coordenadas em S e (x', y', z', t') , as coordenadas correspondentes em S' .

No mesmo artigo é também apresentada a hipótese da contração dos elétrons, necessária para dar conta dos experimentos de Trouton e Noble, a generalização do teorema dos estados correspondentes e a previsão da dependência da massa do elétron com a velocidade. Lorentz mostra que o elétron tem duas massas: a chamada “massa transversal”, perpendicular à direção da força acelerativa e dada por $m = m_o(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, e a “massa longitudinal”, dada por $m = m_o(1 - v^2/c^2)^{-3/2}$, onde m_o é a massa de repouso do elétron. Essas hipóteses concordavam bem com resultados experimentais obtidos por Kaufmann.

C. O modelo de pensamento científico de Einstein

Durante o estudo do programa de Einstein, para melhor visualizar o seu desenvolvimento e localizar os principais argumentos que deram plausibilidade às hipóteses fundamentais das teorias envolvidas, nós achamos interessante fazer uso de alguns esquemas de representação que têm certa semelhança com os chamados *mapas conceituais* (Ota, 1985; Salém, 1986; Necessian, 1989; Moreira, 1990; Thagart, 1990). O esquema foi concebido a partir de algumas

reflexões de Einstein sobre o processo de pensamento científico, o qual será resumidamente discutido abaixo.

A relação entre ciência e epistemologia no pensamento científico é um interessante tema de estudo. Particularmente no caso de Einstein, é visível a influência de credos epistemológicos sobre o seu processo de criação científica. O “cientista-filósofo” que publicou constantemente sobre o assunto principalmente a partir de 1914, acreditava que “epistemologia sem contato com a ciência torna-se um esquema vazio. Ciência sem epistemologia é ...primitiva e confusa”(Einstein, 1949, p.683). Como apontado por Holton (1979), uma das questões centrais da epistemologia einsteniana era seu modelo de pensamento científico, que ele expõe em diversos ensaios como no início das Notas Autobiográficas e de maneira mais bastante concisa, inclusive com um gráfico representado na figura C.1, numa carta a seu amigo Solovine de 1952 (publicada em French, 1979). Vamos discutir abaixo esse modelo, tomando por base a análise feita por Holton (1979) e algumas citações de outros ensaios de Einstein (Einstein, 1982; 1954)

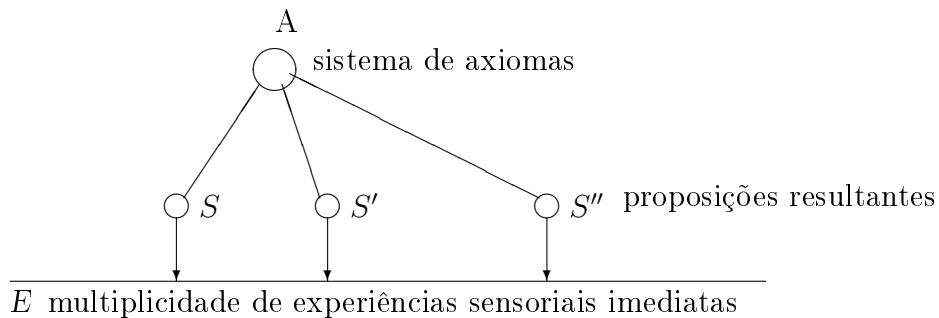


Figura C.1 MODELO DE PENSAMENTO CIENTÍFICO DE EINSTEIN

Segundo Einstein, E , as “experiências diretas”, ou a “totalidade das experiências sensoriais” ou ainda a “totalidade dos fatos empíricos” são dadas a nós. A são “os axiomas dos quais nós extraímos as consequências”. Não há nenhum caminho lógico levando de E a A , e nem pode A ser induzido a partir da experiência, mas somente pode ser alcançado através da invenção. O caminho que vai de E a A é indicado na figura pela seta curva J . Apesar de “arbitrário em sua totalidade”, a escolha do sistema de axiomas está condicionada a dois fatores. Primeiro, “pelo objetivo de permitir a mais completa

coordenação (intuitiva) com a totalidade das experiências sensoriais"; e em segundo lugar porque "objetivam à maior excasse possível dos seus elementos logicamente independentes (conceitos básicos e axiomas)". Do sistema de axiomas A são deduzidas consequências lógicas S , S' e S'' que podem ser verificadas experimentalmente. Se a correspondência entre S e E não for atingida "com grande certeza" o sistema não terá nenhum valor para a "compreensão da realidade". Em resumo, o modelo de construção de teorias de Einstein é um processo cíclico que parte da experiência e a ela retorna, que pode ser indicado pela sequência $E \rightarrow J \rightarrow A \rightarrow S \rightarrow E$.

O modelo de pensamento científico proposto por Einstein põe em evidência um dos aspectos centrais de todo processo de aquisição de conhecimento: a necessidade de que os esquemas teóricos propostos se ajustem à realidade. Esse processo de ajustamento vai desde a aquisição de modelos mentais pelas crianças até à testagem e verificação de teorias pelo cientista. Portanto tanto as teorias científicas como as teorias alternativas ou não científicas são construídas e ajustadas pelo mesmo processo que Arbib e Hesse chamam apropriadamente de *feedback físico* (Arbib e Hesse, 1986, p.2). Essa é a base sobre a qual se apoia o construtivismo tanto na aprendizagem como na investigação científica. Ou seja, tanto o pensamento comum como o científico se processam fundamentalmente da mesma maneira. Einstein também concordava com essa afirmativa. É possível portanto que a explicitação das relações entre a teoria, ou a construção teórica, e a realidade seja importante para o ensino da física (em particular, a explicitação dessa relação pode ser utilizada para aumentar a plausibilidade das teorias). Há evidências que ajudar os estudantes a desenvolver um conhecimento epistemológico sobre como as teorias se relacionam com as evidências ou que a ciência exige uma maior consistência que a teorização usual da vida cotidiana, poderá favorecer uma mudança conceitual racionalmente baseada (Chinn e Brewer, 1993).

A influência desse modelo de pensamento científico nos trabalhos de Einstein é visível. A estrutura conceitual de algumas de suas teorias parecem se encaixar muito bem dentro do esquema sintetizado pela figura acima. Entretanto analisando o desenvolvimento do programa de Einstein e do processo de construção de suas teorias notamos a ausência em seu modelo dos argumentos que dão suporte ao sistema de axiomas A . Obviamente o que Einstein estava propondo era um modelo de como as teorias seriam inventadas e não de como são justificadas ou porquê são consideradas plausíveis. Entretanto, como vimos no caso da TRE, a escolha do postulado da luz não resultou de um salto intuitivo mas de argumentos racionalmente fundamen-

tados, o mesmo ocorrendo em relação à construção do conceito de fóton, etc. Pareceu interessante então, a partir do modelo delineado por Einstein (fig. C.1), introduzir na figura os argumentos que servem de base aos axiomas, permitindo dessa forma que o modelo de Einstein seja usado para a visualização das diversas relações entre a teoria que está sendo estudada e outras teorias, conceitos ou experimentos, de modo a evidenciar de forma simples a sua plausibilidade. Chamamos o esquema resultante de *esquema P*, que tem a forma geral delineada na figura C.2 .

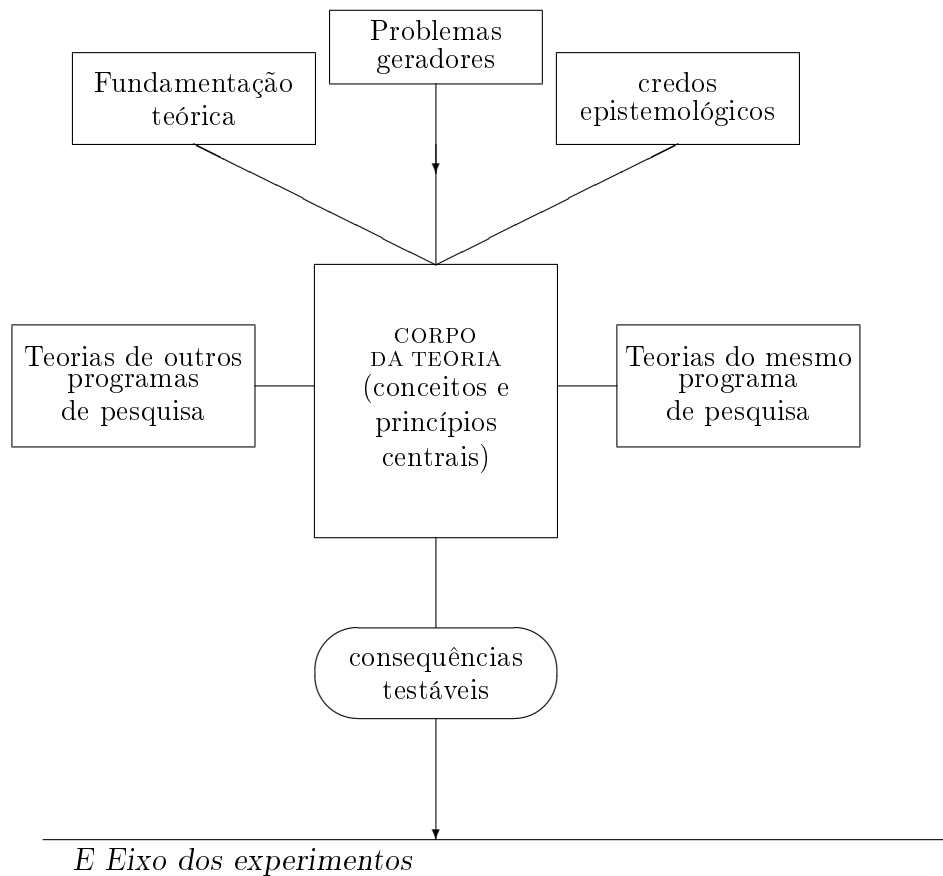


Figura C.2 ESQUEMA "P"

O corpo da teoria, que é a estrutura teórica propriamente dita, corresponde no esquema de Einstein ao sistema de axiomas A, o qual pode ter sido intuído a partir do eixo das "experiências sensoriais imediatas" como diz Einstein. Entretanto, o que importa, tanto para o cientista como para a

comunidade científica, são os argumentos que dão suporte ao sistema de axiomas, ou seja, que o tornam plausível. Na física, como vimos, os principais elementos que realizam essa função são: as teorias bem estabelecidas que fundamentam o novo sistema teórico, outras teorias do mesmo programa de pesquisa, outras teorias de outros programas de pesquisa, os credos epistemológicos aceitos pelo cientista ou pela comunidade e o grau de compatibilidade (ou ajuste) da teoria, através de suas consequências testáveis, com os experimentos. Aachamos conveniente também introduzir no diagrama da figura C.2 os problemas ou anomalias que deram origem à teoria, aos quais chamamos *problemas geradores* [2]. A discussão desses problemas ajudam a dar sentido à estrutura, ou seja, explicam as razões pelas quais a teoria foi criada e assim contribuem para dar maior plausibilidade a ela. A seguir vamos aplicar o “esquema P” à teoria do quantum de luz e à teoria da relatividade especial (fig. C.3). Pensamos que o esquema ajuda a perceber as relações entre as duas teorias e entre cada uma delas e a “realidade”, permitindo que a consistência interna e plausibilidade do pensamento de Einstein em 1905 seja melhor compreendida.

A figura C.3 torna mais explícita as relações internas entre as duas principais teorias de Einstein em 1905. Acrescentamos na figura algumas confirmações experimentais da TRE que vieram a ser realizadas posteriormente: a experiência com mésons, que dá suporte experimental aos paradoxos e a experiência com elétrons, que confirma $E = mc^2$. As experiências interferenciais também aparecem na figura como confirmações experimentais da teoria de Einstein. O paradoxo e o problema da assimetria ímã-condutor (sec 3.3) podem ser considerados como os problemas geradores da TRE.

Notas

[1] Na teoria da radiação térmica o modelo da cavidade substitui o corpo negro emissor ou absorvedor.

[2] A idéia de problema gerador foi aplicada ao ensino de física em Arruda e Nardi (1992) e também pode ser útil à análise de programas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

AICHELBURG, P. C. E SEXL, R. U. (1979). *Albert Einstein: His Influence on Physics, Philosophy and Politics*. Braunschweig, Wiesbaden: Friener. Vieweg e Sons.

ANGOTI, J. A. P., CALDAS, I. L., DELIZOICOV, D., RÜDINGER, E. E PERNAMBUCO, M. M. C. A. (1978). Teaching relativity with a different philosophy. *Am. J. Phys.* 46(12), 1258-1262.

ARBIB, M. A. E HESSE, M. B. (1986). *The Construction of Reality*. Cambridge: Camb. Univ. Press.

ARRUDA, S. M. (1983). Problemas e teorias do tempo. Publicação interna, Depto Física, UEL.

ARRUDA, S. M. (1992a). Dificuldades no Ensino do Problema da Radiação do Corpo Negro. Trabalho apresentado na *44a SBPC*; Anais, p. 563.

ARRUDA, S. M. (1992b). Metáforas na Física. Pré-print, *IFUSP*. A ser publicado no *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, vol 10, nº 1. Apresentado no *X SNEF*, Londrina, PR, 1993.

ARRUDA, S. M. (1993). Planck, Einstein e Quanta. Trabalho apresentado no *X SNEF*. Londrina, PR, 1993.

ARRUDA, S. M. E NARDI, R. (1992). Planejamento de curso através da técnica de resolução de problemas: um exemplo. *Ens. Cienc.*, 10(2), 237-240.

BERTOZZI, W. (1964). Speed and kinetic energy of relativistic electrons. *Am. J. Phys.*, vol. 32, nº 7, 551-555.

BORN, M. (1949). Einstein's Statistical Theories. Em Schilpp, 1949.

BRADLEY, J. (1729). The velocity of light. Em Magie, 1935.

BROWN, D. E. E CLEMENT, J. (1989). Overcoming misconceptions by analogical reasoning: abstract transfer versus explanatory model construction. *Instructional Science*, 18:237-261.

BUNGE, M. (1967). *Foundations of Physics*. Berlim, Heidelberg e New York: Springer.

CAREY ET AL (1989). An experiment is when you try and see if it worke: a study of grade 7 students' understanding of the construction of scientific knowledge. *Int. J. Sci. Educ.*, 11, 514-529.

CHAMPAGNE, A. B., GUNSTONE, R. F. E KLOPFER, L. E. (1985). Effecting changes in cognitive structures among physics students. Em *Cognitive Structure and Conceptual Change*, West L. and Pines A. (ed). Academic Press.

CHINN, C. A. E BREWER, W. F. (1993). The role of anomalous data in knowledge acquisition: a theoretical framework and implications for science instructions. *Rev. Educ. Res.*, vol 63, no 1, 1-49.

CLEMENT J. ET AL (1987). Overcoming students' misconceptions in physics: the role of anchoring intuitions and analogical validity. *Proceedings of the Second International Seminar. Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. 3:84-97.

COSGROVE, M. E OSBORNE, R. (1985). Lesson frameworks for changing children's ideas. Em *Learning in Science: The Implications of children's science*, Osborne R. e Freyberg P. Heinemann.

DORLING, G. (1979). *Approaches to the Teaching or Special Relativity*. Em French, 1979.

DREYFUS, A., JUNGWIRTH, E. E ELIOVITCH, R. (1990). Applying the cognitive conflict strategy for conceptual change - some implications, difficulties and problems. *Science Education*, 74(5), 555-569.

DRIVER, R. (1973). The representation of conceptual frameworks in young adolescent physics students. Phd dissertation. Univ. of Illinois.

DUSCHL, R. E HAMILTON, R., eds. (1992). *Philosophy of science, cognitive pscology, and educational theory and practice*. New York: SUNY.

DUIT, R., GOLDBERG, F E NIEDDERER, H. (eds) (1992). *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*. Proceedings of an International Workshop.

DYKSTRA, D. (1992). Studying conceptual change: constructing new understandings. Em Duit et al, 1992.

EINSTEIN, A. (1904). Théorie Moléculaire Générale de la Chaleur. Em Einstein, 1989, cap. 1, p.29-35.

EINSTEIN, A. (1905a). On a Heuristic View Point About the Criation and Conversion of Light. Em Haar, 1967.

EINSTEIN, A. (1905b). On the movement of small particles suspended in a stacionary liquid demanded by the molecular kinetic theory of heat. Em Einstein, 1956.

EINSTEIN, A. (1905c). Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. Em Einstein et al, 1983.

EINSTEIN, A. (1905d). A inércia de um corpo será dependente de seu conteúdo energético ? Em Einstein et al, 1983.

EINSTEIN, A. (1909). L'évolution de nos conceptions sur la nature et la constitution du rayonnement. Em Einstein, 1989, cap 5, p.86-100. Tradução em ingles em *Collected Papers*.

EINSTEIN, A. (1917). On the quantum theory of radiation. Em Van der Waarden, *Sources of Quantum Mechanics*. Amsterdam: North-Holland.

EINSTEIN, A. (1950). *Out of My Laters Years*. New York: Philos. Library.

EINSTEIN, A. (1954). *Ideas and Opinions*. New York: Dell Publis. Co.

EINSTEIN, A. (1956). *Investigations on the Theory of Brownian Movement*. New York: Dover.

EINSTEIN, A. (1982). *Notas Autobiograficas*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira. *Autobiographical notes*, em Schilpp, 1949.

EINSTEIN, A., LORENTZ, H. A. E MINKOWSKI, H. (1983). *O Princípio da Relatividade*. Lisboa: Fundação Calouste.

EINSTEIN, A. (1989). *Oeuvres Choiesies*, vol 1: Mecanique Statistique et Physique Quantique. Textos escolhidos e apresentados por F. Balibar, O. Darrigol e B. Jech. Paris: Seuil.

EINSTEIN, A. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Anna Beck e Peter Havas. New Jersey: Princeton Univ. Press.

- EISBERG, R. E RESNICK, R. (1979). *Física Quântica*. Rio de Janeiro: Ed. Campus.
- FEYERABEND, P. K. (1974). Zahar on Einstein. *Brit. J Phil. Sci.*, 25, 25-28.
- FIZEAU, A. H. L. (1849). The velocity of light. Em Magie, 1935.
- FOUCAULT, J. B. L. (1862). The velocity of light. Em Magie, 1935.
- FRENCH, A. P. (1974). *Relatividade Especial*. Barcelona: Ed. Reverté.
- FRENCH, A. P. (1979). *Einstein: A Centenary Volume*. Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press.
- FRISCH, D. H. E SMITH, J. H. (1976). Measurement of the relativistic time using μ mésons. *Am. J. Phys.*, p.342.
- GILBERT, J. K. E SWIFT, D. J. (1985). Towards a lakatosian analysis of the piagetian and alternative conceptions research programs. *Sci. Educ.* 69(5), 681-696.
- GOLDBERG, S. (1969). The Lorentz theory of electrons and Einstein's theory of relativity. *Am. J. Phys.*, 10, 982-994.
- GOLDBERG, S. (1970). In defense of ether: the British response to Einstein's special theory of relativity, 1905-1911. *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 2, 89-125.
- GRAF (1993). *Física 3: Eletromagnetismo*. S. Paulo: EDUSP.
- HAAR, D. T. (1967). *The Old Quantum Theory*. Oxford: Pergamon Press.
- HACKLING, M. W. E GARNETT, P. F. (1985). Misconceptions of chemical equilibrium. *Eur. J. Sci. Educ.*, vol 7, 2, 205-214.
- HAMEED, H., HACKLING, M. W. E GARNETT, P. J. (1993). Facilitating conceptual change in chemical equilibrium using a CAI strategy. *Int. J. Sci. Educ.*, vol 15, 2, 221-230.
- HASHWEH, M. Z. (1986). Toward an explanation of conceptual change. *Eur. J. Sci. Educ.* vol 8, no 3, 229-249.
- HERTZ, H. (1962). *Electric Waves*. New York: Dover.
- HEWSON, P. W. (1981). A conceptual change approach to learning science. *Eur. J. Sci. Educ.*, vol 3, 4, 383-396.

- HEWSON, P. W. (1982). A case study of conceptual change in Special Relativity: the influence of prior knowledge in learning. *Eur. J. Sci. Educ.*, 4, 61-78.
- HIROSIGE, T. (1969). Origins of Lorentz' theory of electrons and the concept of electromagnetic field. *Hist. Stud. Phys. Sci.*, vol 1, 151-209.
- HIROSIGE, T. (1976). The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity. *Hist. Stud. Phys. Sci.*, vol 7, 3-82.
- HOLTON, G. (1960). On the origins of special theory of relativity. *Am. J. Phys.* 28(7),627-636. Também publicado em Holton, 1973.
- HOLTON, G. (1968). Mach, Einstein and the search for reality. Em Holton, 1973.
- HOLTON, G. (1969). Einstein, Michelson and the "crucial" experiment. Em Holton, 1973.
- HOLTON, G. (1973). *Thematic Origins of Scientific Thought*. Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press.
- HOLTON, G. (1979). Einstein's Model for Constructing a Scientific Theory. Em Aichelburg and Sexl, 1979.
- JAMMER, M. (1961). *Concepts of Mass*. Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press.
- JAMMER, M. (1966). *Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: MacGraw-Hill Book Co.
- JANOSI, L. (1971). *Theory of Relativity Based on Physical Reality*. Budapest: Akademi Kiadó.
- KANGRO, H. (1972). *Planck's Original Papers in Quantum Physics*. London: Taylor & Francis.
- KIRCHHOFF, G. R. (1859). Emission and Absorption. Em Magie, 1935.
- KITTEL ET AL (1962). BERKELEY PHYSICS COURSE. Volume 2.
- KLEIN, M. J. (1963). Einstein's First Paper on Quanta. *The Natural Philosopher*, 2, p.59-86.
- KLEIN, M. J. (1964). Einstein and the wave-particle duality. *The Natural Philosopher*, 3, 1-49.

KLEIN, M. J. (1967). Thermodynamics in Einstein's Thought. *Science*, 157, p.509-516.

KUHN, D. (1993). Science as argument: implications for teaching and learning scientific thinking. *Sci. Educ.* 77(3), 319-337.

KUHN, T. S. (1959). A tensão essencial. Em Kuhn, 1989.

KUHN, T. S. (1978a). *A Estrutura das Revoluções Científicas*. S. Paulo: Ed. Perspectiva. Edição original de 1962.

KUHN, T. S. (1978b). *Black Body Theory and Quantum Discontinuity* Oxford: Clarendon Press.

KUHN, T. S. (1989). *A Tensão Essencial*. Lisboa: edições 70.

IVES, H. E. (1952). Derivation of the mass-energy relation. *J. Opt. Soc. Am.* 42(8), 540-543.

ILLY, J. (1981). Revolutions in a revolution. *Stud. Hist. Phil. Sci.* 12, 173-210.

LABURU, C. E. (1993). Tese de doutorado. *FEUSP/USP*.

LAKATOS, I. (1979). O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica. Em *A crítica e o desenvolvimento do conhecimento*. Lakatos e Musgrave (eds.). S. Paulo: Cultrix.

LANDAU E LIFCHITZ (1966). *Théorie du Champ*. Moscow: MIR.

LORENTZ, A. H. (1904). Fenómenos electromagnéticos num sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz. Em Einstein et al (1983).

LUCAS, J. R. E HODSON, P. E. (1990). *Spacetime and Electromagnetism*. Oxford: Clarendon Press.

MACH, E. (1949). *Desarrollo Historico-Critico de la Mecanica*. Buenos Aires: Espase-Calpe Argentina S. A. 1ª edição de 1883.

MAGIE, W. F. (1935). *A Source Book on Physics*. New York: McGraw-Hill Book.

MALGRANGE, J. L., SALTIEL E. E VIENNOT, L. (1973). Vecteurs, scalaires et grandeurs physiques. *Bulletin de la Société Française de Physique - Encart Pédagogique*, 1, 3-13.

MAXWELL, J. C. (1878). Ether. Em *Maxwell - The Scientific Papers*. New York: Dover, 1965.

- MCCORMMACH, R. (1970a). H. A. Lorentz and the electromagnetic view of nature. *Isis*, 61, 458-497.
- MCCORMMACH, R. (1970b). Einstein, Lorentz and the electron theory. *Hist. Stud. Phys. Sci.*, vol 2, 41-87.
- MEHRA, J. (1975). Einstein and the Foundations of Statistical Mechanics. *Physica*, 79A, P.447-477.
- MICHELSON, A. A. E MORLEY, W. M. (1887). The Michelson e Morley experiment. Em Magie, 1935.
- MILLAR, R. (1989). Constructive criticisms. *Int. J. Sci. Educ.* 11, special issue, 587-596.
- MILLER, D. C. (1933). Ether drift experiments and the determination of the absolute motion of the earth. *Rev. Mod. Phys.* 5, p.203.
- MILLER, A. I. (1976). On Einstein, light quanta, radiation and relativity en 1905. *Am. J. Phys.* vol 44, no 10, 912-923.
- MILLIKAN, R. A. (1916). A Direct Photoelectric Determination of Planck's h. *Phys. Rev.*, 7, p.355-388.
- MINKOWSKI, H. (1908). Espaço e tempo. Em Einstein et al, 1983.
- MÖLLER, C. (1952). *The theory of relativity*. Oxford: Clarendon Press.
- MOREIRA, M. A. (1990). Um Mapa Conceitual para as Interações Fundamentais. *Ens. Cienc.*, 8(2), 133-139.
- NAVARRO, L. (1991). On the Einstein's statistical-mechanical approach to the early quantum theory (1904-1916). *Historia Scientiarum*, vol 1-1, 39-58.
- NERCESSIAN, N. J. (1989). Conceptual change in science and science education. *Synthese*, 80, 163-183.
- NEWTON, I (1947). *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Berkeley: California Press.
- NIEDDERER, H. (1987). A teaching strategy based on student's alternative framework - theoretical conceptions and examples. Em Scott et al, 1987.
- NUGAEV, R. N. (1985). The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz. *Phil. Sci.*, 52, p.44-63.

NUGAEV, R. N. (1988). Special Relativity as a Stage in the Development of Quantum Theory. *Historia Scientiarum*, 34, p.57-79.

NUSSBAUM, J. E NOVICK, S. (1982). Alternative framework, conceptual conflict and accommodation: toward a principled teaching strategy. *Instructional Science* 11, 183-200.

OTA, M. I. N. (1985). Um Texto de Eletromagnetismo e Relatividade Baseado no Conhecimento Estrutural. Dissertação de Mestrado. *IFUSP/FE-USP*.

PAIS, A. (1979). Einstein and the Quantum Theory. *Rev. Mod. Phys.*, 51(4), p.861-914.

PAIS, A. (1982). "Subtle is the Lord...": *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press.

PATY, M. (1993). *Einstein Philosophe*. Paris: Presses universitaires de France.

PLANCK, M. (out 1900). On a Improvement of Wien's Equation for the Spectrum. Em Kangro, 1972.

Planck, M. (dez 1900). On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum. Em Kangro, 1972.

POSNER, G. J., STRIKE, K. A., HEWSON, P. W. E GERTZOG, W. A. (1982). Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Sci. Educ.* 66(2):211-227.

REICHENBACH, H. (1969). *Axiomatization of the theory of relativity*. Berkeley: Univ. California Press.

RESNICK, R. (1971). *Introdução à relatividade especial*. S Paulo: Edusp. Edição original de 1968.

RINDLER, W. (1960). *Special Relativity*. London: Oliver and Boyd.

RÖEMER, O. (1666). The velocity of light. Em Magie (1935).

ROSENFELD, L. (1957). The velocity of light and the evolution of electrodynamics. *Nuovo Cimento, suppl.*, vol IV, serie X, no 5, 1630-1669.

ROSS, K. E. K. E SHUELL, T. J. (1993). Childrens beliefs about earthquakes. *Science Education*, 77(2), 191-205.

- ROWELL, J. A. E DAWSON, C. J. (1985). Equilibration, conflict and instruction: a new class-oriented perspective. *Eur. J. Sci. Educ.* 7, 4, 331-344.
- RÜDINGER ET AL (1980). *Relatividade especial: módulo para ciclo básico*. IFUSP.
- RYAN, A. G. E AIKENHEAD, G. S. (1992). Student's preconceptions about epistemology of science. *Science Education*, 76(6), 559-580.
- SALEM, S (1986). Estruturas Conceituais no Ensino de Física: Uma Aplicação à Eletrostática. Dissertação de Mestrado. *IFUSP/FEUSP*.
- SCHAFFNER, K.F. (1969). The Lorentz Electron theory of relativity. *Am. J. Phys.*, 5, 498-513.
- SCHILPP, P. A. (1949). *Einstein: Philosopher-Scientist*. New York: Harper e Row. Edição de 1959.
- SCOTT, P. H.; ASOKO, H. M. E DRIVER, R. H. (1992). Teaching for conceptual change: a review of strategies. Em Duit et al, 1992.
- SEARS E BREHME (1968). *Introduction to the Theory of Relativity*. Reading, Mass: Addison-Wesley Publis. Co.
- SONGER, N. E LINN, M. (1991). How do students' views of science influence Knowledge integration? *J. Res. Sci. Teach.*, 28, 761-784.
- STACHEL, J. E TORRETI, R. (1982). Einstein's first derivation of mass-energy equivalence. *Am. J. Phys.* 50(8), 760-763.
- STAVY, R. E BERKOVITZ, B. (1980). Cognitive conflict as a basis for teaching quantitative aspects of the concept of temperature. *Sci. Educ.* 64, 679-692.
- STEFAN, J. (1879). Temperature Radiation. Em Magie, 1935.
- STRIKE, K. A. E POSNER, G. J. (1982). Conceptual change and science teaching. *Eur. J. Sci. Educ.* 4, 3, 231-240.
- STRIKE, K. A. E POSNER, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. Em Duschl e Hamilton, 1992.
- Synge (1956). *Relativity: the Special Theory*. Amsterdam: North-Holland Publis. Co.

- THAGART, P. (1990). The conceptual structure of the chemical revolution. *Phil. Sci.*, 57, 183-209.
- TOULMIN, S. (1972). *Human Understanding*. Princeton: Princeton Univ. Press.
- UGAROV, V. A. (1979). *Special theory of relativity*. Moscow: Mir Publis.
- VIENNOT, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *Eur. J. Sci. Educ.* 1, 205-221.
- VILLANI, A. (1985). Visão eletromagnética e relatividade II: o desenvolvimento das teorias de Lorentz e Einstein. *Rev. Ens. Fis.*, vol 7, nº 2, 37-73.
- VILLANI, A. (1991). *Conteúdo científico e problemática educacional na formação dos professores de ciência*. Tese de livre docência. IFUSP.
- VILLANI, A E PACCA, J. (1987). Students' spontaneous ideas about the speed of light. *Int. J. Sci. Edc.*, vol 9, nº 1, 55-66.
- VILLANI, A E ORQUIZA, L. (1993). Experimentos qualitativos e conflitos cognitivos. Draft.
- WERTHEIMER, M. (1945). *Productive Thinking*. Harper e Brothers, New York e Londres.
- WHITTAKER, E. (1989). *A History of the Theories of Aether and Electricity*. New York: Dover. Republicação das edições de 1951 e 1953.
- ZAHAR, E. (1973). Why did Einstein's program superseded Lorentz's? *Brit. J. Phil. Sci.* 24, 95-123.
- ZANETIC, J. (1989). *Física Também é Cultura*. Tese de doutorado. FEUSP.