

Luiz O. Q. Peduzzi

Evolução dos Conceitos da Física

Florianópolis, 2011



Universidade Federal de Santa Catarina Consórcio RediSul

Campus Universitário – Trindade

Caixa Postal 476 – CEP 88040-200 – Florianópolis – SC

<http://www.ead.ufsc.br> – licenciatura@ead.ufsc.br

Reitor Alvaro Toubes Prata

Vice-Reitor Carlos Alberto Justo da Silva

Secretário de Educação à Distância Cícero Barbosa

Pró-Reitora de Ensino de Graduação Yara Maria Rauh Muller

Pró-Reitora de Pesquisa e Extensão Débora Peres Menezes

Pró-Reitor de Pós-Graduação Maria Lúcia de Barros Camargo

Pró-Reitor de Desenvolvimento Humano e Social Luiz Henrique V. Silva

Pró-Reitor de Infra-Estrutura João Batista Furtuoso

Pró-Reitor de Assuntos Estudantis Cláudio José Amante

Centro de Ciências da Educação Carlos Alberto Marques

Centro de Ciências Físicas e Matemáticas Tarciso Antônio Grandi

Centro de Filosofia e Ciências Humanas Roselane Neckel

Instituições Consorciadas

UDESC Universidade do Estado de Santa Catarina

UEM Universidade Estadual de Maringá

UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

UFSM Universidade Federal de Santa Maria

Cursos de Licenciatura em Física na Modalidade à Distância

Coordenação de Curso Sônia Maria S. Corrêa de Souza Cruz

Coordenação de Tutoria Rene B. Sander

Coordenação Pedagógica/CED Roseli Zen Cerny

Coordenação de Ambiente Virtual Nereu Estanislau Burin

Comissão Editorial

Demétrio Delizoicov Neto, Frederico F. de Souza Cruz, Gerson Renzetti
Ouriques, José André Angotti, Nilo Kühlkamp, Silvio Luiz Souza Cunha.

Laboratório de Novas Tecnologias - LANTEC/CED

Coordenação Pedagógica

Coordenação Geral: Andrea Lapa, Roseli Zen Cerny

Núcleo de Formação: Nilza Godoy Gomes

Núcleo de Pesquisa e Avaliação: Claudia Regina Flores

Núcleo de Criação e Desenvolvimento de Materiais

Design Gráfico

Coordenação: Laura Martins Rodrigues, Thiago Rocha Oliveira

Projeto Gráfico: Carlos Antonio Ramirez Righi, Diogo Henrique Ropelato,
Mariana da Silva

Diagramação: Andrezza Pereira do Nascimento, Laura Martins Rodrigues

Aberturas de Capítulo: Alexandre dos Santos Oliveira,
Rafael Naravan Kienen

Ilustrações: Andrezza Pereira do Nascimento, Laura Martins Rodrigues

Design Instrucional

Coordenação: Elizandro Maurício Brick

Design Instrucional: João Paulo Mannrich

Revisão Gramatical: Daniela Piantola e Hellen Melo Pereira

*Copyright © 2011, Universidade Federal de Santa Catarina / Consórcio RediSul
Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada, por qual-
quer meio eletrônico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, da
Coordenação Acadêmica do Curso de Licenciatura em Física na Modalidade à Distância.*

Ficha Catalográfica

P372e Peduzzi, Luiz O. Q.
Evolução dos Conceitos da Física / Luiz O. Q. Peduzzi. —
Florianópolis : UFSC/EAD/CED/CFM, 2011.
130p. : il. ; grafs. tabs.

Inclui bibliografia
UFSC. Licenciatura em Física na modalidade à distância.
ISBN 978-85-99379-92-9

1. Física – História. 2. Ciência – Filosofia. 3. Física – Estudo e ensino. I. Título.

CDU 53

Sumário

Apresentação	7
1 Sobre a história e o ensino da física	9
1.1 História da ciência/física: para quê?	11
1.2 Argumentos favoráveis ao uso da história da ciência/física na educação científica	13
1.3 Muitas hipóteses e o seu exercício, sob a tensão da crítica, em um texto sobre a história da física	17
1.4 O que se espera do aluno ao final deste capítulo	20
2 Força e movimento: de Thales a Galileu	21
2.1 Sobre o texto “Força e movimento: de Thales a Galileu” ...	23
2.2 Estrutura geral e divisão dos conteúdos	31
2.3 Objetivos da aprendizagem	33
3 Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana	39
3.1 Sobre o texto “Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana”	41
3.2 Estrutura geral e divisão dos conteúdos	47
3.3 Objetivos da aprendizagem	49
4 Do átomo grego ao átomo de Bohr	53
4.1 Sobre o texto “Do átomo grego ao átomo de Bohr”	55
4.2 Estrutura geral e divisão dos conteúdos	63
4.3 Objetivos da aprendizagem	65
5 A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica	69
5.1 Sobre o texto “A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica”	71
5.2 Estrutura geral e divisão dos conteúdos	79
5.3 Objetivos da aprendizagem	81
6 Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu... ..	87
6.1 Sobre o texto “Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...”	89
6.2 Estrutura geral e divisão dos conteúdos	95
6.3 Objetivos da aprendizagem	96

7 Sobre continuidades e discontinuidades no conhecimento científico: uma discussão centrada na perspectiva kuhniana	99
7.1 O termo revolução: origem, significado e analogias	101
7.2 Ciência acumulativa x ciência descontínua: a perspectiva kuhniana do desenvolvimento científico.....	106
7.3 A matriz disciplinar kuhniana e seus elementos	111
7.4 Críticas à epistemologia de Kuhn.....	113
7.5 Implicações para o ensino: uma pergunta e várias respostas, ao final de uma disciplina de evolução dos conceitos da física.....	117
Referências	125

Apresentação

Uma história da física: o referencial teórico e a formatação do livro-texto

A história da física é uma grande ausente no ensino dessa ciência. Em geral, as disciplinas regulares dos cursos de física não contemplam a discussão de aspectos históricos dos conteúdos abordados. Em muitos cursos, também não há uma disciplina específica sobre a história da física na grade curricular. Por certo, essa realidade não desqualifica, per si, o conteúdo histórico. A primazia absoluta conferida aos produtos do conhecimento em detrimento de seus processos pode ser uma opção consciente, fundamentada, e como tal deve ser respeitada. O que, sem dúvida, merece crítica é a dicotomia existente entre ensino e história da física sob o véu da ignorância.

No primeiro capítulo, intitulado “Sobre a história e o ensino da física”, discute-se o potencial didático, cultural e epistemológico da história da física para o ensino. Contudo, apresentam-se também argumentos contrários a essa inserção. Com isso, objetiva-se não apenas oferecer subsídios para um posicionamento inicial do aluno sobre esse assunto, mas gerar expectativas para o seu envolvimento crítico e consciente com as matérias abordadas na disciplina Evolução dos Conceitos da Física.

Os capítulos 2, 3, 4, 5 e 6 do livro-texto relacionam-se, respectivamente, aos textos “Força e movimento: de Thales a Galileu” (PEDUZZI, 2008a), “Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana” (PEDUZZI, 2010a), “Do átomo grego ao átomo de Bohr” (PEDUZZI, 2008b), “A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica” (PEDUZZI, 2009) e “Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...” (PEDUZZI, 2010b), utilizados na disciplina Evolução dos Conceitos da Física (FSC 5602) do Curso de Física (modalidade presencial) da Universidade Federal de Santa Catarina. Dada a extensão desses materiais, eles estão disponibilizados em um DVD, integrados a uma ferramenta hipermídia elaborada para a disciplina.

Nesses termos, os capítulos de 2 a 6 contemplam uma descrição dos assuntos abordados, a divisão dos conteúdos e os objetivos da aprendizagem dos textos. Ao mesmo tempo que se enseja um panorama geral dos conteúdos, procura-se valorizar o pormenor das discussões propostas na hipermídia, viabilizando o estudo de uma história passível de reflexão e não meramente cronológica, de viés positivista.

O referencial epistemológico que orienta o desenvolvimento dos conteúdos é a filo-

sofia da ciência contemporânea. Conforme Massoni (2010), uma das principais características dessa epistemologia é a multiplicidade de escolas, ora similares e complementares, ora contraditórias e até excludentes. Explorando-se a objeção comum que autores como Gaston Bachelard (1996), Karl R. Popper (1982), Thomas S. Kuhn (2000), Imre Lakatos (1989), Paul Feyerabend (1977) e Norwood R. Hanson (1985) têm à concepção empírico-indutivista do conhecimento científico (mais precisamente, ao empirismo lógico), apresenta-se um posicionamento teórico contundente contra essa visão de ciência. Já no que se refere a outras questões sobre a natureza da ciência e do trabalho científico, busca-se oferecer ao estudante os subsídios necessários para uma reflexão crítica fundamentada e uma decisão pessoal. O último capítulo do livro-texto exercita mais explicitamente essa postura epistemológica.

Assim, o capítulo 7, “Sobre continuidades e discontinuidades no conhecimento científico: uma discussão centrada na perspectiva kuhniana”, trata da problemática das revoluções na ciência, apresentando a epistemologia de Thomas S. Kuhn e críticas a ela. Na última seção, analisa-se as respostas dadas por alunos da disciplina Evolução dos Conceitos da Física à pergunta: O conhecimento evolui ou é substituído?

Do ponto de vista educacional, o texto apoia-se no conceito de aprendizagem significativa da teoria de David P. Ausubel.

Aprendizagem significativa é um processo através do qual uma nova informação se relaciona de forma não arbitrária e substantiva (não literal) a aspectos relevantes da estrutura cognitiva de um indivíduo. (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980, p. 34; MOREIRA, 2006, p. 14)

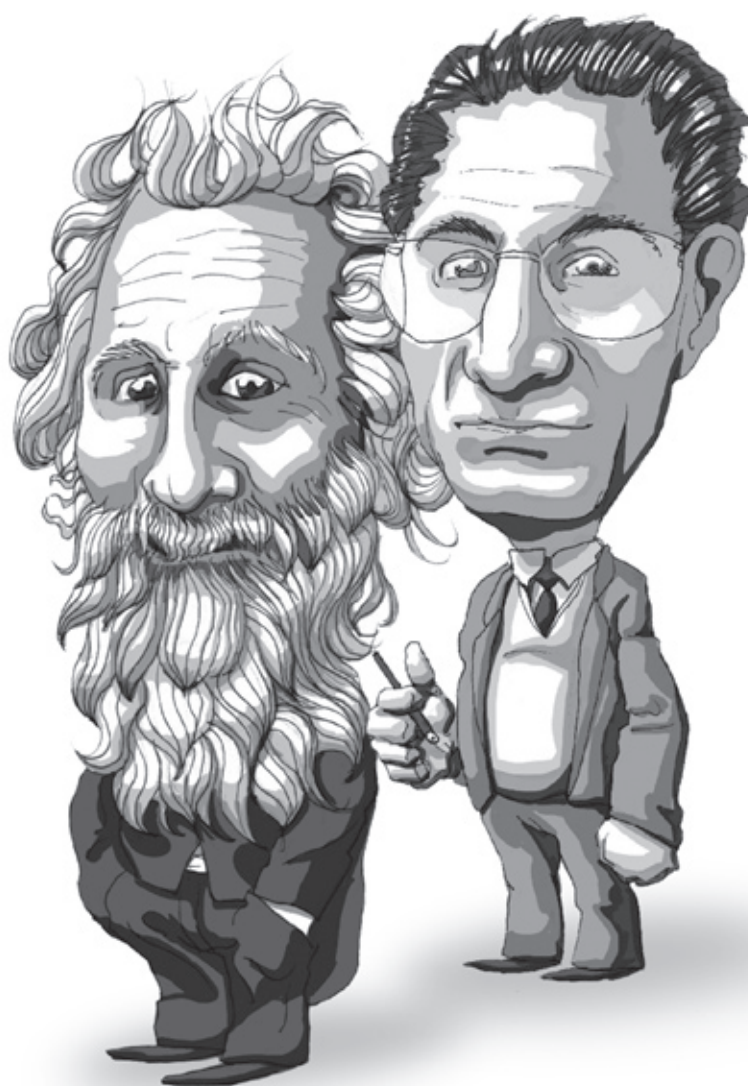
A **aprendizagem significativa** requer materiais potencialmente significativos, com significado lógico. Estando os textos voltados para uma disciplina de história da física situada ao final da grade curricular, espera-se que os conceitos físicos disponíveis na estrutura cognitiva do estudante que a cursa sirvam de **subsunçores** para o seu envolvimento não apenas com os produtos dessa ciência, mas também com os processos relativos à gênese das teorias.

Subsunçor é um conceito, uma ideia, uma proposição já existente na estrutura cognitiva de um indivíduo capaz de servir de ancoradouro e dar significado a uma nova informação.

Por certo, todo o material instrucional disponibilizado ao estudante, tanto em cursos de física na modalidade presencial quanto de ensino a distância, não prescinde das ações do professor e de tutores construtivistas em sintonia com os seus objetivos, que se empenham no sentido de auxiliar o estudante no esclarecimento de suas dificuldades. Afinal, é na raiz da relação triádica entre professor (tutor), aluno e material instrucional que o ensino se consuma, quando o significado do material que o aluno capta é o significado que o professor (tutor) pretende que esse material tenha para o aluno (GOWIN, 1981). De qualquer modo, é importante ressaltar que a aquisição de significados é uma experiência idiossincrática, que demanda esforço e dedicação.

Luiz O. Q. Peduzzi

1 Sobre a história e o ensino da física



1 Sobre a história e o ensino da física

1.1 História da ciência/física: para quê?

Em um simpósio sobre a história da bioquímica, realizado na Academia de Ciências de Nova York, em 1978, no qual estiveram presentes vários cientistas com contribuições relevantes em bioquímica, evidenciou-se um amplo descrédito de vários deles sobre a utilidade da história da ciência na sua prática científica, em uma sessão organizada pelo historiador Frederic L. Holmes. A razão explícita para isso foi a de que, nessa prática, os cientistas necessitam de uma apresentação lógica do seu tema, e não cronológica. Entretanto, reconheceram o valor da história para outros propósitos, como o de estabelecer uma imagem apropriada da disciplina para um público de não especialistas e para agências de financiamento; propiciar um importante registro de erros passados e de ideias equivocadas e colocar a ciência em uma perspectiva cultural. Para alguns, a história dos erros, particularmente, seria um bom entretenimento.

Referindo-se ao pouco apreço pela história da ciência, em geral, o historiador George Sarton (1884-1956) salienta que:

Alguns homens de ciência interessam-se mais ou menos pela História e estão prontos a reconhecer a sua importância, todavia desinteressam-se pela História da Ciência. A sua oposição é curiosa e merece a nossa atenção. A ciência, dizem-nos, pode abandonar seu próprio passado. Os artistas devem estudar a História da Arte, ou pelo menos tirarão grande proveito em estudá-la, porque a Arte do passado é ou pode ser tão nova e viva como a Arte de hoje: pelo contrário, a Ciência do passado é certamente inferior à nossa, e foi inteiramente substituída por esta. Os mais recentes tratados de ciência contêm tudo que existia de bom nos tratados precedentes; guardaram o melhor e rejeitaram o que era errôneo ou fútil. É a própria perfectibilidade da Ciência que torna inútil o estado do seu passado. (SARTON apud CHASSOT, 1996).

Do ponto de vista educacional, e tendo em vista a formação do futuro cientista, encorajar os estudantes de ciência a lerem os clássicos

históricos de suas respectivas áreas lhes propiciaria o contato com trabalhos nos quais “poderiam descobrir outras maneiras de olhar os problemas discutidos nos seus livros de texto”, assegura Thomas S. Kuhn, “mas onde também encontrariam problemas, conceitos e padrões de solução que as suas futuras profissões há muito descartaram e substituíram” (KUHN, 1989, p. 279). Assim, a exposição à história poderia abalar ou enfraquecer as convicções do estudante sobre o paradigma vigente, sendo, portanto, danosa à sua formação.

De acordo com a visão kuhniana do desenvolvimento científico, a estabilidade do cientista em um período de ciência normal contrasta com as suas incertezas e inseguranças durante as crises e revoluções. Desse modo, por que submeter novamente o estudante, futuro cientista, ao resgate de concepções “que os melhores e mais persistentes esforços da ciência tornaram possível descartar?” (KUHN, 2000, p. 176).

Justifica-se, portanto, segundo Kuhn, a eficácia operacional de estratégias pedagógicas que não fazem uso da história da ciência, ou, até mesmo, que propositadamente a distorcem para cumprir com celeridade, sem maiores delongas, o objetivo fundamental da educação científica, que é o de inculcar no estudante o paradigma vigente.

Entre outros argumentos contrários à presença da história no ensino da física e das demais ciências, pode-se ainda mencionar que:

- a) enfatizar conceitos e teorias do passado em uma história cuja finalidade é a glorificação do presente traz a ideia de um passado simples em contraposição a um presente complexo. Nesse caso, teorias já descartadas pela ciência aparecem geralmente em um contexto muito simplificado. “Caindo em desgraça pela ótica do novo, o velho parece pouco justificar seu título científico” (BIZZO, 1992);
- b) os contextos históricos em que se produziram e se desenvolveram conhecimentos já superados pela ciência atual são de difícil compreensão e de pouco interesse para o aluno, que já encontra problemas suficientes para compreender os paradigmas vigentes;
- c) a seleção e a utilização de materiais históricos com fins didáticos, desfigurados, cheios de omissões, têm tornado inevitável a presença de uma história da ciência de má qualidade no ensino de física. Se essa pseudo-história, ou história simplificada, for a única possível, então ela deve ser evitada;

- d) veicular o envolvimento de cientistas com ideias e concepções metafísicas, religiosas, astrológicas, etc. pode enfraquecer as convicções do estudante na objetividade da ciência;
- e) a história dos conceitos, dos instrumentos e das teorias científicas mostra o esforço do ser humano na busca do conhecimento, mas concomitantemente também desvela o mito da isenção do erro, da conduta sem deslizos, do caráter irrepreensível, da ética inquestionável. Não sendo desejável divulgar meias verdades, então é melhor calar-se;
- f) a física, como uma ciência objetiva, dispensa avaliações históricas subjetivas, que inevitavelmente dependem de concepções filosóficas de diferentes matizes para a sua análise;
- g) a história da ciência/física é complexa e, sob muitos aspectos, extrapola o campo de interesse do físico: por exemplo, quando o seu estudo recai fundamentalmente na compreensão da problemática da constituição e do desenvolvimento interno da ciência, geram-se as condições para a sua análise filosófica; quando o foco de suas preocupações e interesses é a ciência no âmbito mais geral de suas relações com o contexto social, econômico, filosófico e religioso, estabelecem-se os conhecimentos necessários para uma análise sociológica da ciência;
- h) o aluno (de qualquer nível de ensino) deve aprender a ciência/física, seus conceitos, princípios, teorias, métodos, e não investir esforços na aquisição de conhecimentos *sobre* a ciência/física.

1.2 Argumentos favoráveis ao uso da história da ciência/física na educação científica

Conforme Kuhn, “se a História fosse vista como um repositório para algo mais do que anedotas ou cronologias, poderia produzir uma transformação decisiva na imagem de ciência que atualmente nos domina.” (KUHN, 2000, p. 19).

A menção esporádica à história nos manuais científicos, em breves notas, na exaltação descontextualizada de heróis de uma época anterior, etc., introduz de imediato o estudante nos paradigmas aceitos pela ciência, mas torna invisíveis as revoluções científicas.

Através dessas referências, tanto os estudantes como os profissionais sentem-se participando de uma longa tradição histórica. Contudo, a tradição derivada dos manuais, da qual os cientistas sentem-se participantes, jamais existiu. Por razões ao mesmo tempo óbvias e muito funcionais, os manuais científicos (e muitas das antigas histórias da ciência) referem-se somente àquelas partes do trabalho de antigos cientistas que podem facilmente ser consideradas como contribuições ao enunciado e à solução dos problemas apresentados pelo paradigma dos manuais. Em parte por seleção e em parte por distorção, os cientistas de épocas anteriores são implicitamente representados como se tivessem trabalhado sobre o mesmo conjunto de problemas fixos e utilizado o mesmo conjunto de cânones estáveis que a revolução mais recente em teoria e metodologia científica fez parecer científicos... Não é de admirar que, ao ser reescrita, a ciência apareça, mais uma vez, como sendo basicamente cumulativa. (KUHN, 2000, p. 175-176).

Preâmbulos históricos incorporados acriticamente aos conteúdos de um ensino que se estrutura e se desenvolve a partir dos resultados da ciência e que priorizam o empírico em detrimento da razão empobrecem e desqualificam esse ensino. Efetivamente, “esses resumos da história da ciência adquirem apenas o caráter ilustrativo pois, como bem afirma Bachelard, transformam grandes questões científicas, com múltiplos problemas filosóficos, em mero conjunto de experiências de um empirismo simplista” (LOPES, 1993). Nas palavras do próprio Gaston Bachelard, “esta *simplicidade de ensino* oculta a fina estrutura epistemológica de uma experiência primitivamente empenhada em uma problemática multiforme. É aqui que uma recorrência à situação histórica complexa é útil para fazer sentir como se enriquece o pensamento materialista.” (BACHELARD, 1990, p. 93).

Para uma melhor compreensão, o conhecimento científico precisa ser devidamente contextualizado. “O conhecimento não parte do nada – de uma *tábula rasa* – como também não nasce da observação; seu progresso consiste, fundamentalmente, na modificação do conhecimento precedente” (POPPER, 1982, p. 56). O ato de conhecer se dá contra um conhecimento anterior (BACHELARD, 1990, p. 17).

Ao se analisar, por exemplo, a relevância de uma contribuição científica, deve-se deixar claro, entre outras coisas:

- a) o que levou o cientista a se envolver com o tema? Como bem ressalta Karl Popper, o ponto de partida é um problema. Sendo assim,

insatisfações de ordem conceitual, estética, filosófica, religiosa, etc. podem ser a sua causa. Naturalmente, isso demanda a explicitação dos conhecimentos vigentes e o seu questionamento;

- b) uma vez proposto, que dificuldades (conceituais, experimentais, filosóficas, socioculturais) o novo conhecimento teve de superar? A história da ciência mostra que os cientistas são resistentes a mudanças, especialmente quando entram em cena conceitos e instrumentos emblemáticos, revolucionários, que questionam convicções teóricas e experimentais bem sedimentadas.

O estudo da gênese de conceitos e teorias enseja ao estudante o envolvimento com uma ciência mais realista, dinâmica, criativa, em constante transformação. Uma ciência que explicita os seus problemas, as soluções propostas, o conflito de ideias e as incertezas que periódica e recorrentemente acompanham o curso de uma renovação conceitual, de uma troca paradigmática, é muito diferente daquela que se encontra nos manuais didáticos, que se deixa conhecer apenas pelos seus resultados.

Por outro lado, a concepção de que a história da ciência está sujeita a distorções, “pode conduzir a uma ideia falsa que precisa ser evitada: a de que não podem existir diferentes maneiras de se interpretar um mesmo episódio histórico ou de que a correção das distorções que vêm sendo encontradas dará lugar a relatos históricos ‘realmente verdadeiros’ e definitivos.” (BASTOS, 1998, p. 40).

Há evidências factuais disponíveis (por exemplo, livros, artigos e cartas escritas pelos cientistas), mas isso não significa consenso em sua interpretação. É a partir dos seus conhecimentos e de suas concepções epistemológicas que o historiador e o professor de física, que leva a história da sua ciência para a sala de aula, apreciam os dados de que dispõem. A análise e seleção de fontes fidedignas é o antídoto para o enfrentamento de um relativismo indesejável e inconsequente.

“Erro, não és um mal”, como diz Bachelard em *A formação do espírito científico* (1996, p. 298). Mas o erro de que ele fala é o erro positivo, o erro normal, o erro útil, parte integrante e inexorável do verdadeiro trabalho intelectual. Esses erros devem ser distinguidos daqueles que não são erros propriamente ditos, fruto de afirmações gratuitas, inconsequentes, sem nenhum esforço de pensamento.

Para Bachelard, o erro tem uma função constitutiva importante na ciência, porque as verdades são sempre provisórias:

Como seu objetivo não é validar as ciências já prontas, tal qual pretendem os partidários das correntes epistemológicas lógicas, o erro deixa de ser interpretado como um equívoco, uma anomalia a ser extirpada. Ou seja, com Bachelard, o erro passa a assumir uma função positiva na gênese do saber e a própria questão da verdade se modifica. Não podemos mais nos referir *à verdade*, instância que se alcança em definitivo, mas apenas *às verdades*, múltiplas, históricas, pertencentes à esfera da *veridicidade*, da capacidade de gerar credibilidade e confiança. (LOPES, 1996).

Sem dúvida, uma complementaridade entre as histórias (ditas) internalista e externalista da ciência enseja uma visão mais abrangente de questões e conteúdos que permeiam a atividade científica. Mas nos limites de um mesmo trabalho, em função de seus objetivos, isso nem sempre é possível. O texto “Evolução dos Conceitos da Física” lida com essa importante limitação detendo-se, essencialmente, no âmbito interno da ciência.

Certamente, há muitas (e boas) histórias da física, que diferem entre si tanto pela escolha e pelo grau de aprofundamento dos conteúdos abordados como pelos interesses, conhecimentos e concepções epistemológicas de seus autores.

Tal como Paul Feyerabend, considera-se que a história da ciência é sempre de conteúdo mais rico, variado, multiforme, vivo e sutil do que o melhor historiador e o mais atento metodologista possam imaginar (FEYERABEND, 1977, p. 19). Aceita-se também que essa história é dependente de quem a interpreta, que, longe de ser um observador *neutro*, tem as suas convicções teóricas sobre os assuntos abordados, o que amplia e diversifica ainda mais os caminhos. Mas também se admite que por entre o labirinto de opções e possibilidades emirjam sequências históricas com significado lógico, apropriadas ao nível de ensino a que se destinam, que geram condições para a ocorrência de uma aprendizagem significativa.

Criticando o aspecto limitador, e mesmo cerceador, da educação científica quando faz uso da história, Feyerabend (1977, p. 21) diz que “uma pequena lavagem cerebral muito fará no sentido de tornar a história da ciência mais insípida, mais simples, mais uniforme, mais ‘objetiva’ e mais facilmente acessível a tratamento por meio de regras imutáveis.” Mesmo discordando-se de aspectos importantes da filosofia feyerabendiana, considera-se relevante essa crítica de Feyerabend, e na estruturação dos conteúdos do texto “Evolução dos Conceitos da Física”, atentou-se para ela.

A crença na recepção passiva das impressões sensoriais, no culto dos fatos que se impõem per si, de fora, ao observador e são independentes de sua consciência, é própria de um positivismo que ainda permeia a educação científica e que precisa ser melhor discutido. Como bem ressalta o historiador E. R. Carr, os fatos da história nunca nos chegam “puros”, pois não podem existir nessa forma. Por isso, ele recomenda que a primeira preocupação de um leitor com um trabalho de história “não deveria ser com os fatos que ele contém, mas com o historiador que o escreveu.” (CARR, 1982, p. 23).

Enfim, a história e a filosofia da ciência/física *podem* promover a *alfabetização cultural* do indivíduo (BASTOS, 1998, p. 35), admitindo-se que há um valor intrínseco em se compreender (ao menos) certos episódios fundamentais que ocorreram na história do pensamento científico. É importante observar que, no caso do Ensino Médio, esse nível de estudos será terminal para muitos estudantes; outros tantos não terão mais contato com as ciências da natureza, na universidade. Física também é cultura, como enfatiza João Zanetic (1989).

1.3 Muitas hipóteses e o seu exercício, sob a tensão da crítica, em um texto sobre a história da física

A seguir, explicitam-se, esquematicamente, várias hipóteses sobre o potencial didático, epistemológico e cultural da história da ciência/física, com base na literatura especializada. As proposições contidas em a) e b) são exercitadas mais diretamente pelo texto “Evolução dos Conceitos da Física” na veiculação de seus conteúdos; já as constantes no item c), pela sua natureza, têm uma abordagem parcial. Não obstante, e sob a ótica da tríade professor-aluno-material instrucional, é nas ações do professor (construtivista) com esse material que se reforçam e se ampliam significados para um aluno que quer aprender.

a) A história e a filosofia da ciência/física *podem ser utilizadas* para lidar com concepções pouco exploradas, ou mesmo equivocadas, sobre a natureza da ciência e do trabalho científico, evidenciando, entre outras coisas, que:

- as observações não são neutras; os dados, per si, não geram teorias (crítica à concepção empírico-indutivista e atórica da ciência);

- as teorias científicas não são definitivas e irrevogáveis, mas sim objeto de constante revisão; o pensamento científico modifica-se com o tempo;
- uma teoria não deixa de ser científica porque foi descartada; no período de sua vigência ela constituiu um corpo de conhecimento coerente, com poder explicativo e preditivo, que explicitou uma maneira de ver e compreender o mundo físico, os fenômenos naturais;
- concepções filosóficas, religiosas, culturais, éticas influenciam o trabalho do cientista desde os tempos mais remotos; citando Koyré (1982, p. 80), “as concepções cosmológicas, mesmo as que consideramos científicas, só muito raramente – quase nunca, até – foram independentes de noções que não o são, ou seja, de noções filosóficas, mágicas e religiosas”;
- a abordagem lógica, ahistórica e linear/sequencial dos conteúdos, veiculada pelo livro didático, é uma simplificação (grosseira) que ressalta apenas os resultados da ciência (seu aspecto utilitarista, como bem enfatiza Paul Langevin);
- a ciência está longe de se constituir em um empreendimento fundado em regras rígidas, imutáveis; a história da física mostra vários exemplos da atividade contraindutiva, destacada por Feyerabend em *Contra o método*;
- a disputa de teorias pela hegemonia do conhecimento muitas vezes transcende os aspectos estritamente internos da ciência; podem ser bastante complexos e sutis os mecanismos de aceitação de um novo conhecimento;
- a ciência (o empreendimento científico) é uma construção coletiva; o esquecimento ou mesmo o anonimato de muitos de seus personagens é injustificável;
- certos conceitos encontram-se tão profundamente arraigados a convicções teóricas que muitos cientistas se recusam a abandoná-los, mesmo sob forte evidência empírica contrária a sua sustentação; as “experiências cruciais”, em particular, só se apresentam como tais à luz de um distanciamento histórico;

b) A história e a filosofia da ciência/física *podem ser usadas* para:

- explorar o debate de temas polêmicos, como a questão da cumulatividade ou não do conhecimento científico, a luta por prioridade na estruturação de conhecimentos, etc.;

- apresentar a ciência e sua história como parte integrante do patrimônio cultural da humanidade.

c) A história e a filosofia da ciência/física *podem ser utilizadas* para:

- lidar com dificuldades conceituais dos estudantes e, particularmente, com a problemática das concepções alternativas, à luz de um ensino construtivista. Do ponto de vista conceitual, é possível estabelecer-se paralelismos entre ideias historicamente superadas e a física intuitiva do aluno. Nesse caso, as reorganizações conceituais que se processam na história da física podem se constituir em um interessante instrumento didático para promover a *evolução conceitual* do aluno (auxiliando-o nas reformulações conceituais necessárias), quando ele entende a dinâmica dessas transformações. Isso não implica ou pressupõe nenhuma adesão estrita à vertente de investigação que procura relacionar a psicogênese (desenvolvimento cognitivo individual) à construção histórica do conhecimento científico (PIAGET; GARCIA, 1987). É importante observar que o aluno atual vive, pensa e constrói conhecimentos em um mundo muito diferente daquele vivenciado pelas pessoas e pelos cientistas de outras épocas. Desse modo, esses paralelismos devem ser abordados com os devidos cuidados;
- propiciar o aprendizado significativo de conceitos e de equações que o utilitarismo do ensino tradicional acaba transformando em meras relações matemáticas que servem à resolução de problemas;
- mostrar as limitações das bases epistemológicas de um ensino que identifica o método científico pelo esquema OHERIC (Observação, Hipótese, Experiência, Resultados, Interpretação e Conclusão);
- tornar as aulas de física mais desafiadoras e reflexivas, promovendo o desenvolvimento do pensamento crítico, da argumentação fundamentada;
- levar o aluno a se interessar mais pelo aprendizado da física;
- atenuar a compartimentalização do conhecimento científico em disciplinas, na estrutura curricular.

1.4 O que se espera do aluno ao final deste capítulo

Após a leitura das seções deste capítulo, o aluno deve desenvolver uma análise preliminar dos argumentos favoráveis e contrários à presença da história no ensino da física, com o devido detalhamento e registro, a fim de contrastá-la com uma outra, a ser realizada por ele mesmo, ao final da disciplina “Evolução dos Conceitos da Física”.

Esse procedimento metodológico não visa detectar “acertos e erros”, mas sim ao exercício da crítica (no caso, a autocrítica) para corroborar ou refutar hipóteses a partir do “dado empírico”. Afinal, na ciência, faz-se exatamente isso.

2 Força e movimento: de Thales a Galileu



2 Força e movimento: de Thales a Galileu

2.1 Sobre o texto “Força e movimento: de Thales a Galileu”

Uma característica marcante do ensino de física em qualquer nível de escolaridade, refletida de forma bastante clara nos materiais instrucionais, em geral, é o recurso ao enunciado “objetivo” de conceitos, leis e princípios que enfatiza o produto final da ciência, e não o processo de construção de seus conceitos e teorias. Conteúdos que se estruturam segundo critérios lógicos, ahistóricos e modernos, que priorizam ampla e exclusivamente o formalismo matemático e a resolução de problemas de lápis e papel, levam professores e estudantes, não apenas a uma visão irrealista e enfadonha da física, mas a uma imagem estereotipada, rígida e estéril do próprio conhecimento científico, na qual a associação cientista – método científico é sinônimo garantido de sucesso.

A história da ciência e a filosofia das ciências naturais, articuladas entre si e com os tópicos que compõem o currículo tradicional dos cursos de ciências e, em particular, o da física podem transformar essa situação, corrigindo a disseminação equivocada da ciência e estabelecendo uma nova orientação para uma ampla reformulação da concepção ultrapassada de ensino que lhe é subjacente.

Como evidencia uma extensa literatura em filosofia da ciência, não existe uma descrição única e universalmente aceita do “conjunto de regras” seguido pelo cientista, pois a natureza do conhecimento científico é complexa. O método científico, entendido como um processo investigativo, constituído por uma sequência linear de etapas que começa com a observação “neutra” e culmina com o estabelecimento de leis e teorias (passando pelas fases intermediárias de formulação de hipóteses, experimentação, medição, estabelecimento de relações e conclusões), é mera ficção. Mesmo assim, no ensino de ciências, em nível médio, notadamente, ele ainda é bastante enfatizado por professores e livros de texto (MOREIRA; OSTERMANN, 1993).

O cientista, ao contrário do que parecem sugerir muitos materiais didáticos, é um ser falível, dependente de sua intuição, criatividade,

capacidade de análise, de seu poder de síntese, etc., envolvido em um amplo processo coletivo de construção do conhecimento. A introdução de aspectos históricos do desenvolvimento científico nos manuais escolares e em sala de aula pode não apenas contribuir para proporcionar ao estudante uma visão mais realista e humana do desenvolvimento da ciência, como pode também auxiliar o professor a desenvolver estratégias que possibilitem uma melhor assimilação de ideias e conceitos por parte do aluno.

Em mecânica, por exemplo, de longe a parte da física mais explorada no ensino secundário, é notável a semelhança de certas ideias mantidas por estudantes de qualquer nível de escolaridade sobre o movimento dos corpos com algumas ideias presentes na física aristotélica e em teorias do *impetus*, como apontam, já há algum tempo, inúmeros estudos (McCLOSKEY, 1983; ZYLBERSZTAJN, 1983; SEBASTIA, 1984; SALTIEL; VIENNOT, 1985). Mas é pouca, quando não inteiramente inexistente, a ênfase atribuída por livros de texto do ensino médio brasileiro (e também universitário, entre aqueles mais consultados) a aspectos históricos da relação entre força e movimento (PEDUZZI, 1992).

A mudança de concepção do “tudo que se move é movido por alguma coisa” para “todo o corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja compelido a alterar um desses estados por uma força resultante a ele aplicada”, que se operou no espírito científico a partir do século XVII e abriu as portas para uma nova física, tem um longo e interessante desenvolvimento histórico. Do ponto de vista de um ensino atento à construção do conhecimento pelo aluno, o resgate de trechos significativos desse percurso pode ser de grande utilidade tanto para o professor (que tem uma opção adicional àquela de simplesmente enunciar as leis de Newton e, logo a seguir, exemplificá-las), como para o aluno (na superação de suas dificuldades de compreensão das leis básicas da dinâmica).

Sem uma ênfase na abordagem histórica da mecânica, por exemplo, passa despercebido o pensamento de Galileu Galilei (1564-1642), que é de uma riqueza extraordinária. Nele, encontram-se presentes três grandes períodos da história do pensamento científico (físico): a física aristotélica, a física do *impetus* e a física matemática, experimental, arquimediana (KOYRÉ, 1986). Mas,

[...] não é suficiente ler Galileu com os olhos do século XX ou interpretá-lo em termos modernos. Só podemos compreender o seu trabalho se soubermos algo acerca do sistema que pôs em

causa e devemos conhecer esse sistema, independentemente das afirmações que os seus adversários faziam sobre ele. Em todo caso, não basta descrever e expor descobertas. É necessário investigar mais profundamente os processos históricos e aprender algo acerca da interdependência dos acontecimentos, assim como esforçarmo-nos por compreender os homens que pensavam de uma maneira diferente da nossa. Não se podem fazer grandes progressos se pensarmos nos estudos mais antigos apenas como exemplo de uma ciência deficiente, ou se imaginarmos que só os progressos conseguidos pelos cientistas recentes são dignos da nossa atenção. (BUTTERFIELD, 1949, p. 11).

Teorias obsoletas, como ressalta o físico e historiador da ciência Thomas S. Kuhn (1922-1996) (2000, p. 21), não são acientíficas simplesmente porque foram descartadas. Crenças e concepções mantidas no passado e hoje superadas, quando examinadas dentro de um contexto que ressalta a sua consistência e coerência internas, propiciam não apenas uma melhor compreensão da evolução de ideias e conceitos, mas uma visão mais nítida e realista do desenvolvimento da própria física. A excessiva linearização do conhecimento, como em geral é promovida pelos livros de texto e em sala de aula, acaba dando à física uma imagem de ciência destituída de contradições, que a transforma em um encadeamento de ideias sempre bem-sucedidas, não passíveis de nenhum percalço em seu desenvolvimento.

A linearização é responsável por uma imagem de ciência como algo não humano, muito superior às possibilidades dos mortais. A linearização da história apresenta a ciência como um produto a ser venerado, admirado à distância, fazendo com que os estudantes adquiram um sentimento de inferioridade. Esse sentimento sugere a eles ser difícil demais a participação no desenvolvimento e difusão da ciência. A linearização da história promove o triunfo da ciência; nós somos os derrotados. Esse estado de coisas somente pode ser alterado se a história da física passar a fazer parte integrante e orgânica de seu ensino. (ROBILOTTA, 1985, p. iv-10).

O presente texto representa um esforço em operacionalizar as considerações aqui expostas.

Para o físico e historiador Alexandre Koyré (1892-1964), a origem da astronomia e da cosmologia científica está na Grécia e não na Babilônia, pois não se pode entender por ciência uma simples compilação de dados, mesmo que deles resultem previsões corretas:

Com efeito, se admitíssemos uma certa concepção ultrapositivista e ultrapragmática da ciência e do trabalho científico, certamente deveríamos dizer que foram os babilônios que começaram. Realmente, eles observaram os céus, fixaram as posições das estrelas e organizaram os respectivos catálogos, anotando, dia a dia, as posições dos planetas. Se isso é feito cuidadosamente durante séculos, chega-se, no fim das contas, a ter catálogos que revelarão a periodicidade dos movimentos planetários e oferecerão a possibilidade de prever, para cada dia do ano, a posição das estrelas e dos planetas que serão reencontrados cada vez que se olhar para o céu. O que é muito importante para os babilônios, pois, dessa previsão das posições de planetas depende, pelos caminhos da astrologia, uma previsão dos acontecimentos que se darão na Terra. Assim, se a previsão e a predição equivalem a ciência, nada é mais científico do que a astronomia babilônica. Mas se se vir no trabalho científico sobretudo um trabalho teórico e se acreditar – como é o meu caso – que não há ciência onde não há teoria, rejeitar-se-á a ciência babilônica e dir-se-á que a cosmologia científica dá seus primeiros passos na Grécia, pois foram os gregos que, pela primeira vez, conceberam e formularam a exigência intelectual do saber teórico: *preservar os fenômenos*, isto é, formular uma teoria explicativa do dado observável, algo que os babilônios jamais fizeram. (KOYRÉ, 1982, p. 81-82).

Por certo, não há ciência onde não há teoria, e nesse ponto pode-se concordar com Koyré. Mas a formulação de uma teoria a partir do dado observável, inadvertidamente, pode induzir a uma postura empirista na construção do conhecimento, e sobre isso não há acordo.

O texto “Força e movimento: de Thales a Galileu” começa com os gregos. No primeiro capítulo, “De Thales a Ptolomeu”, discute-se a constituição da matéria segundo alguns filósofos gregos e ideias no campo da astronomia que acabam colocando a Terra como corpo central no universo e elegendo o movimento circular uniforme como um movimento “perfeito”. Nessa trajetória chega-se ao universo aristotélico. Vendo de um lado a Terra, em constante mudança, e de outro o céu, que exceto pelo movimento dos astros não é objeto de qualquer alteração, Aristóteles (384-322 a.C.) atribui realidades físicas diferentes a esses dois “mundos”, com reflexos diretos na forma com que irá estruturar as suas concepções em mecânica. O sistema de Ptolomeu (~100-170 d.C.) salva admiravelmente bem os fenômenos e será aceito como o sistema do mundo até Copérnico, no século XV. Ele é compatível com a doutrina aristotélica de uma Terra imóvel e referencial

para todos os movimentos, mas dela diverge por não centrar na Terra todos os movimentos circulares. Isso suscita uma interessante contenda entre astronomia matemática e astronomia física.

Muitos séculos depois, em carta endereçada ao reverendo padre Paolo Foscarini (1565-1616), da ordem Carmelita, que nutria simpatia pelas ideias de Galileu, o cardeal Roberto Bellarmino (1542-1621) deixa claro que é apenas no âmbito das hipóteses de uma astronomia matemática que a Igreja pode tolerar o exercício da retirada da Terra do centro do universo:

Dizer que a suposição de que a Terra se move e o Sol permanece em repouso pode salvar melhor as aparências do que as teorias dos excêntricos e dos epiciclos não é violar o bom senso, nem se expor a riscos; essa maneira de falar deve bastar ao matemático. Mas pretender afirmar que o Sol realmente está no centro do mundo e apenas gira sobre si mesmo, sem se deslocar do oriente ao ocidente, e que a Terra está no terceiro céu e gira com grande velocidade em torno do Sol, é coisa muito perigosa, capaz não só de irritar todos os filósofos e teólogos escolásticos como também de prejudicar a Santa Fé ao tornar falsas as Sagradas Escrituras. (BELLARMINO apud GALILEU, 1994, p. 111).

Mas até se chegar a Galileu, há ainda um longo caminho...

“A física aristotélica”, estudada no capítulo 2, introduz os conceitos de lugar natural e de movimento natural, ambos diretamente associados à estrutura logicamente ordenada do universo aristotélico. Através da “lei de força” de Aristóteles, fica clara a proporcionalidade entre força aplicada e velocidade adquirida, bem como a impossibilidade de movimento no vazio. Na dinâmica aristotélica, o que move e o que se movimenta devem estar em permanente contato, não sendo possível, dessa forma, a manutenção de um movimento sem uma força constantemente aplicada ao móvel. Isso acaba acarretando problemas na forma como Aristóteles explica o movimento de um projétil após o seu arremesso, devido ao duplo caráter que ele atribui ao meio: o de sustentar o movimento e o de opor uma resistência a ele.

A ideia básica da dinâmica aristotélica, de que é necessário associar uma força a um objeto em movimento, continua presente nos trabalhos de Hiparco (130 a.C.) e Filoponos (século VI d.C.), mas de uma forma diferente. Para eles, o movimento de um projétil se dá por meio de uma força *transmitida* ao projétil pelo projetor (ao contrário

de Aristóteles, para o qual a força provinha do próprio meio). As primeiras seções do capítulo “A física da força impressa e do *impetus*” mostram como essa ideia se insere na perspectiva de um universo finito, que exige que qualquer movimento seja limitado em extensão. A noção de força impressa de Hiparco e Filoponos serviu de referencial para que, no século XIV, estudiosos da escola parisiense desenvolvessem a teoria do *impetus*, que originou uma série de novas críticas às considerações de Aristóteles sobre força e movimento. O *impetus*, é uma “qualidade”, “força”, “impressão”, “potência”, “virtude motriz”, que passa do movente ao móvel nos movimentos violentos e de que um corpo em movimento natural também fica impregnado. É através desse conceito, sugerido como explicação para a rotação da Terra ou da esfera das estrelas, que aparece, pela primeira vez, mesmo que de forma incipiente, a ideia de uma única física para explicar eventos terrestres e celestes.

Contudo, para que uma nova física possa encontrar terreno fértil para o seu desenvolvimento, faz-se necessário abalar toda uma estrutura rigidamente estabelecida ao longo dos séculos, em que se acham interligados componentes de ciência, filosofia e religião. No capítulo “As novas concepções do mundo”, procura-se mostrar como se deram os primeiros passos nessa direção, comentando o pensamento de Nicolau de Cusa sobre a relatividade dos movimentos e a sua ideia de um universo sem limites; discutindo o heliocentrismo de Nicolau Copérnico e os problemas de ordem física que os aristotélicos levantavam para a sua rejeição; apresentando a argumentação de Giordano Bruno em favor de um universo infinito que passa não pelo testemunho dos sentidos, mas sim pela força do intelecto, pelos olhos da razão; fazendo referência à prática de observação sistemática do céu desenvolvida por Tycho Brahe e o espírito de precisão que sempre norteou o seu trabalho, que acabaram propiciando dados a Kepler para romper com o mito do movimento circular na astronomia.

Quando surge o telescópio, sentimentos de repulsa, de um lado, e de adesão, de outro, dividem o julgamento dos espectadores em relação ao que veem através das lentes desse novo e revolucionário instrumento. É a imutabilidade do céu, e com ela toda uma concepção de mundo, que está em jogo quando se argumenta existirem estrelas nunca vistas, irregularidades na superfície lunar, satélites em Júpiter, “protuberâncias” em Saturno, manchas no Sol e fases em Vênus. O fato de dois observadores com concepções de mundo bem definidas e antagônicas, como aristotélicos e copernicanos, dirigirem o telescópio a Júpiter e admitirem coisas tão distintas, como a existência de satélites nesse

planeta ou meros borrões/defeitos em suas lentes, levanta a pertinente questão do papel da interpretação das observações na defesa e na construção de teorias científicas. O capítulo “Galileu e a teoria copernicana” termina com a defesa de Galileu à liberdade científica, à autonomia da ciência em relação à teologia, em resposta aos que pretendem se valer da Bíblia para resolver disputas filosóficas. Mantendo-se fiel aos “princípios realistas” da doutrina copernicana, Galileu é proibido pela Inquisição de sustentar ou defender as teses do heliocentrismo.

A ciência galileana é rica em interpretações. No artigo *Galileu: um cientista e várias versões*, Zylbersztajn (1988) aborda quatro delas: “o empirista”, “o herdeiro da física medieval”, “o platonista” e “o manipulador de ideias”. Sendo objeto de diferentes concepções epistemológicas, que Galileu, afinal, deve-se levar ao aluno em um texto sobre a história da mecânica?

Um Galileu que rompe com a tradição dos escolásticos aristotélicos, elaborando conhecimentos indutivamente a partir da experiência, da “observação neutra” do fenômeno, situa Galileu na tradição empirista, que dissocia o sujeito do seu objeto de conhecimento. Mas se as experiências de Pisa são um mito, como diz Koyré, que considera que a principal influência sobre o trabalho de Galileu na investigação da natureza vem de Platão, qual a função do experimento na física galileana?

O resgate de importantes estudos sobre a relação entre força e movimento na Idade Média favorece a contextualização do trabalho de Galileu. Com Buridan e Oresme, por exemplo, Galileu tem acesso à dinâmica do *impetus* e a explicações que levam esse conceito “terrestre” ao domínio supralunar, para horror dos aristotélicos. Inegavelmente, Galileu conhecia a demonstração geométrica do teorema da velocidade média, feita por Oresme e que se mostrou essencial na obtenção da lei que relaciona a distância com o quadrado do tempo, na queda livre. Essa “versão” de Galileu, como um “herdeiro da física medieval”, defendida pelo físico, filósofo e historiador Pierre Duhem (1861-1916), pode favorecer a imagem da cumulatividade do conhecimento na ciência. Não obstante, é a partir da análise da originalidade do trabalho de Galileu que ela poderá ou não ser corroborada.

A caracterização de Galileu como “o manipulador de ideias” tem sustentação teórica nos estudos de Paul Feyerabend (1924-1994). “Truques psicológicos e táticas persuasivas” são utilizados por Galileu para induzir a aceitação dos novos conhecimentos. Não por acaso, as duas principais obras de Galileu, *Diálogos sobre os dois principais sis-*

temas de mundo e Discursos e demonstrações matemáticas sobre duas novas ciências, têm como protagonistas Simplicio (o interlocutor aristotélico), Sagredo (homem ponderado, que investiga livremente a verdade dos conhecimentos que se apresentam) e Salviati (o porta-voz de Galileu), que Galileu manipula com habilidade e persuasão para que sejam aceitas as descobertas propiciadas pelo telescópio, a teoria copernicana e a sua física.

“A física de Galileu”, estudada no capítulo 6, apresenta as primeiras ideias desse sábio italiano sobre força e movimento e a influência de Arquimedes em seu trabalho. Em seguida, mostra-se como Galileu obtém a lei da queda dos corpos, introduzindo definitivamente uma física quantitativa, inteiramente diferente da física das qualidades de Aristóteles e de seus seguidores e da física do *impetus*, bastante confusa e vaga. Finalmente, discute-se o movimento de projéteis e a inércia galileana, chamando a atenção para o fato de que esta seria, no limite, uma inércia circular.

É interessante observar que, ao perceber que a chave para a compreensão da queda livre estava em não abordá-la do ponto de vista da dinâmica, Galileu opõe-se à praxe secular dos filósofos de iniciar qualquer discussão sobre o movimento dos corpos indagando sobre suas causas. Essa postura galileana expressa uma ruptura com o pensamento vigente, ressaltando a contra-indução na ciência, nos termos feyerabendianos: “dada uma regra qualquer, por ‘fundamental’ e ‘necessária’ que se afigure para a ciência, sempre haverá circunstâncias em que se torna conveniente não apenas ignorá-la como adotar a regra oposta” (FEYERABEND, 1977, p. 30). Efetivamente, a ciência está longe de se constituir em um empreendimento fundado em regras rígidas.

Com Kepler (capítulo 7), tem início o fim do divórcio entre a física e a astronomia, daí o interesse histórico-didático desta matéria. Universalizando o conceito de força, isto é, aplicando ao domínio celeste um conceito extraído da mecânica terrestre, e procurando entendê-lo tanto qualitativa quanto quantitativamente, Kepler inaugura o estudo da física do sistema solar. Ao fazer isso, ele vai contra a praxe secular de explicar assuntos de astronomia de acordo com os métodos da astronomia, que se situavam no campo da geometria e da aritmética, nada tendo a ver com causas e hipóteses físicas. Mas é, sem dúvida, por suas três leis que Kepler ganha notoriedade. É através de sua primeira lei que, definitivamente, começa a ruir o mito do movimento circular na astronomia.

2.2 Estrutura geral e divisão dos conteúdos

Para uma melhor clareza da estrutura organizacional do texto “Força e movimento: de Thales a Galileu”, apresenta-se a seguir o seu sumário:

Introdução

Introdução	1
Referências Bibliográficas	6

1. De Thales a Ptolomeu

1.1. Introdução	10
1.2 Os primórdios da ciência grega: a “natureza” da materia para jônicos e pitagóricos	11
1.3 Os sistemas cosmológicos de Filolau, Heráclides e Aristarco	15
1.4 Os movimentos irregulares dos planetas e o dogma do movimento circular uniforme	19
1.5 O universo aristotélico	22
1.6 O sistema de Ptolomeu	24
1.7 Astronomia matemática <i>versus</i> astronomia física	28
1.8 Referências Bibliográficas	31

2. A física aristotélica

2.1 Introdução	34
2.2 Aristóteles e os movimentos naturais	35
2.3 A “lei de força” de Aristóteles.....	38
2.4 A questão da “força” e da resistência no movimento natural de uma pedra	40
2.5 O movimento violento de um projétil.....	41
2.6 Implicações para o ensino e comentários finais	43
2.7 Referências Bibliográficas	45

3. A física da força impressa e do impetus

3.1 Introdução	48
3.2 Hiparco e a noção de força impressa.....	49
3.3 Filoponos.....	51
3.4 Do reaparecimento da força impressa no século XI ao <i>impetus</i> de Buridan.....	53
3.5 A teoria do <i>impetus</i> e a rotação dos corpos celestes	58
3.6 Novos questionamentos à dinâmica dos projéteis	60
3.7 Referências Bibliográficas	65

4. As novas concepções do mundo	
4.1 Introdução	68
4.2 O universo de Nicolau de Cusa	70
4.3 Peurbach e Regiomontano.....	72
4.4 O heliocentrismo de Nicolau Copérnico.....	73
4.5 Considerações finais sobre o heliocentrismo	82
4.6 Giordano Bruno e a infinitização do universo.....	84
4.7 Tycho Brahe e o espírito da precisão	87
4.8 Referências Bibliográficas	89
5. Galileu e a teoria copernicana	
5.1 Introdução	92
5.2 As descobertas de Galileu com o uso do telescópio	94
5.3 A força da razão e as observações impregnadas de teorias: o impacto do telescópio	101
5.4 Galileu e o copernicanismo: os primeiros conflitos com a Igreja.....	105
5.5 Ciência e fé.....	110
5.6 Os caminhos da condenação	114
5.7 Referências Bibliográficas	117
6. A física de Galileu	
6.1 Introdução	120
6.2 As primeiras ideias de Galileu sobre força e movimento	121
6.3 A influência de Arquimedes e a lendária experiência da Torre de Pisa	123
6.4 O movimento acelerado e a queda dos corpos	128
6.5 O movimento neutro e a lei da inércia de Galileu	135
6.6 A questão do movimento de um projétil em um navio em movimento.....	136
6.7 Galileu e o movimento de projéteis.....	139
6.8 Referências Bibliográficas	140
7. As leis de Kepler do movimento planetário	
7.1 Introdução	144
7.2 Os sólidos perfeitos e a estrutura do universo kepleriano	145
7.3 A lei das áreas e a lei das órbitas elípticas	148
7.4 A elipse: elementos e excentricidade	152
7.5 A excentricidade dos planetas do sistema solar	154
7.6 A lei dos períodos.....	155
7.7 A física celeste kepleriana	156
7.8 Epílogo: a aceitação científica das leis de Kepler	159
7.9 Referências Bibliográficas.....	160

2.3 Objetivos da aprendizagem

A seguir, especificam-se os objetivos referentes à aprendizagem de cada capítulo do texto “Força e movimento: de Thales a Galileu”.

Capítulo 1

- Discutir a relevância dos gregos antigos (jônicos e pitagóricos, entre eles) na estruturação da ciência ocidental.
- Caracterizar os movimentos irregulares dos planetas e o dogma do movimento circular.
- Discutir a dicotomia existente entre os mundos sub e supralunares da cosmologia aristotélica.
- Descrever o sistema de Ptolomeu e os mecanismos do epiciclo-deferente, excêntrico e equante.
- Distinguir os objetivos da astronomia matemática e da astronomia física.

Capítulo 2

- Caracterizar os conceitos de lugar natural, movimento natural e movimento forçado da filosofia natural aristotélica.
- Enunciar e discutir a “lei de força” de Aristóteles.
- Explicar a *antiperistasis* aristotélica.
- Assinalar as potencialidades e os limites de uma comparação didática entre a dinâmica aristotélica e o senso comum, que vincula compulsoriamente o movimento de um corpo a uma força a ele aplicada.

Capítulo 3

- Aplicar a noção de força impressa de Hiparco ao movimento vertical de um projétil.
- Discutir a rejeição de Filoponos à “lei de força” e à *antiperistasis* aristotélica.
- Analisar o conceito de *impetus*, de Buridan.
- Explicar a “saída” de uma pedra em movimento circular a partir dos diferentes conceitos que Benedetti e Buridan têm do *impetus*.
- Examinar a queda de um objeto em direção ao centro do mundo, nas perspectivas de Aristóteles e de Tartaglia.

- Appreciar criticamente as considerações de Tartaglia de que a trajetória bidimensional de um projétil é sempre curva, sob o pressuposto de que “há sempre um pouco de gravidade afastando o projétil da sua linha de movimento”.
- Avaliar o significado da associação do *impetus* ao movimento celeste.

Capítulo 4

- Discorrer sobre o universo de Nicolau de Cusa.
- Analisar o contexto histórico em que emerge o sistema copernicano, as possíveis motivações de Copérnico para o estabelecimento desse sistema e a sua relutância na publicação do *De revolutionibus*.
- Debater o prefácio de Osiander ao livro de Copérnico.
- Explicar, qualitativamente, o movimento retrógrado de um planeta no sistema copernicano.
- Criticar a apresentação (em livros didáticos, obras de divulgação, etc.) dos sistemas de Ptolomeu e de Copérnico a partir de planetas que descrevem órbitas circulares em torno da Terra e do Sol, respectivamente.
- Avaliar os argumentos de ordem física, astronômica e religiosa contrários à mobilidade da Terra.
- Ponderar os argumentos de Giordano Bruno em favor de um universo infinito, que passam por considerações que envolvem a limitação dos sentidos no ser humano, a uniformidade do espaço e a grandiosidade do Criador.
- Destacar a principal contribuição de Tycho Brahe à ciência.
- Explicitar que eventos astronômicos, observados por Brahe e outros astrônomos, evidenciavam mudanças no céu imutável dos aristotélicos, e as razões para se acreditar nisso.

Capítulo 5

- Descrever as descobertas de Galileu com o telescópio.
- Argumentar contra as evidências propiciadas pelo telescópio.
- Refutar as objeções ao telescópio.
- Avaliar a afirmação de que as observações e o relato experimental estão impregnados de teoria à luz das diferentes concepções de Galileu e de Scheiner sobre as manchas solares.

- Explicar por que, para Galileu, o milagre de Josué não contradiz o heliocentrismo.
- Discutir o conflito entre ciência e religião, no contexto galileano.

Capítulo 6

- Explicitar as primeiras ideias de Galileu sobre a relação força e movimento e a influência de Arquimedes sobre o seu trabalho científico.
- Descrever as principais dificuldades e soluções encontradas por Galileu nos estudos que o levaram à relação $d \propto t^2$.
- Enunciar o princípio da inércia, nos termos de Galileu.
- Avaliar a pertinência histórica do seguinte relato sobre “a experiência de Pisa”, em um livro de 1931 (NAMER apud KOYRÉ, 1982, p. 199-200):

Quando Galileu soube que todos os outros professores exprimiam dúvidas quanto às conclusões do insolente inovador, aceitou o desafio. Solenemente, convidou aqueles graves doutores e todo o corpo de estudantes, em outras palavras, toda a Universidade, para assistir a uma de suas experiências. Mas não no seu lugar habitual. Não, este não era bastante grande para ele. Lá fora, a céu aberto, na vasta praça da catedral. E a cátedra acadêmica claramente indicada para aquelas experiências era o Campanário, a famosa torre inclinada.

Os professores de Pisa, como os de outras cidades, tinham sempre sustentado, de acordo com os ensinamentos de Aristóteles, que a velocidade da queda de um objeto era proporcional ao seu peso. Por exemplo, uma bola de ferro pesando cem libras, e outra pesando apenas uma libra, soltas no mesmo momento, da mesma altura, evidentemente devem tocar a Terra em instantes diferentes e, obviamente, a que pesa cem libras atingirá a Terra primeiro, pois é justamente mais pesada do que a outra.

Galileu, pelo contrário, pretendia que o peso não vinha ao caso e que ambas atingiriam a Terra no mesmo momento. Ouvir semelhantes asserções, feitas no coração de uma cidade tão velha e sábia, era intolerável. E considerou-se necessário e urgente fazer uma afronta pública àquele jovem professor que se tinha, a si próprio, em tão alta conta, e dar-lhe uma lição de modéstia da qual se lembrasse até o fim de sua vida.

Doutores em trajes de veludo e magistrados, que pareciam acreditar estar indo a uma espécie de feira de aldeia, deixaram de lado suas diversas ocupações e se misturaram com os representantes da Faculdade, prontos a zombar do espetáculo, qualquer que fosse o seu desfecho.

Talvez o ponto mais estranho de toda essa história seja o fato de que não tenha vindo ao espírito de ninguém fazer a experiência por si próprio antes de chegar à arena. Ousar pôr em dúvida algo que Aristóteles afirmara nada mais era que uma *heresia* aos olhos dos estudantes daquele tempo. Era um insulto a seus mestres e a eles próprios, uma desgraça que os poderia excluir dos círculos da *elite*. É indispensável ter essa atitude constantemente presente no espírito para apreciar plenamente o gênio de Galileu, sua liberdade de pensamento e sua coragem, e também para avaliar, em sua justa medida, o sono profundo do qual a consciência humana iria ser despertada. Que esforços, que lutas eram necessárias para fazer nascer uma ciência exata!

Galileu subiu os degraus da torre inclinada, calmo e tranquilo, a despeito dos risos e gritos da multidão. Compreendia bem a importância da hora. No alto da torre, formulou mais uma vez a questão com toda a exatidão. Se os corpos, ao cair, chegassem ao solo ao mesmo tempo, ele seria o vitorioso; mas, se chegassem em momentos diferentes, seriam seus adversários que teriam razão.

Todos aceitaram os termos do debate. Gritavam: “Faça a prova!”

Chegara o momento. Galileu largou as duas bolas de ferro. Todos os olhares se dirigiam para o alto.

Silêncio! E o que se viu: as duas bolas partirem juntas, caírem juntas e juntas tocarem a Terra ao pé da torre.

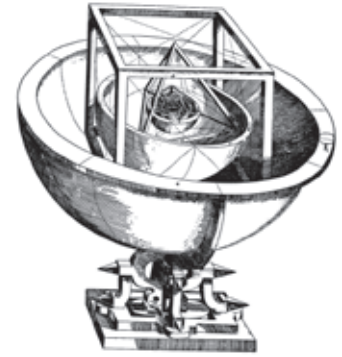
- Contrastar as explicações dadas por um aristotélico, por um teórico do *impetus* e por um galileano sobre a trajetória de uma pedra solta por um marujo da torre de observação de um navio em movimento com velocidade constante.
- Analisar epistemologicamente a seguinte afirmativa:

Não foram tanto as observações e experimentos de Galileu que causaram a ruptura com a tradição, mas sua *atitude* em relação a eles. Para ele, os dados eram tratados como dados, e não re-

lacionados a alguma ideia preconcebida... Os dados da observação poderiam ou não se adequar a um esquema conhecido do universo, mas a coisa mais importante, na opinião de Galileu, era aceitar os dados e construir a teoria para adequar-se a eles. (ANTHONY apud CHALMERS, 1999, p. 24).

Capítulo 7

- Avaliar criticamente em que bases Kepler primeiro propõe e depois rejeita um modelo para o universo no qual ele inscreve e circunscreve os cinco sólidos regulares em esferas, intercalando-os em uma sequência, com as dimensões apropriadas, visando ao acordo entre as distâncias médias dos planetas ao Sol e os raios dessas esferas.
- Analisar a afirmação de que o tratamento que Kepler dispensa ao dados está impregnado de teoria.
- Enunciar e discutir as leis de Kepler.
- Quando aborda a causa do movimento planetário, examinando que tipo de força proveniente do Sol vincula os planetas a órbitas elípticas, Kepler subverte a praxe do astrônomo, rompendo com o divórcio entre a física e astronomia. Appreciar criticamente em que medida isso exemplifica um procedimento contra-indutivo, nos termos feyerabendianos.
- Discutir o contexto de aceitação da leis de Kepler.



O esqueleto invisível do universo, proposto por Kepler em 1596.

3 Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana



3 Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana

3.1 Sobre o texto “Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana”

Desde os tempos antigos, o movimento dos corpos e suas causas foram objeto de especulações científicas e filosóficas. A queda dos corpos, o movimento de projéteis e o movimento no vazio e suas consequências inerciais foram temas para os quais convergiram as discussões de muitos filósofos e estudiosos, desde Aristóteles até Galileu.

Para os aristotélicos, os movimentos naturais, como o da queda dos corpos, tinham por finalidade assegurar a ordem em um universo hierarquicamente organizado, onde cada elemento possuía o seu lugar natural. A imobilidade da Terra, situada em uma posição central no universo, podia ser constatada por evidências corriqueiras do dia a dia, propiciadas, por exemplo, pelos pássaros que não ficam “para trás” quando voam das árvores para o solo em busca de alimento e pelo retorno ao ponto de lançamento de um objeto projetado verticalmente para cima. As dificuldades da física aristotélica com o conceito de *antiperistasis* para explicar a causa física do movimento não natural de um projétil levou Hiparco a introduzir o conceito de força impressa e Buridan à teoria do *impetus*.

Tanto a física aristotélica (no caso de movimentos violentos) como a física da força impressa e a física do *impetus* mantinham a crença comum de que a permanência de um objeto em movimento só era possível se sobre ele agisse continuamente uma “força”/*impetus*. Desse modo, os incrementos ou as diminuições na velocidade de um objeto representavam, inequivocamente, variações na intensidade da “força”/*impetus* que o deslocava.

Enquanto entre os aristotélicos a presença de um meio era indispensável para que se processasse qualquer movimento, para alguns partidários da teoria do *impetus*, como Oresme, isso não era necessário, primeiro pela forma com que um corpo era capaz de ceder um *impetus* a outro e segundo porque, para um *impetus* autoextinguível, nenhum movimento poderia resultar infinito, ainda que se efetuasse no vácuo.

O universo, para Galileu, mesmo sem as hierarquias aristotélicas e sendo muito mais amplo do que o imaginado por Copérnico, é finito. Por isso ele só admitia um movimento perpétuo em trajetórias circulares. Ao chegar à conclusão de que, em um movimento com aceleração constante, a velocidade de um corpo varia uniformemente com o tempo e que o movimento de um objeto sob a ação da gravidade (se desprezada a resistência do ar) é o seu mais notável exemplo, Galileu desconsidera a(s) causa(s) do movimento. Assim, ele não sabe por que a queda dos corpos, sem resistência, independe de suas massas. A explicação do porquê de os corpos caírem, tal como hoje é aceita pela ciência, vai exigir uma conceituação clara e precisa do conceito de força – e isso se deve a Isaac Newton (1642-1727).

Com a publicação dos *Philosophiae naturalis principia mathematica* (*Princípios matemáticos de filosofia natural*) (NEWTON, 1987a; NEWTON, 1987b), em 1687, Newton protagoniza um dos mais importantes capítulos na história da física ao promover a grande transformação intelectual que deu origem à ciência moderna.

Os *Principia* emerge em uma ciência agitada por uma nova postura filosófica. As hierarquias e qualidades finalísticas e ocultas da filosofia natural aristotélica não fazem mais sentido à discussão. É nas leis da matéria em movimento e do choque mecânico entre partículas que se supõe residir a chave para a compreensão de todos os fenômenos – físicos (como a queda dos corpos, a reflexão, a refração), biológicos (como a circulação sanguínea), fisiológicos (como as sensações), astronômicos (como o movimento dos astros), químicos. O artífice dessa filosofia mecanicista é o filósofo e matemático francês René Descartes (1596-1650). É contra uma visão de mundo e de ciência, explicitada nos *Princípios da filosofia* (DESCARTES, 2007), de Descartes, publicado em 1644, que os *Principia* newtoniano vai travar uma luta de várias décadas, até a sua ampla aceitação.

Conforme Descartes, o conhecimento se estrutura a partir da razão e não dos sentidos. Assim, ele discorda tanto dos aristotélicos quanto da filosofia empirista de seu contemporâneo Francis Bacon (1561-1626) expressa no *Novum organum* (1620) (BACON, 1979) que considera que o conhecimento deriva, direta ou indiretamente, da experiência sensível, do observado, a partir de um processo indutivo. Segundo Bacon, observações detalhadas e rigorosas são o antídoto ao especulativismo fatalmente vazio. Porém, mesmo defendendo filosofias antagônicas sobre a forma de edificar conhecimentos, Bacon e Descartes se opõem à filosofia aristotélica.

Para Descartes, não é partir da percepção dos sentidos que se edificam conhecimentos, pois os sentidos são fontes de erro. O conhecimento tem sua origem na intuição intelectual de ideias claras e distintas.

O pensamento, para Descartes, deve ser progressivo e não regressivo. Vai das ideias às coisas e não das coisas às ideias; vai do simples ao complexo; avança, ao concretizar-se, da unidade dos princípios para a multiplicidade das diversificações; caminha da teoria para a aplicação, da metafísica para a física, da física para a técnica, para a medicina, para a moral. Não parte, como o de Aristóteles e o da escolástica, de um diverso e de um Universo dados, para *remontar* daí à unidade dos princípios e das causas que é o seu fundamento. Para o pensamento cartesiano, o dado é justamente o objeto simples da intuição intelectual, não os objetos complexos da sensação. (KOYRÉ, 1963, p. 77).

Descartes destrói inteiramente o cosmo helênico, o cosmo de Aristóteles e da Idade Média, já abalado por Copérnico, Galileu e Kepler. Mas o que ele coloca em seu lugar?

A bem dizer, quase nada: extensão e movimento; ou matéria e movimento. Extensão sem limites e sem fim. Ou matéria sem fim nem limites: para Descartes, é estritamente a mesma coisa. E movimento sem tom nem som, movimentos sem finalidade nem fim. Deixa de haver lugares próprios para as coisas: todos os lugares, com efeito, se equivalem perfeitamente; todas as coisas, de resto, se equivalem igualmente. São todas apenas matéria e movimento. E a Terra já não está no centro do mundo. Não há centro. Não há 'mundo'. O Universo não está ordenado para o homem: não está sequer 'ordenado'. Não existe à escala humana, *existe à escala do espírito*. É o mundo verdadeiro, não o que os nossos sentidos infieis e enganadores nos mostram: é aquele que a razão pura e clara que não se pode enganar reencontra em si mesma. O nascimento da ciência cartesiana é sem dúvida uma vitória decisiva do espírito. É, todavia, uma vitória trágica: neste mundo infinito da ciência nova já não há lugar nem para o homem nem para Deus. (KOYRÉ, 1963, p. 67-68).

De fato, na ciência cartesiana, os atributos essenciais da matéria são a extensão e o movimento, nada mais. Com a "doutrina da verdade evidente", a clareza de um método (o da intuição, seguido de dedução, matemática) e uma filosofia mecanicista, Descartes erige conhecimentos; que o olhar atento e crítico do espírito avalia e aceita, rejeita, ou transforma. Não é assim que a ciência evolui?

Para Descartes, a Terra e os céus são feitos de uma mesma matéria primordial e estão sujeitos às mesmas leis físicas. A dicotomia dos mundo sub e supralunares é coisa do passado. No cosmo cartesiano, cada estrela é centro de um turbilhão de matéria que movimenta os planetas.

Neste grande turbilhão que forma o céu cujo centro é o Sol, há ainda outros menores que podem ser comparados com os que às vezes se vê nos redemoinhos dos rios, que conjuntamente acompanham o movimento do maior que os contém... Um desses turbilhões tem Júpiter como centro, movendo com ele os outros quatro planetas que descrevem a sua órbita à volta deste astro. (DESCARTES, 2007, p. 106).

O mundo material não é infinito, mas nem por isso se deve pensar em encerrá-lo dentro de limites definidos. Ele é indeterminado, ou indefinido (o que certamente traz à lembrança Nicolau de Cusa) e isso, segundo Descartes, deve encerrar a discussão.

Nos conhecimentos estruturados por Descartes, em que as hipóteses se restringem “à forma e à dimensão das partículas materiais responsáveis pelo fenômeno observado”, emerge um universo, no qual “não há lugar para atrações, para simpatias ou para almas” (GUICCIARDINI, 2005, p.17). Trata-se de um mundo mecânico, obra de um Deus Todo Poderoso cuja influência não mais se faz sentir depois da Criação. É contra Descartes, esse ilustre desconhecido no ensino da física, que Newton vai medir forças para a consolidação dos *Principia*. Um Newton que, para muitos, é o maior entre os maiores de todos os tempos, e que, exceto pelos *resultados* de sua física, também é muito pouco conhecido.

O capítulo 1 introduz Descartes, destacando algumas de suas obras e a trajetória que o levou a bem conduzir a razão e procurar a verdade nas ciências, segundo o próprio Descartes.

O capítulo 2 apresenta uma ideia geral da obra de Newton, mostrando de um lado a diversidade de seus interesses e de outro como o conceito de racionalidade, na ciência, não é de fácil definição ou consenso.

Do ponto de vista dos cânones da ciência, o que parece relevante é o produto concreto do trabalho científico do símbolo da racionalidade do Iluminismo, o grande arquiteto da Idade da Razão: uma nova matemática, uma nova mecânica, uma nova óptica, uma nova forma de olhar o céu, com o telescópio refletor. As suas elocubrações, os

seus sonhos, sua motivação, suas neuroses, seus interesses pessoais, que se situam no contexto da descoberta, não fazem parte do relato científico. Efetivamente, em uma ciência que valoriza o contexto da justificativa, não importam os caminhos extracientíficos trilhados por Newton. Pode ser curioso, ou mesmo surpreendente, para o físico que Newton tenha procurado “perscrutar a mente de Deus e Seu plano para o mundo e a humanidade, tal como o exposto nas profecias bíblicas” (WESTFALL, 1995, p. 40), ou se envolvido profundamente em estudos alquímicos. É apenas para o historiador e o filósofo da ciência que essas matérias, em princípio, são relevantes. Por quê?

A física e a cosmologia cartesiana são discutidas no capítulo 3. Em consonância com a sua filosofia, explicita-se como Descartes estabelece o princípio da inércia e chega à primeira explicação mecânica para a gravidade a partir do delineamento de uma teoria especulativa sobre a formação progressiva dos astros. É também a partir de movimentos e de tendências de movimentos da matéria que compõe os céus dos corpos celestes que Descartes explica o que é a luz, examinando as suas principais propriedades.

Mas, no âmbito da mecânica, é a lei da conservação da quantidade de movimento, enunciada por Descartes a partir do seu entendimento sobre como se deve investigar a ciência, e não o princípio da inércia, que atrai o interesse dos cientistas do século XVII. O que, afinal, se conserva em uma colisão é a tônica dos assuntos explorados no capítulo 4. Os estudos de alguns cientistas, nessa direção, terminam por estabelecer noções precursoras do moderno princípio da transformação e conservação da energia. A falta ainda de uma noção clara do conceito de força é, em última instância, o que precipita essas ideias.

Para o filósofo e matemático alemão Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), por exemplo, um objeto em movimento possuía uma “força” dependente de sua massa e do quadrado de sua velocidade – um conceito bastante próximo daquele que, mais tarde, viria a ser conhecido como a energia cinética de um corpo.

Conferindo validade ao princípio da inércia, não teoricamente como em Descartes, mas em conformidade com uma física que admite a existência do vazio, Newton pondera que “devia haver uma rigorosa correlação entre uma causa externa e a mudança que ela produz. Ali estava uma nova abordagem da força, na qual os corpos eram tratados como objetos passivos de forças externas incidentes sobre eles, e não como um veículo ativo de força incidindo sobre outros.” (WESTFALL, 1995, p. 47).

Ao demonstrar experimentalmente em que condições ocorre a conservação da quantidade de movimento em uma colisão, Newton identifica uma força à taxa da variação temporal da quantidade de movimento de um corpo (segunda lei) e conclui que as forças envolvidas em um choque mecânico possuem a mesma intensidade, a mesma direção e sentidos opostos (terceira lei).

O capítulo 5 discute a gravitação universal newtoniana, enunciada no Livro 1 dos *Principia* e aplicada ao movimento celeste no Livro 3. O universo, definitivamente, é regido por leis físicas que desconhecem fronteiras. Com a formulação das leis do movimento dos corpos e a sua generalização a todos os constituintes do universo, a ciência é levada a um novo patamar de desenvolvimento. O longo processo de construção e transformação de ideias que culmina com a síntese newtoniana, ao mesmo tempo que ressalta o caráter eminentemente coletivo do empreendimento científico, mostra que ele não abdica do impulso das contribuições de exceção, do *insight* de um gênio.

Porém, conceitos e teorias revolucionárias na ciência não se estabelecem sem resistências, e quando se contextualiza historicamente um novo e emblemático conhecimento, vê-se isso com clareza. Os *Principia* mostra-se um texto complexo, estruturado sob uma nova matemática e que abriga conceitos de difícil assimilação, como o espaço absoluto e a ação a distância. Como diz Voltaire (François-Marie Arouet, 1694-1778), por muito tempo e para muitas pessoas, a filosofia de Newton pareceu quase tão ininteligível quanto a dos antigos.

Mas a obscuridade dos gregos vinha do fato de que eles, realmente, não possuíam luzes, e as trevas de Newton vêm do fato de que sua luz estava muito longe de nossos olhos. Ele encontrou verdades, mas descobriu-as e colocou-as num abismo. É preciso descer nesse abismo e trazer essas verdades para a luz do dia. (VOLTAIRE, 1996, p. 16).

Certamente, pode-se discordar de Voltaire quanto à falta de luz dos gregos, mas não no que se refere a Newton.

O capítulo 6 trata das dificuldades de aceitação dos *Principia*, tanto na própria Inglaterra quanto na França, em particular, e dos esforços que foram desenvolvidos para superar a sua rejeição. Detém-se, particularmente, no problema da (suposta) interação instantânea a distância entre dois corpos e no empenho de Pierre Louis-Moreau de Maupertuis (1698-1759) em levar a física de Newton para a França.

3.2 Estrutura geral e divisão dos conteúdos

Para uma melhor percepção da estrutura organizacional do texto “Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana”, explicita-se, a seguir, o seu sumário:

Introdução

Introdução.....	1
Referências Bibliográficas	6

1. Sobre René Descartes

1.1 Para bem conduzir a razão e procurar a verdade nas ciências.....	8
1.2 Referências Bibliográficas	15

2. Sobre Isaac Newton

2.1 As revoluções de Newton.....	18
2.2. O último dos magos e o primeiro dos cientistas.....	20
2.3 Referências Bibliográficas	25

3. A física e a cosmologia cartesiana

3.1. Introdução	28
3.2 A <i>verdade evidente</i> em Descartes	28
3.3 O princípio da inércia	31
3.4 Prelúdio a um novo mundo	35
3.5 O nascimento de um novo mundo	37
3.6 Sobre o movimento de cometas e planetas.....	43
3.7 Céus em torno de planetas: os satélites e a explicação mecânica da gravidade.....	45
3.8 Sobre a luz.....	49
3.9 Referências Bibliográficas	53

4. A dinâmica das colisões e o surgimento de uma nova física

4.1 Introdução	56
4.2 Choque perfeitamente inelástico	56
4.3 Choque elástico	58
4.4 A medida de uma “força”	62
4.5 A conservação da “força viva”	64
4.6 A conservação da quantidade de movimento em uma colisão: os estudos newtonianos.....	67
4.7 A concepção clássica de força	71
4.8 A relação $\vec{F} = d\vec{p} / dt$	72
4.9 Referências Bibliográficas	74

5. A gravitação newtoniana

5.1. À guisa de introdução	76
5.2 A correspondência de Newton com Hooke.....	76
5.3 Sobre o significado dinâmico da segunda lei de Kepler e a lei da força centrípeta para o movimento em uma cônica	79
5.4 Regras para filosofar.....	83
5.5 Fenômenos.....	84
5.6 A lei da força centrípeta para órbitas circulares	85
5.7 A lei da gravitação para órbitas circulares (centro de força fixo)	87
5.8 Aceleração da gravidade para pontos na superfície da Terra e externos a ela	89
5.9 O sistema Terra-Lua	91
5.10 A queda da maçã e o seu significado no contexto da gravitação universal.....	93
5.11 A breve correspondência com Flamsteed e o encontro com Halley.....	98
5.12 A dinâmica newtoniana como generalização das leis de Kepler – crítica à posição empírico-indutivista.....	100
5.13 Referências Bibliográficas.....	105

6. Das resistências à gravitação ao contexto de sua aceitação

6.1. À guisa de introdução	108
6.2 Ação a distância, princípios ativos na matéria e outras dificuldades.....	110
6.3 Sobre o método, em Newton	116
6.4 Qual é a forma da Terra, afinal?	121
6.5 Referências Bibliográficas.....	128

3.3 Objetivos da aprendizagem

A seguir, especificam-se os objetivos concernentes à aprendizagem de cada capítulo do texto “Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana”.

Capítulo 1

- Avaliar a pertinência dos receios de Descartes quanto à publicação do livro *O mundo ou Tratado da Luz*.
- Ao final da sua formação acadêmica, Descartes diz-se desiludido com a não aquisição de um conhecimento claro e seguro do que considerava ser útil à vida e ao espírito. Discutir as razões dessa insatisfação e o rumo que Descartes dá a sua vida e ao seu trabalho.
- Enunciar os quatro preceitos ou regras que, segundo Descartes, devem ser obedecidos com rigor na procura da verdade.

Capítulo 2

- Apresentar a relevância de Newton para a ciência, destacando os seus principais trabalhos.
- Analisar a pertinência ou não de se abordar, em termos educacionais, o envolvimento de Newton com outras matérias do conhecimento, que não as de cunho estritamente científico.
- Avaliar que concepção de ciência permeia a seguinte afirmação de Newton sobre a forma como se deve fazer ciência, e sob que contexto histórico se pode entendê-la: “A filosofia natural consiste em descobrir a estrutura e as operações da natureza, e em reduzi-las, tanto quanto possível, a regras ou leis gerais – estabelecendo essas regras através de observações e experimentos e, a partir destes, deduzindo as causas e efeitos das coisas [...]”.
- Em uma das citações mais conhecidas na história da ciência, o poeta Alexander Pope afirma que “A Natureza e suas leis escondiam-se na noite. Deus disse: que se faça Newton!, e Tudo se fez Luz”. Appreciar criticamente o impacto epistemológico dessa afirmação, sem um devido estudo e entendimento do trabalho de Newton.

Capítulo 3

- Discutir as causas do erro, segundo Descartes.
- Conceituar o mecanicismo cartesiano.
- Analisar, científica e epistemologicamente, a proposição de Descartes relativa à conservação da quantidade de movimento do mundo.
- Enunciar o princípio da inércia, nos termos de Descartes, e justificar como a rejeição ao vazio determina que se distinga entre os movimentos a que os corpos tendem e o movimento que efetivamente realizam.
- Discorrer sobre a “fábula da criação do mundo”, na qual Descartes apresenta uma teoria completa sobre a formação do universo.
- Explicar o que é a luz para Descartes e discutir as suas principais propriedades.
- Descrever a causa mecânica da gravidade, no referencial cartesiano.

Capítulo 4

- Avaliar a contribuição de Wallis para o entendimento de um choque perfeitamente inelástico.
- Analisar os estudos de Huygens sobre colisões elásticas unidimensionais.
- Desenvolver a argumentação utilizada por Leibniz para caracterizar a “força de um corpo”; contrastar esse conceito com o de energia cinética.
- Explicar a conservação da “força viva” em colisões inelásticas, nos termos de Leibniz.
- Discutir, qualitativa e quantitativamente, os estudos realizados por Newton sobre colisões, que o levam ao enunciado da segunda e da terceira leis.

Capítulo 5

- Justificar a relevância da hipótese de Hooke de compor os movimentos dos planetas em um movimento direto segundo a tangente e em um movimento de atração em direção ao corpo central, nos estudos de Newton sobre a gravitação.

- Discutir o significado dinâmico conferido por Newton à segunda lei de Kepler.
- Mostrar como a “queda da maçã”, apresentada como um evento meramente curioso ou pitoresco no ensino da física, pode contribuir para disseminar a ideia de que a gravitação universal surgiu a Newton, pronta e acabada, em um lampejo de discernimento.
- Avaliar o cerne da argumentação empírico-indutivista que sustenta que a lei da gravitação newtoniana pode ser obtida indutivamente a partir das leis de Kepler.
- Apreciar criticamente as *Regras para filosofar*, de Newton.
- Argumentar como o sucesso de Newton no estabelecimento da lei da gravitação universal seria impossível sem a contribuição do trabalho desenvolvido por outros cientistas.

Capítulo 6

- Especificar as dificuldades (de ordem conceitual) envolvidas na compreensão dos *Principia* newtoniano.
- Contrastar os “métodos” de Newton e de Descartes, segundo Roger Cotes.
- Apreciar criticamente o significado da famosa declaração de Newton *Hypothesis non fingo* (não simulo hipóteses).
- Analisar a afirmação do historiador I. Bernard Cohen de que a declaração de Newton sobre o método na filosofia experimental não se estende a toda a sua obra, mas que é, fundamentalmente, uma peculiaridade da *Óptica*.
- Discutir a afirmação de que a gravidade é uma propriedade inata da matéria, para Newton.
- Debater a questão da incomensurabilidade das cosmologias newtoniana e cartesiana.
- Descrever o papel e a contribuição de Maupertuis para a consolidação dos *Principia* newtoniano entre os franceses.

4 Do átomo grego ao átomo de Bohr



4 Do átomo grego ao átomo de Bohr

4.1 Sobre o texto “Do átomo grego ao átomo de Bohr”

No prefácio à edição portuguesa do texto de Niels Bohr *Sobre a constituição de átomos e moléculas* (BOHR, 1989, p. 5-26), **J. L. Rodrigues Martins** faz uma interessante reflexão sobre o valor didático, cultural e epistemológico da história da ciência a partir do XII Congresso Internacional de História da Ciência realizado em Paris, no ano de 1968. Logo ao início, ele ressalta que:

Professor do Laboratório de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Luanda.

[...] mais uma vez se reacendeu o debate tantas vezes renovado entre os que defendem o extraordinário interesse pedagógico, o iniludível significado cultural e o relevante alcance epistemológico da História da Ciência, e os que a relegam para uma posição apagada e secundária, simples fonte de valores emotivos, ou gratuita curiosidade intelectual para as horas de repouso e disponibilidade de espírito, numa posição duplamente marginal: marginal em relação à História Geral e marginal em relação à própria Ciência; mais uma vez, abriu-se o debate oportuno entre os que propugnam a prevalência de uma autêntica História da Ciência em todos os cursos de um Ensino Superior de vocação universitária, integrado numa pedagogia polivalente, personalista e cultural, de tonalidade fortemente humanista, verdadeira Escola formadora de Homens, abertos a todas as frentes da Cultura, e os que defendem apenas, ou em primeiro lugar, um Ensino Superior de vocação tecnocrática, orientado predominantemente para uma visão de realidade mais polarizada, diferenciadora, linear, acutilante e instrumental, fecunda Fábrica de Técnicos, marcados por imperativos de eficiência e de produtividade, mas amputados de todas as dimensões humanas que não apontem diretamente para uma orientação profissional [...].

Continuando a discorrer sobre o significado das opções em jogo, ele diz que novamente se abriu o debate entre aqueles que admitem que

[...] um autêntico cientista não pode, em verdade, reivindicar para si um perfeito e completo domínio da Ciência que cultiva

se não possuir, ao mesmo tempo, um conhecimento igualmente completo e perfeito da evolução histórica dessa mesma Ciência, até ao seu estado atual, como há mais de meio século vem ensinando o grande historiador George Sarton, na sua luta esforçada mas inglória contra a fatalidade dessa miopia epistemológica de que adoece a maioria dos investigadores e especialistas contemporâneos. E os que, pelo contrário, asseguram que tais especialistas e investigadores não podem, de certo, ultrapassar o condicionalismo que lhes é imposto na impiedosa luta da emulação e da competição em que estão empenhados no campo da atividade científica, e, por isso, para assegurarem a viabilidade da conquista de direitos de prioridade e de descoberta, são forçados a uma preparação intensiva, orientada exclusivamente para as exigências imediatas dos problemas propostos, na investigação tecnológica ou na investigação fundamental, o que não lhes deixa qualquer disponibilidade de tempo livre para, “mesmo de modo passageiro, poderem se afastar das fecundas atividades em que trabalham, para se dedicarem à consulta de velhas memórias científicas”, como, melancolicamente, reconheceu o eminente biólogo francês Jean Rostand [...].

As justas preocupações do professor Rodrigues Martins trazem à discussão uma matéria de natureza polêmica, difícil, complexa pelo número e pela amplitude das variáveis que abriga. Entretanto, são pertinentes e atuais na medida em que questionam pressupostos e suscitam posicionamentos no âmbito da educação e da pesquisa científica.

O texto “Do átomo grego ao átomo de Bohr” atua na perspectiva de que a história da física não pode ser desconhecida pelos que estudam e trabalham com essa ciência. Voltado prioritariamente para o aluno universitário, procura explorar o potencial didático, cultural e epistemológico da física atômica. De fato, desde os seus primórdios, o átomo tem desempenhado um papel essencial na estruturação de inúmeras hipóteses, conceitos e teorias na física, seja como protagonista ou como coadjuvante.

O conhecimento grego, e o atomismo em particular, foi objeto de estudo para muitos físicos, alguns deles formuladores da mecânica quântica, que em livros, artigos e conferências, expressaram publicamente o apreço pelas origens e pela história da sua ciência.

Em *A natureza e os gregos* (SCHRÖDINGER, 2003), obra baseada em uma série de conferências proferidas por Erwing Schrödinger (1887-

1961) em 1948, como parte de suas atividades oficiais como professor de física do University College, em Dublin, o autor diz que, no início das primeiras palestras sobre a ciência grega, sentia-se na obrigação de explicar que o seu interesse pelos antigos não era um mero passatempo pessoal. Longe de se constituir em uma perda de tempo, em termos profissionais, como muitos poderiam inadvertidamente pensar, ao se aprofundar na história de vários séculos de um pensamento original que tem início no século VI a. C., na cidade jônica de Mileto, e que logo se espalha por outras cidades-estado gregas, Schrödinger objetiva reunir elementos para uma visão mais crítica da ciência atual.

A ciência é uma invenção dos gregos. Talvez aí esteja a maior razão para estudá-la e, conhecendo-a, capacitar-se a admirar as suas conquistas e compreender as suas limitações.

O iluminismo jônio gera a ideia de que o mundo pode ser entendido. Desde então, estruturam-se conhecimentos sob a validade irrestrita desse inédito e original pressuposto. A busca de explicações naturais para os fenômenos naturais, a procura de ordem e regularidade como regra geral em um mundo que não compartimentaliza conhecimentos, não podem deixar os deuses senão em seus devidos lugares, ou mesmo negar a sua existência. Nesse novo horizonte de expectativas, superstições e práticas mágicas ou obscuras não podem competir com a razão e a argumentação lógica.

As complexas relações da razão com a observação e as limitações dos sentidos, estudadas pelos gregos, são ainda hoje matéria de vivo interesse, como adverte Schrödinger. “Será que a nossa imagem inventada do mundo se baseia unicamente nas percepções dos sentidos? Que papel desempenha a razão na sua formulação? Será que essa imagem se assenta, em última instância e de forma verdadeira, simplesmente sobre a razão pura?” (SCHRÖDINGER, 2003, p. 32-33).

A ideia de que todas as coisas são constituídas por átomos e espaço vazio dá continuidade ao postulado básico de que a Natureza é compreensível. O som, a cor, o aroma, a rigidez, o calor não são atributos dos átomos, mas o resultado das interações dos (órgãos dos) sentidos com a diversidade das formas, dos movimentos e dos arranjos geométricos dos constituintes fundamentais da matéria.

Os átomos constituem a única realidade imutável; eles se movem no espaço e no tempo, ao longo de linhas retas; mantêm incólume a sua individualidade, colidem entre si, associam-se, desassociam-se, associam-se novamente... assim produzem a variedade dos fenômenos.

Mas a construção intelectual não prescinde da percepção sensorial. O famoso diálogo de Demócrito, que apresenta o intelecto em uma competição com os sentidos, deixa isso claro:

O intelecto afirma: O doce existe por convenção, o amargo existe por convenção, o calor existe por convenção, o frio existe por convenção; na verdade, não existe nada senão átomos e vazio.

Ao que os sentidos respondem: Pobre intelecto, pensas derrotar-nos ao mesmo tempo que de nós queres as provas de que necessitas? A tua vitória é a nossa derrota. (SCHRÖDINGER, 2003, p. 38-39).

Imortalizada na obra *De rerum natura* (*Sobre a natureza das coisas*), do poeta romano Tito Lucrecio Caro (95-55 a.C.), a hipótese atômica é retomada no século XVII. Quando acorda do seu sono profundo, para não mais adormecer, encontra uma ciência que começa a ser regida por novas regras.

O experimento controlado coloca o conhecimento científico em um novo patamar de desenvolvimento. Em meio a isso, o papel atribuído aos dados acirra disputas epistemológicas entre aqueles que, como Francis Bacon, consideram que eles estão na gênese das teorias e os que os veem como corroboradores ou refutadores em potencial de ideias concebidas previamente pela razão, como René Descartes.

A concepção realista da antiga filosofia atomística coloca o átomo no centro de discussões polêmicas (a natureza tem ou não horror ao vazio?), na descrição de estados dinâmicos da matéria (a pressão de um gás, de Daniel Bernolli (1700-1782)), na estruturação de modelos físico-químicos (o modelo de John Dalton (1766-1844)), na base de explicações sobre as reações químicas.

A imagem objetiva dos fenômenos, calcada na realidade objetiva do átomo, sofre a sua primeira crise com o advento do conceito de campo, de Michael Faraday (1791-1867). Segundo Werner Heisenberg (1901-1976) (1980, p. 12):

Uma interação entre campos de forças, sem nenhuma substância como suporte das forças, era menos facilmente compreensível do que a ideia materialista da realidade, própria da física atômica, e introduzia um elemento de abstração, não intuitivo, naquela imagem do mundo que, por outro lado, parecia tão clara e convincente.

A postulação de um meio material (o éter) dotado de tensões elásticas, como suporte dos campos de força e veículo de difusão dos distúrbios eletromagnéticos, mostrou-se insatisfatória tanto pelas suas contradições internas como pela evidência experimental. Contudo, conforme Heisenberg (1980, p. 12):

Alguma consolação se encontrava no fato de que, pelo menos, as variações dos campos de forças se podiam tomar por processos no espaço e no tempo descritíveis objetivamente, isto é, sem qualquer referência aos processos de observação e que, por conseguinte, correspondiam à imagem ideal, comumente aceita, de um fluir no espaço e no tempo segundo leis determinadas. Além disso, era lícito conceber os campos de forças observáveis somente nas suas interações com os átomos, como gerados por estes, e, de certo modo, não havia necessidade de recorrer aos campos senão para explicar os movimentos dos átomos. Desta maneira, a única realidade continuava a ser constituída pelos átomos [e pelo espaço vazio entre eles].

Uma segunda e mais aguda crise é provocada pelo surgimento do energetismo, uma filosofia que vai contestar a visão mecanicista da natureza e a realidade do átomo. Será mesmo desejável construir conhecimentos à luz deste (e de outros) não observável na ciência? Que evidências experimentais confirmam a existência do átomo? As conquistas da teoria cinética dos gases e o papel desempenhado pelo átomo na química não são suficientes para arrefecer as críticas ao atomismo. Afinal, a termodinâmica e a síntese maxwelliana não prescindem do átomo?

Em meio ao debate científico e epistemológico entre Ludwig Boltzmann (1844-1906), um defensor incondicional do atomismo e da visão mecanicista da natureza, e Wilhelm Ostwald (1853-1932), que advoga a exclusão do átomo da ciência, o século XIX chega ao fim, e com ele a constatação de que átomo não é o último limite de divisão da matéria, com as descobertas do elétron, do raios X e da radioatividade.

O fato de o átomo ter uma estrutura interna não abala a imagem materialista do mundo. A realidade objetiva da matéria está nas partículas elementares que constituem o átomo. Muda o foco, mas a essência da ideia é a mesma. É nessa “simplicidade” que reside a força de persuasão dessa visão de mundo.

O elétron, os raios X e a radioatividade, e toda a gama de novos problemas teóricos e experimentais que suscitam, mostram o equívoco daqueles que, desconhecendo a lição da história, em outros episódios

semelhantes, consideravam a física “quase” completa. Havia, de fato, muito mais (e ainda não suspeitadas) coisas por fazer do que buscar explicações mais satisfatórias, no quadro da física clássica, para alguns fenômenos como a radiação do corpo negro e a emissão de partículas carregadas (elétrons) por metais expostos a radiação de certas frequências.

Como bem ressalta Louis de Broglie (1892-1987):

Para o sábio, o julgar a ciência acabada é uma ilusão tão completa como para o historiador é pensar que a história terminou. Quanto mais progredem os nossos conhecimentos, tanto mais a natureza se mostra detentora de uma riqueza quase infinita nas suas diversas manifestações. Mesmo no domínio de uma ciência já tão desenvolvida como a Física, não temos razão alguma para pensar que estão exaustos os tesouros da natureza ou que estamos quase a terminar o seu inventário. (DE BROGLIE, 1958, p. 30).

Um novo e revolucionário conceito introduzido na física por Max Planck (1858-1947), em 1900 – o *quantum* elementar de ação – vai definitivamente mostrar que, no domínio atômico, a física deve lidar com um mundo regido por leis e regras muitas vezes estranhas à física clássica, que não admitem analogias puras e simples com fenômenos já conhecidos.

O modelo atômico de Bohr evoca a imagem do átomo como um sistema solar em miniatura, mas Bohr sabe das limitações desse tipo de representação. “A intervenção do *quantum* de ação impede o infinitamente pequeno de ser uma redução homotética do infinitamente grande.” (DE BROGLIE, 1958, p. 18).

A estabilidade intrínseca das configurações eletrônicas não pode ser explicada pela física clássica. Da mesma forma, a emissão de radiação prevista pela teoria clássica não é compatível com os espectros de emissão dos elementos químicos. Assim, à luz do *quantum* de ação, Bohr impõe condições específicas ao átomo de Rutherford e desenvolve o seu paradoxal e bem-sucedido modelo. O princípio da correspondência assegura que, quando a constante de Planck não tem um papel significativo no âmbito dos fenômenos, as predições da física quântica correspondem às da física clássica.

A intuição e a inspiração, nem sempre fáceis de justificar, manifestam-se agudamente nas proposições de Bohr. Elas são ingredientes essenciais, peças integrantes, condições necessárias (mas não sufi-

cientes) à estruturação de uma nova física. O processo de construção e desenvolvimento da ciência não abdica das singularidades, mas é coletivo por natureza e demanda tempo à sua elaboração.

A falta de uma linguagem própria para tratar os problemas ao nível atômico é apontada com bastante clareza por Bohr, em uma conversa com Heisenberg (1996, p. 54):

Pretendemos dizer algo sobre a estrutura do átomo, mas faltamos uma linguagem em que possamos nos fazer entender. Estamos na mesma situação de um marinheiro abandonado numa ilha remota, onde as condições diferem radicalmente de tudo o que ele jamais conheceu e onde, para piorar as coisas, os nativos falam uma língua desconhecida. Ele tem que se fazer entender, mas não dispõe de meios para isso. Nesse tipo de situação, uma teoria não pode “esclarecer” nada, no sentido científico estrito habitual da palavra. Tudo o que ela tem a esperança de fazer é revelar ligações. Quanto ao mais, ficamos tateando da melhor maneira possível [...] Fazer mais do que isso está muito além dos recursos atuais.

O papel desempenhado pelo *quantum* de ação nos fenômenos atômicos não abala a convicção de Planck de que há uma realidade objetiva independente do observador. Com a evolução do conhecimento científico, aperfeiçoam-se as representações dessa realidade. Os objetos gerados por uma nova representação possuem (em regra) um nível de realidade mais elaborado que a sua precedente, daí não se exigir que eles possam ser compreensíveis a partir dos elementos de visões de mundo mais ingênuas.

Hábitos psicológicos fortemente arraigados às experiências clássicas usuais tiram do pensamento a flexibilidade necessária à compreensão de novos conceitos. Desse modo, como argumenta Gaston Bachelard (1884-1962) em *O novo espírito científico* (BACHELARD, 1986, p. 65), faz-se com frequência necessário desaprender certas coisas de modo a poder vê-las de uma outra forma, como partes de uma construção erigida em bases conceituais distintas da anterior.

Os fótons de Einstein não têm análogo na mecânica clássica. Com massa de repouso nula e movimentando-se com a velocidade da luz, eles diferem dos corpúsculos newtonianos de luz ou de qualquer outro corpo material. Da mesma forma, não há análogo clássico para o elétron. Nesses termos, um átomo não se assemelha a um modelo em miniatura do sistema solar, pois um elétron não é um corpúsculo

esférico ou quase esférico, também não é uma nuvem em volta do núcleo, não é, enfim, nenhuma coisa que possa ser identificada com algo conhecido (FEYNMAN, 1989, p. 164-165).

De fato, é irreversível a crescente diminuição do caráter intuitivo dos objetos e dos fenômenos de uma ciência dinâmica, em constante mutação. Segundo Planck (2000, p. 94):

Em comparação com a imagem do mundo primordial e ingênua, a atual cosmovisão científica oferece um aspecto estranho e realmente insólito. As impressões sensoriais imediatas, nas quais o trabalho científico tem sua origem, desapareceram por completo. Ver, ouvir e tocar não desempenham nela nenhum papel. Uma olhada ao interior de um laboratório de pesquisa revela que essas funções têm sido substituídas por uma coleção de aparelhos extremamente complexos, intrincados e difíceis de manejar, inventados e construídos para a resolução de problemas que só podem ser colocados com a ajuda de conceitos abstratos e símbolos matemáticos e geométricos e que com frequência resultam absolutamente incompreensíveis para os não iniciados.

Há vinte e cinco séculos, Heráclito de Éfeso (576-480 a.C.) disse que “só se pode entender a essência das coisas quando se conhecem sua origem e seu desenvolvimento”. Com igual clareza e perspicácia, ele também afirmou que a *natureza ama esconder-se*, veiculando a ideia de que existe uma realidade oculta por trás da aparência imediata do fenômeno sensível.

A natureza ama esconder-se é título de um livro escrito por **Shimon Malin** (2003), no qual o autor explora os *insights* proporcionados pela teoria quântica sobre a natureza da realidade. O que é essa realidade oculta? Qual a sua relação com o mundo sensorial? É possível reunir o oculto e o manifesto em uma formulação inteligível? A essas questões, formuladas na introdução do texto, somam-se muitas outras: Que papel tem o observador nesse novo e desconcertante mundo? É ainda possível falar em representações “palpáveis” da realidade objetiva? Os objetos atômicos têm ou não realidade física independente dos seres humanos e de suas observações? Pode-se estender ao nível atômico a objetividade e o determinismo da física clássica?

É, enfim, em uma física que perscruta o (sempre) enigmático universo do infinitamente pequeno que se vai buscar respostas a preocupações antigas de um espírito que não envelhece pelas sempre novas e desconcertantes questões que propõe.

Autoridade em mecânica quântica, relatividade geral, cosmologia e filosofia.

4.2 Estrutura geral e divisão dos conteúdos

Para um melhor entendimento da estrutura organizacional do texto “Do átomo grego ao átomo de Bohr”, apresenta-se, a seguir, o seu sumário:

Introdução

Introdução.....	1
Referências Bibliográficas.....	7

1. Do átomo grego ao átomo de Dalton: um percurso através da história da física e da química

1.1 Introdução.....	10
1.2 A substância e a forma na composição de todas as coisas.....	11
1.3 O atomismo.....	15
1.4 As formas geométricas de Platão.....	20
1.5 A retomada do atomismo a partir do século XVII: a natureza não tem horror ao vazio.....	24
1.6 Da alquimia árabe à ascensão e queda do flogístico.....	32
1.7 O atomismo de Dalton.....	42
1.8 Um papel para a história.....	53
1.9 Referências Bibliográficas.....	56

2. Sobre o atomismo do século dezanove

2.1 Introdução.....	60
2.2 Clausius e Thomson: as bases conceituais da termodinâmica.....	65
2.3 O movimento browniano.....	74
2.4 O átomo <i>não é</i> real: a rejeição de não observáveis em uma teoria científica.....	77
2.5 Reversibilidade e irreversibilidade temporal.....	80
2.6 A oposição científica e epistemológica de Boltzmann ao energetismo.....	84
2.7 Referências Bibliográficas.....	91

3. A espectroscopia, o elétron, os raios X e a radioatividade: prelúdio a uma nova física

3.1 Introdução.....	96
3.2 Espectros: de Newton a Balmer.....	100
3.3 Novas nuvens no céu da física clássica.....	107
3.4 A descoberta do elétron.....	108
3.5 Os raios X.....	117

3.6 A radioatividade.....	120
3.7 A experiência de Millikan.....	126
3.8 Referências Bibliográficas.....	130
4. O quantum de radiação	
4.1 Introdução.....	134
4.2 A radiação de corpo negro.....	136
4.3 A lei da radiação de Planck.....	146
4.4 Obtenção das leis de Stefan-Boltzmann, Wien e Rayleigh-Jeans a partir da lei da radiação de Planck.....	154
4.5 Dos “fotoelétrons” de Hertz aos estudos de Lenard.....	157
4.6 O <i>quantum</i> de luz.....	161
4.7 Reações aos <i>quanta</i> de luz.....	166
4.7 Referências Bibliográficas.....	168
5. O átomo de Bohr	
5.1 Introdução.....	172
5.2 Os postulados de Bohr.....	178
5.3 A quantização das órbitas e das velocidades no átomo de hidrogênio.....	181
5.4 A quantização da energia e a primeira corroboração da teoria.....	186
5.5 O modelo de Bohr para o hélio ionizado.....	188
5.6 O modelo de Bohr para átomos de um elétron.....	190
5.7 A teoria de Bohr e os espectros atômicos.....	193
5.8 O princípio da correspondência.....	194
5.9 À guisa de conclusão, provisória... ..	198
5.10 Referências Bibliográficas.....	202

4.3 Objetivos da aprendizagem

A seguir, especificam-se os objetivos referentes à aprendizagem de cada capítulo do texto “Do átomo grego ao átomo de Bohr”.

Capítulo 1

- Caracterizar e exemplificar o atomismo de Leucipo e Demócrito.
- Expor as críticas de Aristóteles ao átomo.
- Explicar em que medida o *De rerum natura*, à luz da filosofia epicúrea, transcende à ciência física.
- Descrever, em linhas gerais, a teoria de Platão sobre a estrutura da matéria.
- Contrastar o racionalismo cartesiano com o empirismo baco-niano.
- Relacionar experimentos históricos que demonstram que “a natureza não tem horror ao vazio”.
- Debater diferentes interesses e motivações associados ao estudo da alquimia.
- Analisar a relevância ou não do flogístico para o desenvolvimento da ciência.
- Definir o que se entende por “experimento crucial” e avaliar a pertinência dessa designação às experiências de Lavoisier que refutaram o flogístico.
- Identificar o “núcleo duro” do atomismo de Dalton, enunciando seus pressupostos sobre a constituição da matéria e de como os elementos se combinam.
- Explicitar as propriedades do calórico e mostrar como Dalton utiliza esse conceito para explicar a estabilidade de um “átomo composto”.
- Debater a importância da história para o ensino, a partir dos argumentos apresentados na última seção do texto (“Um papel para a história”).

Capítulo 2

- Descrever o “energetismo” de Ostwald e a concepção de ciência que lhe é subjacente.

- Apresentar as contribuições de Clausius e Thomson para o estabelecimento das bases conceituais da Termodinâmica.
- Discutir as hipóteses que permearam a compreensão do movimento browniano.
- Caracterizar as ações e os fins dos “demônios” de Maxwell e de Laplace.
- Avaliar a rejeição a não observáveis em uma teoria científica.
- Discutir os conceitos de reversibilidade e irreversibilidade temporal.
- Mostrar como Boltzmann refuta as pretensões de Ostwald de excluir o átomo da ciência.

Capítulo 3

- Apreciar criticamente a afirmação de Lord Kelvin, no final do século XIX, de que as futuras verdades da física deveriam ser procuradas na sexta casa decimal.
- Discutir a importância da espectroscopia para a física e para a química, a partir dos trabalhos de Kirchhoff, Balmer e Rydberg, entre outros.
- Destacar investigações que se mostraram relevantes na trajetória de estudos que culminaram com a descoberta do elétron, em 1897, exemplificando com isso o caráter coletivo da construção de conhecimentos.
- Argumentar, a partir dos estudos de Röntgen, que as descobertas resultantes de “felizes acidentes” não são obras do acaso. Os interesses imediatos e a carga conceitual do investigador são pré-requisitos necessários, embora não suficientes.
- Discutir a contribuição científica de Becquerel no ainda incipiente campo das radiações e, em particular, as críticas de Roberto Martins (físico e historiador brasileiro) de que Becquerel não teria descoberto a radioatividade.
- Discorrer sobre o trabalho científico de Marie e Pierre Curie.

Capítulo 4

- Explicitar que concepções epistemológicas acompanham o jovem Planck quando ele decide ingressar no “templo da ciência”.

- Appreciar criticamente os estudos teóricos e experimentais que contextualizam a formulação da lei da radiação de Planck.
- Obter as leis de Stefan-Boltzmann, Wien e Rayleigh-Jeans a partir da lei de Planck.
- Discutir as resistências ao *quantum* de radiação, à introdução de um conceito revolucionário na ciência.
- Mostrar como os estudos de Lenard assinalam a insuficiência da física clássica para explicar o “efeito fotoelétrico”.
- Demonstrar como Einstein explica por que as energias adquiridas pelos fotoelétrons nos experimentos de Lenard não dependem da intensidade da radiação incidente e por que há uma frequência de corte, abaixo da qual não há emissão de elétrons por uma superfície.
- Analisar as reações aos quanta de luz.

Capítulo 5

- Caracterizar os primeiros modelos atômicos (J. J. Thomson, William Thomson e Hantaro Nagaoka).
- Avaliar a afirmação de que os estudos de Planck sobre a radiação do corpo negro, a teoria de Einstein do efeito fotoelétrico, as experiências e o modelo atômico de Rutherford, e resultados empíricos sobre espectros de emissão de vários elementos químicos contextualizam bem o quadro teórico e experimental em que se desenvolve o trabalho de Bohr.
- Enunciar os postulados de Bohr.
- Desenvolver didaticamente o átomo de Bohr à luz de Lakatos.
- Reconhecer que o problema de Bohr é o de entender a estabilidade da matéria, um reflexo de sua estabilidade em nível microscópico, criticando a improcedência da tese empirista que apresenta os estudos de Bohr como exemplo de uma ascensão indutiva baconiana constituída a) pelo caos das linhas dos espectros; b) por uma lei empírica (Balmer) e c) pela explicação teórica (Bohr).
- Estabelecer e discutir o princípio da correspondência.

5 A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica



5 A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica

5.1 Sobre o texto “A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica”

Os conhecimentos produzidos desde os gregos antigos à ciência moderna, com René Descartes (1596-1650), Johannes Kepler (1571-1630), Galileu Galilei (1564-1642), Isaac Newton (1642-1727), Gottfried W. Leibniz (1646-1716), Christiaan Huygens (1629-1695), ressaltam a dinamicidade da ciência, a ausência de verdades inquestionáveis e absolutas. Paradoxalmente, no entanto, com o contínuo desenvolvimento da mecânica no século XVIII e na primeira metade do século XIX, por Pierre S. Laplace (1749-1827), Joseph Louis Lagrange (1736-1813), William R. Hamilton (1805-1865), Carl G. J. Jacobi (1804-1851), esse referencial acabou se transformando em um paradigma do qual se esperava respostas a todos os questionamentos e problemas da física. Para Lagrange, por exemplo, Newton tinha sido o maior de todos os cientistas porque a ciência do nosso mundo só podia ser criada uma vez e havia sido Newton o seu criador (INFELD, 1950, p. 25-26).

O ideal da explicação mecânica de qualquer fenômeno, compartilhado por cartesianos e newtonianos, sofre duro golpe com o estabelecimento das equações de Maxwell, na segunda metade do século XIX. Com elas, estrutura-se uma nova teoria científica, com amplo poder descritivo e preditivo, que torna possível a abordagem de fenômenos eletromagnéticos com grande eficácia.

Como era de se esperar, a ideia de uma “segunda física”, de um modo alternativo de pensar e de fazer ciência, que nascia com o conceito de *campo* (elétrico, magnético, eletromagnético), encontrou forte resistência entre aqueles que defendiam a continuidade da hegemonia do conceito mecânico.

A questão da existência ou não de um meio material para a propagação das ondas eletromagnéticas; a incompatibilidade da regra clássica da adição de velocidades com a constância da velocidade da luz, que independe do movimento relativo entre a fonte e o observador;

o conflito entre o princípio da relatividade de Galileu e a ideia de um referencial absoluto, além das últimas descobertas ao nível do átomo, com a entrada em cena do elétron, dos raios X e da radioatividade, estavam a exigir uma reformulação de conceitos e princípios da física clássica, mostrando serem muito mais sutis e complexos os caminhos que conduzem à compreensão do mundo físico do que os imaginados por Lagrange. É nesse contexto que se encontram as raízes da teoria da relatividade especial, de Albert Einstein (1879-1955), publicada no volume XVII da revista *Annalen der Physik*, em junho de 1905.

Contudo, as origens históricas dessa teoria têm sido objeto de diferentes interpretações por parte de cientistas, filósofos e historiadores da ciência, tanto entre aqueles que procuram encontrar na própria ciência as razões de seu desenvolvimento, quanto nos que consideram a instituição ciência dentro de um conjunto mais amplo, sujeito e influenciado por pressões ideológicas, políticas e econômicas. Do ponto de vista didático, essa discussão se encontra, em geral, ausente; quando existe é pouco explorada nos livros-textos universitários e em sala de aula. A ênfase restrita aos aspectos matemáticos da teoria, combinada com a sua descontextualização histórica, inviabiliza o conhecimento dos problemas discutidos pelos físicos da época e uma melhor compreensão do que representou a solução dada a eles pela teoria da relatividade especial.

Em 1910, o matemático inglês Edmund T. Whittaker (1873-1956), um estudioso da história da física, com contribuições relevantes em física matemática, publica *A history of the theories of aether and electricity*, abrangendo um período que vai de Descartes até o final do século XIX. A obra é reeditada em 1951 e, dois anos depois, acrescida de um segundo volume, incluindo o período de 1900 a 1926 (WHITTAKER, 1953). É nesse livro que Whittaker argumenta que a teoria da relatividade especial foi formulada essencialmente por Hendrik A. Lorentz (1853-1928) e Jules Henry Poincaré (1854-1912), admitindo a originalidade de Einstein apenas em relação a correções relativísticas para a aberração e o efeito Doppler.

A tese de Whittaker gerou um intenso debate entre físicos, filósofos e historiadores da ciência, muitos deles com uma sólida formação em física, como Thomas S. Kuhn e Gerald Holton. A apreciação crítica da improcedência dessa tese (defendida no presente texto) passa por um quadro teórico que demanda uma análise do desenvolvimento da óptica e do eletromagnetismo no século XIX, bem como da influência da filosofia mecanicista na física desse período. A concepção do éter como um referencial absoluto, por exemplo, re-

toma aspectos de um conceito muito criticado da física de Newton – o espaço absoluto –, enriquecendo e complexificando ainda mais as discussões. Referindo-se às régulas e aos relógios ideais nas experiências de pensamento de Einstein, Holton ressalta que “a teoria da relatividade apenas desloca o lugar do espaço-tempo do *sensorium* do Deus de Newton para o *sensorium* do experimentador abstrato de Einstein” (HOLTON, 1995, p. 196).

De fato, a forma como Einstein vê e aborda os problemas que estuda, não apenas no âmbito da relatividade, mas também da física quântica, é importante e esclarecedora quando confrontado o seu trabalho com o de outros cientistas.

Os artigos de Einstein sobre a estrutura quântica da radiação, o movimento browniano e a eletrodinâmica dos corpos em movimento (STACHEL, 2001) começam destacando alguma assimetria inerente aos fenômenos “ou outras incongruências de natureza predominantemente estética (ao invés de, por exemplo, um enigma colocado por fatos experimentais não explicados)” (HOLTON, 1995, p. 193).

Sendo o objetivo essencial de toda a teoria física reduzir as conexões descobertas “ao menor número possível de elementos conceituais mutuamente independentes”, pois “é nessa busca da unificação racional do múltiplo que a ciência logra seus maiores êxitos” (EINSTEIN, 1994, p. 33), Einstein enuncia princípios, axiomas e hipóteses gerais para remover as assimetrias e os demais problemas existentes. Em seguida, por dedução lógica, extrai as consequências e previsões da teoria. A sua adequação aos fatos conhecidos e aos novos resultados que sugere ensinam a avaliação da teoria.

Contudo, a concepção empírico-indutivista da ciência, que ainda hoje se encontra fortemente disseminada no meio acadêmico, concebe fundamentalmente a teoria da relatividade especial como uma resposta objetiva e correta ao experimento realizado em 1887, por Albert A. Michelson (1852-1931) e Edward W. Morley (1838-1923), sobre o movimento da Terra em relação ao éter estacionário. Por certo, a teoria da relatividade emerge em uma ciência dominada pelo positivismo, e a influência de Ernst Mach (1838-1916) sobre Einstein é inegável. Mas o vínculo genético da teoria de Einstein com o experimento de Michelson-Morley é fruto de uma história mal contada.

Inevitavelmente, o posicionamento de Whittaker sobre a originalidade da contribuição de Einstein à ciência, com a teoria da relatividade especial, exclui qualquer interpretação desse episódio como um constructo revolucionário, nos termos kuhnianos (KUHN, 1987). Já a

rejeição a Whittaker não implica necessariamente a aceitação dessa tese. Quanto ao próprio Einstein, reiteradas vezes, em livros, artigos, cartas e entrevistas, ele afirmou que considerava a teoria da relatividade especial como uma “evolução, não uma revolução da ciência da dinâmica” (JAMMER, 2000, p. 31); como um desenvolvimento sistemático da eletrodinâmica de Maxwell e Lorentz, mas que, mesmo assim, apontou para além dela mesma (EINSTEIN, 1994, p. 60).

A teoria da relatividade é uma construção de duas etapas. A relatividade geral exige o abandono dos fundamentos seguros da geometria euclidiana e a incursão por novas e desconhecidas áreas da relação entre física e matemática para o estabelecimento de uma teoria na qual as leis sejam válidas em qualquer sistema de referência.

Conforme Holton (1995, p. 191), referindo-se à relatividade einsteiniana, “para encontrar um outro trabalho que tão ricamente ilumina as relações entre física, matemática e epistemologia, ou entre experimento e teoria, com a mesma extensão científica, filosófica e implicações intelectuais gerais, seria preciso voltar aos *Principia* de Newton”. Talvez não seja possível expressar de forma tão eloquente, e em tão poucas palavras, a importância do estudo dessa teoria.

Enfim, são muitas as questões discutidas pelo texto “A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica”, entre elas:

- a) Qual era o estado da ciência no período que antecedeu a primeira publicação de Einstein sobre a teoria da relatividade? Em particular, que assuntos potencialmente relevantes ao surgimento da teoria eram discutidos pelos cientistas?
- b) Que imagem (hegemônica) de ciência permeava o trabalho dos físicos à época?
- c) Por que, ao contrário de Lorentz e Poincaré, a questão do éter não foi essencial para Einstein, em 1905?
- d) O princípio da relatividade tem, rigorosamente, o mesmo significado para Poincaré e para Einstein?
- e) Como Lorentz e Einstein interpretam as equações de transformação de um sistema de referência inercial a outro?
- f) Qual a importância da experiência de Michelson-Morley na gênese da teoria da relatividade especial de Einstein? Se é cor-

rente admitir que esse foi um experimento crucial na história da física, então por que muitos cientistas ainda continuaram a desenvolver pesquisas sobre o éter e suas propriedades, mesmo depois de 1905?

- g) Que concepção de ciência, ou estilo de fazer ciência, como diz Holton (1995, p. 193), pode-se extrair da semelhança estrutural da *Eletrodinâmica dos corpos em movimento* com outros trabalhos seminais publicados por Einstein em 1905?
- h) A teoria da relatividade especial é ou não um constructo revolucionário? E a relatividade geral?
- i) Que contribuições pode trazer ao estudante a visão de Einstein sobre a natureza da ciência e do trabalho científico ao redigir seus escritos da maturidade? (EINSTEIN, 1982; EINSTEIN, 1994)

Para tratar esses e outros temas, o texto está organizado em oito capítulos.

No capítulo 1 discute-se um conceito central da física de Newton – o espaço absoluto. A partir das críticas de Henry More (1614-1687) ao conceito de extensão material de René Descartes, chega-se a sua concepção de espaço. Os vinte conceitos comuns a Deus e ao espaço, enumerados por More, “todos eles solenes atributos ontológicos do absoluto” (MORE apud BURTT, 1991, p. 146-150), explicitam várias semelhanças do conceito newtoniano de espaço absoluto (o *sensorium* de Deus, para Newton) com o conceito de More. Os experimentos que Newton descreve na defesa do espaço absoluto demonstram uma ação do espaço sobre a matéria, que produz as forças inerciais envolvidas, mas não da matéria sobre o espaço, como em princípio seria de se esperar, de acordo com a terceira lei. A rejeição de Ernst Mach ao espaço absoluto é contundente, e sem dúvida a mais significativa antes de Einstein. Ela é sustentada por uma visão de ciência que, quando muito, concede apenas um valor instrumental a grandezas não observáveis em uma teoria científica. Contudo, e independentemente da existência ou não de um referencial privilegiado na física, é o conceito de referencial inercial que se estabelece e enseja perspectivas equivalentes para o estudo de um sistema mecânico por diferentes observadores (inerciais).

O capítulo 2 descreve as equações de transformação de um referencial inercial a outro, mostrando que as leis da mecânica são as mesmas em todos os sistemas de referência inerciais.

Enquanto todos estavam convencidos de que os fenômenos da natureza podiam ser representados com auxílio da mecânica clássica, a validade deste princípio da relatividade nunca foi posta em dúvida. Mas, os novos desenvolvimentos da eletrodinâmica e da óptica foram tornando cada vez mais claro que a mecânica clássica era uma base insuficiente para a descrição de todos os fenômenos físicos. Com isto, também passou a ser discutida a questão da validade do princípio da relatividade, e a possibilidade de a resposta ser negativa não parecia excluída. (EINSTEIN, 1999, p. 19).

Nessa perspectiva, apresentam-se no capítulo 3 conteúdos da história da óptica relevantes aos objetivos do texto. Os primeiros esforços do intelecto humano em compreender o que é a luz e o mecanismo da visão geram explicações sobre a reflexão e a refração da luz e promovem o surgimento do primeiro princípio de mínimo na física – o “princípio de mínimo esforço”, de Heron de Alexandria (10-70 d.C.). A contundente afirmação de Francesco M. Grimaldi (1618-1663), em meados do século XVII, ao descobrir a difração, de que “não sabemos nada sobre a natureza da luz” ressalta a insuficiência de conhecimentos no âmbito da óptica física, reiterada pela descoberta dos fenômenos da interferência e da polarização da luz. Não obstante, a obtenção da lei da refração da luz, por Willebrord Snell (1580-1626) e René Descartes, o surgimento de um novo princípio de mínimo (o de que a luz se movimenta pelos caminhos mais fáceis e não por linhas mais curtas) com Pierre de Fermat (1601-1665), a determinação da velocidade da luz por Olaus Roemer (1644-1710) e a teoria ondulatória da luz de Christiaan Huygens, são conquistas importantes da óptica do século XVII. Para Huygens, não se pode duvidar de que a luz consista no movimento de certa matéria, e de que é na mecânica que se deve buscar as causas de todos os fenômenos naturais (HUYGENS, 1986, p. 12).

Através da publicação da *Óptica* de Newton, em 1703, termina o longo período do que Kuhn chama de “pré-ciência” no estudo dos fenômenos luminosos. É essencialmente a concepção de que a luz é constituída por fluxos de partículas que domina os estudos realizados nessa área da física durante o século XVIII. A mudança do paradigma corpuscular para o ondulatório, a partir dos trabalhos de Thomas Young (1773-1829), Dominique F. J. Arago (1786-1853), Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) e Augustin J. Fresnel (1788-1827), na primeira metade do século XIX, evidencia, mais uma vez, o quanto o conhecimento científico se modifica com o tempo. Um conceito explorado por Descartes e essencial na física de Huygens, sempre de muitas facetas e interpretações na história da física, também utilizado

por Newton na explicação de vários fenômenos, mantém ainda viva a confiança dos que acreditam que as forças entre partículas e os seus movimentos estão na base do entendimento de qualquer fenômeno. Esse conceito é o éter. A luz é uma onda que tem no éter luminífero o substrato material para a sua propagação.

Com a teoria de Maxwell, entretanto, vem o declínio do conceito mecânico. A identificação da luz como uma onda eletromagnética mostra que a lei da adição galileana de velocidades é incompatível com a crença de que a luz é uma onda em um meio mecânico. A contextualização histórica do eletromagnetismo maxwelliano é matéria do capítulo 4. Relembrando a situação da física quando estudante, Einstein diz que a teoria de Maxwell era o assunto mais fascinante à época. Embora tivesse que desenvolver estudos particulares para aprendê-la, pois sendo uma teoria recém-constituída não integrava o currículo escolar, o que lhe dava um aspecto revolucionário, segundo Einstein, era a transição da ação à distância para os campos, como variáveis fundamentais (EINSTEIN, 1982, p. 39).

Uma das previsões da teoria de Maxwell era a de que o movimento da Terra através do éter estacionário poderia ser constatado em experimentos ópticos ou elétricos que propiciassem medidas de segunda ordem na razão entre a velocidade orbital da Terra e a velocidade da luz. Contudo, o experimento pioneiro realizado por Michelson, em 1881, dá os primeiros indícios de que não há qualquer “vento do éter”. Mas para muitos ele não é conclusivo, e não sem razão, pois efetivamente algumas insuficiências de ordem experimental poderiam estar escondendo o reduzidíssimo efeito esperado. Em 1887, Michelson desenvolve um novo experimento, juntamente com Morley, com um interferômetro muito mais preciso do que o utilizado anteriormente, e o veredito tem um efeito fulminante sobre as bases teóricas da ciência da época: se existe algum movimento relativo entre a Terra e o éter luminífero, ele é muito pequeno; tão pequeno que se pode refutar por completo a explicação que Fresnel dá à aberração da luz, como afirmam Michelson e Morley (MICHELSON; MORLEY, 1887). Será que as dimensões dos corpos físicos se modificam em decorrência do seu movimento através do éter, como sugerem George F. FitzGerald (1851-1901) e Hendrik A. Lorentz? Ou o éter deve ser abandonado?

O capítulo 5 explicita as resistências de Poincaré e Lorentz à exclusão do éter na física. Considerando, além disso, as críticas de Whitaker à originalidade da relatividade einsteiniana, discute-se brevemente o princípio da relatividade de Poincaré e alguns aspectos da física de Lorentz.

No capítulo 6 aborda-se didaticamente a teoria da relatividade especial. Sem mencionar a experiência de Michelson-Morley, Einstein elimina o éter da física. Questionando o caráter absoluto da simultaneidade na mecânica newtoniana e o conceito de espaço absoluto, ele reformula as noções clássicas de espaço e tempo e, a partir da equivalência de todos os observadores inerciais, da constância da velocidade da luz e da hipótese de homogeneidade do espaço e do tempo, introduz uma nova física.

Com a teoria da relatividade especial e a demonstração de como se efetua a transformação de coordenadas de um referencial inercial a outro, Einstein reafirma a equivalência física de todos os observadores inerciais, que estava sendo questionada pelo fato de as equações de Maxwell não serem invariantes frente à transformação de Galileu. Entretanto, a relatividade especial e a gravitação newtoniana são teorias incompatíveis, pois enquanto para Newton a ação gravitacional entre dois corpos é instantânea, para Einstein há uma velocidade limite máxima para a propagação de qualquer evento físico. É através da relatividade geral que Einstein resolve esse conflito.

No capítulo 7 analisam-se as implicações físicas da igualdade das massas inercial e gravitacional de um corpo, ou seja, o fato de a aceleração de um sistema em queda livre em um campo gravitacional (de pequena extensão espacial) ser independente da natureza do sistema em queda, especialmente de seu conteúdo de energia (EINSTEIN, 1982, p. 65). Discutem-se também, em nível qualitativo, o conceito de gravitação de Einstein e a corroboração da teoria da relatividade geral.

O capítulo 8 gera subsídios de ordem conceitual e epistemológica para uma avaliação do leitor sobre a relatividade einsteiniana ser ou não uma teoria revolucionária (o que demanda uma discussão preliminar quanto ao que se deve entender por uma revolução, na ciência) e se, ou em que medida, o experimento de Michelson-Morley foi relevante na gênese da relatividade especial (o que, inevitavelmente, envolve uma apreciação crítica da concepção empírico-indutivista do conhecimento).

5.2 Estrutura geral e divisão dos conteúdos

Para uma melhor compreensão da estrutura organizacional do texto “A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica”, relaciona-se, a seguir, o seu sumário:

Introdução

Introdução.....	1
Referências Bibliográficas	8

1. Sobre o referencial absoluto newtoniano

1.1 Newton e a filosofia mecanicista	12
1.2 Prelúdio ao espaço absoluto newtoniano: críticas de Henry More ao conceito de extensão material de Descartes	12
1.3 A questão do referencial absoluto newtoniano.....	16
1.4 A experiência do balde	20
1.5 A experiência de pensamento dos globos em rotação.....	22
1.6 O <i>sensorium</i> de Deus	23
1.7 A rejeição de Mach ao espaço absoluto newtoniano	27
1.8 Referencial inercial	30
1.9 Referências Bibliográficas	32

2. O princípio da relatividade de Galileu

2.1 A transformação de Galileu	36
2.2 A adição galileana de velocidades	39
2.3 A invariância da aceleração para observadores inerciais	40
2.4 A invariância da mecânica newtoniana frente à transformação de Galileu	42
2.5 Referências Bibliográficas	43

3. Sobre a luz

3.1 Um estágio de pré-ciência na óptica: dos gregos a Grosseteste	46
3.2 Galileu: a velocidade da luz é finita	52
3.3 A lei da refração da luz.....	54
3.4 O princípio de Fermat.....	57
3.5 Difração e interferência.....	61
3.6 A determinação da velocidade da luz, por Roemer	64
3.7 Sobre a óptica de Huygens	66
3.8 Revisitando Fermat à luz de Huygens.....	76
3.9 Éter, luz, cores e... Newton!	79

3.10 Uma querela (ainda) não resolvida	89
3.11 A aberração estelar	90
3.12 A retomada da teoria ondulatória da luz e o papel do éter nessa teoria	93
3.13 Referências Bibliográficas.....	100
4. Da síntese de Maxwell à experiência de Michelson-Morley	
4.1 O declínio do conceito mecânico	104
4.2 O surgimento do eletromagnetismo	105
4.3 A contribuição de Faraday para o eletromagnetismo.....	108
4.4 A síntese de Maxwell	112
4.5 A questão do meio de propagação das ondas eletromagnéticas	115
4.6 Michelson e o experimento de Potsdam	116
4.7 A experiência de Michelson-Morley	125
4.8 A contração de Lorentz-FitzGerald.....	129
4.9 Referências Bibliográficas	131
5. Prelúdio à relatividade: Poincaré e Lorentz	
5.1 Poincaré: sobre o éter e o princípio da relatividade	134
5.2 Sobre a teoria de Lorentz.....	137
5.3 Sobre as origens da transformação de Lorentz.....	142
5.4 Referências Bibliográficas	148
6. A teoria da relatividade especial	
6.1 Os postulados da relatividade especial	150
6.2 O caráter absoluto da simultaneidade na mecânica newtoniana e o questionamento de Einstein.....	153
6.3 A sincronização de relógios em um referencial inercial	156
6.4 A relatividade da simultaneidade	157
6.5 A transformação de Lorentz.....	158
6.6 A contração de Lorentz-FitzGerald.....	164
6.7 Dilatação temporal	167
6.8 Adição relativística de velocidades	170
6.9 Referências Bibliográficas	173
7. Sobre a relatividade geral	
7.1 Problemas de uma nova e de uma (não tão) “velha” física.....	176
7.2 O pensamento mais feliz de minha vida.....	179
7.3 Relógios e réguas em um referencial acelerado	184
7.4 A explicação einsteiniana da gravidade	187

7.5 A comprovação da relatividade geral: o periélio anômalo de Mercúrio e o desvio da luz por um campo gravitacional.....	188
7.6 O deslocamento das linhas espectrais para o vermelho	193
7.7 Referências Bibliográficas	195

8. Considerações epistemológicas sobre a relatividade einsteiniana

8.1 De Einstein e sobre Einstein: o contexto da relatividade especial.....	198
8.2 A teoria da relatividade é uma teoria revolucionária?	207
8.3 A teoria da relatividade especial foi uma resposta ao “resultado negativo” da experiência de Michelson-Morley?.....	216
8.4 Referências Bibliográficas	225

5.3 Objetivos da aprendizagem

A seguir, especificam-se os objetivos concernentes à aprendizagem de cada capítulo do texto “A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica”.

Capítulo 1

- Discutir as críticas de Henry More ao conceito de extensão material de Descartes.
- Apreciar criticamente os argumentos utilizados por Newton, na “experiência do balde” e na experiência de pensamento dos globos em rotação, em favor da existência do espaço e do movimento absolutos.
- Avaliar a afirmação de que, para Newton, o espaço absoluto não é somente real, é também qualquer coisa de divino. Ele é o *sensorium* de Deus.
- Discutir as bases conceituais e epistemológicas da rejeição de Mach ao espaço absoluto newtoniano.
- Conceituar um referencial inercial.

Capítulo 2

- Explicitar a transformação de Galileu.
- Demonstrar a adição galileana de velocidades e a invariância da aceleração para observadores inerciais.

- Enunciar o princípio da relatividade de Galileu, justificando os limites de sua validade.

Capítulo 3

- Discutir o que é a luz para os atomistas gregos, os pitagóricos, Empédocles, Platão, Aristóteles e os estoicos.
- Explicar o que é a luz, para a ciência atual.
- Demonstrar a igualdade dos ângulos de incidência e de reflexão da luz em um espelho plano, a partir do “princípio de mínimo esforço”, de Heron de Alexandria.
- Expor os argumentos de Galileu sobre a finitude da velocidade da luz e a maneira como ele procura corroborar essa sua hipótese.
- Justificar por que Descartes estuda a reflexão e a refração da luz, considerando-a como um feixe de partículas sujeitas às leis de um choque mecânico quando incidem sobre a interface de dois meios, se para ele a luz é uma espécie de pressão, que se transmite através de um meio contínuo, em linha reta e em todas as direções, “instantaneamente”, a partir da fonte emissora.
- Utilizar o princípio de Fermat para obter didaticamente a lei da refração da luz, contrastando conceitualmente o seu resultado com o encontrado por Descartes.
- Explicar como a descoberta da difração, por Grimaldi, mostra que o *insight* de um novo evento exige conhecimentos e interesses, capazes de serem sensibilizados pela ocorrência do inesperado, e também habilidade e intuição do cientista em prover e examinar novas situações em que o fenômeno se manifesta, investigando-o com algum sucesso.
- Apresentar a determinação da velocidade da luz, por Roemer.
- Discutir o conceito e as propriedades da luz, segundo Huygens.
- Contrastar a dedução “simples e fácil” que Huygens apresenta da lei da refração da luz obtida por Fermat (a qual ele critica, considerando-a “muito longa”) com a que se faz utilizando linguagem matemática atual.
- Avaliar a importância do éter na óptica e na mecânica newtoniana, considerando que esse conceito varia em estrutura e função ao longo de sua obra, como sustenta Paulo Abrantes (físico e historiador brasileiro).

- Caracterizar a relevância da óptica newtoniana.
- Contrastar a aberração e a paralaxe estelar.
- Analisar a retomada da teoria ondulatória da luz e o papel do éter nessa teoria, a partir dos trabalhos de Young, Arago e Fresnel.

Capítulo 4

- Analisar o declínio do conceito mecânico no contexto de surgimento do eletromagnetismo.
- Demonstrar a importância de Oersted para a estruturação do eletromagnetismo.
- Explicitar a contribuição de Faraday para o eletromagnetismo.
- Descrever a síntese de Maxwell.
- Discutir a originalidade e acuidade dos experimentos realizados, primeiro por Michelson e depois em conjunto com Morley, para evidenciar o possível movimento da Terra em relação ao éter, bem como as implicações de seus resultados para a física da época.
- Avaliar, conceitual e epistemologicamente, a contração de Lorentz-FitzGerald.

Capítulo 5

- Apreçar criticamente as convicções e as resistências de Lorentz e Poincaré em relação à exclusão do éter na física.
- Analisar o papel que Poincaré confere ao experimento, como fonte de verdades e certezas, na ciência.
- Caracterizar, sucintamente, a teoria do elétron de Lorentz.
- Discutir a obtenção, por Lorentz, das equações de transformação de coordenadas entre dois sistemas inerciais.

Capítulo 6

- Explicar o que Einstein quer dizer quando afirma que “nenhum caminho lógico conduz das percepções aos princípios de uma teoria”.
- Enunciar os postulados da teoria da relatividade especial.
- Discutir o questionamento de Einstein ao caráter absoluto da simultaneidade na mecânica newtoniana.

- Analisar a relatividade da simultaneidade no referencial einsteiniano.
- Demonstrar que a percepção de contração dos objetos na direção do movimento e a dilatação temporal são consequências importantes das equações de transformação de um referencial inercial a outro, na relatividade einsteiniana.

Capítulo 7

- Explicitar os “problemas” não resolvidos pela gravitação newtoniana, destacando quais dentre eles são de maior relevância no conjunto das insatisfações de Einstein com essa teoria.
- Expressar o que, segundo Einstein, teria sido o pensamento mais feliz de sua vida, analisando, em detalhes e com os devidos exemplos, como ele desenvolve esse *insight*.
- Caracterizar o contexto de validade da teoria da relatividade especial.
- Discutir o que é a gravidade, para Einstein.
- Apresentar as críticas de Einstein à percepção do desenvolvimento de uma ciência experimental como um processo contínuo de indução.
- Avaliar a importância do problema do periélio anômalo de Mercúrio na gênese e na corroboração da relatividade geral.
- Apreciar criticamente, tanto do ponto de vista físico como do epistemológico, a corroboração da relatividade geral resultante da análise das observações do eclipse total do Sol realizadas em Sobral e na Ilha do Príncipe.

Capítulo 8

- Discutir a influência da filosofia positivista de Mach sobre os estudos de Einstein.
- Explicitar as críticas de Einstein à mecânica newtoniana, considerando os dois aspectos (ou pontos de vista, como Einstein prefere chamar) que, segundo ele, devem orientar a avaliação de uma teoria científica: confirmação externa do constructo teórico e simplicidade lógica das suas premissas.
- Apresentar, sucintamente, as principais ideias e pensamentos que, de acordo com o próprio Einstein, desempenharam um pa-

pel relevante em sua trajetória científica.

- Debater sobre o caráter revolucionário ou não da teoria da relatividade.
- Avaliar o papel do experimento de Michelson-Morley na gênese da relatividade especial.

6 Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...



6 Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...

6.1 Sobre o texto “Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...”

A descoberta do elétron por J. J. Thomson (1856-1840) em 1897 é para a física e sua história um evento marcante. Os estudos de Thomson com os raios catódicos nos tubos de vácuo concebidos por William Crookes (1832-1919) mostram, inequivocamente, que o átomo tem uma estrutura interna; portanto, ele não é o limite fundamental da matéria, como pensavam os atomistas gregos, em termos especulativos e filosóficos e, muito tempo depois, aqueles que, como John Dalton (1766-1844), alimentavam a mesma crença, com base em uma ciência que estabelece, em princípio, o “controle” da conjectura pelo “veredito” da experiência.

Desde Thomson, o elétron tem se mostrado uma partícula indivisível. Mas a máxima (não tão velha) de Antoine Lavoisier (1743-1794) de que a impossibilidade experimental da divisão de um elemento no presente não significa a inviabilidade desse processo no futuro não pode ser desconsiderada.

Entretanto, à luz da física contemporânea, não é correto caracterizar o conceito de partícula elementar como o de um ente quântico que não pode (experimentalmente) ser decomposto ou se transformar em outro(s). Primeiro, porque isso sugere colocar o conceito na dependência direta da observação, priorizando-se um empirismo que desconsidera a necessidade de um estreito e indispensável vínculo entre observação e teoria na elaboração de conhecimentos. O conceito de partícula elementar é dependente de uma teoria. Assim, de acordo com a mecânica quântica, por exemplo, uma partícula é elementar quando a função de onda a ela associada não é redutível à função de onda de outras partículas (ABDALLA, 2006, p. 26). Em segundo lugar, mas não menos importante, as partículas elementares da física atual não incorporam o conceito de imutabilidade. Elas podem ser transmutadas, e mesmo aniquiladas, através de suas interações fundamentais.

É claro, toda a área de estudo tem uma história. As partículas que surgiram na física a partir de 1930 – em pequeno número inicialmente, mas às dezenas logo em seguida –, foram todas consideradas ele-

mentares. Com a proposição teórica dos quarks, na década de 60, e o subsequente delineamento do modelo padrão, que categoriza as partículas (antipartículas) em quarks (antiquarks) e léptons (antiléptons), o número de partículas elementares (e suas correspondentes antipartículas) foi drasticamente reduzido.

Curiosamente, talvez, a primeira antipartícula, prevista teoricamente por Paul A. M. Dirac (1902-1984) em 1928, é a imagem espelho do elétron – o pósitron. Recorrendo-se à história da ciência, e guardadas as devidas proporções, tem-se uma ideia do que pode representar, em termos científicos, epistemológicos e ontológicos, a aceitação da negativa de um conceito para o desenvolvimento do conhecimento com os gregos do século V a.C., quando estes estabelecem como pilares da filosofia materialista a coexistência do átomo (“o ser”) e do vazio (o “não ser”) (CARUSO, 1997). De fato, o aparecimento da antimatéria na física vai ensejar um entendimento mais claro do próprio conceito de matéria.

Para perscrutar o átomo, o físico experimental necessita energia. De modo geral, a ejeção de elétrons pela matéria nos experimentos controlados realizados no final do século XIX envolvia energias muito pequenas, de poucos elétrons-volts. Investigações mais detalhadas da estrutura atômica demandavam energias muito maiores. A descoberta da radioatividade natural deu um novo alento à pesquisa científica, ao propiciar aos laboratórios projéteis com energias superiores a vinte milhões de elétron-volts.

O intrigante problema de explicar a fonte da energia emitida pelos elementos radioativos encontrou na relação massa-energia de Einstein uma solução eficaz: as substâncias emissoras irradiam energia à custa de perda de massa. Assim como a mecânica quântica, também a relatividade é essencial no estudo das estruturas atômicas e subatômicas.

Os experimentos de sondagem do interior do átomo por Ernest Marsden (1889-1970) e Hans W. Geiger (1882-1945), com partículas α emitidas por átomos radioativos, ensinaram a Rutherford (1871-1937) entender que a massa do átomo está concentrada em uma diminuta região central de um imenso espaço vazio, e a propor um modelo atômico em 1911. Alguns anos depois, bombardeando átomos de nitrogênio com partículas α , Rutherford obtém isótopos 17 do átomo de oxigênio e núcleos de hidrogênio, fazendo história na física ao realizar a primeira reação nuclear.

Já nas primeiras décadas do século passado estava claro que o núcleo atômico era uma estrutura complexa. A coexistência de prótons e nêutrons no núcleo, o surgimento de novas partículas e as tentativas iniciais de compreensão do decaimento beta e das forças nucleares atestam isso.

Sujeito apenas a forças nucleares de curto alcance, pois sem carga elétrica não interage com os campos elétricos da matéria, o nêutron – seja como partícula teórica ou como um novo e eficiente projétil no laboratório – desempenhou um papel essencial na sondagem do núcleo, no entendimento da força nuclear forte, na geração de reações nucleares e na compreensão da fissão nuclear.

O estudo dos raios cósmicos e o aproveitamento das grandes quantidades de energia de seus constituintes foram essenciais para a detecção do pósitron, do múon, do pión e das partículas V . De fato, pouco tempo transcorre entre os experimentos realizados com o uso de balões por Victor Hess (1883-1964) em 1912 – para investigar uma radiação desconhecida, de grande capacidade de ionização e penetração na atmosfera terrestre – e a análise de chapas fotográficas expostas a raios cósmicos no Monte Chacaltaya, a 5200 m de altitude, realizada por Cesar Lattes (1924-2005), que resultaram na identificação do pión, em 1947. O pósitron (1933), o múon (1937) e as partículas V (1947) emergiram a partir de registros fotográficos de trajetórias de raios cósmicos em câmaras de nuvens.

Concomitantemente às descobertas dessas novas partículas, desenvolveram-se os aceleradores de partículas. Os primeiros aceleradores, operando com energias inferiores a 1 MeV, eram extensões de tubos de raios catódicos. Acelerando linearmente prótons em um tubo evacuado de 27 cm de comprimento, no Laboratório Cavendish, em 1932, John D. Cockcroft (1897-1967) e Ernest Walton (1903-1995) geraram partículas alfa pela desintegração de núcleos de uma amostra de lítio.

Apenas quinze anos depois, Cesar Lattes e Eugene Gardner (1913-1950) faziam uso dos 380 MeV do ciclotron de 184 polegadas de Berkeley para a detecção do méson π por meios artificiais.

Segundo D. Perkins (1997), o ano de 1947 foi uma espécie de divisor de águas para a física de partículas. Nos 50 anos anteriores a essa data, desde o descobrimento do elétron, os avanços nessa área da física foram significativos, mas lentos, pois a comunidade dos “físicos de partículas” era pequena, os detectores rudimentares e os recursos para

a pesquisa escassos. Perkins lembra do choque que teve quando viu seu primeiro artigo publicado em Bristol, sobre o decaimento pi-mu, assinado por quatro autores, quando o usual eram artigos redigidos por um, dois ou no máximo três autores.

As descobertas do pión em Bristol e das partículas V em Manchester impulsionaram a construção de novos e mais eficientes aceleradores e detectores de partículas. As energias obtidas com essas máquinas eram muito inferiores às conseguidas nos experimentos com raios cósmicos, mas a investigação sistemática do núcleo atômico, com um amplo controle de variáveis, em escalas de distâncias cada vez menores e com exigências de energias sempre crescentes, encontrou na construção e no aperfeiçoamento contínuo dos aceleradores e dos detectores de partículas as respostas esperadas.

Assim, já no começo da década de 1950, as colisões geradas pela aceleração de prótons, elétrons e pósitrons nos aceleradores de partículas produziram um impressionante aumento do número de hádrons, revelando a necessidade de se organizar o “zoológico subatômico”.

É dentro desse contexto que tem início uma nova ruptura conceitual na física, quando, em 1963, Murray Gell-Mann (1929-) – e também George Zweig (1937-), em trabalho independente – propõe que os hádrons são constituídos por partículas elementares chamadas quarks (Zweig as chamou de ases).

A introdução dos quarks implicava em não mais conceber o próton, o nêutron e um extenso número de outras partículas como elementares. Com carga elétrica fracionária, os quarks “mexiam” com uma outra ideia bem estabelecida dentro da física, a da carga do elétron como unidade elementar de carga. Não bastasse isso, essas partículas eram inacessíveis aos experimentos, pois jaziam “escondidas” no interior das partículas por elas constituídas. Tal como em outros episódios da história da física onde a desconstrução de uma parte significativa do conhecimento vigente é necessária para o estabelecimento de uma nova ordem, os quarks naturalmente enfrentaram resistências, tanto em termos conceituais, no âmbito da própria física, como epistemológicas, devido à presença de um não observável em uma teoria.

Mas o surgimento de novos constituintes fundamentais da matéria mostrou-se frutífero, e aos quarks up, down e strange de Gell-Mann logo vieram somar-se os quarks charm, bottom e top.

À luz da física atual, os constituintes fundamentais da matéria são léptons e quarks. É para eles que se deve transferir a intuição do velho indivisível grego formador de todas as coisas. Mas, não se deve nunca esquecer, o conhecimento é sempre provisório.

O texto “Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...” estrutura conteúdos divididos em cinco capítulos.

O capítulo 1 contextualiza historicamente a proposição teórica do pósitron, abordando aspectos conceituais e epistemológicos do trabalho de Paul Dirac. A partir de uma discussão sucinta sobre a situação da mecânica quântica relativística em 1926, introduz-se a equação de Dirac para o elétron livre, explorando a interpretação que o próprio Dirac dá aos estados de energia negativa de sua teoria.

A identificação experimental do pósitron por Carl D. Anderson (1905-1991) ilustra mais um caso de “descoberta acidental” na ciência. Independentemente das divergências epistemológicas suscitadas por essa afirmação, o certo é que, no âmbito da física, os estudos de Anderson ressaltam a importância dos raios cósmicos e da linha de investigação conduzida em câmaras de Wilson, sob intensos campos magnéticos.

No capítulo 2 aborda-se a introdução do próton por Rutherford, a transmutação induzida artificialmente e a sequência de estudos que levam à descoberta do nêutron, por James Chadwick (1891-1974), em 1932. Discute-se ainda a radioatividade artificial e a fissão nuclear. A concessão do Prêmio Nobel de Química, em 1944, a Otto Hahn (1879-1968), por sua “descoberta dos núcleos pesados”, exclui, injustificadamente, Lise Meitner (1878-1968) dessa honraria.

Outro caso (dos muitos que realmente existem) de injustiça na atribuição do Prêmio Nobel atinge o brasileiro Cesar Lattes, quando, em 1950, Cecil F. Powell (1903-1969) recebe esse prêmio pela descoberta do pión. O capítulo 3 aborda a contribuição de Lattes na detecção dessa partícula teórica, considerada a partícula mediadora da interação entre prótons e nêutrons, proposta por Hideki Yukawa (1907-1981), em 1935. O múon, detectado experimentalmente em 1937 por Carl Anderson, em colaboração com S. H. Neddermeyer (1907-1988), é parte dessa história, já que inicialmente se pensou ser esta a partícula de Yukawa.

Os conteúdos relativos ao capítulo 4 elucidam, mais uma vez, como o sentimento de conquista na física é pouco duradouro. A proliferação do número de hádrons tornou inevitável a busca de princípios ordena-

dores na física, tanto para classificar as novas partículas quanto para explicar por que certas reações ocorriam e outras não. Às conservações da massa-energia, do momento linear, do momento angular intrínseco e da carga elétrica, vieram somar-se muitas outras, como as conservações do número bariônico, da estranheza (nas interações regidas pela força nuclear forte e nas interações eletromagnéticas), do número leptônico do elétron, do número lepônico do múon, do número leptônico do tau.

A solução do enigma $\tau - \theta$ ressaltou os cuidados que se deve ter com as generalizações na ciência, pois a extensão, para as interações fracas, de uma lei de simetria espaço-tempo bem conhecida pelos físicos, válida para interações regidas pela força eletromagnética e pela força nuclear forte, mostrou-se incorreta. De fato, não há conservação da paridade no âmbito dos processos dominados pela interação fraca. Conforme ressaltava o físico chinês Chen Ning Yang (1922-) (YANG, 1957), não deixa de ser intrigante que se tenha acreditado nessa conservação, por tanto tempo, sem o devido aval da experiência.

O capítulo 5 introduz os multipletos de Gell-Mann, abordando certos paralelismos entre o sistema classificatório de partículas introduzido por esse físico e o sistema periódico proposto por Dmitri Mendeleev (1834-1907). A proposição dos quarks, por Gell-Mann, é seguida de uma discussão sobre o quantum da interação eletromagnética e os *quanta* da interação forte. Nessa trajetória de estudos, chega-se à unificação de duas forças fundamentais da natureza: a força eletromagnética e a força nuclear fraca.

6.2 Estrutura geral e divisão dos conteúdos

Para melhor clareza da estrutura organizacional do texto “Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...”, lista-se a seguir o seu sumário:

Introdução

Uma (mais uma vez) nova e surpreendente física	1
Referências Bibliográficas	5

1. Da formulação teórica à identificação do pósitron

1.1 Sobre métodos em física teórica.....	8
1.2 Sobre a busca por uma mecânica quântica relativística em 1926	12
1.3 A equação de Dirac para o elétron livre	14
1.4 Raios cósmicos	20
1.5 A descoberta “acidental” do pósitron	22
1.6 Revisitando Heisenberg: o movimento de uma partícula em uma câmara de nuvem e o papel do observável em uma teoria científica	26
1.7 Referências Bibliográficas	27

2. Da transmutação à fissão nuclear

2.1 Um velho sonho dos alquimistas: a transmutação induzida artificialmente.....	30
2.2 A descoberta do nêutron	33
2.3 A radioatividade artificial	37
2.4 A fissão nuclear	39
2.5 Referências Bibliográficas	44

3. Novas forças e partículas na física

3.1 O que mantém o núcleo atômico coeso? A proposição teórica de Yukawa.....	48
3.2 O múon.....	51
3.3 Cesar Lattes e a descoberta do pión	54
3.4 Sobre a Conferência Nobel de Cecil Powell.....	59
3.4 Referências Bibliográficas	63

4. A proliferação hadrônica e novas leis (regras) de conservação

4.1 Partículas V	66
4.2 Um sentimento de conquista pouco duradouro	67
4.3 Partículas estranhas, antipartículas, novas leis (regras) de conservação.....	70
4.4 A conservação do número leptônico (do elétron, do múon, do tau)	75
4.5 Outras leis de conservação	79
4.6 O enigma $\tau-\theta$ e a violação da paridade nas interações fracas	81
4.7 Referências Bibliográficas	83

5. Sobre os quarks de Gell-Mann, Nambu...

5.1 Prelúdio aos quarks: os multipletos de Gell-Mann (e Ne'eman).....	86
5.2 Quarks.....	89
5.3 O <i>quantum</i> da interação eletromagnética	95
5.4 Os <i>quanta</i> da interação forte.....	97
5.5 A unificação das interações fraca e eletromagnética.....	101
5.6 Referências Bibliográficas	103

6.3 Objetivos da aprendizagem

A seguir, especificam-se os objetivos referentes à aprendizagem de cada capítulo do texto “Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...”.

Capítulo 1

- Descrever como Paul Dirac caracteriza o envolvimento de um físico teórico com o seu trabalho, na conferência que profere em 1968 sob o título *Métodos em física teórica*, analisando, com exemplos, o “procedimento experimental” frente a uma nova área de investigação e o “procedimento teórico” em relação a uma área de investigação consolidada.
- Enunciar a síntese de H. Kragh sobre a situação da mecânica quântica com relação à relatividade em 1926.
- Discutir as soluções de energia negativa da equação de Dirac para o elétron livre.

- Apresentar a relevância dos trabalhos de Victor Hess no estudo dos raios cósmicos.
- Analisar a descoberta “acidental” do pósitron.

Capítulo 2

- Expressar a reação envolvida na primeira transmutação induzida artificialmente, analisando a importância a ela conferida por Rutherford.
- Apresentar objeções físicas à partícula nuclear proposta por Rutherford à Royal Society, em 1920.
- Discutir o contexto da descoberta do nêutron, dos problemas suscitados pela radiação penetrante identificada nos experimentos de Bothe, à conjectura e aos experimentos de Chadwick, que corroboram a existência de um novo componente do núcleo atômico.
- Discorrer sobre a transmutação artificial, a partir dos experimentos realizados por Irène e Frédéric Joliot-Curie.
- Analisar a contribuição de Lise Meitner na descoberta da fissão nuclear.

Capítulo 3

- Caracterizar qualitativamente a proposição teórica de Yukawa para a interação entre dois núcleons, a partir de uma analogia com o *modus operandi* da força eletromagnética, à luz da eletrodinâmica quântica.
- Esclarecer que dificuldades tornaram irreconciliável a identificação do méson com a partícula de Yukawa.
- Explicar por que múons produzidos por raios cósmicos na alta atmosfera chegam à superfície terrestre se o tempo de vida médio dessas partículas, em seu referencial, é de 2,2 milissegundos.
- Dissertar sobre a contribuição de Cesar Lattes para a descoberta do píon, tanto na natureza quanto na detecção dessa partícula por meios artificiais.

Capítulo 4

- Contrastar os problemas e o impulso que a descoberta das partículas V trouxe à física.

- Analisar a importância dos aceleradores para a física nuclear, em um primeiro momento, e para a física de partículas, ou física das altas energias, logo em seguida.
- Apreciar criticamente a divisão das partículas em léptons e hádrons, e desses últimos em mésons e bárions.
- Enunciar e exemplificar a conservação do número leptônico do elétron, do número leptônico do múon e do número leptônico do tau.
- Discutir o enigma $\tau-\theta$ e a violação da paridade nas interações fracas.

Capítulo 5

- Explicitar semelhanças e diferenças entre o sistema de classificação dos elementos formulado por Mendeleev e as estruturas propostas por Gell-Mann, que agrupam partículas em famílias (octetos, decupletos).
- Caracterizar as quatro forças fundamentais da natureza e as partículas mensageiras dessas forças.
- Representar, através de um diagrama de Feynman, a) a troca de um fóton virtual entre dois elétrons e b) a troca de um glúon virtual entre dois quarks.
- Discutir a unificação das interações fraca e eletromagnética.

7 Sobre continuidades e descontinuidades no conhecimento científico: uma discussão centrada na perspectiva kuhniana



7 Sobre continuidades e descontinuidades no conhecimento científico: uma discussão centrada na perspectiva kuhniana

Este capítulo foi extraído de: PEDUZZI, L. O. Q. Sobre continuidades e descontinuidades no conhecimento científico: uma discussão centrada na perspectiva kuhniana. In: SILVA, C. C. (Org.) **Estudos de história e filosofia das ciências**: subsídios para aplicação no ensino. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. cap. IV, p. 59-83.

7.1 O termo revolução: origem, significado e analogias

Quando se fala em *revolução*, seja no domínio das ciências ou na esfera dos acontecimentos sociais e políticos, relaciona-se hoje esse termo a uma mudança radical, de considerável magnitude, que denota ruptura ou quebra de continuidade com aquilo que é familiar e usual, e que vinculada a uma expressiva inovação traz consigo uma nova perspectiva de mundo (científica e/ou ideológica e/ou social).

A palavra *revolução* tem sua origem na ciência. Contudo, curiosamente o emprego desse termo pelos gregos antigos nada tinha de “revolucionário”. Utilizado para referenciar (como ainda é hoje) o movimento de rotação de um corpo em torno de um outro corpo ou ponto “fixo”, objetivava, tão somente, exprimir a constância ou regularidade de um fenômeno – daí se falar na *revolução* de um planeta em sua órbita.

A associação de uma mudança científica de vulto nos padrões de pensamento vigentes à ideia de uma *revolução*, com conotação em muitos sentidos análoga àquela que altera em parte, ou mesmo por inteiro, o compasso da vida social, econômica e política de um povo, começa

a surgir entre os estudiosos durante o século XVIII. Antes de 1700, como ressalta o historiador da ciência I. B. Cohen (1983, p. 61), não há referências específicas a “revoluções” nas ciências. Até essa época, e a partir do século XI, com o resgate da herança grega, preservada pelos árabes, muitos cientistas criativos viam-se como redescobridores do pensamento antigo. Assim, mesmo produzindo por vezes inovações substanciais no conhecimento não as elegiam (ou tinham suas obras vistas por seus pares) como contribuições que pudessem “abalar” a ordem científica estabelecida.

Uma clara menção a uma revolução, com significado de mudança radical, aparece na obra de Bernard de Fontenelle (1657-1757), *Elements de la géométrie de l'infini*, publicada em 1727. Nesse trabalho, Fontenelle considera que a invenção do cálculo infinitesimal por Newton e Leibniz (coinventor independente), e o seu desenvolvimento subsequente por renomados matemáticos, “introduziu um nível de simplicidade nunca antes sonhado, com o que se iniciou uma revolução quase total nas matemáticas” (FONTENELLE apud COHEN, 1983, p. 62). Um pouco mais adiante (em 1747), Clairaut, estudioso francês, em um trabalho intitulado *Du système du monde dans les principes de la gravitation universelle*, afirma que os *Principia* de Newton (publicação de 1687) assinalavam a época de “uma grande revolução na física” (CLAIRAUT apud COHEN, 1983, p. 63).

Essas duas citações à obra de Newton, que em conjunto destacam com propriedade e oportunismo os aspectos revolucionários do conteúdo físico e do formalismo matemático de seu trabalho, contribuíram para dar corroboração ao significado de um novo termo na ciência, ao apontarem as profundas modificações que irremediavelmente se processam na esfera científica com a entrada em cena de um conhecimento genuinamente original e relevante.

Ainda no século XVIII, aparecem outras referências a trabalhos científicos inovadores ou revolucionários, como os de Copérnico e de Descartes. Contudo, talvez a mais significativa seja a de Lavoisier, que em 1773 qualifica como revolucionário seu próprio programa de pesquisa. *A revolução química: Lavoisier*, publicada em 1890 por M. Berthelot, fixou a expressão *revolução química* nos anais da história da ciência (BERTHELOT apud COHEN, 1983, p. 66-67).

O termo *revolução*, enfim, como expressão de um avanço original e significativo do pensamento científico, começa definitivamente a fazer parte do vocabulário dos cientistas e dos filósofos. A primeira visão de conjunto das conquistas intelectuais do século XVIII, *A brief*

retrospect of the eighteen century, de Samuel Miller, publicada em 1803, ilustra isso através de seu subtítulo, bastante sugestivo: *uma busca das revoluções e avanços na ciência, nas artes e na literatura durante este período*. Ao procurar explicar a frequência e rapidez das revoluções científicas, a resposta que Miller encontra,

[...] resulta bastante moderna, pois viu a principal causa disto na emergência do que hoje chamamos uma comunidade científica. Assinala, em particular, “a extraordinária difusão do conhecimento”, “o grande número de investigadores e experimentadores existentes” e, sobretudo, “o grau de intercâmbio sem precedentes de que desfrutavam os científicos”, que possibilitava “a completa e rápida investigação de toda a nova teoria” [...] [Para Miller], o século XVIII foi, fundamentalmente, a época do intercâmbio literário e científico. (COHEN, 1983, p. 67-68).

Contudo, a caracterização de um feito científico como revolucionário não isenta de um alto grau de subjetividade quem o analisa. Daí a discordância entre cientistas, historiadores e filósofos da ciência sobre esse tema. Isso ocorre, em boa parte, devido à ausência de parâmetros (pela própria dificuldade em estabelecê-los) que confirmam maior objetividade a esse tipo de julgamento.

Há, sem dúvida, episódios na ciência que se constituíram em marcos na história do pensamento científico. São contribuições que extrapolaram as suas próprias áreas de atuação, como as promovidas por Copérnico, Newton, Darwin e Einstein. No que concerne a esses saltos no conhecimento, ainda hoje desfrutam de boa aceitação os critérios estabelecidos pelo historiador da astronomia J. S. Bailly, no século XVIII, para o julgamento de revoluções científicas. Segundo ele, revoluções de grande envergadura na ciência envolvem dois estágios bem característicos: “primeiramente se produz uma revolta capaz de destruir o sistema científico aceito; em seguida se introduz algo novo para ocupar o seu lugar” (BAILLY apud COHEN, 1983, p. 65).

De acordo com Bailly, como se observa, não se pode falar de uma revolução cartesiana ou de uma revolução galileiana porque as contribuições de Descartes e de Galileu ficaram basicamente restritas ao primeiro estágio, já que é somente com Newton que eclode uma nova filosofia natural.

Ao lado dessas maxirrevoluções – que encontram na sociedade o seu paralelo nas grandes revoluções, como a francesa e a russa – há uma

miríade de mini ou microrrevoluções científicas que atingem, em sua essência, apenas uma parcela dos profissionais de determinada área do conhecimento, ou ainda, de forma um pouco mais ampla, certos segmentos de diferentes ramos da ciência. Cabe aos cientistas diretamente envolvidos em cada uma dessas situações, de acordo com as especificidades de suas áreas de pesquisas, julgarem a pertinência, os efeitos e o grau das novidades que surgem e afetam seus campos de trabalho.

A descoberta dos raios X pelo físico alemão W. C. Röntgen, em 1895, revolucionou o estudo das radiações, dando novos e importantes desdobramentos à pesquisa nessa área da física. A possibilidade de “fotografar o invisível” com essa radiação, como mostrava a chapa que registrava a estrutura óssea de uma mão, apresentada à Academia de Ciências de Paris, sinalizava à comunidade médica aplicações promissoras relacionadas a esse novo conhecimento. Já para os astrônomos, os raios X nada tinham de revolucionário, pois não se mostravam relevantes às suas pesquisas.

Um novo instrumento pode também desencadear efeitos revolucionários, inclusive em larga escala. Isso foi, por exemplo, o que ocorreu com o telescópio. Construído e apontado para o céu por Galileu, esse instrumento mostrou que o cosmo aristotélico estava longe de exibir a propalada “perfeição” e imutabilidade preconizada pelo “mestre daqueles que sabem”, agitando os filósofos e astrônomos da época que tinham no heliocentrismo de Copérnico uma alternativa desafiadora e teoricamente viável ao sistema de Ptolomeu. Para espanto e incredulidade dos aristotélicos e das pessoas em geral, observavam-se através de suas lentes montanhas e crateras na superfície lunar, manchas no Sol, fases em Vênus, quatro corpos a girar em torno de Júpiter e uma quantidade de estrelas muito maior do que aquela percebida a olho nu.

A resistência à introdução do novo demanda, certamente, o convencimento pela argumentação, mas também a coerção pela força, em muitas situações. O elemento da novidade e o fenômeno da conversão, a ela ligado, apresentam-se como traços característicos e comuns a revoluções científicas e revoluções políticas.

A novidade que um conhecimento científico ou uma proposta revolucionária traz consigo associa-se à ideia de que uma nova história, uma nova sucessão de fatos e eventos, que geram expectativas e promessas de novos desafios, está para desdobrar-se. Conexões ou ligações entre o novo e o velho são comuns na ciência; nas revoluções políticas esses laços são mais frágeis.

Uma característica marcante de uma revolução política é a violência física que invariavelmente está ligada à tomada do poder. Insuperáveis divergências mantidas por grupos políticos, acentadas em concepções muito diferentes de sociedade, acabam instaurando processos de disputa em que o acesso e a conversão ao novo resultam impostos pela força.

As revoluções na ciência, naturalmente, não envolvem violência física. No entanto, uma grande revolução científica pode exibir um padrão de ações similar à derrubada física de um governo. Isso ocorre quando os partidários da nova teoria ou do programa de pesquisa emergente, em busca de adesão e convencimento, desenvolvem, por exemplo, uma série de atos que visam o controle da imprensa científica, do sistema educacional e dos assentos de poder (onde se partilham recursos e elaboram políticas de pesquisa, educacionais, etc.).

A consolidação da obra de Newton *Philosophiae naturalis principia mathematica*, em um ambiente dominado pelos cartesianos, ilustra isso. Além da própria crítica que Newton fez à teoria dos vórtices, base da cosmologia cartesiana, articulou-se todo um conjunto de ações com o claro objetivo de “facilitar” a aceitação dessa nova estrutura conceitual pela comunidade científica. Entre essas ações, pode-se citar:

- a dedicação, por Newton, da primeira edição dos *Principia* à Royal Society e seu patrono, o rei James II;
- a divulgação da nova ciência em aulas populares;
- as críticas dirigidas principalmente às obras cartesianas;
- a redação de livros em conformidade com os preceitos do novo espírito científico;
- a substituição paulatina, nas principais universidades, de professores escolásticos e cartesianos por newtonianos ortodoxos (por influência do próprio Newton);
- a eleição de Newton como presidente da Royal Society.

Contudo foi somente em meados do século XVIII, e particularmente no que se refere ao cenário internacional, que a obra de Newton firmou raízes profundas e definitivas. Ao comentar, de uma forma um tanto quanto dramática, que tinham sido necessários mais de 50 anos

para que a teoria gravitacional reunisse seguidores fora da Inglaterra, o matemático e filósofo Pierre Maupertuis (1698-1759), um dos principais responsáveis pela introdução da física newtoniana na França (foco das maiores resistências a Newton), assim se expressa:

Ela [a teoria da gravitação] permaneceria encerrada em sua ilha; ou, se atravessava o mar, não parecia mais que a reprodução de um monstro que fora proscrito; aplaudia-se tanto o ter-se banido da filosofia as qualidades ocultas, e tinha-se tanto medo de que elas ressuscitassem, que tudo o que aparentemente se assemelhasse com elas intimidava. (MORENO, 1988).

7.2 Ciência acumulativa x ciência descontínua: a perspectiva kuhniana do desenvolvimento científico

A problemática das revoluções na ciência traz à discussão uma questão bastante complexa, cuja resposta abriga profundas diferenças entre cientistas, historiadores e filósofos da ciência. Como, afinal, progride o conhecimento científico? De forma contínua e cumulativa ou através de saltos que evidenciam discontinuidades, como parecem sugerir as revoluções, em seus diversos graus, para aqueles que nelas acreditam?

Para George Sarton, fundador da revista *Isis*, em 1913, e editor por muitos anos desse conceituado periódico americano publicado pela Sociedade de História da Ciência, é falsa a primeira impressão de que a ciência avança em passos gigantes, como os que são necessários à subida dos altos degraus de uma escadaria, em que cada patamar atingido representa uma conquista associada a uma descoberta essencial. Segundo ele, “à medida que detalhamos nossa análise vemos que os grandes passos se subdividem em pedaços menores e estes em outros ainda menores, até que finalmente parecem se anular em seu conjunto” (SARTON apud COHEN, 1985, p. 22).

Nesse sentido, o escrutínio de uma história que busca esclarecer e mesmo enfatizar a contribuição de todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para o incremento gradual do conhecimento mostra-se de grande relevância aos que defendem implícita ou explicitamente a concepção de ciência cumulativa.

A caracterização da ciência como um empreendimento eminentemente coletivo é igualmente importante para os partidários do crescimento da ciência por descontinuidades. A ênfase dada à contribuição individual é que difere da anterior. Dentro da corrente revolucionária, é basicamente no sentido de se gerarem condições propícias para o surgimento de maxi ou minirrevoluções que viabilizem a síntese ou reestruturação de ideias que se insere a célula básica do trabalho individual.

O livro *A estrutura das revoluções científicas*, de Thomas S. Kuhn (1987), publicado originalmente em 1962, é um marco dentro da história e da filosofia da ciência. Nessa obra, Kuhn critica de um lado a filosofia empírico-indutivista da ciência e de outro a historiografia tradicional, que atribui à produção do conhecimento um desenvolvimento linear e cumulativo.

Para Kuhn, constructos teóricos incompatíveis com a ciência atual, como a dinâmica aristotélica, a química do flogístico e a termodinâmica do calórico, não são acientíficos porque foram descartados. Ao apreciar a integridade e os valores de uma ciência no curso da sua história, Kuhn mostra o quanto é insustentável a defesa do conceito de desenvolvimento por acumulação.

De acordo com Kuhn, a ciência progride através de uma sequência de períodos de *ciência normal*, onde o desenvolvimento é cumulativo, alternados por períodos de *crise-revolução*, durante os quais ocorrem profundas mudanças conceituais. Antes de uma ciência em particular estruturar-se como um paradigma do conhecimento, ela passa por um período denominado de *pré-ciência* (Figura 7.1).

Na pré-ciência, diferentes indivíduos ou grupos de indivíduos confrontados com a mesma classe de fenômenos dão a eles explicações distintas, orientados por pressupostos teóricos incompatíveis entre si. A competição científica é intensa, pois não pode haver consenso entre visões de mundo divergentes e antagônicas. Com o triunfo de uma das escolas deste período pré-paradigmático, as discordâncias desaparecem, em grau considerável, pois a vencedora dos debates não precisa explicar todos os fatos contra os quais se defronta. A definição clara e rígida de um campo de estudos assegura aos que com ele se identificam o ingresso a uma etapa estável de trabalho.

Os períodos de ciência normal caracterizam-se pela adesão da comunidade científica a um paradigma – conjunto de definições, con-

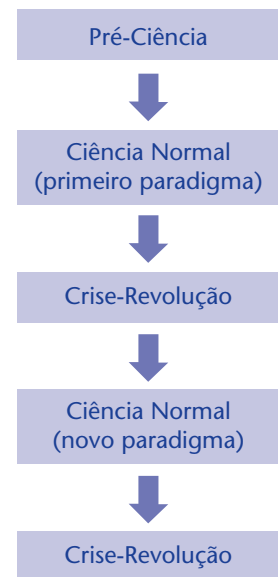


Figura 7.1 - O progresso da ciência, segundo Kuhn.

ceitos, leis, modelos, teorias, instrumentais, valores, etc., partilhados pelos praticantes de uma especialidade científica, que viabiliza “relativa abundância de comunicação profissional” e “unanimidade de julgamentos”.

O paradigma define o campo de trabalho do cientista e orienta a sua pesquisa, mostrando-lhe os problemas passíveis de investigação e a natureza das soluções aceitáveis. A postura acrítica em relação aos pressupostos básicos do paradigma nos períodos de ciência normal é não apenas necessária como fundamental para a sua articulação e aperfeiçoamento. É o “compromisso profundo com a tradição” que faz o cientista “postular a teoria corrente como a regra de seu jogo”, que leva a natureza a ser objeto de investigação “com uma profundidade e de uma maneira tão detalhada que de outro modo seria inimaginável” (CARVALHO, 1989, p. 85). A confiança no paradigma é tão grande que o fracasso em resolver problemas é culpa do cientista (por falhas de interpretação, aplicação incorreta de técnicas e métodos, etc.) e não do corpo conceitual corrente. “Uma vez que o paradigma é propriedade coletiva, ele goza de certas imunidades, tem existência duradoura e não perde facilmente a sua credibilidade.” (KUHN, 1987, p. 125).

Contudo, a pesquisa científica normal invariavelmente traz à tona problemas teóricos e/ou experimentais relevantes que se mostram resistentes à solução, mesmo quando neles se envolvem pesquisadores de reconhecida competência e prestígio. Descobertas e invenções também podem gerar situações e resultados não previstos. Quando fatos como esses ocorrem, o meio científico se agita e se instala um período de crise. O equacionamento da crise revigora o paradigma e faz voltar a confiança da comunidade no seu referencial de pesquisa. Por outro lado, a sua persistência e aumento, com a presença de novas situações sem solução, faz com que leis e conceitos fundamentais sejam criticamente examinados. A crise se aprofunda e se apresenta como irreversível quando surge um paradigma rival, que além de resolver os mesmos problemas que o paradigma dominante apresenta solução para as suas anomalias e faz novas previsões passíveis de teste. A adoção do novo paradigma pela comunidade científica, em substituição ao anterior, caracteriza o que Kuhn denomina de uma *revolução científica*.

Revoluções científicas, em geral, representam “episódios de desenvolvimento não cumulativo nos quais um paradigma mais antigo é total ou parcialmente substituído por um novo, incompatível com o anterior.” (KUHN, 1987, p. 125).

Consubstanciada a mudança de referencial conceitual, estabelece-se um novo período de ciência normal e toda uma conjuntura de trabalho a ela inerente, na visão kuhniana.

A crise que (segundo Kuhn) necessariamente precede a revolução científica igualmente se faz presente no processo que culmina com a deflagração de uma revolução política, permitindo o estabelecimento de uma nova analogia entre ambas. Conforme Kuhn,

[...] as revoluções políticas iniciam-se com um sentimento crescente, com frequência restrito a um segmento da comunidade política, de que as instituições existentes deixaram de responder adequadamente aos problemas postos por um meio que ajudaram em parte a criar. De forma muito semelhante, as revoluções científicas iniciam-se com um sentimento crescente, também seguidamente restrito a uma pequena subdivisão da comunidade científica, de que o paradigma existente deixou de funcionar adequadamente na exploração de um aspecto da natureza cuja exploração fora anteriormente dirigida pelo paradigma. Tanto no desenvolvimento político como no científico, o sentimento de funcionalismo defeituoso, que pode levar à crise, é um pré-requisito para a revolução. (KUHN, 1987, p. 126).

Do lado político, “a não existência de uma estrutura suprainstitucional neutra e competente” para julgar os pleitos e as visões de sociedade de grupos antagônicos e em competição, conjugada à radicalização de ideias e propostas que de um lado defendem a manutenção do *status quo* e de outro propõem mudanças radicais, torna impossível o diálogo e a busca do entendimento. Surge, então, o conflito e a luta que glorificam um e fazem sucumbir o outro.

No campo da ciência, a escolha entre dois paradigmas em competição, incomensuráveis entre si por representarem diferentes modos de ver e entender a natureza, está longe de se constituir em uma tarefa trivial aos praticantes de uma especialidade científica. Isso ocorre, fundamentalmente, face à inexistência de regras ou critérios isentos de julgamento. Por conseguinte, no debate que se estabelece entre os defensores de diferentes paradigmas, cada grupo fundamenta a sua discussão segundo critérios atrelados a seu próprio referencial conceitual. Dessa forma, procedem de maneira bastante semelhante àquela em que se empenham os partidários de instituições políticas rivais na defesa de suas teses. Como argumenta Kuhn,

[...] colocar um paradigma como premissa numa discussão destinada a defendê-lo pode, não obstante, fornecer uma mostra de como será a prática científica para todos aqueles que adotarem a nova concepção da natureza. Esta mostra pode ser imensamente persuasiva, chegando muitas vezes a compelir à sua aceitação. Contudo, seja qual for a sua força, o *status* do argumento circular equivale tão somente ao da persuasão. (KUHN, 1987, p. 128).

Conforme se vê, a comunidade científica desempenha um papel de enorme importância na ciência kuhniana, tanto na definição “de certos modelos de produção intelectual a seus membros” nos períodos de ciência normal, como no julgamento de teorias concorrentes, em um período de ciência extraordinária. Termos como *fracasso individual*, *crise*, *persuasão*, *convencimento*, *consenso*, etc., pertencentes ao vocabulário kuhniano, mostram claramente que para Kuhn o entendimento da produção e do desenvolvimento da ciência passa por considerações que extrapolam o domínio exclusivo da razão científica. Como bem coloca Oliva, “a ciência em Kuhn não pode ser entendida como pura *episteme*, já que constitui uma atividade também envolvida com a *erística*, isto é, com o desenvolvimento de técnicas de convencimento em situações de conversão.” (OLIVA, 1994).

No pós-fácio da edição de 1969 de *A estrutura das revoluções científicas*, Kuhn sugere uma “saída” para a questão da incomensurabilidade entre paradigmas rivais. Procurando racionalizar o debate, menciona ser possível o envolvimento de protagonistas pertencentes a diferentes paradigmas em uma situação de tradução recíproca. Segundo ele, “o que resta aos interlocutores que não se compreendem mutuamente é reconhecerem-se uns aos outros como membros de diferentes comunidades de linguagem e a partir daí tornarem-se tradutores.” (KUHN, 1987, p. 248).

A “tradução” tem início com a identificação e o isolamento de áreas de dificuldades na comunicação científica. Os interlocutores, em seguida, recorrem aos vocabulários cotidianos que lhes são comuns, em um esforço para elucidar ainda mais seus problemas. A seguir, cada um empenha-se em tentar descobrir o que o outro veria e diria em determinadas situações. Com o tempo, começam a prever bastante bem o comportamento recíproco. Durante esse empreendimento fazem uso de padrões de comparação de teorias que transcendem aos paradigmas. Alguns desses valores referem-se às qualidades de uma boa teoria, tais como precisão, consistência, amplitude de aplicação, simplicidade e fertilidade. No fim do processo, cada um terá aprendido a traduzir para a sua própria linguagem a teoria do outro. Pelo menos

é isso que espera Kuhn. Como ele destaca, “a tradução, quando levada adiante, é um instrumento potente de persuasão e conversão, pois permite aos participantes de uma comunicação interrompida experimentarem vicariamente alguma coisa dos méritos e defeitos recíprocos.” (KUHN, 1987, p. 249).

Sem dúvida, a “tradução” contribui para racionalizar a disputa paradigmática, mas também não se pode deixar de assinalar que por maior que sejam as provas que se possam acumular em favor do novo paradigma ele não se imporá no cenário acadêmico se os candidatos à sua aceitação não acreditarem na promessa de seu sucesso. Como já foi dito, o que deve ficar claro, em última instância, é que a conversão de um cientista a um novo paradigma não pode ser forçada racionalmente, justamente pelo fato de compreender muito mais do que o mero entendimento no campo puramente formal das relações conceituais. De qualquer forma, a *incomensurabilidade* inicial de Kuhn transforma-se em *incompatibilidade*, porque há tradução. E isso viabiliza a mudança paradigmática.

7.3 A matriz disciplinar kuhniana e seus elementos

Ao examinar como o conhecimento científico é transmitido de uma geração de profissionais para a seguinte, Kuhn destaca o que para ele é uma das características mais importantes da educação científica: o fato desta educação estar baseada quase que exclusivamente em *manuais* especialmente escritos para o estudante.

O aparente acordo, entre os cientistas, sobre o que o futuro profissional deve saber explica o seu uso na educação científica, ao invés de uma combinação eclética de originais de investigação. Antes do surgimento desses manuais eram grandes obras, como a *Physica*, de Aristóteles, o *Almagesto*, de Ptolomeu, os *Principia* e a *Óptica*, de Newton, a *Química*, de Lavoisier, que, implícita ou explicitamente e por algum tempo, definiam os problemas legítimos e os métodos de investigação para sucessivas gerações de praticantes.

Como “veículos pedagógicos destinados a perpetuar a ciência normal”, os manuais da educação científica apresentam as generalizações simbólicas, os modelos e os exemplares partilhados pelos membros da comunidade científica. No posfácio de 1969 de *A estrutura das revoluções científicas*, Kuhn procura deixar claro o significado desses

A sala de aula e os manuais científicos (livros de texto) ainda são, sem dúvida, as principais fontes de divulgação do conhecimento científico para o aluno. Textos de divulgação científica (livros e revistas), programas educativos (televisão, multimídia), feiras e clubes de ciência, etc. representam outras formas de manifestação desse conhecimento, mas certamente de menor expressão em relação às duas primeiras.

conceitos integrantes de sua matriz disciplinar – “*disciplinar* porque se refere a uma posse comum aos praticantes de uma disciplina particular; *matriz*, porque é composta de elementos ordenados de várias espécies, cada um deles exigindo uma determinação mais pormenorizada.” (KUHN, 1987, p. 226).

As *generalizações simbólicas* são as expressões empregadas sem discussão ou dissensão pela comunidade científica, pontos de apoio essenciais para os problemas que a comunidade se propõe a investigar. Elas se apresentam na forma de relações matemáticas (como as equações de Maxwell e a equação de Schrödinger), ou em sentenças (por exemplo, o calor nunca passa espontaneamente de um corpo de menor temperatura para outro de maior temperatura). Expressam tanto leis da natureza como definições (a quantidade de movimento de um corpo é o produto da massa do corpo pela sua velocidade).

Os *modelos* fornecem à comunidade as analogias e metáforas aceitáveis (o átomo como um sistema solar em miniatura, as moléculas de um gás como pequeninas bolas de bilhar movendo-se ao acaso).

Os *valores* mostram-se particularmente úteis na avaliação das crises e julgamentos de formas incompatíveis de ver o mundo, de praticar uma ciência. Eles também propiciam aos especialistas de uma área a sensação de fazerem parte de uma comunidade científica mais ampla.

Embora os valores sejam amplamente compartilhados pelos cientistas e este compromisso seja ao mesmo tempo profundo e constitutivo da ciência, algumas vezes a aplicação dos mesmos é consideravelmente afetada pelos traços da personalidade individual e pela biografia que diferencia os membros do grupo. (KUHN, 1987, p. 230).

Julgamentos sobre a acuidade e o domínio de abrangência de uma teoria são mais ou menos consensuais, mas questões envolvendo aspectos relativos à simplicidade, amplitude, plausibilidade podem abrigar divergências significativas (“uma teoria pode ser mais acurada, mas menos coerente ou plausível que outra”). A dependência de fatores subjetivos não diminui a importância dos valores partilhados por uma comunidade em geral, muito pelo contrário.

Já os *exemplares* constituem

[...] as soluções concretas de problemas que os estudantes encontram desde o início de sua educação científica, seja nos labo-

ratórios, exames ou fim dos capítulos dos manuais científicos... Mais do que os outros tipos de componentes da matriz disciplinar, as diferenças entre conjuntos de exemplares apresentam a estrutura comunitária da ciência. (KUHN, 1987, p. 232).

Exemplares como a máquina de Atwood, o plano inclinado, o pêndulo cônico, o oscilador harmônico, no paradigma newtoniano, ou o potencial degrau, o poço de potencial, o oscilador harmônico, o átomo de hidrogênio, na mecânica quântica, ensejam ao futuro cientista a articulação das generalizações simbólicas e dos modelos, a análise das soluções possíveis, a prática indispensável ao engajamento na ciência normal.

Kuhn ressalta a rigidez da educação científica formal, que inicia dogmaticamente o aluno em uma tradição preestabelecida de resolver problemas, à qual ele não é convidado e não está preparado para apreciar. Depois de apresentadas as soluções concretas dos problemas que a profissão aceita como exemplares, a tradição exige o envolvimento do estudante em tarefas de resolução de problemas, seja usando lápis e papel ou servindo-se do laboratório, de acordo com a técnica de apresentação dos assuntos nos manuais didáticos e laboratórios. (KUHN, 1979, p. 58). “Resolver problemas é aprender coisas relevantes a respeito da natureza. Na ausência de tais exemplares, as leis e teorias anteriormente aprendidas teriam pouco conteúdo empírico.” (DELIZOICOV, 1991, p. 43). Como ressalta Kuhn,

Normalmente, o cientista é um solucionador de *puzzles* como um jogador de xadrez, e a adesão induzida pela educação é o que lhe dá as regras do jogo que se pratica no seu tempo. Na ausência delas, ele não seria um físico, um químico ou o que quer que fosse aquilo para o qual fora preparado. (KUHN, 1979, p. 55-56).

7.4 Críticas à epistemologia de Kuhn

A ausência de critérios lógicos para análise e julgamento científico de paradigmas concorrentes, conjugada à importância dada aos *valores* de uma comunidade científica, suscitou muitas críticas a Kuhn, que se viu acusado de promover uma imagem irracional do debate científico.

Para Imre Lakatos, por exemplo, a crise kuhniana “é um conceito psicológico”, “um pânico contagioso”, pois não há causas racionais para o seu aparecimento. A falta de padrões supraparadigmáticos que

viabilizem a apreciação e o julgamento de paradigmas que disputam a hegemonia do conhecimento no contexto científico torna a transferência dos membros de um referencial conceitual a outro, “um efeito de adesão de última hora”, ou “uma conversão mística que não é nem pode ser governada por regras racionais”. Assim, Lakatos considera a revolução científica kuhniana como irracional, como uma “questão de psicologia das massas”. (LAKATOS, 1979).

Karl R. Popper, de seu lado, argumenta que é sempre possível o diálogo e a discussão crítica entre pessoas situadas em diferentes referências conceituais. A concepção de que as suas linguagens são mutuamente intradutíveis não passa de um dogma e se constituiu em uma expressão clara de irracionalismo. Ele ressalta que pode haver dificuldades no entendimento entre interlocutores de diferentes paradigmas, chegando a admitir que uma revolução científica se assemelha, com frequência, a uma conversão religiosa, “mas isso não quer dizer que não possamos avaliar crítica e racionalmente nossos pontos de vista anteriores à luz de novos fatos.” (POPPER in LAKATOS; MUSGRAVE, 1979).

Popper também rejeita a postura acrítica do cientista em um período de ciência normal. Para ele, as teorias científicas devem ser objeto de um permanente questionamento, pois não há outro modo de aferir o valor de uma teoria a não ser submetendo-a a contínuas tentativas de refutação. O cientista popperiano deve ter ousadia nas conjecturas e austeridade nas refutações.

Mesmo com divergências profundas, Popper se alia a Kuhn na defesa de importantes teses dentro da filosofia da ciência. Ambos, por exemplo, defendem e realçam o “embricamento íntimo e inevitável” entre teoria e observação, posicionando-se contrariamente à generalização indutivista da ciência.

Na visão de Popper, a substituição de uma teoria T_A por outra, T_B , demanda que T_B :

- a) conflite com T_A , isto é, que contradiga essa teoria em aspectos relevantes (por exemplo, questionando a validade de seus fundamentos);
- b) conduza a resultados tão bons quanto os produzidos por T_A nos pontos onde essa teoria é bem-sucedida.

Dessa forma, se na competição que se estabelece entre duas teorias concorrentes a vencedora for a “nova”, esta incorpora a anterior como um caso particular.

No âmbito da física, como se sabe, a transformação de Lorentz se reduz à transformação de Galileu para velocidades pequenas comparadas à da luz. Nesse sentido, não há maiores dificuldades em se mostrar que no limite de $v/c \rightarrow 0$ a energia cinética e o momento relativísticos, por exemplo, resultam em suas correspondentes expressões clássicas. Estas e outras *reduções* matemáticas, exploradas acriticamente em livros-textos e de divulgação científica, em particular, acabam disseminando a ideia de que a mecânica newtoniana é incontestavelmente um caso particular da mecânica relativística.

Para Popper, isso de fato é o que acontece, já que se cumprem os critérios de conflito e de abrangência mencionados anteriormente. Isto é, ao mesmo tempo que a teoria da relatividade (incluindo suas duas versões, a restrita e a geral) contradiz a teoria newtoniana em aspectos relevantes, ela a contém como uma excelente aproximação no domínio de baixas velocidades e de campos gravitacionais fracos.

A interpretação kuhniana a essa mesma situação, contudo, diverge inteiramente da de Popper. A questão da incompatibilidade de paradigmas, que se evidencia em uma competição de teorias e que particularmente transparece com toda a intensidade em uma revolução científica, deixa isso claro.

À luz de seus compromissos de pesquisa, cientistas em diferentes paradigmas veem os fenômenos naturais de forma distinta, considerando como relevantes e significativas questões e problemas que via de regra pouco ou nada possuem em comum. Desse modo, onde Galileu e Newton viam um pêndulo no movimento de oscilação de uma pedra amarrada à extremidade de um barbante, um aristotélico observava um obstáculo ao movimento natural da pedra para o seu lugar natural (cada interpretação, nitidamente, pressupõe um referencial teórico); a ação não explicada a distância, admitida pelos newtonianos, era desprezada e considerada como não científica pelos cartesianos; massa e energia, tão profundamente relacionadas na mecânica relativística, são tidas como grandezas físicas independentes e sujeitas cada qual a uma lei de conservação distinta dentro da mecânica newtoniana.

Assim, é o próprio Kuhn quem pergunta: **a dinâmica newtoniana pode realmente ser derivada da dinâmica relativística? A que**

se assemelharia essa derivação? A sua resposta, em essência, é a seguinte:

Imaginemos um conjunto de proposições E_1, E_2, \dots, E_n , que juntas abarcam as leis da teoria da relatividade [...] Para demonstrar a adequação da dinâmica newtoniana como um caso especial, devemos acrescentar aos E_i proposições adicionais, tais como $(v/c)^2 \ll 1$, restringindo o âmbito dos parâmetros e variáveis. Esse conjunto ampliado de proposições é então manipulado de modo a produzir um novo conjunto N_1, N_2, \dots, N_m , que na sua forma é idêntico às leis de Newton relativas ao movimento, à gravidade e assim por diante. Desse modo, sujeita a algumas condições que a limitam, a dinâmica newtoniana foi aparentemente derivada da einsteiniana [...]. Todavia [continua Kuhn] tal derivação é espúria [...]. A menos que modifiquemos as definições das variáveis dos N_i , as proposições que derivamos não são newtonianas. Se as mudamos, não podemos realmente afirmar que *derivamos* as leis de Newton, pelo menos não no sentido atualmente aceito para a expressão “derivar”. (KUHN, 1987, p. 135-136).

Exemplificando o ponto de vista kuhniano: segundo a mecânica relativística, a medida de um objeto é menor na direção do movimento. Isto, como se sabe, não é previsto na mecânica clássica. Que significado físico tem, então, a redução matemática da expressão relativística

$l = l_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ para $l = l_0$, quando $(v/c)^2 \ll 1$? Ou, similarmente,

afirmar que a massa de um corpo $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ adquire um valor que independe da velocidade no domínio $(v/c)^2 \ll 1$?

Matematicamente, quando se exclui termos de uma série por serem considerados muito menores do que outros, tem-se como resultado tão somente uma aproximação, e não a manutenção rigorosa de uma igualdade. Isto, por si só, já questiona as inferências acima. Sem dúvida, uma maior ou menor aproximação ao tratamento de determinada situação física é função de diversos fatores (instrumentos de medidas, técnicas disponíveis, etc.), mas, em última instância, é ela que determina o grau de precisão dos resultados alcançados. Nesse contexto, dois observadores, um einsteiniano e outro newtoniano, que se propusessem a medir a massa de um corpo em diversas situações de movimento (no domínio da mecânica clássica) poderiam chegar a resultados idênticos, ou seja, concluir que a massa não depende da velocidade. Contudo, suas interpretações à evidência experimental seriam diferentes, baseando-se cada um em seu constructo teórico.

Enquanto o observador newtoniano se dá por satisfeito com os resultados da experiência, o einsteiniano tem consciência de que a não detecção do efeito previsto se deveu à utilização de instrumentos com um grau de precisão aquém daquele demandado pela teoria. Ou seja, apesar de numericamente idênticos, os dados, para cada observador, referem-se a grandezas físicas distintas.

De acordo com a estrutura conceitual da mecânica relativística, a massa de um corpo *depende* da sua velocidade relativamente a um dado observador. Da mesma forma, no referencial relativístico, verifica-se a contração de um objeto na direção do movimento – que não é absoluta, como pensavam FitzGerald e Lorentz, mas relativa, ou seja, ela depende do referencial utilizado nas medições (OSTERMANN; RICCI, 2002). Para pequenas velocidades, esses dois efeitos relativísticos podem não ser macroscopicamente perceptíveis, mas, o que é importante, *não deixam de existir*.

Dessa forma, é falho o argumento “reducionista” baseado na cadeia “adicionando-se à proposição relativística E_j , a condição $(v/c)^2 \ll 1$, resulta a proposição newtoniana N_k ”, pois N_k continua a ser uma proposição pertencente ao domínio relativístico.

A massa, a energia, o momento, o espaço, o tempo, etc. da teoria da relatividade são conceitos que apenas mantêm a mesma nomenclatura que os seus equivalentes clássicos. Fisicamente são diferentes, porque pertencem a realidades físicas diferentes. Como ressalta Kuhn, “precisamente por não envolver a introdução de objetos ou conceitos adicionais, a transição da mecânica newtoniana para a einsteiniana ilustra com particular clareza a revolução científica como sendo um deslocamento da rede conceitual através da qual os cientistas veem o mundo.” (KUHN, 1987, p. 137).

7.5 Implicações para o ensino: uma pergunta e várias respostas, ao final de uma disciplina de evolução dos conceitos da física

Em qualquer discussão sobre como se desenvolve o conhecimento científico, as ideias de Thomas S. Kuhn exercem um forte fascínio sobre o estudante, particularmente através de seu conceito de revolução científica. Contudo, face à não existência de uma disciplina específica sobre a filosofia da ciência nas grades curriculares dos cursos de física

Disciplina obrigatória tanto para alunos da licenciatura como do bacharelado, que a cursam em conjunto; com quatro créditos, tem Estrutura da Matéria I como pré-requisito; em 2004, foi cursada por 30 alunos.

em geral, abordagens preliminares deste e de outros autores, como contraponto ao amplo predomínio da visão empírico-indutivista e de outras concepções distorcidas do conhecimento científico nos livros-textos, podem, naturalmente, apresentar limitações.

Alguns equívocos conceituais e, em certos casos, a surpreendente adesão à visão cumulativa do conhecimento por alunos da disciplina “[Evolução dos Conceitos da Física](#)” (FSC 5602) do curso de Física da Universidade Federal de Santa Catarina, no segundo semestre de 2004, constituem um exemplo. Denotou-se os cuidados didáticos que o tema demanda a partir das respostas escritas dos alunos a uma questão (ou problema aberto) formulada por um dos estudantes quando se avaliava sugestões para a composição da “prova final” da disciplina. A pergunta proposta, e aceita, foi “O conhecimento evolui ou é substituído?”, devendo a análise ser ilustrada com exemplos.

Parafraseando Étienne Klein (D’ESPAGNAT; KLEIN, 1993), o aluno VAC situa a pergunta “no rol das mais interessantes”, por considerar que “ela é mais adequada do que qualquer resposta que se possa dar”, entendendo e explicitando a sua essência, que nada tem de trivial. Nesse sentido, e para evitar ambiguidades, diversos estudantes demarcaram o significado dos termos envolvidos na pergunta. Foi majoritária a ideia de *substituição* como “abandono por inteiro”; “algo totalmente novo que toma completamente o lugar do conhecimento anterior”, como escreve TK; que envolve “colocar em lugar de, trocar algo ou alguma coisa por outra, mudar ou deslocar”, conforme registra MRS a partir de um dicionário escolar da língua portuguesa. Já o conceito de *evolução*, bem mais sutil no seu detalhamento, encerra a ideia de “algo que apenas incrementa qualidade no que já era conhecido (sem abandonar as principais concepções)”, conforme TK; ou “progresso paulatino e contínuo a partir de um estado inferior ou simples para um superior, mais complexo ou melhor”, como expressa LHMA, fazendo uso do dicionário Michaelis.

O pormenor da análise transcende os objetivos do presente capítulo. Contudo, mesmo correndo o risco de ser incompleto ou superficial na elaboração de uma síntese, procura-se, a seguir, exprimir a riqueza conceitual, as potencialidades e as limitações das respostas dos estudantes, bem como as hipóteses que o estudo levanta para novas pesquisas.

Foi tão interessante quanto intrigante constatar que vários alunos da licenciatura buscaram na filosofia da ciência a justificativa de suas

respostas. Apesar de haver menções a Popper, Bachelard, Lakatos e Feyerabend, o autor mais citado foi Kuhn. Essa preocupação não esteve presente entre os estudantes do bacharelado (com uma única exceção). Na disciplina de “Evolução dos Conceitos da Física”, além de menções pontuais a esses autores, houve um confronto específico entre Popper e Kuhn ao se examinar a questão proposta, e amplamente discutida em sala de aula, sobre se a mecânica newtoniana é ou não um caso particular da mecânica relativística. Assim, esse contraste epistemológico entre os dois grupos deve-se em princípio a discussões efetuadas sobre esses autores em outros segmentos do curso de Física, mais especificamente na disciplina Instrumentação para o Ensino da Física I, obrigatória apenas para alunos da licenciatura (sexto semestre). Possivelmente, a história da física e o enfoque não empirista conferido à disciplina de Evolução também tenham contribuído para consubstanciar, através de exemplos, alguns conceitos já estudados (a análise de quatro diferentes interpretações do trabalho de Galileu (ZYLBERSZTAJN, 1988), “o empirista”, “o herdeiro da física medieval”, “o platonista” e “o manipulador de ideias”, é um exemplo).

No caso de FSC 5602, para muitos estudantes (especialmente os do bacharelado), uma articulação mais efetiva de conceitos da filosofia da ciência com a história da física parece demandar discussões mais específicas dentro da própria disciplina ou, o que certamente seria desejável, estudos prévios de alguns autores, com o devido grau de profundidade. Para os alunos da licenciatura, inclusive, isso evitaria alguns equívocos constatados em relação à filosofia kuhniana, como, ficando restritos ao conceito inicial de incomensurabilidade de Kuhn, considerar que não há diálogo entre defensores de diferentes paradigmas (LHMA, AAL), ou não entender que o conhecimento é cumulativo em um período de ciência normal (MAB). Esses erros – conjugados a uma interpretação errônea da mudança paradigmática, associada a uma “substituição com esquecimento”, do ponto de vista histórico – acabaram levando estudantes (conscientemente ou não) a uma visão cumulativa do conhecimento:

Conforme JS, as rupturas, como sugere Kuhn, existem, mas isso não significa que o conhecimento anterior não tenha, de algum modo, sido útil (exemplifica fazendo considerações relativas à mecânica clássica e à relatividade restrita):

[...] os modelos anteriores [servem] de inspiração, de base, nem que [seja] para serem refutados...[Se dissermos] simplesmente que a ciência é substituída quando este ou aquele modelo não

mais representa as nossas aspirações, estaremos ignorando o passado [...].

O conhecimento evolui, ou seja, ele nunca é substituído completamente, sempre se aproveita alguma parte do conhecimento adquirido anteriormente, podendo ser substituída apenas a parte que por ventura apresentar alguma anomalia. (AAL)

Mas se os erros alertam para cuidados e correções, os acertos dos alunos estimulam.

O estudante RRS menciona que a atividade científica desenvolve-se em um meio sociocultural bem estruturado, destacando o conceito de quebra-cabeças na ciência normal, o papel das anomalias não resolvidas, as revoluções no desenvolvimento científico e a relevância da comunidade científica na avaliação de teorias. Como exemplos de troca paradigmática, cita a mecânica clássica, que põe fim à visão aristotélica de mundo (caracterizando-se como um modelo do fazer científico), e a ruptura da nova física do século XX com a física clássica.

Para ALM, em determinados momentos o conhecimento evolui, em outros é substituído. Como exemplo de evolução, menciona o aperfeiçoamento de uma ideia comum a todos os sistemas astronômicos da Antiguidade: o movimento circular uniforme. Isto é, não sendo possível descrever os movimentos dos planetas por um único círculo, a busca de combinações de movimentos circulares, segundo certos arranjos geométricos, com o objetivo de salvar as aparências orientou o trabalho de cientistas como Apolônio de Perga e Hiparco de Nicéia, que, entre outros, apresentaram contribuições significativas à estruturação do sistema ptolomaico, no século I.

De maneira supreendente, talvez, conforme ressalta ALM, se o foco do problema for deslocado do círculo para o modelo, quando se examinam diferentes modelos, como o do fogo central de Filolau, o de Heraclides de Pontos, o de Aristarco de Samos e o de Aristóteles, e a aceitação que tiveram, tem-se clara a ocorrência de um processo de substituição.

Fazendo algumas considerações sobre Kuhn, ALM conclui corretamente que “durante um período de ciência normal encontram-se aprimoramentos das teorias, o que indica evolução do conhecimento”. Para ilustrar a complexidade da questão formulada, que pode encerrar diferentes pontos de vista, afirma que:

Assim como em um único borrão várias pessoas podem ver figuras diferentes, ou ainda, em uma mesma imagem certas pessoas veem uma mulher idosa e outras pessoas veem uma mulher jovem, algumas pessoas observam uma passagem histórica como sendo evolutiva e outras como sendo substituída. Por exemplo, há quem prefira pensar que o modelo de átomo vem sendo substituído desde Demócrito, passando por Dalton, Rutherford, Bohr até a atual ideia de *quarks*. Enquanto que outros pensam que esta é a linha evolutiva do modelo atômico. Assim como há aqueles que veem Galileu como empirista e outros que [o] veem como platonista.

Entre os alunos do bacharelado, as opiniões igualmente se dividem.

O título do texto em que DNS examina a questão deixa claro o seu posicionamento: “Uma visão evolutiva da formação do conhecimento científico”. Para ele, a aparente falta de linearidade no processo de desenvolvimento da ciência manifesta-se apenas quando se tem uma visão limitada, de pequena escala, dele. Neste sentido, deve-se buscar apoio na história da ciência para se ter uma visão mais abrangente e completa.

A afirmação de que realmente ocorreu uma substituição do sistema ptolomaico pelo copernicano é enganosa, “pois mesmo sendo estes modelos aparentemente antagônicos, podemos enxergá-los como uma evolução”. Mencionando uma citação que diz que “[Copérnico] fez uso de técnicas e dispositivos matemáticos de que se valeu Ptolomeu para a estruturação de seu sistema”, argumenta que não se pode considerar esse processo como o de uma mera substituição, “pois não é o refinamento de certas partes, a rejeição e conservação de outras que faz a evolução do todo?” Assim, as órbitas de Kepler podem ser consideradas como uma evolução do sistema copernicano, no qual as órbitas circulares são substituídas por órbitas elípticas.

O aluno vê no atomismo mais um exemplo que corrobora a sua tese:

O átomo é talvez um dos conceitos que mais sofreu mudanças bruscas dentro da física. Nasceu como um átomo rígido e indivisível com Leucipo e Demócrito, passando mais tarde a ser constituído de um núcleo central rodeado de calórico por Dalton, até chegar aos modelos mais modernos como o de Rutherford e o de Bohr. Em cada passo, rumo ao conhecimento moderno do átomo, podemos visualizar uma evolução. Não existe uma “substi-

tuição” total de um modelo pelo outro, pois algumas concepções acabam sendo incorporadas pelos novos modelos. Apesar dos contrastes com a visão quântica do átomo, dizer que as ideias de Leucipo e Demócrito foram substituídas seria esquecer a sua grande contribuição a esta teoria que é o próprio conceito de átomo, ou seja, a ideia de que a matéria não é contínua.

Analogamente, o aluno AMZ considera que o conhecimento evolui porque é sempre possível encontrar resquícios de uma teoria ultrapassada em sua sucessora. Perguntado sobre se é possível dizer que a teoria de Einstein *herda* o conceito de massa da mecânica newtoniana, responde que sim. E ressalta: “isso de maneira alguma iguala os dois conceitos. Para Einstein massa é um conceito bem mais refinado do que para Newton, mas com certeza o primeiro trabalhou em cima do conceito do segundo para elaborar suas próprias ideias”. E conclui:

“Dado um conjunto completo de características C1 de uma teoria T1, cronologicamente anterior a outra T2, que por sua vez é composta por um conjunto completo de características C2, então diz-se que:

- T2 evolui de T1 se C2 herda de C1.
- T2 substitui T1 se o caso anterior não se aplica.”

Até mesmo a cinemática de Galileu baseia-se em conceitos aristotélicos, como, por exemplo, velocidade, trajetória, etc. A mecânica quântica, dita tão inovadora e revolucionária, baseia-se completamente em termos como *hamiltoniana* e variáveis conjugadas, como *momentum-posição*, *tempo-energia*, etc. Como sabemos, esses conceitos são usados na mecânica hamiltoniana. Óbvio está também que os conceitos quânticos são bem mais refinados dos que os pensados por Hamilton, mas isso não invalida a correspondência entre as duas teorias. Portanto, para mim, o conhecimento sofre uma lenta evolução, que talvez depois de muito tempo possa até parecer uma substituição, mas que, analisado com mais cuidado, não é.

Com perfil kuhniano, EFJ diz que o pensamento, assim como uma teoria, não se edifica a partir do nada, “porém isto não significa que novas teorias surjam de um processo evolutivo. Há um momento em que uma teoria necessita ser substituída. Um momento em que os aprimoramentos não são suficientes para que ela tenha sucesso”. Como exemplo, diz que a mecânica quântica “vem em substituição a toda a física clássica, eliminando algo fundamental até então, o conceito de *trajetória*” [entre outros, certamente].

Já o estudante RFS acredita que a construção do conhecimento pode se dar tanto de forma gradual (“evoluir a partir de uma concepção, transformar-se, modelos podem ser melhorados a fim de explicar satisfatoriamente os fatos observados”), como passar por quebras bruscas das concepções vigentes (“com o objetivo de dar conta de novos fenômenos observados”). Ilustra o primeiro caso com a síntese maxwelliana

e o segundo com a dualidade onda-partícula. Assim, “observa-se que ora as concepções da época servem de base para o desenvolvimento de modelos, e portanto o conhecimento evolui; ora são necessárias rupturas dessas concepções para ser capaz de explicar fatos ainda obscuros, e tem-se, por isso, substituição do conhecimento”.

Citando Heisenberg, quando este se refere à mecânica quântica, o aluno MDA escreve: “quando nos metemos em um campo novo como esse, [...] se é obrigado a usar sempre os conceitos antigos; uma vez que não existem outros conceitos [...]”. Contudo, como diz mais adiante, “nunca se pode esperar chegar, por pequenos passos, cada vez mais perto da teoria real; a certa altura, um salto se torna obrigatório, os conceitos antigos têm mesmo que ser abandonados”. A condição para o avanço científico é, portanto, o abandono de velhos conceitos seguido de sua substituição por outros, por mais “estranhos”, ou contrários ao senso comum, que possam parecer. Menciona o princípio da incerteza e o novo conceito de partícula que, mesmo mantendo o nome, tem um significado bem distinto do clássico: “não se refere mais a um objeto minúsculo localizado no espaço, se torna agora um objeto teórico que possui uma distribuição de probabilidades de se localizar em vários pontos”.

A teoria de Newton para a luz (e a noção de “acessos” para explicar a difração, por exemplo) é mais um exemplo abordado, que mostra a complexidade dos caminhos conceituais da ciência e as diferentes interpretações que com frequência a sua análise suscita. Nesse caso, o aluno claramente discorda de Schenberg (mencionado em um dos textos estudados), que afirma ter Newton, de algum modo, vislumbrado a dualidade onda-partícula.

Assim, finaliza:

Se entendermos a palavra “evoluir” como um processo contínuo ou, nas palavras de Heisenberg, “passo a passo, não, o conhecimento não evolui, não se dá de forma contínua e ordenada. Ao contrário, há certos momentos em que se deve retornar as ideias abandonadas, e mesmo assim apenas para descobrir que o caminho é ainda mais estranho do que se pensava. Há certos momentos em que um conceito deve ser deixado de lado e outro posto em seu lugar, ou seja, o conhecimento deve ser substituído.

Alguns alunos apresentaram concepções distintas do padrão mais comumente concebido dos termos *evolução* e *substituição*, mas estas não serão aqui discutidas.

À guisa de conclusão, cabe (mais) uma pergunta: o que, afinal, as respostas dos alunos mostram ou sugerem? Sem dúvida, e acima de tudo, o exercício do espírito crítico, a análise fundamentada, que dá peso à estruturação dos argumentos e valoriza as divergências. Nesses termos, não há crédito, nem valor, para a simples opinião à luz do senso comum. Por outro lado, aderindo-se ao papel que Bachelard confere ao erro (não o leviano, não pensado, mas o que decorre do esforço consciente para a compreensão de algo) no aprendizado em geral, a superação dos equívocos em relação a conceitos da filosofia kuhniana e de outros autores é parte natural do processo de aquisição de conhecimentos, que certamente demanda tempo e (maior) reflexão.

O contato dos alunos do bacharelado (e mesmo da licenciatura) com a filosofia da ciência, ainda que restrito apenas a uma disciplina do currículo, como “Evolução dos Conceitos da Física” (ou similar), em muitos cursos pode contribuir para atenuar uma importante lacuna na formação desses estudantes. Para isso é indispensável que se atente para os percalços que o vínculo da história com a filosofia pode suscitar. O caminho é difícil, mas gratificante para os que nele se envolvem. A satisfação do professor e dos alunos com as discussões efetuadas na disciplina FSC 5602 mostra isso.

Referências

- ABDALLA, M. C. B. **O discreto charme das partículas elementares**. São Paulo: UNESP, 2006.
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.
- BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- _____. **O materialismo racional**. Rio de Janeiro: Edições 70, 1990.
- _____. **O novo espírito científico**. Lisboa: Edições 70, 1986.
- BACON, F. **Novum organum ou verdadeiras indicações acerca da interpretação da natureza**. 2. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1979.
- BASTOS, F. **História da ciência e ensino de biologia**. 1998. 212 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- BIZZO, N. M. V. História da ciência e ensino: onde terminam os paralelos possíveis? **Em Aberto**, v. 11, n. 55, p. 29-35, 1992.
- BOHR, N. **Sobre a constituição de átomos e moléculas**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1989.
- BURTT, E. A. **As bases metafísicas da ciência moderna**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 1991.
- BUTTERFIELD, H. **As origens da ciência moderna**. Rio de Janeiro: Edições 70, 1992. Original de 1949.
- CARR, E. H. **Que é história?** Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1982.
- CARUSO, F.; OGURI, V. A eterna busca do indivisível: do átomo filosófico aos *quarks* e léptons. **Química Nova**, v. 20, n. 3, p. 324-334, 1997.
- CARVALHO, M. C. M. A construção do saber científico: algumas posições. In: CARVALHO, M. C. M. (Org.). **Construindo o saber: técnica de metodologia científica**. Campinas: Papirus, 1989.
- CHALMERS, A. F. **O que é ciência, afinal?** São Paulo: Brasiliense, 1999.
- CHASSOT, A. Alquimia: na busca de um sincretismo. **Episteme**, v. 1, n. 1, p. 11-45, 1996.

COHEN, I. B. **Revolution in science**. Cambridge: Harvard University Press, 1985. parte 1, cap. 1.

_____. **La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas**. Madri: Alianza Editorial, 1983. cap. 2.

DE BROGLIE, L. O futuro da física. In: _____. **Para além da ciência**. Porto: Livraria Tavares Martins, 1958.

DELIZOICOV, D. **Conhecimento, tensões e transições**. 1991. Tese (Doutorado) –Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

DESCARTES, R. **Princípios da filosofia**. São Paulo: Rideel, 2007.

D'ESPAGNAT, B.; KLEIN, E. **Olhares sobre a matéria**. Lisboa: Instituto Piaget, 1993.

EINSTEIN, A. **A teoria da relatividade especial e geral**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

_____. **Escritos da maturidade**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1994. Original de 1956.

_____. **Notas autobiográficas**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982. Original de 1946.

FEYERABEND, P. **Contra o método**. Rio de Janeiro: F. Alves, 1977.

FEYNMAN, R. **O que é uma lei física?** Lisboa: Gradiva, 1989.

GALILEI, G. **O ensaiador**. São Paulo: Nova Cultural, 1996.

_____. **Carta a Cristina de Lorena y otros textos sobre ciencia y religión**. Madrid: Alianza Editorial, 1994.

GOWIN, D. B. **Educating**. Ithaca: Cornell University Press, 1981.

GUICCIARDINI, N. Newton: pai da física moderna. In: **Gênios da ciência**. São Paulo: Ediouro, 2005. (Coleção Scientific American Brasil).

HANSON, N. R. **Patrones de descubrimiento**: investigación de las bases conceptuales de la ciencia. Madrid: Alianza Editorial, 1985.

HEISENBERG, W. **A parte e o todo**: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

_____. **A imagem da natureza na física moderna**. Lisboa: Edição Livros do Brasil, 1980.

HOLTON, G. J. **Thematic origins of scientific thought**: Kepler to Einstein. Cambridge: Harvard University Press, 1995.

- HUYGENS, C. Tratado sobre a luz. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, 1986. Suplemento 4.
- INFELD, L. **Albert Einstein: a sua obra e a sua influência no mundo contemporâneo**. Lisboa: Publicações Europa-América, 1950.
- KOYRÉ, A. **Considerações sobre Descartes**. Lisboa: Editorial Presença, 1963.
- _____. **Estudos de história do pensamento científico**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1982.
- _____. **Estudos galilaicos**. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1986.
- KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva, 2000, 1987.
- _____. **A tensão essencial**. Lisboa: Edições 70, 1989.
- _____. A função do dogma na investigação científica. In: De DEUS, J. D. (Org.). **A crítica da ciência**. Rio de Janeiro: Zahar, 1979. p. 65-66.
- LAKATOS, I. **La metodología de los programas de investigación científica**. Madrid: Alianza, 1989.
- _____. O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica. In: LAKATOS, I.; MUSGRAVE, A. (Org.). **A crítica e o desenvolvimento do conhecimento**. São Paulo: Cultrix, 1979.
- LOPES, A. R. C. Bachelard: o filósofo da desilusão. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 13, n. 3, p. 248-273, 1996.
- _____. Contribuições de Gaston Bachelard ao ensino de ciências. **Enseñanza de las ciencias**, v. 11, n. 3, p. 324-330, 1993.
- MALIN, S. **A natureza ama esconder-se**. São Paulo: Horus, 2003.
- MASSONI, N. T. **A epistemologia contemporânea e suas contribuições em diferentes níveis de ensino de física: a questão da mudança epistemológica**. 2010. 404 f. Tese (Doutorado em Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- MCCLOSKEY, M. Intuitive physics. **Scientific American**, v. 248, n. 4, p. 114-122, 1983.
- MICHELSON, A. A.; MORLEY, E. W. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether. **American Journal of Science**, v. 34, n. 203, p. 333-341, 1887.

MOREIRA, M. A. **A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula.** Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2006.

MOREIRA, M. A.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino do método científico. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 10, n. 2, p. 108-117, 1993.

MORENO, M. Q. Principia mathematica: 300 anos. **Ciência Hoje**, v. 7, n. 41, p. 58-64, 1988.

NEWTON, I. **Principios matemáticos de la filosofía natural.** Madrid: Alianza Editorial, 1987a. Introducción y libro I.

_____. **Principios matemáticos de la filosofía natural.** Madrid: Alianza Editorial, 1987b. Libro II y libro III.

OLIVA, A. Kuhn: o normal e o revolucionário na reprodução da racionalidade científica. In: PORTOCARRERO, V. (Org.). **Filosofia, história e sociologia das ciências I: abordagens contemporâneas.** Rio de Janeiro: Fiocruz, 1994.

OSTERMANN, F; RICCI, T. F. Relatividade restrita no ensino médio: contração de Lorentz-FitzGerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. 2, p. 176-190, 2002.

PEDUZZI, L. O. Q. **Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana.** Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010a. 128 p.

_____. **Do próton de Rutherford aos quarks de Gell-Mann, Nambu...** Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010b. 104 p.

_____. **A relatividade einsteiniana: uma abordagem conceitual e epistemológica.** Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. 226 p.

_____. **Força e movimento: de Thales a Galileu.** Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008a. 160 p.

_____. **Do átomo grego ao átomo de Bohr.** Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008b. 202 p.

_____. Sobre continuidades e discontinuidades no conhecimento científico: uma discussão centrada na perspectiva kuhniana. In: SILVA, C. C. (Org.) **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. cap. IV, p. 59-83.

Força e movimento na ciência curricular. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 14, n. 2, p. 87-93, 1992.

PERKINS, D. The discovery of the pion in Bristol in 1947. **Ciência e Sociedade**, v. 32, 1997.

PIAGET, J; GARCIA, R. **Psicogênese e história das ciências**. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1987.

PLANCK, M. **Autobiografía científica y últimos escritos**. Madrid: Nivola Libros Ediciones, 2000.

POPPER, K. R. **Conjecturas e refutações**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 1982.

ROBILOTTA, M. R. **Construção e realidade no ensino de física**. São Paulo: IFUSP, 1985. p. iv-10.

SALTIEL, E.; VIENNOT, L. ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? **Enseñanza de las Ciencias**, v. 3, n. 2, p. 137-144, 1985.

SCHRÖDINGER, E. **A natureza e os gregos seguido de ciência e humanismo**. Lisboa: Edições 70, 2003.

SEBASTIA, J. M. Fuerza y movimiento: la interpretación de los estudiantes. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 2, n. 3, p. 161-169, 1984.

SEGRÈ, E. **Dos raios X aos quarks: físicos modernos e suas descobertas**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 1987.

STACHEL, J. (Org.). **O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 2001.

VOLTAIRE, F. M. A. de. **Elementos da filosofia de Newton**. Campinas: UNICAMP, 1996.

YANG, C. N. The law of parity conservation and other symmetry laws of physics (1957). **Nobel Lectures, Physics 1942-1962**, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1964. Disponível em: <http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1957/young-lecture.pdf>. Acesso em set. 2010.

WESTFALL, R. S. **A vida de Isaac Newton**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

WHITTAKER, E. **A history of the theories of aether and electricity. The modern theories 1900-1926**. New York: Dover, 1953.

ZANETIC, J. **Física também é cultura**. 1989. 252 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ZYLBERSZTAJN, A. Galileu: um cientista e várias versões. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 5, p. 36-48, 1988. Número especial.

_____. Concepções espontâneas em física: exemplo em dinâmica e implicações para o ensino. **Revista de Ensino de Física**, v. 5, n. 2, p. 3-16, 1983.