

*Instituto de Física/USP*

***EVOLUÇÃO DOS  
CONCEITOS DA FÍSICA***

**João Zanetic**

**São Paulo**

**1989**

**[2020]**

***Instituto de Física/USP***

# ***FMT405 – EVOLUÇÃO DOS CONCEITOS DA FÍSICA***

***Notas de Aula***

***1ª parte: Alguns tópicos de “filosofia” da ciência***

***2ª parte: Alguns tópicos de história da física***

**João Zanetic**

**São Paulo, 1989**

**[Edição revista e ampliada de 2020/  
com colaboração de Érika Regina Mozena]**

\*

**EDIÇÃO DIGITAL ORGANIZADA PELO**

**NÚCLEO PRÁXIS DE PESQUISA, EDUCAÇÃO POPULAR  
E POLÍTICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**



**NÚCLEO PRÁXIS**  
de PESQUISA, EDUCAÇÃO POPULAR e POLÍTICA  
da UNIVERSIDADE de SÃO PAULO

**[com base 1.<sup>a</sup> Edição Digital publicada em 2020 pelo Departamento  
de Física Experimental do Instituto de Física da USP]**

**2026**

\*

***REPRODUÇÃO GRATUITA***

# SUMÁRIO

***Apresentação (da versão revista em 2019-2020) – André Ferrer P. Martins***

## ***1ª parte***

### ***Alguns tópicos de “filosofia” da ciência***

Introdução geral

Capítulo 1: Filosofia ou “filosofia”

Capítulo 2: O método da indução

Capítulo 3: Da indução baconiana à crítica de Popper

Capítulo 4: Da refutação de Popper à revolução de Kuhn

Capítulo 5: O anarquismo epistemológico de Feyerabend

Capítulo 6: O novo espírito científico de Bachelard

Capítulo 7: A sociologia do conhecimento de Fleck

Capítulo 8: Observações quase finais

## ***2ª parte***

### ***Alguns tópicos de história da física***

Capítulo 1: Uma breve discussão sobre o que pode ser história

Capítulo 2: A física clássica em busca da solução de uma “catástrofe”

Anexo I – Derivação da lei de Kirchhoff

Anexo II – O desenvolvimento de Boltzmann

Capítulo 3: A radiação do corpo negro e o quantum de ação de Planck

Anexo III – Estudo de um oscilador harmônico nas paredes de um corpo negro

Anexo IV – Análise Combinatória

Capítulo 4: Dando um fecho nessa “história internalista” do surgimento do quantum

Capítulo 5: Uma verdadeira catástrofe nos manuais didáticos universitários

Capítulo 6: A física como instituição social – uma história externalista

*Instituto de Física/USP*

***FMT 405 - EVOLUÇÃO  
DOS CONCEITOS DA FÍSICA***

**1ª parte: Alguns tópicos de “filosofia” da ciência**

**Notas de aula-1ºsem./1999**

Fac-símile da capa original da brochura *Evolução dos conceitos da Física*  
[1ª parte], de João Zanetic, publicada em 1999.

# APRESENTAÇÃO

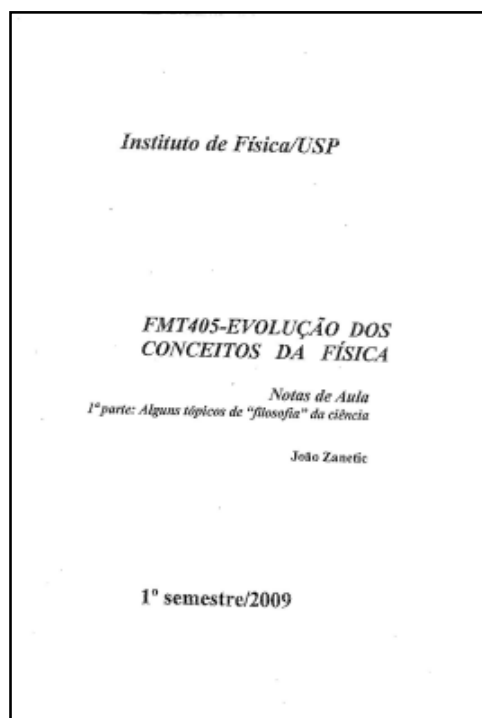
(da versão revista em 2019-2020)

Quem sabe nenhum texto possa ser considerado, de fato, acabado. Essa ideia se adéqua perfeitamente às *Notas de Aula* da disciplina de *Evolução dos Conceitos da Física* elaboradas pelo professor João Zanetic, do Instituto de Física da USP (Ifusp). Essas *Notas* encontram-se divididas em duas partes: a 1ª, destinada à Filosofia da Ciência, em que são apresentados diversos autores desse campo; e a 2ª, que versa sobre a História da Ciência com foco principal (mas não apenas) no problema da radiação do corpo negro. Quatro capítulos dessa 2ª parte foram escritos em colaboração com Érika Regina Mozena.

O componente curricular de *Evolução*, dos cursos de Licenciatura e Bacharelado em Física, foi ministrado em diversas oportunidades pelo professor João, como assim ele mesmo descreve na Introdução Geral à 1ª parte das *Notas*, voltada à Filosofia. Ao longo dos anos, o texto-base passou por uma série de modificações e acréscimos, refletindo o caráter inacabado desse material e a (sempre presente) vontade de aprimoramento de seu autor.

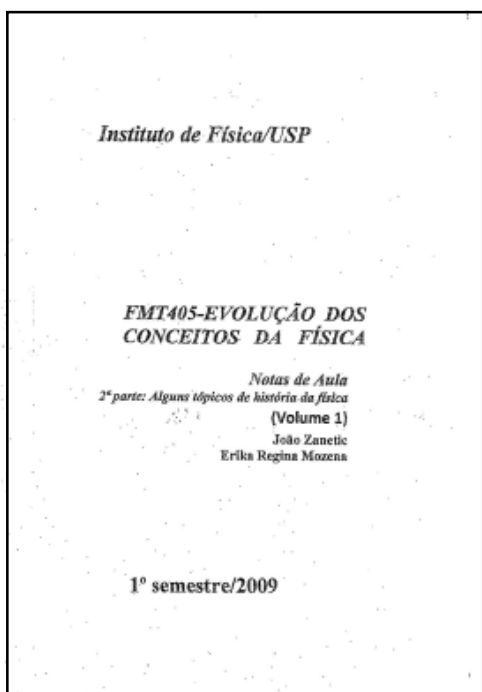
Para a maioria daqueles que foram seus estudantes nessa disciplina, creio haver uma lembrança e uma relação de afeto positivas com a experiência de ter contato com a temática da História e da Filosofia da

Física pela ótica zaneticiana. Assim como nem a História nem as escolhas filosóficas são neutras, era a abordagem e o olhar do João que tornavam o componente de *Evolução* tão significativo para aqueles que o cursavam.



Uma confluência de fatores propiciou que alguns de seus atuais e ex-orientandos se reunissem ao final de 2019 para, novamente, reler as *Notas de Aula* com o intuito de revisá-las visando sua publicação, quem sabe na forma de um e-book. A intenção era mais pretensiosa do que conseguimos atingir como resultado final, em parte devido à confluência (no caso, “influenza”!) de outros fatores, como a reviravolta nos modos de vida e trabalho imposta já em 2020 pela pandemia da COVID-19. Assim, chegamos a um produto (na forma de um arquivo em PDF) que permanece inacabado, quem sabe aguardando novas modificações e acréscimos. É esse o material que o leitor tem em mãos (ou: na tela!).

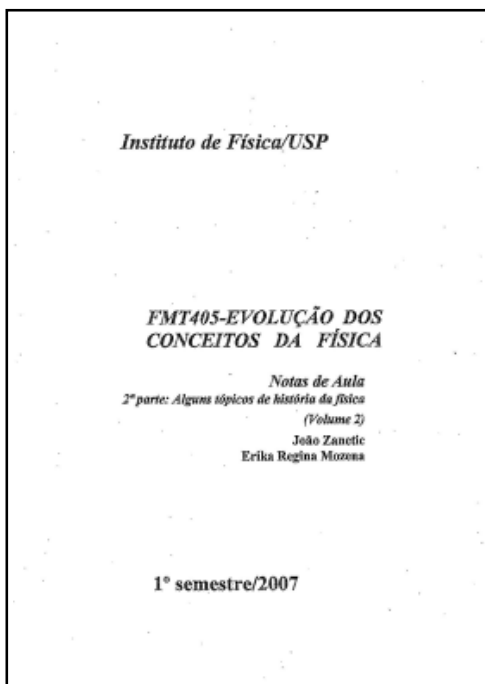
Desde o início não foi tarefa fácil debruçar-nos nesse texto, dada a relação de afetividade com o mesmo. A partir de um dado momento, optamos por considerá-lo em seu “valor histórico”, procurando manter suas características de estilo e formato. Nesse sentido, preservamos certos aspectos identificativos, ainda que não cumprissem as (famosas) “regras da ABNT”, tais como o recuo em citações literais, a forma de apresentação das referências, dentre outros. Outros aspectos de formatação foram modificados, procurando deixar o texto mais padronizado e agradável à leitura. Figuras foram acrescentadas na parte de Filosofia e atualizadas na parte de História. Algumas mudanças devidas à mais recente reforma ortográfica também foram realizadas.



Quanto ao conteúdo específico propriamente dito, as maiores modificações dizem respeito ao acréscimo de um capítulo na parte de Filosofia da Ciência – escrito por mim –, destinado à apresentação do pensamento de Ludwik Fleck, e a revisão cuidadosa das extensas notas de rodapé da parte de História, com referência ao problema da radiação do corpo negro, realizada por Maria Beatriz Fagundes.

As reuniões de trabalho (presenciais e virtuais) foram, ao longo desse processo, muito prazerosas e produtivas, ainda que a revisão em si fosse, muitas vezes, esquecida momentaneamente por nós mesmos. Novos questionamentos surgiram e o caráter atual e problematizador do material veio à tona. O próprio nome do componente (“*Evolução dos*”

*Conceitos da Física*”) não nos passou despercebido, principalmente, devido à mensagem que parece passar, que não se coaduna completamente com o conteúdo e as concepções de ciência trabalhadas no material. A presença do professor João tornou esse processo ainda mais significativo para todos.



Esperamos, enfim, que esse material, para além de seu valor histórico, seja útil a estudantes de licenciatura e bacharelado, a professores e futuros professores de física que apreciam e valorizam a História e a Filosofia da Ciência. O próximo passo promete ser uma nova revisão, com vistas à futura publicação em forma impressa ou eletrônica. Lá chegaremos!

André Ferrer P. Martins  
São Paulo, julho de 2020.

---

# **EVOLUÇÃO DOS CONCEITOS DA FISICA**

**- Notas de Aula -**

*(Versão revisada em 2019-2020)*

**1ª parte: Alguns tópicos de “filosofia” da ciência**

**João Zanetic / IFUSP**

## Índice

|                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Introdução geral .....</b>                                       | <b>02</b>  |
| <b>Capítulo 1: Filosofia ou “filosofia” .....</b>                   | <b>06</b>  |
| <b>Capítulo 2: O método da indução .....</b>                        | <b>18</b>  |
| <b>Capítulo 3: Da indução baconiana à crítica de Popper .....</b>   | <b>27</b>  |
| <b>Capítulo 4: Da refutação de Popper à revolução de Kuhn .....</b> | <b>40</b>  |
| <b>Capítulo 5: O anarquismo epistemológico de Feyerabend .....</b>  | <b>56</b>  |
| <b>Capítulo 6: O novo espírito científico de Bachelard .....</b>    | <b>69</b>  |
| <b>Capítulo 7: A sociologia do conhecimento de Fleck .....</b>      | <b>87</b>  |
| <b>Capítulo 8: Observações quase finais .....</b>                   | <b>100</b> |

## Introdução geral

*“O oposto de uma afirmação correta é uma afirmação incorreta. Contudo, o oposto de uma verdade profunda pode ser igualmente uma outra verdade profunda.”*

Niels Bohr <sup>1</sup>

A disciplina *Evolução dos Conceitos da Física*, presente nos cursos de licenciatura e bacharelado em física, oferecidos pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo (Ifusp), tem também a sua história. Diversos professores do Ifusp já foram responsáveis por ela em diferentes períodos.<sup>2</sup> Até a reforma universitária de 1971, que desmembrou a antiga Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras criando, entre outros, o Instituto de Física, ela se denominava *História da ciência*. Após a mudança do nome, com conteúdos, abordagens e ênfases variadas, essa disciplina continuou se constituindo num momento de reflexão sobre temas históricos e filosóficos dos cursos destinados à formação de professores e de pesquisadores em física.

Pelo menos dois livros foram publicados a partir das notas de aula utilizadas durante o oferecimento da disciplina, em 1966/67, por Jun'ichi Osada<sup>3</sup> e, em 1983, por Mário Schenberg (1914-1990)<sup>4</sup>. Esses dois livros muito contribuíram para a organização e exposição do conteúdo desta nova versão dessa disciplina.

---

<sup>1</sup> Frase do físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), Prêmio Nobel de física de 1922 e um dos grandes físicos que contribuíram na construção da teoria quântica. Citada por A. M. Nunes dos Santos na introdução do livro **Werner Heisenberg - Páginas de reflexão e auto-retrato**. Lisboa: Gradiva, 1990, p. 9.

<sup>2</sup> Com o risco de estar omitindo algum nome, lembro-me dos seguintes: Antonio F. T. Piza, J. Osada (de quem fui aluno exatamente nessa disciplina, em 1967), Newton Bernardes, Alberto Luiz da Rocha Barros, Mário Schenberg, Amélia Império Hamburger, Hugo Franco e eu próprio.

<sup>3</sup> Jun'ichi Osada. **Evolução das idéias da física**. São Paulo: E. Blücher e EDUSP, 1972. Este livro contém os seguintes capítulos: 1. Surgimento das ciências; 2. História do surgimento da física; 3. Evolução da física; 4. Surgimento da mecânica quântica; 5. Métodos da formação da física; 6. Método da teoria da relatividade; 7. Desenvolvimento da tecnologia e o progresso das ciências; 8. Nascimento da engenharia nuclear. Contém ainda um apêndice com um breve estudo sobre os diferentes campos em que está dividida a física contemporânea.

<sup>4</sup> Mário Schenberg. **Pensando a física**. São Paulo: Brasiliense, 1984. Este livro foi editado a partir da gravação das aulas proferidas por Mário Schenberg e contou com o trabalho de dezesseis professores e estudantes coordenados por Amélia Império Hamburger e José Luiz Goldfarb. O livro está organizado nas seguintes partes: Apresentação (Amélia Império Hamburger); Introdução (José Luiz Goldfarb); Física e matemática; Isaac Newton e criação da mecânica; Física e sociedade; Física matemática e experimental; Criação da física do campo; Teoria do calor, termodinâmica e mecânica estatística; Estrutura atômica e física quântica; Física do século XX e Perspectivas futuras.

Eu tive oportunidade de dar aulas de *Evolução* em quatro períodos, 1978/82, 1989/91, 1994/95 e 1999/2000, nascendo daí um conjunto de fascículos que animaram as aulas dos dois primeiros períodos.<sup>5</sup> Uma parte significativa do material desses fascículos constituiu a base de um novo conjunto de *Notas de Aula* que, em 2004, passou por uma nova revisão e ganhou novos acréscimos.

Comparando os dois livros de J. Osada e de M. Schenberg fica clara a diferença de abordagem e mesmo de escolha de tópicos entre os dois autores. Isso reflete a diferente perspectiva segundo a qual eles viam tanto a física quanto a história da física. Os diversos outros professores de *Evolução* também apresentaram diferentes visões da história da física e textos especialmente preparados para suas aulas. O professor Alberto Luiz da Rocha Barros (1930-1999), em particular, embora tenha apresentado diversas abordagens nas diferentes oportunidades em que ministrou essa disciplina, dava um destaque especial ao pensamento científico da Grécia antiga, utilizando como referência central o livro de Benjamin Farrington<sup>6</sup>.

O pouco tempo disponível nos cursos do Ifusp para a abordagem histórica e filosófica da física exigia que os docentes de *Evolução* fizessem uma seleção reduzida de temas de um universo temático bastante amplo, vindo daí uma das razões da possibilidade dessas diferentes abordagens. Uma outra razão dessas diferenças de abordagem, e a mais importante, é a diferente formação e área de interesse dos diversos professores. Por exemplo, meu interesse específico com a problemática relacionada com a pesquisa em ensino de física certamente se reflete tanto na abordagem dos temas quanto nos exemplos escolhidos.

Considero que tanto um pesquisador em física quanto um professor de física, este lecionando tanto no ensino médio quanto na universidade, muito têm a ganhar se considerarem que a *física também é cultura*, isto é, que esse ramo do conhecimento não se resume no trato de questões técnicas teóricas e ou experimentais. Os conceitos, as leis, os princípios, as interpretações experimentais, as observações, as heurísticas, os métodos, as hipóteses, as intuições, as linguagens matemáticas, enfim, tudo aquilo que constitui a física, conheceram uma

---

<sup>5</sup> João Zanetic. **Textos de evolução**. Publicação interna do IFUSP em 9 fascículos: 1. A física como instituição; 2. A radiação do corpo negro, a quantização e a história da história da ciência; 3. Da indução baconiana à crítica de Popper; 4. A revolução copernicana: antes, durante e depois; 5. Da refutação popperiana à revolução científica de Kuhn; 6. A elipse de Kepler e a parábola de Galileu; 7. Da normalização kuhniana ao anarquismo epistemológico de Feyerabend; 8. Dos vórtices de Descartes à maçã de Newton; 9. A crítica do racionalismo clássico e o surracionalismo de Bachelard.

<sup>6</sup> Benjamin Farrington. **A ciência grega**. São Paulo: Ibrasa, 1961.

evolução ao longo do tempo. A história contemporânea da ciência pode contribuir muito para a formação dos dois tipos de profissionais em física. E uma história da ciência não pode prescindir de uma filosofia da ciência, como dramatizava o matemático e filósofo Imre Lakatos (1922-1974), parafraseando o filósofo alemão Kant:

“A filosofia da ciência sem a história da ciência é vazia; a história da ciência sem a filosofia da ciência é cega.”<sup>7</sup>

É por isso que inicio estas aulas, e a 1ª parte destas *Notas de Aula*, com uma breve introdução ao estudo de tópicos de filosofia da ciência, com ênfase em alguns modelos epistemológicos contemporâneos desenvolvidos a partir da década de 30 do século passado. Embora análises filosóficas da ciência tenham uma história que vem desde os filósofos gregos, esse ramo do conhecimento teve um desenvolvimento mais marcante a partir do início da construção da física clássica com Galileu (1564-1642) e Kepler (1571-1630), sendo o filósofo Francis Bacon (1561-1626) um exemplo significativo. No entanto, a filosofia da ciência só conheceria um desenvolvimento ainda mais marcante e significativo com o advento da física contemporânea no começo do século XX. O filósofo Gaston Bachelard costumava dizer que o advento da mecânica quântica e da relatividade constituiu uma provocação, um desafio, para a sua construção de uma nova filosofia, a filosofia de um novo espírito científico. Podemos afirmar que essa mesma motivação provocou o surgimento das demais propostas epistemológicas que surgiram ao longo do século passado.

A segunda metade da disciplina será dedicada a alguns tópicos de história da ciência. Na 2ª parte destas *Notas de Aula* é apresentado um tópico de história da física contemporânea que, na medida do possível, estará relacionado à temática epistemológica da 1ª parte. Esse tópico histórico (de autoria de Erika Regina Mozena e João Zanetic) será dedicado à solução do problema da radiação do corpo negro, tema que deu origem ao nascimento das ideias quânticas. A parte histórica se iniciará com uma breve discussão sobre o que entendemos por história da

---

<sup>7</sup> Imre Lakatos. **Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales**. Madrid: Editorial Tecnos, 1987, p. 11. A frase original de Kant foi: “Pensamentos sem conteúdos são vazios, intuições sem conceitos são cegas” (Immanuel Kant. **Crítica da Razão Pura**. São Paulo: Abril Cultural, 1.ed., 1974, p. 57). Em seu artigo original (1970), Lakatos cita essa paráfrase entre aspas, mas sem menção à autoria. O trecho é atribuído, originalmente, a Norwood Russell Hanson no artigo (p. 580): The Irrelevance of History of Science to Philosophy of Science, **The Journal of Philosophy**, v. 59, n. 21, p. 574–586, 1962.

ciência e será finalizada com uma breve incursão ao tema da física como instituição social. Essa parte é fechada com a indicação de um estudo sociológico polêmico de Boris Hessen (1883-1938) sobre os *Principia* de Newton.

Espero que nas aulas de *Evolução* e nestas *Notas de Aula* transpareça o caráter cultural da física, embora a temática central da disciplina esteja limitada exclusivamente a duas áreas específicas, a História da Ciência, particularmente da física, e a Filosofia da Ciência, com ênfase nas epistemologias que têm a física como foco de investigação, apresentadas em aulas e textos separados mas construídos com a intenção de mostrar sua interdependência.

Enfim, veremos um pouco do romance da física ou, como diria nosso saudoso professor Mário Schenberg, a história de detetive que quanto mais se esclarece mais misteriosa fica.

## Capítulo 1

### Filosofia ou “filosofia”

*“Pretendo falar do Universo Físico, Metafísico e Matemático, do Material e do Espiritual: de sua Essência, sua Origem, sua Criação, sua condição presente e seu Destino. Serei audaz a ponto de discutir...”*

Edgar Allan Poe <sup>8</sup>

#### 1.1 Introdução

Vamos iniciar uma breve e incompleta excursão sobre um vasto continente do conhecimento que teve certamente sua exploração iniciada há milênios. Iniciada, provavelmente, quando um ser humano de alguma região qualquer do planeta, se pôs a cogitar sobre sua vida pessoal, a morte de um ente querido, um sonho noturno, o azul do céu, o pescoço do dinossauro ou qualquer outra visão admirada sobre o universo que se descortinava ante seu olhar e sobre os indivíduos com quem partilhava seus pensamentos. Era o início da construção de um diálogo filosófico com o mundo que nascia naquela região. Os mais diferentes povos que já existiram na face da Terra devem ter participado de sua construção. Alguns desses povos devem ter aprendido algo dos outros que os antecederam e esse processo de interação deve ter contribuído para o seu desenvolvimento. No que diz respeito à tradição ocidental, sua exploração mais sistemática iniciou-se alguns séculos antes da era cristã com a civilização grega.

O termo filosofia, no título desta primeira parte dos textos, foi colocado entre aspas pois não pretendo discorrer, e nem teria condições para tanto, sobre as principais escolas filosóficas que tratam do conhecimento científico. A preocupação destas *Notas de Aula* estará restrita àquela parte da filosofia contemporânea que tem nas ciências naturais, e mais particularmente na física, seu objeto de estudo. Um estudo mais abrangente e profundo deve ser conseguido em

---

<sup>8</sup> Edgar Allan Poe. **Eureka**. In: **Poesia e Prosa - obras escolhidas**. Trad. Oscar Mendes e Milton Amado. Rio de Janeiro: Edições de Ouro, 1966, p. 453. Original inglês de 1848. Esse texto de Poe (1809-1849), embora seja mais uma demonstração primorosa do domínio da escrita e do imaginário desse fabuloso contista, poeta e jornalista norte-americano, menciona várias interpretações suas de imagens científicas e questões metodológicas de Aristóteles, Kepler, Bacon e Newton, entre outros. Discute, mesmo não sendo filósofo nem cientista, sua forma de ver a disputa entre indutivistas e dedutivistas. **Eureka** é um exemplar significativo das várias possibilidades de relações entre a ciência e a literatura. Esse ensaio também está publicado em: Edgar Allan Poe. **Poemas e ensaios**. Mesmos tradutores. Rio de Janeiro: Globo, 1987.

disciplinas oferecidas pelos departamentos de Filosofia ou de História ou em leituras específicas sobre os temas aqui focalizados.

Portanto, não vamos tratar de filosofia, assim, sem aspas, mas de “filosofia” das ciências naturais, isto é, de alguns temas que procuram desvendar um pouco o mistério sobre a natureza do conhecimento científico, a saber, o que se entende por metodologia da construção da ciência, como se processa a evolução de uma teoria para outra – a chamada mudança científica, qual o papel desempenhado pelas observações e pelas experiências, como entender o papel desempenhado pela linguagem e pela matemática, o conceito de verdade na ciência, a ideia de progresso científico, entre outros.

Num livro destinado a introduzir tópicos de filosofia no ensino médio, Caetano Ernesto Plastino e Pablo Rubén Mariconda, docentes da USP, iniciam o capítulo sobre filosofia das ciências naturais com estas palavras:

“Como é possível o conhecimento científico da natureza? Que relação deve haver entre as teorias científicas e a experiência a ser por elas retratada? Nos últimos cem anos, inúmeros filósofos e cientistas desenvolveram novos métodos de análise dessas questões epistemológicas. (...)

Durante o século XIX, a ciência natural conseguiu estabelecer-se como instituição social [*abordaremos esse tema na 2ª parte destes Textos*]: tornou-se parte indispensável dos currículos secundários e universitários, impôs a necessidade dos laboratórios ao lado das bibliotecas e difundiu a idéia de que uma educação sólida depende muito mais da ciência do que do conhecimento dos clássicos e das tradições filosóficas. Um dos sintomas desse processo de institucionalização da ciência foi o tipo de exame crítico que se concentrou na eliminação de tudo que poderia prejudicar uma visão positivista da ciência – em particular da mecânica.”<sup>9</sup>

Por outro lado, em um pequeno livro introdutório sobre filosofia da ciência, o filósofo brasileiro Alberto Oliva, docente da UFRJ, assim se manifesta sobre esse tema:

---

<sup>9</sup> Caetano Ernesto Plastino e Pablo Rubén Mariconda. In: Vários autores, **Primeira filosofia**. São Paulo: Brasiliense, 1984, p. 196.

“A *filosofia da ciência* (metaciência) tem se voltado predominantemente para a confecção de uma lógica da pesquisa. Devota-se na maioria de seus estudos à análise dos constituintes sintático-semânticos – lógicos e empíricos – da racionalidade científica. Quando de orientação descritiva, como a de Thomas Kuhn, procura mostrar como a ciência é de facto produzida. Quando prescritiva, como a de Karl Popper, ambiciona recomendar procedimentos metodológicos supostamente superiores aos que vêm sendo empregados pelos cientistas.”<sup>10</sup>

Quando se focaliza a filosofia das ciências naturais e, de forma mais específica, o processo de investigação científica, uma questão aparentemente ingênua pode ser formulada da seguinte forma: será possível inventar um processo ou construir um sistema que ensine a realização de descobertas científicas? P. V. Kopnin chega a mencionar um pensador escolástico medieval de nome Raymond Lulle que teria apresentado um projeto de uma “máquina lógica” que forneceria todas as verdades possíveis.<sup>11</sup>

Não estaremos exagerando muito afirmando que outros pensadores célebres como Francis Bacon e René Descartes (1596-1650) de certa forma respondiam afirmativamente a uma tal questão quando apresentaram suas propostas de uma lógica da investigação científica. Miriam Limoeiro, num interessante artigo sobre o método científico, afirma o seguinte:

“Numa epistemologia cartesiana o método se reduz a um conjunto de regras que por si só garantem a obtenção dos resultados desejados.”<sup>12</sup>

Francis Bacon acabou tornando-se célebre pelo seu esforço de dotar a inteligência humana de um método seguro de estudo da natureza. Para tanto ele orientou-se pelo desenvolvimento das ciências naturais experimentais que, nessa época (séculos XVI e XVII), estavam obtendo triunfos espetaculares. Basta mencionar os trabalhos de Galileu Galilei e Johannes Kepler que, motivados pelo heliocentrismo de Nicolau Copérnico (1473-1543) e empenhados na luta contra o geocentrismo aristotélico-ptolomaico, estabeleceram as bases do edifício que seria construído por Isaac Newton (1642-1727), no final do século XVII.

---

<sup>10</sup> Alberto Oliva. **Filosofia da ciência**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2003, p. 14.

<sup>11</sup> Kopnin, P. V. **A dialética como lógica e teoria do conhecimento**. Trad. Paulo Bezerra. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1978, p. 223. Original russo de 1976.

<sup>12</sup> Limoeiro, M. **O mito do método**. Mimeografado. Rio de Janeiro, 1971, p. 1.

## 1.2 Objetivo

O objetivo central destas aulas e, portanto, destas *Notas de Aula*, será o de apresentar e discutir alguns diferentes enfoques contemporâneos sobre esses temas, partindo da concepção mais próxima do senso comum e caminhando na direção de modelos mais complexos.

Vamos nos familiarizar com as concepções de alguns filósofos da ciência contemporâneos que têm sido muito citados nos artigos publicados nas revistas especializadas e que são responsáveis por novas imagens de ciência quanto por novas definições de imagens da natureza.

Em livro dedicado a temas históricos da física, o filósofo brasileiro Paulo Abrantes, tece comentários interessantes sobre duas dessas imagens exemplificadas por temas que contemplam, principalmente, a mecânica e o eletromagnetismo. Nas palavras do autor:

“O emprego do mesmo termo, ‘imagem’, no que se refere tanto aos pressupostos ontológicos de um programa de pesquisas (uma imagem de natureza) quanto aos pressupostos epistemológicos e metodológicos dessa atividade (uma imagem de ciência), tem o propósito de sugerir um tratamento global para essas diferentes categorias de imagens que permita evidenciar sua interdependência.”<sup>13</sup>

Num estudo que procura fazer um balanço de alguns modelos filosóficos contemporâneos, encontramos a seguinte reflexão sobre várias teorias da ciência que surgiram na segunda metade do século XX que, embora apresentem diferentes visões sobre o que é a ciência, concordam no seu ataque à visão positivista que ainda dominava no início daquele século:

“(…) de fato não possuímos um quadro geral bem confirmado de como a ciência funciona, nem uma teoria da ciência que mereça assentimento geral. Tivemos, certa vez, uma posição filosófica bem desenvolvida e historicamente influente, a saber, o positivismo ou empirismo lógico, que agora se encontra efetivamente refutada. (...)”

---

<sup>13</sup> Paulo Abrantes. **Imagens de natureza, imagens de ciência**. Campinas: Papirus, 1998, p. 21.

No início dos anos 60, algumas novas teorias da ciência foram desenvolvidas como alternativas ao positivismo; trata-se dos trabalhos de N. R. Hanson, Paul Feyerabend, Stephen Toulmin e, acima de tudo, Thomas Kuhn. Essas contribuições, ainda que problemáticas em suas teses positivas, puseram termo efetivamente à hegemonia do positivismo ao revelarem que suas doutrinas centrais (tais como a cumulatividade da ciência, a redutibilidade da linguagem teórica à observacional) conflitam radicalmente com a prática real da ciência.”<sup>14</sup>

Essa visão positivista aí mencionada, na maioria das vezes, se resume em afirmar que os cientistas observam e descrevem fatos empíricos, para a seguir organizá-los de tal forma a facilitar a transposição dos mesmos para uma linguagem matemática auto-consistente.

Lidaremos, principalmente, com as propostas epistemológicas de dois dos filósofos da ciência do século XX mencionados na citação acima, Thomas Kuhn e Paul Feyerabend, e mais outros dois não mencionados, Gaston Bachelard e Karl Popper. O século que viu nascer e se desenvolver um corpo teórico e experimental sofisticado da física, destacando-se aí as teorias da relatividade e da física quântica, trouxe novos problemas que foram enfrentados por essa filosofia da ciência. Alguns desses epistemólogos localizam exatamente nesse desabrochar das novas teorias da física contemporânea sua dedicação a esses ramos do conhecimento. Abordaremos também, mais para o final, o pensamento de Ludwik Fleck que, embora fundado na história da medicina e não da física, dialoga frutiferamente com as epistemologias dos demais autores, em particular, com a perspectiva kuhniana.

Assim, trabalharemos nestas aulas com algumas ideias desenvolvidas por:

1. **Gaston Bachelard**, filósofo francês com graduação inicial em química, nasceu em 1884 e faleceu em 1962. Bachelard dedicou-se tanto ao diálogo com a filosofia da ciência<sup>15</sup> quanto com o desenvolvimento do pensamento poético, tendo publicado cerca de uma dezena de livros em cada uma dessas áreas do conhecimento. Entre outras atividades profissionais, foi funcionário dos correios, vindo dessa experiência sua “conduta da balança”, presente no seu

---

<sup>14</sup> Larry Laudan et al. Mudança científica: modelos filosóficos e pesquisa histórica. **Estudos Avançados**, USP, São Paulo, n. 19, setembro/dezembro de 1993, p. 7-8.

<sup>15</sup> Neste campo seus trabalhos mais conhecidos estão nos livros: **O novo espírito científico** (Coleção “Os pensadores”. Rio de Janeiro: Abril Cultural, 1978; e Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1985), **A formação do espírito científico** (Rio de Janeiro: Contraponto, 1996) e **A Filosofia do não** (Lisboa: Editorial Presença, 1972).

livro *A filosofia do não*. Foi professor secundário das mais variadas disciplinas tendo terminado sua carreira como professor e pesquisador na Universidade Sorbonne.

2. **Ludwik Fleck**, médico polonês nascido em 1896, especialista em microbiologia. Foi perseguido pelos nazistas durante a Segunda Guerra e trabalhou em campos de concentração. Possui poucos trabalhos no campo da filosofia da ciência, sendo o principal deles um livro escrito em 1935 em que defende o caráter histórico e social da epistemologia<sup>16</sup>. Sua obra, que ficou pouco conhecida e só foi “resgatada” após ser citada por Thomas Kuhn, apresenta várias relações com a desse outro autor. Fleck faleceu em 1962.

3. **Karl R. Popper**, filósofo austríaco nascido em 1902 e que abandonou a Áustria em 1937, como consequência da ameaça nazista naquele país, indo lecionar filosofia na Nova Zelândia, onde permaneceu até 1946 quando viajou para a Inglaterra onde veio a falecer, em 1995. Seu mais importante trabalho<sup>17</sup> foi publicado em alemão, em 1934, e traduzido para o inglês apenas em 1959, época em que Popper começou a ser conhecido como um influente filósofo da ciência. Ele também publicou várias obras de natureza mais política<sup>18</sup> que o transformaram em figura polêmica.

4. **Thomas S. Kuhn**, norte americano nascido em 1922, originalmente educado como físico profissional e que, ao tomar contato com a obra de alguns historiadores e filósofos da ciência, começou a investigar problemas da história da física e de seu desenvolvimento conceitual e metodológico. Embora tenha publicado uma série de importantes trabalhos no campo da história da física<sup>19</sup>, seu nome é mais lembrado no terreno da filosofia da ciência a partir da publicação, em 1962, do seu mais importante livro<sup>20</sup>. Kuhn faleceu em 1996.

5. **Paul Feyerabend**, filósofo austríaco nascido em 1924 é autor de inúmeros trabalhos sobre história e filosofia da ciência. Embora seja originário da escola do racionalismo crítico de Popper, ele se tornou mais conhecido como um crítico mordaz das ideias do próprio Popper. Ele

---

<sup>16</sup> Trata-se de **Gênese e desenvolvimento de um fato científico**.

<sup>17</sup> Trata-se do livro **Logik der Forschung**, que foi traduzido para o português sob o título de **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Cultrix e EDUSP, 1975 (há edição mais recente, de 2013).

<sup>18</sup> Entre outros podemos citar **A sociedade aberta e seus inimigos**, obra em que Popper tece críticas contra as teorias de Platão, Karl Marx e Sigmund Freud.

<sup>19</sup> Em particular cabe mencionar o livro **A revolução copernicana**, publicado em 1959, e que traz uma importante e instigante reavaliação do papel dos trabalhos de Nicolau Copérnico para o nascimento da física clássica. Ele produziu também, como uma espécie de preparação histórica para sua maior contribuição à filosofia da ciência, uma série de estudos sobre a física clássica e a física contemporânea.

<sup>20</sup> Trata-se do livro **A estrutura das revoluções científicas**. Trad. B. V. Boeira e N. Boeira. São Paulo: Perspectiva, 1975 (há diversas edições mais recentes).

baseava seus principais argumentos no anarquismo metodológico, tendo se dedicado ao que ele chamava de resgate do humanismo na ciência.<sup>21</sup> Feyerabend faleceu em 1994.

Dependendo dos temas analisados, as concepções desses cinco filósofos da ciência apresentam ora muitas diferenças ora muitas semelhanças entre si, como teremos oportunidade de analisar mais adiante. Todos eles (à exceção de Fleck) davam destaque particular à física contemporânea, embora o desenvolvimento da física clássica tenha oferecido exemplares históricos vitais para a construção de seus modelos.

Iniciaremos esse estudo, no capítulo 2, com a apresentação da concepção do método científico tradicional, muitas vezes mencionado nos livros didáticos de ciência como “o Método Científico”. Essa apresentação servirá como contraponto às ideias contemporâneas, como é a negação da indução por parte de Popper. Na sequência apresentaremos as ideias de Kuhn, Feyerabend, Bachelard e Fleck.

### 1.3 Significado do conhecer

Procurar entender o significado do conhecimento, sua relação com a realidade e a nossa capacidade de conhecer essa realidade de forma mais ou menos objetiva, foi preocupação constante de filósofos desde a antiguidade. Ao dizer isto imediatamente nos vem à mente considerações a respeito da verdade do conhecimento. E aqui nos encontramos sobre um terreno escorregadio e pedregoso.

Eis o que diz sobre a verdade um personagem do escritor francês Honoré de Balzac (1799-1850):

“(...) As pessoas sensatas não de dar razão a C. ou a L. ou a Rubempré, ou, talvez, a todos os três! A mitologia, que é uma das maiores invenções humanas, colocou a Verdade no fundo de um poço; para a tirar não são precisos baldes? Terás fornecido três, em vez de um, ao público. (...)”<sup>22</sup>

---

<sup>21</sup> Seu livro mais conhecido é o **Contra o método**, onde exercita sua epistemologia anarquista e crítica.

<sup>22</sup> Honoré de Balzac. **Ilusões perdidas**. Comédia Humana, vol. VIII. São Paulo: Globo, 1990, p. 340.

O filósofo da USP Franklin Leopoldo e Silva inicia sua argumentação sobre a teoria do conhecimento com palavras que, de certa forma, corroboram a metáfora do jornalista/personagem balzaquiano:

“A Teoria do Conhecimento pode ser definida como a investigação acerca das condições do conhecimento verdadeiro. Neste sentido podemos dizer que existem tantas teorias do conhecimento quantos foram os filósofos que se preocuparam com o problema, pois é impossível constatar uma coincidência total de concepções mesmo entre filósofos que habitualmente são classificados dentro de uma mesma escola ou corrente.”<sup>23</sup>

Franklin inicia sua apresentação da Teoria do Conhecimento abordando as ideias do filósofo grego Aristóteles (384-322 AC) contidas na sua obra *Organon*, onde esse filósofo tratava de questões relativas à verdade e à possibilidade de conhecer. Para o propósito deste capítulo, é interessante a seguinte citação extraída do artigo de Franklin, onde ele apresenta um exemplo do modo de pensar de Aristóteles sobre a aquisição do conhecimento e a correspondente crítica do filósofo francês René Descartes:

“Em Aristóteles a demonstração lógico científica parte de uma proposição geral, mas esta é obtida por um certo tipo de generalização do particular presente na experiência sensível. Isto significa que o dado sensível (sensação e percepção) possui uma importância grande no nível de fundamentação das verdades, pois o trajeto do conhecimento consiste quase num processamento do sensível. O que Descartes vai se perguntar é se nessas condições pode realmente haver uma demonstração rigorosa. Descartes tem em mente a demonstração matemática, mesmo no que diz respeito aos fenômenos do mundo sensível, pois ele é solidário da grande revolução que se opera no final do renascimento e que substitui a física sensualista e qualitativa de Aristóteles pela física matemática ao estilo de Galileu.”<sup>24</sup>

Pelo que foi exposto percebe-se que o trato com os dados da experiência sensível, e sua incorporação no conhecimento da realidade, apresenta várias possibilidades de interpretação. Algumas priorizam as experiências sensíveis, outras priorizam as ideias. Em particular, o

---

<sup>23</sup> Franklin Leopoldo e Silva, **op. cit.**, nota 9, p. 175.

<sup>24</sup> Franklin Leopoldo e Silva, **op. cit.**, nota 9, p. 177-178.

idealismo cartesiano, derivado do seu excesso de geometrização, como diria o historiador da ciência franco-russo Alexandre Koyré (1892-1971)<sup>25</sup>, foi criticado por vários filósofos empiristas, principalmente pelo filósofo inglês David Hume (1711-1776), que dava muita importância para as impressões fornecidas pelos sentidos. Esta inclinação pelo pensamento empirista foi dominante à época do nascimento da ciência, quando pontificava a mecânica, e deu origem ao método científico tradicional.

Dentro de uma abordagem que tem o materialismo dialético como referencial teórico, o filósofo brasileiro Caio Prado Junior (1907-1990) assim se manifesta a respeito da verdade das teorias físicas:

“Assim, por exemplo, se considerarmos o conhecimento físico de hoje, diremos que a Verdade é a Relatividade e a Mecânica Quântica. Mas isso quer dizer que a Mecânica Newtoniana é uma inverdade? Será hoje, mas não há um século. Um físico que ignorasse ou desprezasse em nossos dias a Relatividade e a Mecânica Quântica, e aceitasse unicamente a de Newton, estaria sem dúvida alguma errado; nesse sentido, mas somente nesse sentido, isto é, no momento atual, a concepção daquele físico clássico constituiria uma inverdade. Mas se comparássemos os conhecimentos físicos de hoje com os de um século passado, e isso no terreno histórico, isto é, se os considerássemos como momentos distintos da evolução do conhecimento em que eles respectivamente se manifestaram, então já não seria mais legítimo afirmar que a Mecânica Newtoniana é uma inverdade. Teríamos nesse caso que considerar o conjunto do processo evolutivo do Conhecimento, em que tanto a Mecânica de Newton - como antes dela a de Aristóteles -, quanto a da Relatividade e a Quântica, são momentos apenas ou fases sucessivas daquele processo. Poderíamos então, no máximo, dizer que estas últimas são mais verdadeiras que as anteriores, mais próximas da Realidade objetiva. E isso é tudo.”<sup>26</sup>

---

<sup>25</sup> Alexandre Koyré utilizava este termo quando analisava as obras de Galileu e Descartes. Dizia que estes chegaram a cometer alguns erros na busca de solucionar tanto o problema da inércia quanto o problema da queda dos corpos por **geometrizarem em excesso** a interpretação de suas observações e experiências.

<sup>26</sup> Caio Prado Junior. **Dialética do conhecimento**. São Paulo: Brasiliense, 1960, p. 632-633.

## 1.4 À guisa de conclusão

Este assunto torna-se mais vital quando se nota que, ao comparecer tanto no ensino médio quanto no universitário, a discussão sobre o “método científico” acaba se resumindo numa visão positivista extremamente ingênua, para se dizer o menos, e portanto, danosa à aprendizagem de ciências.

Nesta primeira parte dos *Textos de Evolução*, o breve esboço da filosofia das ciências contemporânea servirá, assim espero, para desmistificar a crença num método científico único, fechado e imutável. Este tema é básico tanto na educação geral de toda a população, quanto na educação profissional de professores e cientistas.

A excessiva ênfase na aplicação de fórmulas na solução de exercícios, como base para a aprendizagem de física, leva-me a compará-la com a “unidimensionalidade” cultural acentuada por Herbert Marcuse (1898-1979) ao criticar o raquitismo intelectual que domina a sociedade industrial avançada.<sup>27</sup> Jürgen Habermas, filósofo alemão nascido em 1929, destaca que Marcuse criticava o papel negativo da ciência nesse tipo de sociedade e, em particular, alertava que o “método científico” era um instrumento de dominação não só da natureza pelo homem, como do próprio homem, em nome de uma racionalidade neutra.<sup>28</sup>

No ensino/aprendizagem de física, seja no nível médio ou no ensino superior, estes temas são básicos já que, ao lado dos conteúdos científicos específicos a serem apresentados e discutidos em sala de aula, também é necessário oferecer um panorama epistemológico e cultural do desenvolvimento da física. Por que? Porque não basta, para uma compreensão mais completa da física enquanto um ramo estruturado, e ainda em evolução, do conhecimento ater-se simplesmente à enunciação de pequenos resumos de teorias e a sua aplicação na solução daqueles problemas “clássicos”, que muitas vezes só interessam à classe de aula. É necessário também passar a ideia da evolução dessas teorias ou, pelo menos, algumas indicações de como deve ter sido realizada sua construção.

A parte formativa, tanto no tocante ao domínio da linguagem e dos formalismos matemáticos básicos, quanto aos aspectos experimentais da física, fica incompleta sem um

---

<sup>27</sup> Herbert Marcuse. **A ideologia na sociedade industrial**. Trad. de Giasone Rebuá. Rio de Janeiro: Zahar, 1967.

<sup>28</sup> Habermas, Jürgen. **Técnica e ciência enquanto “ideologia”**. In: Coleção “Os Pensadores”, vol. XLVIII. São Paulo: Abril Cultural, 1975, p. 305.

embasamento filosófico adequado ao nível de abstração e entendimento compatíveis com a faixa etária dos alunos nos diferentes níveis de ensino.

Temos que organizar e implementar as experiências educacionais de tal forma que elas sejam significativas para a totalidade desses adolescentes. E para que sejam significativos os conteúdos trabalhados nessas experiências educacionais, eles devem envolver de alguma forma a curiosidade dos alunos, adolescentes ou não. O filósofo Gaston Bachelard, além de suas reflexões epistemológicas, nos oferece uma oportuna reflexão educacional quando destaca:

“Em primeiro lugar, é preciso saber formular problemas. E, digam o que disserem, na vida científica os problemas não se formulam de modo espontâneo. É justamente esse sentido do problema que caracteriza o verdadeiro espírito científico. Para o espírito científico, todo conhecimento é resposta a uma pergunta. Se não há pergunta, não pode haver conhecimento científico. Nada é evidente. Nada é gratuito. Tudo é construído.”<sup>29</sup>

Certamente uma física que envolva as emoções, as idas e vindas das grandes ideias geradoras presentes nos problemas cruciais, o uso do discurso racional, o papel do discurso e conceituação tidos por mágicos, as ideias fantásticas dos pensadores científicos que construíram as grandes teorias que já dominaram ou que ainda dominam o cotidiano dos físicos, enfim, toda essa física é incomparavelmente mais viva, mais apropriada a questionamentos, que a física essencialmente formal, a-histórica, recheada de exercícios, distante, quer de uma cultura popular, quer de uma cultura científica, parte integrante da vida inteligente contemporânea.

A reflexão de Bachelard, que aponta para a necessidade da pergunta para a construção do conhecimento, permite introduzir aqui o pensamento de um educador brasileiro que sempre valorizou a pergunta e a resposta em sala de aula, através do diálogo educador  $\Leftrightarrow$  educando. Em seu texto em que domina a reflexão epistemológica, Paulo Freire escreve o seguinte:

“O que se pretende com o diálogo, em qualquer hipótese (seja em torno de um conhecimento científico e técnico, seja de um conhecimento “experencial”), é a problematização do

---

<sup>29</sup> Gaston Bachelard. **A formação do espírito científico**. Trad. de Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996, p. 18. Original de 1938.

próprio conhecimento em sua indiscutível relação com a realidade na qual se gera e sobre a qual incide, para melhor compreendê-la, explicá-la, transformá-la.”<sup>30</sup>

“A física também é cultura” poderia ser uma possível bandeira para uma educação em física comprometida com a construção de uma sociedade voltada para o interesse e necessidade da maioria da população.

O debate tão atual em torno da “filosofia” das ciências naturais, envolvendo os nomes de Gaston Bachelard, Karl Popper, Thomas Kuhn e Paul Feyerabend coloca na berlinda o “que fazer” científico tanto como base de crítica ao trabalho do pesquisador contemporâneo – afinal, o que é ser cientista hoje? – quanto como possibilidade de se repensar a física no contexto da totalidade da população.

Depois da eclosão desse debate e de nele participar, já não poderemos continuar aceitando a definição ingênua e positivista do método científico tradicional, encontrada explícita ou implicitamente nos textos didáticos e na prática educacional em física, tanto nas salas de aula do ensino fundamental e do ensino médio quanto nos cursos universitários.

É necessário situar de modo diferente, mais dinâmico e ao mesmo tempo mais completo e rico, o papel da experimentação e da observação na construção das teorias científicas. É preciso recolocar o método indutivo nos seus limites e contextos apropriados. A concepção comumente propalada, e até mesmo verossímil, de que a observação e a experimentação – realizadas com o intuito de coletar e organizar dados do real – permitem a elaboração de hipóteses de trabalho que, após o confronto verificador com novas observações e experiências, levaria a um conhecimento verdadeiro ou às leis da natureza, precisa ser criticamente debatida.

É um pouco disso o que pretendo apresentar e discutir nestas aulas e nestes textos.

---

<sup>30</sup> Paulo Freire. **Extensão ou comunicação?** Rio de Janeiro: Paz e Terra, 8.ed., 1988, p. 52.

## Capítulo 2

### O método da indução

*“Só há e só pode haver duas vias para a investigação e para a descoberta da verdade. Uma, que consiste no saltar-se das sensações e das coisas particulares aos axiomas mais gerais e, a seguir, descobrirem-se os axiomas intermediários a partir desses princípios e de sua inamovível verdade. Esta é a que ora se segue. A outra, que recolhe os axiomas dos dados dos sentidos e particulares, ascendendo contínua e gradualmente até alcançar, em último lugar, os princípios de máxima generalidade. Este é o verdadeiro caminho, porém ainda não instaurado.”*

Francis Bacon <sup>31</sup>

#### 2.1 O método científico tradicional

Nosso roteiro deve ser aquele que nos leve a percorrer parte do continente da filosofia de tal forma a iluminar, se isso for possível, a construção do conhecimento da natureza, ou melhor, dos diversos fenômenos que estão à nossa disposição para serem observados, analisados, alvos do nosso pensamento.

No que diz respeito a uma sistematização do conhecimento físico da natureza, um dos primeiros pensadores a estabelecer um importante roteiro metodológico para a busca das leis da natureza que explicassem os fenômenos observados foi o filósofo inglês Francis Bacon. Ele empreendeu uma tentativa de construir uma sistematização lógica do procedimento científico, chegando a um método



Francis Bacon (1561-1626)

científico. Sua proposta, apesar de passar por severas críticas e modificações, dominou o cenário científico até o final do século XIX, no que se refere ao método de investigação da natureza.

---

<sup>31</sup> Francis Bacon. **Novum organum**. Trad. José A. R. de Andrade. Coleção “Os Pensadores”. São Paulo: Abril Cultural, 3.ed., 1984, p. 16.

De uma forma muito simplificada podemos resumir os passos do método científico tradicional, ou método indutivo, da seguinte maneira:

1. o cientista faz observações e experimentos que lhe forneçam informações controladas e precisas;
2. essas informações são registradas sistematicamente e eventualmente divulgadas;
3. outros cientistas, trabalhando na mesma área, acumulam novos dados;
4. com o acúmulo de dados é possível uma certa ordenação dessas informações permitindo a formulação de hipóteses gerais, isto é, o estabelecimento de enunciados gerais que descrevam razoavelmente o que os fatos conhecidos deixam transparecer e, ao mesmo tempo, explicam as relações causais entre os mesmos;
5. passa-se a seguir à fase de confirmação ou verificação dessas hipóteses assim construídas, procurando-se novos experimentos e ou observações que evidenciem suas afirmações;
6. se essa busca de confirmação ou de verificação é bem sucedida, o cientista chega a uma lei científica que passa a ser aplicada a casos semelhantes na tentativa de ampliar seu campo de aplicações;
7. com esse alargamento de aplicação do conhecimento novas leis ligadas a fenômenos semelhantes vão permitir que se construa toda uma teoria.

## **2.2 O método indutivo**

Os passos acima expostos sintetizam um procedimento metodológico que ficou conhecido por método da indução, isto é, a elaboração de enunciados gerais a partir de enunciados particulares.

É comum argumentar-se que esse método aproxima-se mais do senso comum. Isto é devido às considerações implícitas no seu procedimento. Uma delas diz que é a própria natureza que nos dita as palavras através das observações que efetuamos. Outra consideração é a de que essas observações ou experimentações são neutras, isto é, independem do particular observador ou de suas concepções – são, portanto, objetivas. Pressupõe, ainda, que as futuras observações certamente seguirão os enunciados derivados de observações passadas. Esta última consideração foi alvo de severas críticas como veremos mais adiante.

O procedimento indutivo seria utilizado como critério de demarcação entre o que é científico e o que não é, isto é, proporcionaria um sinal diferenciador do caráter empírico e não-metafísico<sup>32</sup> de um sistema teórico voltado à explicação de fenômenos naturais. É a defesa da objetividade das leis da natureza, bastando que o investigador seja extremamente cuidadoso nas suas observações e honesto ao relatá-las.

O método indutivo, portanto, protegeria a ciência de critérios subjetivos: tradição, conjectura, preconceitos, ideologia, emoção, beleza, ...

Bryan Magee<sup>33</sup> oferece um exemplo concreto e simples para ilustrar o procedimento indutivo. Ele se refere à tentativa de se estabelecer leis empíricas a partir da observação da ebulição da água em diferentes circunstâncias:

1. por observações sistemáticas e cuidadosas, ou por termos aprendido de outros, conhecemos a seguinte lei: “a água ferve a 100 graus centígrados”;

2. em verificações posteriores dessa lei descobrimos que isso não ocorre em recipientes fechados; é necessária uma nova generalização chegando-se a uma nova formulação da lei: “a água ferve a 100 graus centígrados em recipientes abertos”;

3. essa nova lei é sujeita a novas verificações e descobre-se que em São Paulo a água não ferve a 100 graus centígrados; novos dados são necessários relativos aos mais diferentes lugares; chega-se a uma nova enunciação da lei: “a água ferve a 100 graus centígrados em recipientes abertos sob pressão atmosférica igual àquela ao nível do mar”;

4. e assim por diante.

Desta forma consegue-se cada vez mais informações que restringem o campo de aplicação da lei empírica. Porém, não são apresentadas hipóteses de por que razão a água apresenta tal comportamento.

---

<sup>32</sup> Metafísico, refere-se a uma explicação que busca a essência do ser, indo além da sua aparência sensível.

<sup>33</sup> Bryan Magee. **As idéias de Popper**. São Paulo: Cultrix e EDUSP, 1974, p. 30. Para quem quiser conhecer um pouco mais sobre as ideias epistemológicas de Popper nada substituirá a leitura de seus textos, boa parte deles traduzidos para o português. Mas esse livro do filósofo da Universidade de Oxford servirá bem como uma introdução às ideias de Popper, tanto as epistemológicas quanto as polêmicas ideias sobre filosofia política.

## 2.3 O “problema da indução”

Iniciamos esta seção com uma longa citação bem humorada do filósofo inglês Bertrand Russell (1872-1970), onde ele comenta criticamente a indução de Francis Bacon.

“Bacon foi o primeiro de uma longa série de filósofos de espírito científico que ressaltou a importância da indução como coisa oposta à dedução. Como a maioria de seus sucessores, procurou encontrar algum tipo de indução melhor do que a chamada ‘indução por simples enumeração’. A indução, como simples enumeração, pode ser ilustrada por meio de uma parábola. Era uma vez um empregado do censo que tinha de anotar os nomes de todos os chefes de família de uma certa aldeia de Gales. O primeiro que ele interrogou se chamava William Williams; o mesmo aconteceu com o segundo, o terceiro, o quarto... Por fim, disse com seus botões: ‘Isto é tedioso; todos eles se chamam, evidentemente, William Williams. Anotarei assim todos eles e tirarei uma folga.’ Mas estava equivocado; havia um cujo nome era John Jones. Isto mostra que podemos extraviar-nos, se confiarmos demasiado implicitamente na indução por simples enumeração.

Bacon acreditava que tinha um método capaz de tornar a indução um pouco melhor do que isso. Desejava, por exemplo, descobrir a natureza do calor, que ele supunha (acertadamente) consistir de rápidos movimentos irregulares das partículas dos corpos. Seu método consistia em fazer listas de corpos quentes, listas de corpos frios, e listas de corpos com diversos graus de calor. Esperava que tais listas mostrassem alguma característica sempre presente nos corpos quentes e ausente nos corpos frios, e presente, em graus diversos, nos corpos de diferentes graus de calor. Esperava chegar, por meio desse método, a leis gerais, tendo, em primeira instância, o grau mais baixo de generalidade. Partindo de certo número de leis desse tipo, esperava chegar a leis do segundo grau de generalidade, e assim por diante. Uma lei sugerida deveria ser comprovada mediante sua aplicação em novas circunstâncias; se desse resultado nessas circunstâncias, ficava, até esse ponto, confirmada.”<sup>34</sup>

Apesar dessa crítica avaliação do método de indução de Bacon, devemos destacar que esse filósofo deu importantes contribuições para a evolução do pensamento científico quando criticava os erros cometidos pelo investigador que se deixa levar pelas noções falsas e pelos

---

<sup>34</sup> Bertrand Russell. **História da filosofia ocidental**. São Paulo: Cia. Ed. Nacional, 1967, v. 3, p. 64. Existem edições mais recentes.

“ídolos”, termo que ele deriva da imagem de um falso deus. Ele trabalhava com quatro tipos de ídolos. Os “ídolos da tribo” seriam inerentes à natureza humana e levariam a uma análise pobre dos dados dos sentidos não percebendo que as percepções são parciais e produzindo falsas generalizações. Os “ídolos da caverna” (crítica relativa a Platão) que seriam relacionados com a interpretação dos dados da natureza segundo uma visão particular de cada indivíduo. Os “ídolos do foro ou do mercado” eram relacionados com as ambiguidades do discurso entre os seres humanos. Os “ídolos do teatro” seriam as invenções derivadas de sistemas filosóficos adotados (como os de Aristóteles e Platão, muito criticados por Bacon).<sup>35</sup>

Muito antes de Bertrand Russell, um dos primeiros filósofos a colocar em dúvida a argumentação lógica implícita no procedimento indutivo foi David Hume. Em seu livro *Investigação sobre o conhecimento humano*, Hume rejeitava o princípio da indução, argumentando que não era possível demonstrar logicamente a sua validade a não ser utilizando a própria argumentação indutiva, o que seria produzir um círculo vicioso inadmissível. Passemos a palavra ao próprio Hume:

“Afirma-se que uma proposição é inferida de outra, porém há de reconhecer-se que a inferência não é intuitiva nem tampouco demonstrativa. Então de que natureza é? Dizer que é experimental equivale a cair em uma petição de princípio, pois toda inferência realizada a partir da experiência supõe, como fundamento, que o futuro será semelhante. (...) Aceite que o curso da natureza até agora tenha sido muito regular; isto por si só, sem algum argumento novo ou inferência, não demonstra que no futuro o seguirá sendo. Em vão se pretende conhecer a natureza dos corpos a partir da experiência passada.”<sup>36</sup>

Em outras palavras, Hume queria dizer que podemos argumentar sobre a probabilidade de que algo venha a suceder novamente no futuro como vinha acontecendo no passado, porém, não podemos provar logicamente, sem apelo direto à experiência, que essa forma de proceder seja válida. Estava aberta a possibilidade de associar a questão da indução à questão da probabilidade que iria bem mais tarde envolver inúmeros filósofos como Hans Reichenbach

<sup>35</sup> José Aluysio Reis de Andrade. **Francis Bacon – Vida e Obra**. In: Francis Bacon, **op. cit.**, nota 31, p. XIII-XIV.

<sup>36</sup> David Hume. **Investigación sobre el conocimiento humano**. Tradução ao espanhol de J. S. Ortúeta. Madrid: Alianza Editorial, 1984, p. 60-61. Original inglês de 1748 (essa obra já possui diversas traduções para o português).

(1891-1953), Rudolf Carnap (1891-1970), entre outros, que teriam diferentes interpretações sobre essa associação.<sup>37</sup>

Com essa crítica, Hume criou dificuldades para o pensamento racional do século XVIII instaurando o ceticismo, isto é, colocando em dúvida a relação causal do tipo A causa B. Uma relação causal desse tipo, comumente aceita à sua época, deixava de fora da argumentação toda uma série de processos intermediários causais que eventualmente não eram percebidos explicitamente, deixando evidenciadas apenas as extremidades do processo como um todo. Nascia assim uma situação problemática que se tornou conhecida como problema de Hume ou problema da indução.

Bryan Magee tece as seguintes considerações a respeito dessa reação de Hume à indução:

“Hume colocou alguma dúvida em tudo isso. Assinalou que nenhum número de enunciados de observação singular, por mais amplo que seja, pode acarretar logicamente um enunciado geral irrestrito. Se eu noto que o acontecimento A vem acompanhado, em certa ocasião, pelo acontecimento B, não se segue logicamente que A volte a ser acompanhado por B em outra ocasião. Isso não decorre logicamente de duas observações, nem de vinte ou de duas mil. Se os acontecimentos vêm juntos um número suficientemente grande de vezes, eu posso, notando que A ocorreu, manifestar certa expectativa no sentido de que B ocorra - mas isso é um fato psicológico, não lógico. O Sol pode ter surgido a cada dia, todos os dias de que tenhamos conhecimento, mas isso não acarreta que deva surgir amanhã. A alguém que nos diz “Ah, sim, mas nós podemos predizer, de fato, o momento preciso em que o Sol voltará a raiar amanhã, com base nas estabelecidas leis da física, aplicadas às condições que vigem neste momento”, é possível retrucar com duas objeções. Em primeiro lugar, o fato de que as leis físicas vigoraram no passado não acarreta logicamente que continuem vigorando no futuro. Em segundo lugar, as leis da física são, elas mesmas, enunciados gerais que não decorrem logicamente dos casos observados aduzidos em seu favor, não importa quão numerosos possam ser. Assim, essa tentativa de justificar a indução é viciosa, porque dá por assente a validade da própria indução. A ciência admite que haja regularidade na natureza, admite que o futuro se assemelhará ao passado em todos os aspectos que as leis operam. Todavia, não há meio que permita legitimar esse pressuposto. Ele não pode ser estabelecido pela observação, pois que nos é impossível observar acontecimentos futuros

---

<sup>37</sup> José Ferrater Mora. **Dicionário de Filosofia**. Tradução de Roberto Leal Ferreira e Álvaro Cabral. São Paulo: Martins Fontes, 1994, p. 383-384.

(...) A conclusão a que Hume chegou foi a de que, embora não exista meio de demonstrar a validade dos procedimentos indutivos, a constituição psicológica dos homens [*e das mulheres*] é tal que não lhes resta outra alternativa senão a de pensar (...) em termos de tais procedimentos indutivos.”<sup>38</sup>

Apesar das críticas ao método indutivo ele aparentava ser um porto seguro para levar os barcos da investigação científica racional, objetiva, neutra e cumulativa. Ele seria o avalista do critério de verdade das teorias científicas, além de orientar a prática do trabalho dos pesquisadores. Daí o temor de muitos filósofos em ter que abandoná-lo. O filósofo alemão Hans Reichenbach, um desses filósofos, defensor da lógica indutiva, afirma o seguinte:

“(...) esse princípio determina a verdade das teorias científicas. Eliminá-lo da ciência significaria nada menos que privá-la do poder de decidir quanto à verdade ou falsidade de suas teorias. Sem ele, a ciência perderia indiscutivelmente o direito de separar suas teorias das criações fantasiosas e arbitrárias do espírito do poeta.”<sup>39</sup>

E, como que respondendo a essa profissão de fé indutivista, o poeta/filósofo Goethe, que dedicou parte de suas reflexões na crítica à física newtoniana, assim se manifestou:

“Por mim, nunca utilizei a indução nas minhas solitárias investigações pois senti a tempo o seu perigo.”<sup>40</sup>

Até o filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) procurou salvar o princípio da indução, no domínio das ciências experimentais, invocando o princípio da validade *a priori*, ou seja a razão estaria dotada de critérios que lhe permitiriam organizar os dados sensíveis e que essa qualidade seria anterior à própria experiência com os sentidos. Karl Popper advertia que há aí um pouco de confusão entre a “psicologia do conhecimento”, associada aos fatos empíricos, e a “lógica do conhecimento”.

---

<sup>38</sup> Bryan Magee, **op. cit.**, nota 33, p. 26-27.

<sup>39</sup> Hans Reichenbach, citado por Karl Popper, **op. cit.**, nota 17, p. 28.

<sup>40</sup> Johann Wolfgang Goethe. **Máximas e reflexões**. Tradução de Afonso T. da Mota. Lisboa: Guimarães Editores, 1987, p. 273. Original alemão de 1840.

Outro inconveniente frequentemente apontado contra a indução é o fato de seu procedimento dar pouca ênfase à elaboração da hipótese. O enunciado da lei é tão preso aos fatos empíricos que parece quase não haver intermediação da razão, ficando a hipótese estritamente vinculada ao empírico que, segundo os indutivistas, é o núcleo desse princípio. Bacon e os indutivistas esperavam que a simples disposição ordenada de fatos observáveis seria suficiente para fazer aflorar a nossa concepção sobre o conjunto de dados. A filosofia positivista incorporou esse procedimento como seu modo de entender a construção da ciência. Isso representava um relativo empobrecimento da razão hipotética.

No próximo capítulo voltaremos a comentar algo sobre uma concepção mais contemporânea do termo hipótese, a construída por Popper, por exemplo, que incorpora na sua proposta epistemológica alguns termos de Bacon interpretados em outro formato.

Reichenbach diz que para resolver plenamente o problema da indução, de acordo com sua visão de mundo, não se pode restringir a discussão no campo exclusivo da física newtoniana que era o marco de referência utilizado por David Hume. Reichenbach argumenta que uma nova solução do problema da indução viria com o advento de uma nova interpretação do conhecimento que haveria de nascer da física do século XX. Ele baseia sua argumentação na crítica ao procedimento causal em que se sustentava a argumentação crítica de Hume.

Depois de destacar o papel desempenhado pela física que nasce entrelaçada com a estatística, e aqui ele destaca o trabalho de Ludwig Boltzmann (1844-1906), Reichenbach argumenta o seguinte:

“A causalidade devia ser formulada como uma relação da classe *se – então sempre*. As leis da probabilidade são leis que têm exceções, mas exceções que representam uma porcentagem regular de casos. A lei da probabilidade é uma relação da classe *se – então uma certa porcentagem*. A lógica moderna oferece meios para tratar com uma relação desta classe, a qual, para distingui-la da *implicação* da lógica ordinária, se chama *implicação de probabilidade*. A estrutura causal do mundo físico é substituída por uma estrutura de probabilidade, e a compreensão do mundo físico pressupõe a elaboração de uma teoria da probabilidade.”<sup>41</sup>

---

<sup>41</sup> Hans Reichenbach. **La filosofía científica**. México: Fondo de Cultura Económica, 1985, p. 172-173. Original de 1951.



**A indução é válida?**

Fonte: Jornal "Folha de S. Paulo"

## Capítulo 3

### Da indução baconiana à crítica de Popper

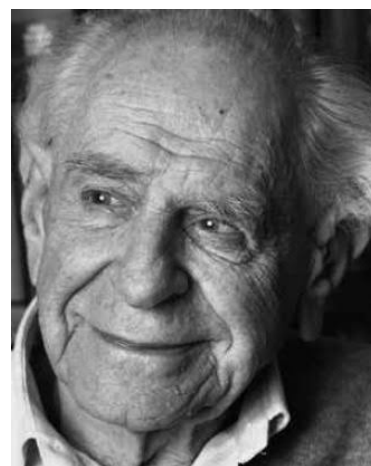
*“Se quisermos evitar o erro positivista de eliminar, por força de critério de demarcação que estabeleçamos, os sistemas teóricos da ciência natural, deveremos eleger um critério que nos permita incluir, no domínio da ciência empírica, até mesmo enunciados insuscetíveis de verificação.”*

Karl Popper <sup>42</sup>

#### 3.1 A crítica de Popper à indução

Neste ponto podemos inserir neste debate a figura de Karl R. Popper, um dos filósofos da ciência mencionados no início desta parte destas notas de aula. Ele tentou, entre outras iniciativas, resolver o problema da indução. Para tanto atacou a concepção tradicional do método científico, baseada na indução e/ou na verificação de hipóteses, tanto do ponto de vista lógico quanto do empírico. Suas ideias iniciais datam da década de 1930, embora sua influência no campo da filosofia da ciência comece a ser evidente a partir do final da década de 1950. É do que vamos tratar a seguir.

Um ponto de concordância inicial entre Popper e os que defendiam a indução como marco distintivo da ciência, encontramos exatamente na preocupação comum em estabelecer um critério de demarcação entre o que pode e o que não pode ser considerado pensamento científico. O motivo dessa preocupação está baseado no esforço de mostrar a diferença entre uma investigação legitimamente científica da mera especulação metafísica.



Karl R. Popper (1902-1994)

Preocupado com essa necessidade de marcar limites para a investigação científica e diferenciá-la de outras formas de investigação da natureza, Popper considera que

---

<sup>42</sup> Karl R. Popper, **op. cit.**, nota 17, p. 41.

“(...) a primeira tarefa da lógica do conhecimento é a de elaborar um conceito de ciência empírica, de maneira a tornar tão definida quanto possível uma terminologia até agora incerta, e de modo a traçar uma clara linha de demarcação entre a ciência e idéias metafísicas - ainda que essas idéias possam ter favorecido o avanço da ciência através de sua história.”<sup>43</sup>

Vimos que o método de investigação indutivo baseava-se no primado da verificação ou da confirmação. E vimos também a argumentação lógica de Hume contra a sua validade. Pois bem, Popper também vai atacar esse verificacionismo indutivo.

“A solução de Popper principia apontando para a assimetria lógica existente entre a verificação e o falseamento. Pondo o ponto em termos da lógica sentencial: embora não exista número de enunciados de observação relatando a observação de cisnes brancos que permita derivar o enunciado universal ‘Todos os cisnes são brancos’, um só enunciado de observação, relatando uma única observação de cisne preto, é suficiente para permitir a dedução lógica do enunciado ‘Nem todos os cisnes são brancos’. Neste importante sentido lógico, as generalizações empíricas, embora não verificáveis, são falseáveis. Isto significa serem as leis suscetíveis de teste, ainda que não sejam demonstráveis: podem as leis científicas ser submetidas a teste mediante sistemático esforço dirigido para sua refutação.”<sup>44</sup>

Assim, no lugar do verificacionismo Popper coloca o falseacionismo como elemento fundamental da investigação científica. Com isso ele pretende ter contornado a objeção de Hume, ou seja, para ele uma lei científica proposta, por exemplo, a partir da observação de acontecimentos particulares, não pode ser cabalmente ou conclusivamente verificada, mas pode ser definitivamente refutada ou falseada. Popper afirma que a indução como investigação científica era logicamente uma quimera.

“Ora, a meu ver não existe a chamada indução. Nestes termos, inferências que levam a teorias, partindo-se de enunciados singulares ‘verificados por experiência’ (não importa o

---

<sup>43</sup> Karl R. Popper, **op. cit.**, nota 17, p. 40.

<sup>44</sup> Bryan Magee, **op. cit.**, nota 33, p. 28-29.

que isto possa significar) são logicamente inadmissíveis. Consequentemente, as teorias *nunca* são empiricamente verificáveis.”<sup>45</sup>

Além de atacar a indução com base na sua inadmissibilidade empírica e lógica, Popper combate também a limitação positivista imposta à ciência com base na indução como critério de demarcação. Dizia ele:

“Se quisermos evitar o erro positivista de eliminar, por força de critério de demarcação que estabeleçamos, os sistemas teóricos de ciência natural, deveremos eleger um critério que nos permita incluir, no domínio da ciência empírica, até mesmo enunciados insuscetíveis de verificação.”<sup>46</sup>

### 3.2 O critério da falseabilidade ou da refutabilidade

É na eleição de seu critério de demarcação que Popper introduz um dos elementos centrais de sua proposta metodológica de desenvolvimento do conhecimento científico, a saber, o critério de falseabilidade, com o qual ele pretende separar os enunciados falseáveis dos não falseáveis, a ciência da metafísica. Apenas os primeiros teriam o direito ao acréscimo do qualificativo científico.

“(…) só reconheerei um sistema como empírico ou científico se ele for passível de comprovação por experiência. Essas considerações sugerem que deve ser tomado como critério de demarcação, não a *verificabilidade*, mas a *falseabilidade* de um sistema. Em outras palavras, não exigirei que um sistema científico seja suscetível de ser dado como válido, de uma vez por todas, em sentido positivo; exigirei, porém, que sua forma lógica seja tal que se torne possível validá-lo através de recurso a provas empíricas, em sentido negativo: *deve ser possível refutar, pela experiência, um sistema científico empírico.*”<sup>47</sup>

---

<sup>45</sup> Karl R. Popper, **op. cit.**, nota 17, p. 41-42.

<sup>46</sup> Karl R. Popper, **op. cit.**, nota 17, p. 42.

<sup>47</sup> Karl R. Popper, **op. cit.**, nota 17, p. 42.

Popper destaca, na sua argumentação, a importância fundamental, para o desenvolvimento das teorias científicas, do papel desempenhado pela hipótese, que, como foi observado por Bertrand Russell, tinha uma relevância limitada no método indutivo.

Para Popper, a hipótese, além de abarcar os exemplos empíricos disponíveis – até aí seria um procedimento indutivo, de acordo com o modo prescrito por Bacon –, deve também permitir explicações que iriam além das aparências exteriores apresentadas pelos fenômenos. Ou seja, permite comentar e explicar o que acontece depois do acontecimento “A” e antes de chegar ao acontecimento “B”.

A hipótese deve oferecer, ainda, uma série de previsões do que poderá ocorrer em outras situações, ou seja, a hipótese deve permitir a construção de deduções a partir de suas afirmações primitivas. Assim, no exemplo da ebulição da água, abordado anteriormente, podemos dizer que Popper argumentaria que, ao constatar, por exemplo, que a água não ferve a 100 graus centígrados em recipientes fechados, devemos perguntar por que isso não ocorre e tentar construir uma hipótese buscando explicar porque a água ferve a 100 graus centígrados em recipientes abertos e, ao mesmo tempo, porque não ferve a essa temperatura em recipientes fechados. Feito isso, isto é, tendo construído tal hipótese, passar-se-ia a exigir do pesquisador que procurasse refutar essa hipótese, ou seja, que fosse à procura de contra-exemplos refutadores significativos.

Com a argumentação acima exposta, o critério da refutabilidade leva-nos a afirmar que o nosso conhecimento não teria evoluído se, ao lado de casos verificadores, não tivessem surgido, por acidente ou não, contra-exemplos como casos refutadores.<sup>48</sup>

É necessário ainda destacar uma preocupação adicional de Popper neste ponto da argumentação. Ele deseja enfatizar a evidência de que o critério de falseabilidade permitiria fornecer uma ligação dos enunciados propostos com a realidade fornecida pelos fatos. Popper destaca essa preocupação com estas palavras:

“Na medida em que um enunciado científico se refere à realidade, ele deve ser falseável; na medida em que não é falseável, não se refere à realidade.”<sup>49</sup>

---

<sup>48</sup> Bryan Magee, **op. cit.**, nota 33, p. 31-32.

<sup>49</sup> Karl R. Popper, **op. cit.**, nota 17, p. 346.

### 3.3 O método científico popperiano

A exemplo do que fizemos com a proposta indutiva, embutida no método científico tradicional, a proposta popperiana pode ser resumida segundo os seguintes passos:

1. existência de um problema a ser resolvido;
2. procura de soluções para o problema através da elaboração de várias hipóteses tentativas e a escolha de uma delas segundo o critério de aceitar aquela que apresenta maior grau de possibilidades de refutação;
3. dedução de consequências dessa hipótese;
4. critério de refutabilidade em ação: a hipótese é testada, isto é, procura-se refutá-la buscando contra-exemplos significativos;
5. passando por esse teste, isto é, na ausência de refutação, a hipótese se transforma na nova teoria;
6. em caso de uma descoberta refutadora ou de uma dedução não confirmada, voltamos ao estágio inicial.

Para entender melhor a diferença de tratamento do termo hipótese entre o método indutivo e o método hipotético-dedutivo acima resumido, aí vai mais um aforismo do *Novum Organum*, de Bacon:

“Para efeito de explanação, chamamos à forma ordinária da razão humana voltar-se para o estudo da natureza de *antecipações da natureza* (por se tratar de intento temerário e prematuro). E à que procede da forma devida, a partir dos fatos, designamos por *interpretações da natureza*.”<sup>50</sup>

Popper, em sua obra, interpreta o termo *antecipação* de Bacon como significando o que ele compreendia por hipótese científica. Creio que dois parágrafos de seu livro *A lógica da pesquisa científica* são esclarecedores a respeito dessa discussão relacionada com o termo hipótese e nos permitem compreender melhor a crítica de Bertrand Russell mencionada anteriormente.

---

<sup>50</sup> Francis Bacon, **op. cit.**, nota 31, p. 18.

*“Não sabemos: só podemos conjecturar. Nossas conjecturas são orientadas por fé não científica, metafísica (embora biologicamente explicável), em leis, em regularidades que podemos desvelar, descobrir. À semelhança de Bacon, procederia descrever a ciência contemporânea – ‘o método de raciocínio que hoje os homens aplicam comumente à natureza’ - como consistindo de ‘antecipações, de intentos temerários e prematuros’ e de ‘preconceitos’.*

*Essas conjecturas ou ‘antecipações’, esplendidamente imaginativas, ousadas, são, contudo, cuidadosamente controladas por testes sistemáticos. Uma vez elaborada, nenhuma dessas ‘antecipações’ é dogmaticamente defendida. Nosso método de pesquisa não se orienta no sentido de defendê-las para provar que tínhamos razão. Pelo contrário, procuramos contestar essas antecipações. Recorrendo a todos os meios lógicos, matemáticos e técnicos de que dispomos, procuramos demonstrar que nossas antecipações são falsas - a fim de colocar, no lugar delas, novas antecipações injustificadas e injustificáveis, novos ‘preconceitos temerários e prematuros’, como Bacon pejorativamente as denominou.”*<sup>51</sup>

Para Popper o objetivo maior da ciência seria a busca da verdade a respeito da natureza, no entanto ele afirmava que essa verdade é inatingível e, assim, só nos restaria buscar uma aproximação cada vez melhor dessa verdade, e para tanto estabelece, através do critério de refutabilidade, a construção de conjecturas e refutações em sucessão.

Além disso, como parte integrante e complementar de seu método hipotético-dedutivo, Popper exige a observação de alguns procedimentos adicionais. Num determinado campo de investigações, a um conjunto  $E_1$  de experiências, fatos observados e deduções, temos associada uma teoria  $T_1$ . Num determinado momento da pesquisa descobre-se, acidentalmente ou não, um fato que inquestionavelmente refuta a teoria  $T_1$ . Passa-se a procurar uma nova teoria, seguindo-se os passos acima esboçados. Escolhida uma nova teoria  $T_2$ , ela estará baseada num novo conjunto experimental/observacional/dedutivo  $E_2$  que corresponde ao acréscimo ao conjunto  $E_1$  do fato que levou à refutação de  $T_1$ . Nesta situação a nova teoria  $T_2$  deverá, portanto, explicar todos os elementos empíricos explicados por  $T_1$ , como também o novo fato, isto é, a teoria  $T_1$  passa a ser um caso particular da teoria  $T_2$ .

---

<sup>51</sup> Karl Popper, **op. cit.**, nota 17, p. 306.

Ainda com relação à busca da verdade, Popper acrescenta, nessa comparação entre duas teorias, um argumento que ele denominava de critério de verossimilitude (ou verossimilhança), isto é, o caráter verossímil das teorias, ou seja, o quanto elas poderiam se aproximar da verdade possível. Popper, como fica claro de sua defesa da mudança científica que se processa pela refutação de uma teoria que não consiga dar conta, por exemplo, de uma nova observação, não acredita que uma determinada teoria científica possa ser considerada verdadeira com toda certeza. Embora aqui não caiba um aprofundamento maior sobre essa temática a que Popper dedicou parte significativa de seu livro *Conhecimento Objetivo*, publicado em 1972, creio que mais uma vez vale a pena ler algo que ele escreveu sobre as noções de verdade e verossimilitude:

“A fim de esclarecer o que estamos fazendo quando procuramos a verdade, devemos, pelo menos em alguns casos, ser capazes de dar razões para a alegação intuitiva de que chegamos *mais perto da verdade*, ou de que alguma teoria  $T_1$  é superada por alguma nova teoria, digamos  $T_2$ , porque  $T_2$  é mais semelhante à verdade do que  $T_1$ . (...)”

Em geral, podemos dizer que só teorias *concorrentes* – tais como as teorias da gravitação de Newton e de Einstein – são intuitivamente comparáveis com respeito a seus conteúdos (...).

A comparabilidade intuitiva dos conteúdos da teoria de Newton (N) e da de Einstein (E) pode ser estabelecida da seguinte forma: (a) para cada questão a que a teoria de Newton apresente uma resposta a teoria de Einstein apresenta uma resposta que é, pelo menos, igualmente precisa; (...) (b) há questões a que a teoria de Einstein E pode dar uma resposta, ao passo que a teoria de Newton N não a dá; isto torna o conteúdo de N definitivamente menor que o de E. (...)

Isto torna a teoria de Einstein *potencialmente* ou *virtualmente* a melhor teoria; pois mesmo antes de qualquer teste podemos dizer: se verdadeira, ela tem maior poder explicativo. Além disso, desafia-nos a realizar maior variedade de testes. Assim, oferece-nos novas oportunidades para aprender mais a respeito dos fatos: sem o desafio da teoria de Einstein, nunca teríamos medido (com o maior grau de precisão necessário) a distância aparente entre as estrelas que rodeiam o sol durante um eclipse, ou o desvio vermelho da luz emitida pelas chamadas ‘anãs brancas’. (...)

(...) Uma teoria é tanto mais ousada quanto maior for seu conteúdo. É também a mais arriscada: é a mais provável de começar com o que será falso. Tentamos encontrar seus pontos fracos, para refutá-la. Se falharmos em refutá-la, ou se as refutações que

encontramos forem ao mesmo tempo também refutações da teoria mais fraca que a precedeu, então temos razão para suspeitar, ou para conjecturar, que a teoria mais forte não tem conteúdo de falsidade maior que o de sua predecessora mais fraca e que, portanto, tem o maior grau de verossimilitude. (...)

A verossimilitude neste sentido, sugiro, é um alvo mais adequado da ciência – especialmente das ciências naturais – do que a verdade (...).

Nestas últimas seções esbocei o (...) conceito de *verossimilitude* que nos permita falar, sem receio de dizer disparates, de teorias que *são melhores* ou *piores aproximações da verdade*. Não sugiro, sem dúvida, que possa haver um critério para aplicabilidade desta noção, assim como nenhum há para a noção da verdade. Mas alguns de nós (por exemplo, o próprio Einstein) às vezes gostam de dizer coisas tais como que temos razão em conjecturar que a teoria da gravidade de Einstein *não é verdadeira*, mas é uma *aproximação melhor da verdade* do que a de Newton. Ser capaz de dizer tais coisas com boa consciência parece-me um desiderato importante da metodologia das ciências naturais.”<sup>52</sup>

Assim, podemos resumir essa abordagem popperiana dessas duas teorias dizendo que a mecânica newtoniana seria um caso particular – no limite clássico de velocidades bem inferiores à velocidade da luz – da mecânica relativística de Einstein e, ainda, que a teoria de Einstein seria considerada possuir maior verossimilitude, ou ser mais verdadeira, que a de Newton. Voltaremos ainda a discutir a comparação entre essas duas teorias mais adiante, quando introduzirmos as propostas de Thomas S. Kuhn e de Gaston Bachelard, que apresentam sobre elas interpretações bem diferentes da defendida por Popper.

Para quem gosta de frases de efeito simplificadoras e econômicas, de acordo com a proposta epistemológica de Popper, uma possível definição de cientista seria: “*Cientista é o homem (ou mulher) que procura provar que as teorias científicas existentes são falsas*”.

### 3.4 Em defesa da racionalidade

Popper acrescenta ainda que todo esse procedimento de aproximação da verdade tem que ser guiado racionalmente, isto é, fatores subjetivos, estéticos e outros, não desempenhariam nenhum papel na formação e avaliação de teorias científicas. Ele enfatiza que mesmo a análise

---

<sup>52</sup> Karl Popper. **Conhecimento objetivo**. São Paulo: Edusp e Itatiaia, 1975, p. 53, 58, 59 e 308.

psicológica do ato criador pode apenas esclarecer acerca da motivação que o cientista demonstrava para levar adiante seu projeto de pesquisa. Seria aquele momento que se costuma designar como sendo o contexto da descoberta.

O estado de espírito, a formação subjetiva, seus desejos, sua visão de mundo, suas preferências estéticas, não afetariam diretamente a elaboração de uma teoria que teria sua formulação e avaliação exclusivamente guiada por critérios lógicos e empíricos bem definidos. Esses critérios, que incluiriam a refutabilidade, constituiriam o contexto da justificação.

Dessa forma, os critérios da ciência seriam independentes e imparciais. Eles seriam neutros e objetivos. Representariam características que nascem do homem racional que encontra sempre caminhos objetivos para distinguir crenças válidas das não válidas. Para Popper, a prática científica seria um empreendimento essencialmente racional. Ele destaca também que um conflito importante de nossa época era devido à oposição entre o racionalismo e o irracionalismo.

Essa racionalidade seria expressa, através do critério de refutabilidade, segundo dois níveis de desenvolvimento:

1. nível experimental: faz referência a coisas e processos percebidos, observados e é testado experimentalmente;
2. nível teórico: sua função é explicar as leis experimentais que são generalizações de fenômenos observados diretamente; este nível não pode ser testado diretamente.

Isto significa que as leis experimentais teriam a vantagem de sobreviver a uma eventual morte ou refutação de uma teoria. Quando o desacordo com a experiência resultar na falsificação de determinada teoria e a sua substituição por outra que não está em conflito com os dados experimentais em questão, os fatos genuínos que haviam sido utilizados na formulação da teoria anterior não são descartados.

Para Popper, embora a ciência possa não ser cumulativa no nível teórico, ela o é no nível experimental. Desta forma, no caso de haver uma inconsistência entre dois conjuntos de hipóteses - observacionais e teóricos - rejeitaríamos a teoria, pois ela pertence a um nível superior de abstração.

Argumentemos um pouco mais sobre essa situação de confronto entre teoria e dados observacionais. De duas teorias  $T_1$  e  $T_2$ , ambas relacionadas com um determinado conjunto de fatos empíricos, escolhemos a teoria  $T_2$  desde que a teoria  $T_1$  não passou pelos testes de

refutabilidade a que foi submetida. Surge um problema: T<sub>1</sub> foi abandonada com base em dados experimentais. Será que isto significa que esses dados são absolutos? Isto é, eles não são passíveis de interpretação?

Embora as leis experimentais sobrevivam à refutação de uma teoria que lhes estava associada, Popper tem pleno entendimento de que os fatos empíricos são problemáticos, como fica claro quando ele cita em seu livro *A lógica da pesquisa científica* uma frase do matemático alemão Hermann Weyl (1885-1955), que sinaliza o modo de funcionar de seu critério de refutabilidade:

“De uma vez por todas desejo deixar registrada minha ilimitada admiração pelo trabalho do experimentador em sua luta para retirar fatos interpretáveis de uma natureza fechada, que sabe muito bem como enfrentar nossas teorias com um decisivo NÃO – ou com um inaudível SIM.”<sup>53</sup>

Assim, Popper reconhece que seria um procedimento totalmente irracional considerar o conhecimento experimental fundamental como não-problemático, isto é, ele reconhece que esse conhecimento experimental é também passível de interpretação. Popper acrescenta uma esclarecedora nota de rodapé, da qual reproduzo um trecho a seguir, quando analisa a relação entre o trabalho do teórico e do experimentador e conclui que “*a teoria domina o trabalho experimental*”. Eis a nota:

“(…) as observações e, com mais forte razão, os enunciados de observação e enunciados que registram resultados experimentais, são sempre *interpretações* dos fatos observados – são *interpretações à luz de teorias*. Aí está um dos principais motivos pelos quais sempre se torna ilusoriamente fácil encontrar *verificações* de uma teoria e que explica por que devemos adotar uma atitude *altamente crítica*, em relação a nossas teorias, se não quisermos raciocinar em círculo – porque, em suma, devemos adotar a atitude de *refutação* frente às teorias.”<sup>54</sup>

---

<sup>53</sup> Karl R. Popper, **op. cit.**, nota 17, p. 308.

<sup>54</sup> Karl R. Popper, **op. cit.**, nota 17, p. 115.

Então, como defender a racionalidade quando a escolha entre duas teorias propostas é baseada exclusivamente na comparação com esses dados experimentais que são passíveis de interpretação? A resposta é dada de forma metodológica por Popper com base na atitude crítica no uso do critério de refutabilidade, como fica explícito na citação da nota acima.

Popper também ressalta que essa crítica deve ser feita de tal forma que a racionalidade seja preservada a todo custo. Brian Easlea afirma que, segundo Popper

“(...) quase todo o vasto conhecimento fundamental permanecerá, por razões práticas, não questionado; a tentativa de questioná-lo no todo, isto é, ter de começar tudo de novo, pode levar-nos a um colapso do debate crítico [... *Assim,*] embora cada uma de nossas afirmações possa ser ameaçada, é completamente impossível ameaçar a todas ao mesmo tempo (...) todo criticismo deve ser feito aos poucos (...) nós devemos nos concentrar no nosso problema (...) e tentar resolver não mais que um problema de cada vez.”<sup>55</sup>

Oferecemos um pálido retrato do, assim chamado, método hipotético dedutivo de Karl Popper, partindo da indução baconiana e chegando ao refutacionismo popperiano.

Não podemos deixar de destacar, neste ponto, um interessante aspecto da proposta popperiana que oferece pontos de reflexão sobre várias dimensões do conhecimento científico como o critério de verdade, a objetividade do conhecimento e o imaginário. Trata-se do fato de que sua proposta se assenta sobre a provisoriedade do saber que se explicita no duplo conjectura e refutação. O conhecimento evolui pela construção de conjecturas que só serão validadas pela sua resistência a tentativas de refutação e só serão substituídas quando a refutação tornar-se evidente.

É necessário portanto destacar que quando Popper falava em refutação de uma teoria ele não pretendia que isso ocorresse imediatamente após uma determinada experiência, ou uma nova descoberta, não concordar com uma dada dedução teórica. Isso seria um “refutacionismo ingênuo”. A primeira instância de refutação simplesmente criaria uma nova situação-problema, cumprindo a primeira fase do método proposto por Popper. Só após o surgimento de uma nova teoria que incorporasse a anterior e resolvesse esse problema. isto é, explicasse o fato novo, é que poderíamos falar em efetivação da refutação.

---

<sup>55</sup> Brian Easlea. **Liberation and the aims of science**. London: Sussex Univ. Press, 1973, p. 9-10.

Na prescrição de um processo de investigação científica, Popper estabelecia a possibilidade de uma mudança contínua, uma espécie de “revolução permanente” localizada.

No próximo capítulo apresentaremos e discutiremos a proposta de Thomas S. Kuhn que polemiza, segundo vários pontos de vista, com a proposta de Popper.

## Um parêntesis

Um poema de Robert Desnos, poeta francês nascido em Paris no dia 4 de julho de 1900 e morto no campo de Concentração de Tereszin, na Tchecoslováquia, em 8 de junho de 1945. Foi, ao lado de André Breton, um dos fundadores do surrealismo.

*Um dia o jovem capitão Jonathan,  
ele tinha dezoito anos nessa época,  
capturou um pelicano  
numa ilha do extremo oriente.*

*Na manhã seguinte,  
este pelicano,  
de Jonathan,  
botou um ovo branco  
e dele apareceu  
um pelicano  
surpreendentemente igual ao primeiro.*

*E este segundo pelicano  
botou por seu turno  
um ovo branco,  
do qual surgiu inevitavelmente  
um outro  
o qual fez a mesma coisa de novo.*

*Esta espécie de coisa pode continuar  
por um tempo muito longo,  
se você não fizer uma omelete.*

(Tradução livre de João Z.)

## Capítulo 4

### Da refutação de Popper à revolução de Kuhn

*“Os sábios contentaram-se com proscrever todos os outros competidores, passados, presentes e futuros, pondo fim a toda controvérsia sobre o assunto, pela promulgação de uma lei Meda, em virtude da qual os caminhos aristotélico e baconiano são, e por direito devem ser, as únicas e possíveis avenidas que levam ao conhecimento. (...) Agora, garanto-lhe, da maneira mais positiva, continua a tardar o progresso da verdadeira Ciência, que realiza seus mais importantes avanços – como toda a história mostrará – por saltos, aparentemente intuitivos.”*

Edgar Allan Poe <sup>56</sup>

#### 4.1 Introdução

Estudamos brevemente no capítulo anterior algumas ideias centrais desenvolvidas por Karl Popper sobre a natureza da mudança científica, isto é, sobre seu modelo hipotético-dedutivo de substituição de teorias científicas.

Popper distancia-se da proposta do método da indução como também da proposta do empirismo lógico que, além de enfatizarem o critério da verificação, davam pouquíssimo destaque à fabricação de hipóteses que seriam submetidas a esse critério, como já tivemos oportunidade de analisar. A ênfase de Popper concentra-se na enunciação de teorias audaciosas que apresentam, na sua estrutura, um alto potencial de instâncias refutáveis, ou melhor dizendo, teorias potencialmente refutáveis.

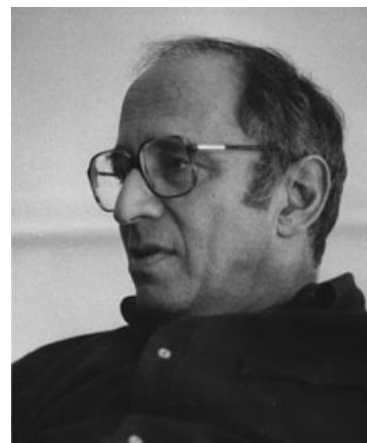
“Popper elogia as teorias audaciosas e refutáveis de Newton, Maxwell e Einstein, assim como os experimentos ‘cruciais’ realizados por Michelson e Morley para testar a hipótese do éter, e por Eddington para verificar a teoria geral da relatividade - cruciais porque confirmaram uma hipótese e rejeitaram outras. Ele concluiu que, toda vez que a ciência protege as suas teorias, ela cai na estagnação.” <sup>57</sup>

<sup>56</sup> Edgar Allan Poe, **op. cit.**, nota 8, p. 455-456.

<sup>57</sup> G. F. Kneller. **A ciência como atividade humana**. São Paulo: Zahar e EDUSP, 1980, p. 60-61.

Desta forma, como já observamos, a proposta popperiana pode ser sintetizada pelo par conjectura-refutação, que comparece até no título de alguns de seus trabalhos.

Em 1962, o físico, historiador e filósofo da ciência, Thomas S. Kuhn escreveu o livro *A estrutura das revoluções científicas*, onde apresentava uma proposta de desenvolvimento do conhecimento científico que, em seus aspectos centrais, chocava-se frontalmente com o modelo de Popper, como veremos a seguir.



Thomas S. Kuhn (1922-1996)

Kuhn lançou seu ataque radical e controvertido não apenas à crença convencional de que a ciência progride cumulativamente no sentido de um maior entendimento da realidade física, passo a passo, guiada pela lógica e o apoio de uma base empírica independente da teoria, como também contra os argumentos de Popper de que os cientistas deveriam submeter suas teorias a testes severíssimos e refutá-las quando ocorre um desacordo entre suas teorias e o conhecimento fundamental reconhecido.

Embora Popper utilize elementos históricos como fonte de inspiração para sua abordagem epistemológica, esses elementos são incluídos apenas para estabelecer sua análise crítica do desenvolvimento científico. Por outro lado, Kuhn utiliza a história da ciência como eixo orientador de sua epistemologia. Suas investigações sobre temas históricos da física clássica e contemporânea foram básicas para a construção de seu livro acima mencionado. É devido a essa diferença que alguns estudiosos da filosofia da ciência entendam que enquanto a epistemologia de Popper é prescritiva, a de Kuhn seria descritiva.

O breve sumário da proposta de Kuhn será quase totalmente baseado na leitura do livro citado acima, onde ele descreve o desenvolvimento científico segundo duas práticas distintas e complementares: a ciência normal e a revolução científica.

A ciência normal, segundo Thomas Kuhn, representaria o procedimento de investigação científica da quase totalidade dos cientistas num determinado período histórico, enquanto a revolução científica representaria a atividade posta em prática por determinados cientistas em épocas especiais da história da ciência, por razões que deverão ser esclarecidas mais adiante.

Essa divisão da prática científica em função dos períodos históricos leva Kuhn a introduzir conceitos sociológicos, como o de comunidade científica, na formulação de sua proposta.

## 4.2 Ciência normal e paradigma

Thomas Kuhn apresenta o seu conceito de ciência normal com estas palavras:

“(...) pesquisa firmemente baseada em uma ou mais realizações científicas passadas. Essas realizações são reconhecidas durante algum tempo por alguma comunidade científica específica como proporcionando os fundamentos para sua prática posterior.”<sup>58</sup>

Essas realizações científicas passadas acabam sendo incorporadas ao corpo do conhecimento científico sob as mais variadas formas: conceitos, princípios, metodologia, instrumental experimental e matemático, modelos, etc. Todo esse conjunto constitui um conceito importante no trabalho de Kuhn: o *paradigma*. Desta forma, a ciência normal seria caracterizada por paradigmas que orientariam a pesquisa científica. O conceito de paradigma de Kuhn não tem uma única explicação. Margaret Masterman, num estudo em que procurou elucidar o significado dessa concepção, identificou nada menos que vinte e um sentidos diferentes em seu livro *A estrutura das revoluções científicas*.<sup>59</sup>

Alberto Oliva afirma que:

“Na metaciência de Kuhn, o conceito de paradigma é vital. Numa de suas definições mais esclarecedoras o paradigma é apresentado como um conjunto de realizações científicas universalmente reconhecidas que, durante algum tempo, fornecem problemas e soluções modelares para uma comunidade de praticantes de uma ciência. Exemplos de paradigma: mecânica clássica, astronomia ptolomaica e copernicana.”<sup>60</sup>

Como surge e se estabelece um paradigma?

---

<sup>58</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 29.

<sup>59</sup> Margaret Masterman. A natureza de um paradigma. In: Imre Lakatos e Alan Musgrave. **A crítica e o desenvolvimento do conhecimento científico**. São Paulo: Cultrix e EDUSP, 1979, p. 75-79. Original inglês de 1970.

<sup>60</sup> Alberto Oliva. **op. cit.**, nota 10, p. 32-33.

Kuhn responde dizendo que inicialmente qualquer campo de trabalho científico passa por uma fase pré-paradigmática, isto é, uma fase em que diferentes pesquisadores apresentam distintos procedimentos e interpretações para um mesmo conjunto de fenômenos. Cita vários exemplos: o estudo da natureza da eletricidade, a óptica física, a relatividade, entre outros. Kuhn considera surpreendente o fato de tais divergências virem a desaparecer devido ao triunfo de uma das teorias pré-paradigmáticas que passava, a partir de então, a ser a teoria aceita pela comunidade científica, isto é, transformava-se num paradigma.

Uma questão crucial: qual é, então, a natureza de uma pesquisa que é baseada essencialmente na aceitação de um ou mais paradigmas por parte de uma comunidade científica?

“Se o paradigma representa um trabalho que foi completado de uma vez por todas, que outros problemas deixa para serem resolvidos pelo grupo por ele unificado?”<sup>61</sup>

A resposta é que o paradigma, além de resolver determinados problemas de forma mais satisfatória do que as teorias que com ele competiam o faziam, constitui também uma promessa de que outros e novos problemas serão por ele resolvidos.

“A ciência normal consiste na realização dessa promessa, realização que se obtém ampliando-se o conhecimento daqueles fatos que o paradigma apresenta como particularmente relevantes, aumentando-se a correlação entre esses fatos e as predições do paradigma e articulando-se ainda mais o próprio paradigma.”<sup>62</sup>

### 4.3 A ciência normal em ação

A atividade do cientista normal se restringiria ao aprimoramento do paradigma dominante através da articulação da teoria paradigmática, resolvendo algumas ambiguidades, permitindo a solução de novos problemas, à determinação de fatos significativos e ao ajuste dos mesmos com a teoria.

Retomando aqui algo que foi abordado quando falamos de Popper, podemos afirmar que esse ajuste – de fatos com teorias – é problemático, pois os primeiros podem ser explicados até

---

<sup>61</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 43.

<sup>62</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 44.

por teorias contraditórias. O movimento de planetas encontrava explicações diferentes nas teorias ptolomaica e copernicana, a luz encontrava guarida tanto na teoria ondulatória quanto na teoria corpuscular, são alguns exemplos desse ajuste entre fatos e teorias.

O objetivo primeiro da ciência normal não é a procura e produção de novidades, mas o aperfeiçoamento da teoria dominante. Os problemas da ciência normal se resumem em atingir algo já antecipado pela teoria, resolver toda uma série de problemas matemáticos, preparar uma parafernália de instrumental experimental ou ajustar a natureza dentro do recipiente fornecido pela ciência normal.

Como veremos mais adiante, podemos interpretar os trabalhos desenvolvidos por muitos físicos nas décadas finais do século XIX como tentativas de melhorar a aplicabilidade da física clássica. Mesmo os trabalhos de Planck, incluindo os dois clássicos do segundo semestre de 1900, poderiam ser enquadrados na prática da ciência normal, isto é, na busca de resolver ou melhorar a solução de determinado problema apelando às teorias físicas dominantes.

Toda essa atividade assemelha-se muito com um jogo de quebra-cabeças, isto é, o cientista tem que juntar todas as peças a fim de obter, no final, uma figura que ele já conhecia de antemão. E é necessário que seja exatamente aquela figura, pois, uma outra figura qualquer não seria aceita como solução adequada do jogo. Qualquer falha em conseguir chegar àquela figura seria atribuída ao cientista que estava procurando resolver o problema e não às regras do jogo ou às peças que o compõem.

Segundo Kuhn, algo dessa espécie ocorre com a prática da ciência normal. Qualquer falha em atingir a solução de um determinado problema é, em primeira instância, cobrada do cientista e não da teoria científica. Teremos oportunidade de discutir na segunda parte destes textos, por exemplo, as inúmeras tentativas de solucionar o problema da radiação do corpo negro, e poderemos examinar esse processo tanto à luz das ideias de Kuhn, quanto nas de Popper ou das outras propostas epistemológicas aqui discutidas.

Como consequência da adoção de um determinado paradigma fica estabelecido um critério para escolha de problemas de pesquisa: só serão dignos de pesquisa os problemas propostos na linguagem fornecida pelo paradigma. Percebe-se aqui um procedimento diferente daquele das propostas epistemológicas anteriores que sugeriam um critério de demarcação entre ciência e outras formas de investigação para eleger os temas que seriam dignos de serem pesquisados.

“Outros problemas, mesmo muitos dos que eram anteriormente aceitos, passam a ser rejeitados como metafísicos ou como sendo parte de outra disciplina. Podem ainda ser rejeitados como demasiado problemáticos para merecerem o dispêndio de tempo. Assim, o paradigma pode até mesmo afastar uma comunidade daqueles problemas sociais relevantes que não são redutíveis à forma de quebra-cabeças, pois não podem ser enunciados nos termos compatíveis com os instrumentos e conceitos proporcionados pelo paradigma.”<sup>63</sup>

Kuhn afirma que a ciência normal acaba sendo uma atividade científica muito bem sucedida, no sentido de que a ciência normal, um empreendimento altamente cumulativo, consegue alargar o alcance e a precisão do conhecimento científico (paradigma). Devido a essa persistência de investigação, a atividade do cientista normal, mesmo que esse não seja seu objetivo, pode favorecer o surgimento de uma mudança de paradigma.

O conjunto de regras, que acompanha a prática da ciência normal, engloba:

1. conceitos e leis científicas;
2. equipamento experimental e seu modo de uso;
3. filosofia dominante.

Esse modo de fazer pesquisa é aprendido bem cedo. Nunca se aprende conceitos, leis científicas ou a forma de utilização de instrumentos, em abstrato. Essa aprendizagem sempre vem acompanhada de farta aplicação, tanto teórica quanto experimental.

Kuhn ainda ia mais longe ao afirmar que diferentes experiências educacionais de formação dos cientistas produzem diferenças de concepções sobre a ciência. Embora a mecânica quântica seja básica para todos os físicos, ela seria interpretada de forma variada por físicos de diferentes especializações ou de diferentes formações. Essa representação variada da mecânica quântica dependeria dos cursos que tivessem frequentado, dos textos lidos e das revistas consultadas.

---

<sup>63</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 60.

#### 4.4 Da ciência normal à crise

Então, se o objetivo da ciência normal não é a produção de novidades empíricas ou teóricas, como a ciência se desenvolve de um paradigma para outro?

Kuhn responde segundo dois aspectos interligados: descobertas ou novidades empíricas e invenções ou novidades teóricas, que ele distinguia com a seguinte argumentação:

“Essa distinção entre descoberta e invenção ou entre fato e teoria revelar-se-á em seguida excessivamente artificial. Sua artificialidade é uma pista importante para várias das principais teses deste ensaio. (...) A descoberta começa com a consciência da anomalia, isto é, com o reconhecimento de que, de alguma maneira, a natureza violou as expectativas paradigmáticas que governam a ciência normal. Segue-se então uma exploração mais ou menos ampla da área onde ocorreu a anomalia. Esse trabalho somente se encerra quando a teoria do paradigma for ajustada, de tal forma que o anômalo se tenha convertido no esperado. A assimilação de um novo tipo de fato exige mais do que um ajustamento aditivo da teoria. Até que tal ajustamento tenha sido completado – até que o cientista tenha aprendido a ver a natureza de um modo diferente – o novo fato não será considerado completamente científico.”<sup>64</sup>

Um exemplo desse procedimento é discutido longamente por Kuhn quando aborda a descoberta dos raios X por Roentgen, em 1895. Foi um caso típico de descoberta por acidente. Tal fato ocorreu num dia em que Roentgen percebeu uma *anomalia*, isto é, ele notou um brilho estranho num material sensível situado nas proximidades do tubo de raios catódicos que ele estava utilizando nas suas experimentações. Roentgen interrompeu o curso de suas investigações normais e passou a investigar esse fenômeno, chegando à conclusão de que a causa do estranho brilho

“(...) provinha do tubo de raios catódicos, que a radiação projetava sombras e que não podia ser desviada por um ímã, entre outras coisas. Antes de anunciar sua descoberta, Roentgen convencera a si próprio que esse efeito não se devia aos raios catódicos, mas a um agente dotado de alguma semelhança com a luz. (...)”

---

<sup>64</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 78.

(...) a descoberta de Roentgen começou com o reconhecimento de que sua tela brilhava quando não devia fazê-lo (...) a percepção da anomalia – isto é, de um fenômeno para o qual o paradigma não preparara o investigador – desempenhou um papel essencial na preparação do caminho que permitiu a percepção da novidade (...)

(...) a [descoberta] dos raios X não esteve, durante uma década, implicada em qualquer transtorno mais óbvio da teoria científica. Em que sentido pode-se então afirmar que a assimilação dessa descoberta tornou necessária uma mudança de paradigma? Existem boas razões para recusar essa mudança. Não há dúvida, entretanto, de que os paradigmas aceitos por Roentgen e seus contemporâneos não poderiam ter sido usados para prever os raios X. (A teoria eletromagnética de Maxwell ainda não fora aceita por todos e a teoria das partículas de raios catódicos era uma entre muitas especulações existentes). Mas nenhum desses paradigmas proibia (pelo menos em algum sentido óbvio) a existência dos raios X, tal como a teoria do flogisto proibira a interpretação de Lavoisier a respeito do gás de Priestley. [Aqui Kuhn está se referindo à descoberta do oxigênio] Ao contrário: a prática e a teoria científica aceitas em 1895 admitiam diversas formas de radiação – visível, infravermelha e ultravioleta. Por que os raios X não puderam ser aceitos como uma nova forma de manifestação de uma classe bem conhecida de fenômenos naturais? Por que não foram recebidos da mesma maneira que, por exemplo, a descoberta de um elemento químico adicional? (...)

Esse empreendimento era um projeto habitual na ciência normal da época; o sucesso de uma investigação era motivo para congratulações, mas não para surpresas.

Contudo, os raios X foram recebidos não só com surpresa mas também com choque. A princípio Lorde Kelvin considerou-os um embuste muito bem elaborado. Outros, embora não pudessem duvidar das provas apresentadas, sentiram-se confundidos por elas. Embora a existência dos raios X não estivesse interdita pela teoria estabelecida, ela violava expectativas profundamente arraigadas. Creio que essas expectativas estavam implícitas no planejamento e na interpretação dos procedimentos de laboratório admitidos na época. Na última década do século XIX, o equipamento de raios catódicos era amplamente empregado em numerosos laboratórios europeus. Se o equipamento de Roentgen produzira os raios X, então muitos outros experimentadores deviam estar produzindo-os sem consciência disso. Talvez esses raios, que poderiam muito bem ter outras origens não conhecidas, estivessem implícitos em fenômenos anteriormente explicados sem referência a eles. Na pior das hipóteses, no futuro, diversos tipos de aparelhos muito familiares teriam que ser protegidos por uma capa de chumbo. Trabalhos anteriormente concluídos, relativos a projetos de

ciência normal, teriam que ser refeitos, pois os cientistas não haviam reconhecido, nem controlado, uma variável relevante. Sem dúvida, os raios X abriram um novo campo de estudo, ampliando assim os domínios potenciais da ciência normal. Mas também modificaram (e esse é o ponto mais importante) campos já existentes. No decorrer desse processo, negaram a determinados tipos de instrumentação, que anteriormente eram considerados paradigmáticos, o direito a esse título.”<sup>65</sup>

Percebemos, assim, que essas experiências, que geraram descobertas não previstas pelas teorias paradigmáticas, provocaram mudanças, ou pelo menos, causaram certa instabilidade que, por sua vez, contribuiu para que se estabelecesse uma crise na ciência.

#### 4.5 A crise e seu desenrolar

Não são apenas as descobertas e anomalias que vão provocar a crise. Um elemento importante para a eclosão da crise é o surgimento de várias teorias conflitantes que buscam explicar um mesmo fenômeno ou conjunto de fenômenos. Assim, por exemplo, a termodinâmica nasce da colisão entre duas teorias existentes no século XIX e a mecânica quântica surge devido a uma variedade de dificuldades ligadas à explicação da radiação do corpo negro inicialmente, seguida quase simultaneamente pelo tratamento dos calores específicos e do efeito fotoelétrico, entre outros.

Traduzindo tudo isso para a linguagem de paradigma e de quebra-cabeças, introduzidas por Kuhn, poderíamos dizer o seguinte: a atividade do cientista normal resume-se na resolução de quebra-cabeças utilizando as regras estabelecidas a partir de um determinado paradigma. Tais regras são os conceitos e princípios, formalismo matemático e instrumental disponível e seu uso.

Forçando o paradigma, com esse procedimento, a resolver um número cada vez maior de problemas relacionados com um conjunto cada vez maior de fatos significativos, surgirão situações em que um determinado quebra-cabeças começa a resistir de tal forma a tentativas sérias de solução que a comunidade, ou pequena fração dela, na maioria das vezes, começa a perceber que não é por falta de habilidade dos pesquisadores que isso está ocorrendo. Percebe-

---

<sup>65</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 83-86.

se, dessa forma, que aquele problema ameaça destruir a técnica normal de solução de quebra-cabeças. Tal situação provoca a *crise*, isto é, a proliferação de diferentes versões de uma teoria é um sintoma da crise.

Apesar da eclosão da crise, os cientistas não renunciam ao paradigma. Uma teoria científica será considerada invalidada apenas quando já existir uma candidata para tomar seu lugar, isto é, a recusa de um paradigma e a aceitação de um outro são fenômenos que ocorrem simultaneamente. Mas, antes que esse confronto ocorra, o cientista procurará aproximar fato e teoria. É nessa tentativa de aproximação que surgem as ideias de verificação, procedimento tradicional, ou de refutação, procedimento popperiano. Kuhn, por seu lado, responde com o esquema de quebra-cabeças.

Esse estado de crise provocou interessantes comentários, ou desabafos, de importantes cientistas, como destaca o próprio o Kuhn:

“(...) Copérnico queixou-se de que no seu tempo os astrônomos eram tão ‘incoerentes nessas investigações [*astronômicas*] (...) que não conseguiam explicar a duração constante das estações do ano’. ‘Com eles’, continua, ‘é como se um artista reunisse as mãos, os pés, a cabeça e outros membros de imagens de diversos modelos, cada parte muitíssimo bem desenhada, mas sem relação com um mesmo corpo. Uma vez que elas não se adaptam umas às outras de forma alguma, o resultado seria antes um monstro que um homem’ (...)”

Wolfgang Pauli, nos meses que precederam o artigo de Heisenberg que indicaria o caminho para uma nova teoria dos quanta, escreveu a um amigo: ‘No momento, a física está mais uma vez em terrível confusão. De qualquer modo, para mim é muito difícil. Gostaria de ter-me tornado um comediante de cinema ou algo do gênero e nunca ter ouvido falar de física’.”<sup>66</sup>

#### 4.6 A revolução científica

Kuhn afirma que a passagem de um paradigma em crise para um novo paradigma que resolve a crise não é um processo cumulativo e isolado. Nessa transição ocorre uma reconstrução do campo de pesquisa a partir dos seus fundamentos, processo em que mudam conceitos, métodos e aplicações.

---

<sup>66</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 114-115.

Esse processo é iniciado quando teorias especulativas são propostas com a intenção de explicar os quebra-cabeças que não foram solucionados de forma adequada com a teoria aceita até então.

Pode-se mencionar aqui uma espécie de característica presente no pensamento dialético nesse procedimento da ciência normal: de tanto procurar afirmar a ciência normal, isto é, ampliar seu campo de aplicação, o cientista acaba provocando a sua negação.

Nesses momentos tudo seria permitido: surgem divagações filosóficas sobre os problemas, as regras tornam-se menos rígidas e as fronteiras se misturam. Claro que tudo isso não ocorre pacificamente no interior dos grupamentos acadêmicos. Bastaria mencionar a polêmica que havia surgido à época em que Newton propunha sua teoria da gravitação universal quando, provavelmente, ele teria apelado para ideias originárias de campos não aceitos como científicos.

É desse contexto que se originam os elementos constitutivos da revolução científica, onde o termo revolução merece uma atenção especial por parte de Kuhn no seu livro de 1962. Ele sente necessidade de conceituar revolução estabelecendo um paralelo com o uso desse termo nas situações sócio-políticas.

“(…) Face às grandes e essenciais diferenças que separam o desenvolvimento político do científico, que paralelismo poderá justificar a metáfora que encontra revoluções em ambos? A esta altura um dos aspectos do paralelismo já deve ser visível. 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 propostos 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 funcionamento defeituoso, que pode levar à crise, é um pré-requisito para a revolução (…)

(…) o estudo histórico da mudança de paradigma revela características muito semelhantes a essas, ao longo da evolução da ciência. Tal como a escolha entre duas instituições políticas

em competição, a escolha entre paradigmas em competição demonstra ser uma escolha entre modos incompatíveis de vida comunitária.”<sup>67</sup>

Como fizemos ao abordar a proposta de Popper, é interessante incluir aqui uma análise realizada por Kuhn a respeito da diferenciação entre a física newtoniana e a einsteiniana.

Utilizando a dinâmica acima resumida, Kuhn entende a mecânica de Newton como fundamentalmente incompatível com a mecânica de Einstein. Em geral, a mecânica newtoniana é considerada como um caso particular da mecânica relativística einsteiniana, desde que sejam levadas em consideração apenas pequenas velocidades de deslocamento de objetos, o chamado limite clássico que uniria as duas teorias.

Com base nisso, podemos construir o seguinte raciocínio: consideremos o conjunto de enunciados  $E_1, E_2, \dots E_n$  representando os elementos da teoria da relatividade de Einstein: tempo, posição espacial, massa de repouso, momento linear, etc. Consideremos também o conjunto  $N_1, N_2, \dots N_m$ , representando os elementos da teoria de Newton: tempo, posição espacial, velocidade, energia, etc. Dos  $E_n$ , por manipulação dos conceitos e princípios através do uso da lógica e da matemática e amparados na observação, podemos deduzir outros enunciados. Assim, se acrescentarmos aos  $E_n$  um  $E_i$  da forma  $(v/c)^2$  muito menor que 1, restringiremos o intervalo das variáveis de tal forma que, pela manipulação adequada dos  $E_n$  da teoria de Einstein chegamos aos  $N_m$  da teoria de Newton: leis do movimento, lei da gravidade, etc. Portanto, aparentemente teríamos os  $E_n$  tendendo, com o uso daquela restrição, aos  $N_m$ .

O que acabamos de descrever parece ajustar-se perfeitamente à concepção popperiana de que a mecânica de Newton seria, no limite, um caso particular da mecânica de Einstein, ou seja, a teoria  $T_N$  estaria contida na teoria  $T_E$  como um caso particular desta.

Na proposta kuhniana, os  $N_m$  elementos obtidos a partir dos  $E_n$ , com a utilização da restrição acima indicada, não seriam os elementos básicos da teoria de Newton. Posição espacial, tempo, massa, etc., que ocorrem em  $E_n$  e em  $N_m$  seriam conceitualmente distintos, de tal forma que, no limite clássico, a igualdade entre os elementos  $E_n$  e  $N_m$  só seria verdadeira se  $t, s, m, E, p$ , etc., fossem definidos de uma forma que só é possível após os trabalhos de Einstein.

---

<sup>67</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 126-127.

Portanto, para Kuhn os  $N_m$  não constituem um subconjunto dos  $E_n$ , como requer o modelo de Popper. Em outras palavras, segundo o modelo de desenvolvimento do conhecimento científico, a mecânica de Newton não é simplesmente um caso particular da teoria de Einstein, isto é,  $T_N$  não está contida em  $T_E$ , como indica a interpretação de Popper.

Portanto, quando a teoria da relatividade de Einstein mostra que conseguiu resolver problemas de forma mais satisfatória que as soluções apresentadas pela física clássica como, por exemplo, a questão da ausência de movimento da terra com relação ao éter, a aparente incompatibilidade entre a mecânica e o eletromagnetismo, a inclinação da luz nas proximidades de fortes campos gravitacionais, entre outros, a revolução científica foi concluída. A partir de então um novo paradigma entrou em cena, definindo uma nova prática de ciência normal.

Assim podemos fechar esta seção lembrando a epígrafe deste capítulo onde o escritor Edgar Allan Poe, antecipando-se de mais de um século aos epistemólogos contemporâneos, predizia que o avanço da ciência se daria através de saltos intuitivos.

#### **4.7 O mundo muda com o paradigma**

Seguindo o procedimento adotado por Kuhn no livro *A estrutura das revoluções científicas*, a nova tradição científica emergente é incomensurável com a antiga. O novo paradigma força uma redefinição da prática científica: certos problemas deixariam de ser considerados científicos, outros que não o eram passariam a ser e surgiriam novos temas relevantes.

Quando os paradigmas mudam, o mundo muda com eles.

Kuhn cita o exemplo da descoberta do planeta Urano: entre 1690 e 1781 cerca de duas dezenas de observações de um corpo celeste estranho foram atribuídas a uma estrela. Verificações realizadas em noites sucessivas não deixavam notar nenhuma movimentação que poderia induzir outra identificação. Em 1781 e nos anos seguintes novas observações com telescópios mais potentes permitiram a Herschel, importante astrônomo da época, anunciar um novo cometa! Apenas vários meses depois, após infrutíferas tentativas de ajustar o movimento observado do corpo celeste ao de um cometa, chegou-se à conclusão de que um novo planeta havia sido descoberto.

Dessa forma, um objeto celeste que já era estudado há mais de um século começou a ser visto diferentemente no final do século XVIII. Era uma anomalia que não se ajustava dentro das categorias perceptuais fornecidas pelo paradigma vigente.

“A própria facilidade e rapidez com que os astrônomos viam novas coisas ao olhar para objetos antigos com velhos instrumentos pode fazer com que nos sintamos tentados a afirmar que, após Copérnico, os astrônomos passaram a viver em um mundo diferente.”<sup>68</sup>

A partir desse momento os astrônomos começaram a procurar novos planetas e asteroides. A física de Newton e, principalmente, a sua teoria da gravitação, dava mostras de sua força e capacidade de resolver novos problemas, bem ao contrário do que acontecia com as realizações da física aristotélica.

Após a revolução científica, portanto, uma nova teoria é escolhida e vai se transformar num novo paradigma que deverá, além de envolver os fatos, problemas e experimentos explicados pelo paradigma anterior, explicar os problemas que provocaram a crise naquele paradigma. A revolução científica, embora motivada pelas limitações do paradigma substituído, dá origem a um paradigma incomensurável com o anterior. A revolução muda a visão de mundo.

#### 4.8 A recepção da revolução científica

A revolução científica não é aceita pacificamente. Os próprios textos didáticos – “*veículos pedagógicos destinados a perpetuar a ciência normal*” – truncam a visão da história da ciência: tendem a apresentar a história da ciência como um suceder linear e cumulativo de eventos. Isso acontece até mesmo com os escritos de Newton quando ele atribuía a Galileu o uso do conceito de força na queda livre de corpos. Os textos didáticos, em geral, apresentam a ciência como tendo um desenvolvimento similar à construção de um edifício “*tijolo com tijolo num desenho lógico*”, parodiando a música do Chico Buarque.

O que aprendemos dos manuais deixa a impressão de que as novas teorias propostas são incorporadas facilmente e sem traumas à atividade da comunidade científica, tanto no aspecto metodológico quanto no que se refere aos conteúdos. Que isso não corresponde à verdade pode

---

<sup>68</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 152.

ser extraído de “desabafos” de cientistas de diferentes épocas como, por exemplo, os seguintes, mencionados por Kuhn:

“Darwin: ‘Embora esteja plenamente convencido das verdades das concepções apresentadas neste volume (...) não espero, de forma alguma, convencer naturalistas experimentados cujas mentes estão ocupadas por uma multidão de fatos, concebidos através dos anos, desde um ponto de vista diametralmente oposto ao meu (...) encaro com confiança o futuro – os naturalistas jovens que estão surgindo, que serão capazes de examinar ambos os lados da questão com imparcialidade.’

Max Planck: ‘(...) uma nova verdade científica não triunfa convencendo seus oponentes e fazendo com que vejam a luz, mas porque seus oponentes finalmente morrem e uma nova geração cresce familiarizada com ela’.”<sup>69</sup>

Ainda no que diz respeito à revolução científica e sua aceitação, é preciso esclarecer que, para Kuhn, não é suficiente afirmar ou mostrar que o novo paradigma ao conseguir resolver os problemas críticos acaba convencendo a comunidade científica. Isso não é suficiente. É necessário que ocorra a articulação do paradigma, quando novos adeptos surgirão.

Assim, por exemplo, quando Copérnico propôs seu sistema, muito ainda teve que ocorrer antes do seu *De revolutionibus* ser transformado no novo paradigma. Essa aceitação só ocorreu quando suas previsões foram confirmadas, quando o telescópio permitiu melhores observações como as fases de Vênus, as irregularidades da superfície da Lua, etc. Só após esses acontecimentos é que surgiram fortes adeptos copernicanos. Kuhn chega a utilizar os termos adeptos e “convertidos”.

Ainda outros argumentos participam da aceitação definitiva de um paradigma após uma revolução científica. Entre eles podemos enumerar os seguintes:

1. promessa de resolver uma quantidade maior de novos problemas;
2. aspectos estéticos de representação matemática;
3. repercussão positiva em áreas afins, etc.

“No início o novo candidato a paradigma poderá ter poucos adeptos e em determinadas ocasiões os motivos destes poderão ser considerados suspeitos. Não obstante, se eles são

---

<sup>69</sup> Citado por Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 191.

competentes, aperfeiçoarão o paradigma, explorando suas possibilidades e mostrando o que seria pertencer a uma comunidade guiada por ele. Na medida em que esse processo avança, se o paradigma estiver destinado a vencer sua luta, o número e a força de seus argumentos aumentará. Muitos cientistas serão convertidos e a exploração do novo paradigma prosseguirá. O número de experiências, instrumentos, artigos e livros baseados no paradigma multiplicar-se-á gradualmente. Mais cientistas, convencidos da fecundidade da nova concepção, adotarão a nova maneira de praticar a ciência normal, até que restem apenas alguns poucos opositores mais velhos. E mesmo estes não podemos dizer que estejam errados. Embora o historiador sempre possa encontrar homens [*e mulheres*] – Priestley, por exemplo – que não foram razoáveis ao resistirem por tanto tempo, não encontrará um ponto onde a resistência torna-se ilógica ou acientífica. Quando muito ele poderá querer dizer que o homem que continua a resistir após a conversão de toda a sua profissão deixou ipso facto de ser um cientista.”<sup>70</sup>

Nos anos seguintes à publicação do seu livro, aqui resumido, e principalmente a partir da década de 70, as ideias de Kuhn sofreram ataques e defesas das mais variadas formas e orientações. O próprio Kuhn foi levado a rever parte de suas afirmações.

Uma ótima compilação das principais reformulações desenvolvidas por Kuhn ao longo das décadas que se seguiram à publicação de *A estrutura...*, bem como uma longa entrevista ocorrida em 1995, foi publicada em português (**O caminho desde A estrutura**. São Paulo: Editora da Unesp, 2006).

---

<sup>70</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 20, p. 199-200.

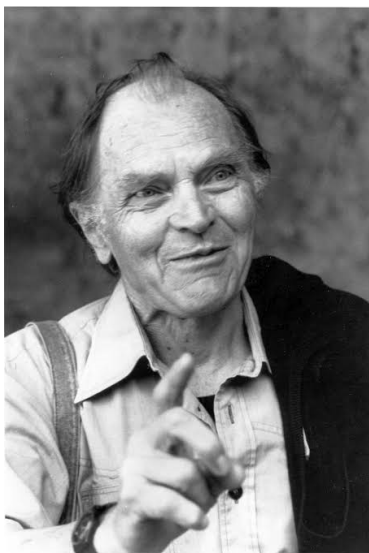
## Capítulo 5

### O anarquismo epistemológico de Feyerabend

*“Contra o positivismo, que pára perante os fenômenos e diz: ‘Há apenas fatos’, eu digo: ‘Ao contrário, fatos é o que não há; há apenas interpretações’.”*

Nietzsche <sup>71</sup>

#### 5.1 Premissas libertárias



Paul Feyerabend (1924-1994)

Paul Feyerabend defende em seus trabalhos uma prática científica que procura incorporar elementos que estão distantes do indutivismo do método científico tradicional, do racionalismo crítico de Popper, bem como do domínio das ideias paradigmáticas do modelo kuhniano, mesmo quando estas desempenham um papel funcional no desenvolvimento das teorias científicas.

Assim, a emoção, a paixão, o lado humano não traduzível em dimensões operacionais vão ter sua hora e vez na definição em favor de diferentes teorias que, ao serem escolhidas, não deverão simplesmente decretar a morte de suas rivais.

É um sonho? É um delírio? Ou é uma forma provocativa de tratar da racionalidade do desenvolvimento da ciência?

A obra mais conhecida de Feyerabend denomina-se, coerentemente com suas premissas, *Contra o método*. As primeiras palavras desse livro já delineiam a sua profissão de fé no anarquismo epistemológico:

---

<sup>71</sup> Friedrich Wilhelm Nietzsche. **Para além do bem e do mal**, §22.

“Este ensaio é escrito com a convicção de que o anarquismo epistemológico, embora não constituindo, talvez, a mais atraente filosofia política, é, por certo, excelente remédio para a epistemologia e para a filosofia da ciência.”<sup>72</sup>

Feyerabend argumenta que a existência de um método científico não passava de um mito que não resistiria a qualquer investigação da história da ciência. Ele procura demonstrar essa sua convicção utilizando largamente uma peculiar e original investigação histórica sobre os trabalhos de Galileu Galilei, particularmente sobre o famoso argumento da queda de um grave de uma torre – o *argumento da torre* – tão grato aos aristotélicos que o utilizavam na tentativa de derrubar a investida dos copernicanos e seus seguidores contra o edifício da ciência aristotélica.

Ao contrário de Kuhn que afirma que o estabelecimento de uma determinada teoria (re) define um particular campo de investigação, levando por um certo período a uma espécie de progresso que, no seu limite, leva à derrubada da própria teoria,

“(...) Feyerabend procura mostrar como a ciência estagna sob o domínio de uma teoria única, e propõe métodos para derrubar quaisquer teorias que estejam nessa posição.”<sup>73</sup>

Feyerabend argumenta que não existe método de trabalho na investigação científica que não tenha sido abandonado em algum momento. Isto quer dizer que todas as metodologias teriam um limite de validade.

Buscando recuperar um humanismo que a ciência teria perdido, Feyerabend propõe que o cientista trabalhe com a maior liberdade possível no que respeita a metodologias. Ele busca apoio em Einstein citando a seguinte frase do criador da relatividade:

“As condições externas que os fatos da experiência colocam (diante do cientista) não lhe permitem, ao erigir seu mundo conceitual, que ele se prenda em demasia a um dado sistema epistemológico. Em consequência, o cientista aparecerá, aos olhos do epistemologista que se prende a um sistema, como um oportunista inescrupuloso (...)”<sup>74</sup>

---

<sup>72</sup> Paul Feyerabend. **Contra o método**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1977, p. 19 (há traduções mais recentes, como a da Editora da Unesp de 2011).

<sup>73</sup> G. F. Kneller, **op. cit.**, nota 57, p. 78.

<sup>74</sup> Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 20.

## 5.2 O pluralismo epistemológico de Feyerabend

Com base em suas premissas libertárias, Feyerabend propõe o *princípio do tudo vale* para a investigação científica. Isso significa que devemos apelar livremente para qualquer forma de argumentação, para todas as metodologias possíveis, para a propaganda, se for o caso, para defender nossas posições teóricas.

“O desenvolvimento da doutrina copernicana, desde o tempo de Galileu até o século XX, é perfeito exemplo da situação que desejo apresentar. Partimos de uma firme convicção, contrária à razão e à experiência da época. A convicção se dissemina e encontra apoio em outras convicções que são igualmente ou mais desarrazoadas (lei da inércia; telescópio). A pesquisa toma novas direções, constroem-se novos tipos de instrumentos, a evidência passa a ser relacionada com as teorias segundo novas linhas, até que surja uma ideologia suficientemente rica para oferecer argumentos específicos em defesa de cada uma de suas partes e suficientemente plástica para encontrar esses argumentos sempre que se façam necessários. Hoje, podemos dizer que Galileu trilhava o caminho certo, pois sua persistente busca de algo que, a certa altura, se afigurou uma ridícula cosmologia, veio a criar os elementos necessários para defendê-la contra aqueles que só aceitam um ponto de vista quando ele é apresentado de determinado modo e que só confiam nele quando encerra certas frases mágicas, denominadas *relatos de observação*. E isto não é exceção – é o caso comum: as teorias só se tornam claras e razoáveis depois de terem sido usadas, por longo tempo, várias partes incoerentes que as compõem. Essa operação desarrazoada, insensata, sem método é, assim, condição inevitável de clareza e de êxito empírico.”<sup>75</sup>

É assim, portanto, que Feyerabend compreende a ação anárquica do cientista adequando seus métodos e sua prática à necessidade de fazer avançar sua compreensão do mundo. O cientista seria livre para praticar aquilo que mais lhe agrada, podendo – na verdade, devendo –

---

<sup>75</sup> Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 33.

propor hipóteses que estariam em flagrante contradição com as teorias confirmadas ou mesmo com as evidências experimentais que definem até uma tradição de como ver.

Proceder contra-indutivamente é uma primeira contra-regra proposta por Feyerabend que, desta forma, se posiciona contra a metodologia compreendida nas propostas verificacionistas, posicionando-se contra a essência do empirismo. Portanto, ele defende que se invente uma teoria que, ao contrário de corroborar os fatos consumados, leve à predição de fatos que rompessem com as expectativas correntes.

“Com o que disse, terei, talvez, dado a impressão de que prego uma nova metodologia em que a indução é substituída pela contra-indução e onde aparecem teorias várias, concepções metafísicas e contos de fadas, em vez de aparecer o costumeiro binômio teoria/observação. Essa impressão seria, indubitavelmente errônea. Meu objetivo não é o de substituir um conjunto de regras por outro conjunto do mesmo tipo: meu objetivo é, antes, o de convencer o leitor de que *todas as metodologias, inclusive as mais óbvias, têm limitações*. A melhor maneira de concretizar tal propósito é apontar esses limites e a irracionalidade de algumas regras que alguém possa inclinar-se a considerar fundamentais.”<sup>76</sup>

O cientista inovador tem que persuadir os outros cientistas a aceitar seus fatos novos e de que estes se ajustam às novas teorias. Aliás, Feyerabend não propõe simplesmente a substituição de uma teoria antiga por uma teoria nova. Ao contrário, ele sugere a proliferação de teorias como muito mais benéfica para a ciência que a uniformidade que lhe debilita o poder crítico. Assim a ciência progrediria muito mais, afirma Feyerabend, se houvesse uma construção de teorias revolucionárias que fornecessem, cada uma isoladamente, suas visões de mundo.

“Unanimidade de opinião pode ser adequada para uma igreja, para as vítimas temerosas ou ambiciosas de algum mito (antigo ou moderno) ou para os fracos e conformados seguidores de algum tirano. A variedade de opiniões é necessária para o conhecimento objetivo. E um método que estimule a variedade é o único método compatível com a concepção humanitarista.”<sup>77</sup>

---

<sup>76</sup> Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 43.

<sup>77</sup> Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 57.

Feyerabend sugere que o cientista deve adotar uma metodologia pluralista. O cientista deve comparar teorias com outras teorias, e não apenas com fatos ou dados de experiências. Ele sugere ainda que a história de uma ciência deve fornecer também possíveis teorias alternativas que, eventualmente, tenham sido descartadas.

“Depois de Aristóteles e Ptolomeu, a idéia de que a Terra se move - estranha, antiga e *inteiramente ridícula* concepção pitagórica – foi jogada ao monte de entulhos da história, só vindo a ser revivida por Copérnico e sendo por ele utilizada como arma para frustração dos que a negavam. Os escritos mágicos desempenharam importante papel nessa revivescência, ainda não perfeitamente compreendida, e foram estudados nada menos que pelo grande Newton.”<sup>78</sup>

Com essa argumentação, Feyerabend propõe o uso recorrente da história da ciência, partindo do pressuposto de que a teoria hoje aceita pode, em algum momento, passar a ser vista como um conto de fadas, da mesma forma que um mito ridículo do passado pode renascer e transformar-se numa base nova da ciência. Há uma mescla entre o pensamento puramente subjetivo (arbitrário) e o pensamento objetivo (submisso a regras).

Feyerabend acrescenta ainda mais um motivo em favor do procedimento contra-indutivo: referia-se ao fato de que “*nenhuma teoria está jamais em concordância com todos os fatos conhecidos em seu domínio*”. Essa não concordância pode ser tanto de ordem quantitativa quanto qualitativa. Para ele um conflito entre fatos e teorias podia ser evidência de progresso.

### 5.3 Galileu e o argumento da torre

A seguir Feyerabend utiliza o famoso argumento da torre para prosseguir na construção da sua proposta de como a ciência deveria progredir e de como realmente progrediu segundo a sua interpretação do procedimento adotado por Galileu.

Segundo o argumento da torre, o fato de que os graves caem seguindo uma linha vertical perpendicular à superfície da Terra, é a comprovação empírica de que nosso planeta não se move. Tal argumento era utilizado pelos aristotélicos contra a proposta copernicana.

---

<sup>78</sup> Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 68.

Galileu, ao trabalhar com esse problema, admitia como óbvio o conteúdo sensorial da observação da queda vertical dos corpos. Para ele não era a visão sensorial do experimento que deveria ser problematizada. Galileu escreve o seguinte a respeito:

“Gostaria que esse autor (*Chiaramonti*) não se desse ao incômodo de tentar levar-nos a compreender, apelando para os nossos sentidos, que o movimento de queda dos corpos é movimento retilíneo e não de outra espécie; e gostaria que ele não se zangasse, nem se queixasse por se colocar em questão essa coisa clara, óbvia e manifesta. Com efeito, assim procedendo, ele se dispõe a acreditar que o movimento não é retilíneo, mas circular, quando passa a considerar pessoas para as quais a pedra parece mover-se visivelmente, segundo um arco – e isso porque invoca os sentidos e não a razão para esclarecimento desse ponto. Não é assim que se deve proceder, Simplicio; pois assim como (...) jamais vi ou esperei ver a pedra cair a não ser perpendicularmente, o mesmo creio que todos os outros hajam visto. Melhor é, portanto, deixar de lado a aparência, a propósito da qual concordamos todos, e recorrer ao poder da razão, seja para confirmar-lhe a realidade, seja para revelar-lhe a falácia. (...)

(...) percebe-se quão facilmente qualquer pessoa pode ver-se lograda pela simples aparência ou, digamos, pelas impressões dos próprios sentidos. O exemplo diz respeito aos que caminham à noite pela rua e que, ao verem a Lua deslizar ao fundo dos telhados têm a impressão que ela os segue, caminhando com a mesma velocidade. Os caminhantes a vêem como veriam um gato verdadeiro deslizando pelas telhas e colocando-se por detrás delas, e essa impressão, caso a razão deixasse de intervir, obviamente iludiria os sentidos.”<sup>79</sup>

Neste ponto, Feyerabend afirma que Galileu estava trabalhando com a ideia de que os sentidos, por si sós, podiam nos enganar. Ou seja, o enunciado que é sugerido pela impressão sensorial necessita ser submetido a exame racional. A impressão sensorial, mediatizada pela razão, pode levar a diferentes enunciados.

Um fenômeno fornecido pelos sentidos seria entendido como uma soma da aparência com o enunciado. E o enunciado é carregado de teoria, não é neutro. Há, desse modo, uma forte unidade entre o enunciado e o fenômeno. É parte de um aprendizado que se inicia na infância e que comanda um processo de operações mentais. Os processos de ensino/aprendizagem

---

<sup>79</sup> Trecho dos **Diálogos**, de Galileu. Citado por Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 105.

delineiam e condicionam a aparência ou fenômeno estabelecendo forte conexão entre eles e as palavras que utilizamos. Daí acaba soando quase natural a descrição que fazemos dos mesmos. Como sugere Feyerabend, “*os fenômenos parecem falar por si mesmos*”.

“A linguagem que *falam* está, naturalmente, influenciada pelas crenças de gerações anteriores, mantidas há tanto tempo que não mais parecem princípios separados, apresentando-se nos termos do discurso cotidiano e parecendo, após o treinamento natural exigido, brotar das próprias coisas.”<sup>80</sup>

#### 5.4 A nova interpretação natural de Galileu

Feyerabend denomina de *interpretações naturais* a origem e o efeito dessas operações mentais. Operações mentais que se mostram quase indissociáveis dos fatos, fenômenos ou aparências. Ele afirma que tais interpretações naturais ora são vistas como pressupostos a priori, como ocorria na filosofia de Kant, ora como preconceitos, lembrando o que propunha Bacon, que precisam ser evitados.

É claro que essas interpretações naturais não são as únicas nem tampouco definitivas. Elas também passam por um desenvolvimento histórico. Discutir o significado de uma aparência, revelando sua falácia ou confirmando sua verdade, nada mais é que discutir a validade das interpretações naturais.

Feyerabend sugere que Galileu propôs uma discussão crítica promotora de novas interpretações naturais. A forma como Galileu teria construído seus diálogos, presentes nas suas últimas obras, levaram-no exatamente à elaboração dessas novas interpretações naturais que dão a impressão de sempre terem existido, como se fossem reminiscências.

“(...) a atitude de Galileu é relativamente fácil de caracterizar: as interpretações naturais são *necessárias*. Os sentidos puros, desajudados da razão, não nos proporcionam verdadeira compreensão da natureza. Necessários para chegarmos a essa compreensão verdadeira são os ‘sentidos, *acompanhados pela razão*’ (Galileu nos *Diálogos*).”<sup>81</sup>

---

<sup>80</sup> Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 107.

<sup>81</sup> Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 108.

Para os pensadores aristotélicos, o movimento de queda de um grave é retilíneo e vertical. Para Copérnico e seus seguidores, esse mesmo movimento é “*a um tempo, retilíneo e circular*”. Ambas as afirmações são baseadas em argumentos nascidos da observação, isto é, tanto os aristotélicos quanto os copernicanos falam a linguagem do movimento real.

Se aceitarmos a concepção de movimento real dos aristotélicos, isto é, sua interpretação natural, o pensamento de Copérnico é refutado. É dessa forma que se colocava o problema como o próprio Galileu, segundo Feyerabend, o entendia: o pensamento comum, ou dominante, do século XVII apontava para o caráter operativo de todo movimento, admitindo o realismo ingênuo com respeito ao movimento. Todo movimento era considerado, por esse pensamento dominante, como absoluto.

Obviamente há situações em que o movimento ilusório é patente, como é o caso do exemplo do movimento da Lua, anteriormente mencionado. Porém, há situações que já se configuram como casos paradigmáticos em que “*é psicologicamente muito difícil ou mesmo impossível admitir engano*”. É esse tipo de situação que aprendemos desde a infância. O movimento da pedra, utilizado no argumento da torre, é um dos exemplos típicos.

“Como poderíamos deixar de perceber o rápido movimento da grande porção de matéria que se supõe a Terra seja? Como poderia escapar-nos o fato de que a pedra, caindo, percorre ampla trajetória no espaço? Do ponto de vista do pensamento e da linguagem do século XVII, o argumento é, portanto, impecável e convincente.”<sup>82</sup>

Para sair desse enredo, que coloca obstáculos para uma nova teoria, é necessário apelar para alguma espécie de “*medida externa de comparação*” que inclui novos modos de relacionar conceitos e dados de percepção. Feyerabend sugere o procedimento contra-indutivo como um bom modo para encontrar as contradições entre essa teoria e os fatos já consagrados segundo outro modo de pensar. Teria sido dessa maneira que Galileu introduziria uma nova interpretação natural, a saber, a de que o movimento compartilhado não seria perceptível, isto é, não conseguiríamos perceber o movimento da Terra, assim como não percebemos o movimento circular de uma pedra caindo, pois compartilhamos do mesmo movimento. Assim, Galileu dava

---

<sup>82</sup> Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 110.

realidade apenas ao movimento relativo. Desta forma, Galileu introduzia uma “*nova linguagem de observação*” e a sua concepção de relatividade.

### 5.5 “A propaganda é a alma do negócio”

Feyerabend afirma que Galileu substituiu uma interpretação natural por outra muito diferente recorrendo não apenas a argumentos lógicos e a fatos reais, mas também à propaganda. Um diálogo entre os personagens de Galileu, onde é explicitada uma situação envolvendo o conceito não-operativo de movimento, serve de exemplo para essa argumentação de Feyerabend:

**“Salviatti:** (...) imagine-se em um navio, com os olhos fixos em um ponto da verga da embarcação. Acha você que, por estar o navio a mover-se rapidamente, terá que mover os olhos para mantê-los fixos na verga e acompanhar-lhe o movimento?

**Simplicio:** Estou certo de que não será preciso qualquer movimento. E isso não apenas quanto a meus olhos; se eu tivesse apontado um mosquetão (para a verga), não seria preciso desviá-lo nem um pouco para mantê-lo apontado, sem importar o quanto a embarcação se movesse.

**Salviatti:** E isso ocorre porque o movimento que a embarcação confere à verga, confere também a você e a seus olhos, de sorte que não é preciso movê-los para fixar o topo da verga, que, em consequência, parece-lhe imóvel. (E os raios da visão caminham do olho à verga, como se uma corda estivesse estendida entre as duas extremidades do navio. Ora, centenas de cordas estão estendidas entre diferentes pontos fixos, e cada qual delas conserva sua posição, esteja o navio em movimento ou em repouso.)”<sup>83</sup>

E Galileu prossegue:

“(...) também é verdade que, estando a Terra em movimento, o movimento da pedra, ao cair, corresponde a uma longa extensão de centenas ou milhares de metros; e se a pedra pudesse marcar seu curso no ar imóvel ou em alguma outra superfície, deixaria assinalada uma longa linha oblíqua. Todavia, aquela parte de todo esse movimento, que é comum à pedra, à Terra

---

<sup>83</sup> Trecho dos **Díálogos**, de Galileu. Citado por Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 123-124.

e a nós próprios, permanece imperceptível, sendo como se não existisse. Só se torna observável aquela parte de que nem a torre, nem nós participamos; em outras palavras, aquela parte com que a pedra, ao cair, mede a torre.”<sup>84</sup>

Com esse modo de argumentar, Galileu conseguiu fazer com que uma experiência que parecia contradizer o movimento da Terra fosse utilizada para confirmar tal movimento.

Porém, o que Feyerabend denomina de princípio da relatividade de Galileu, ainda não era suficiente para explicar porque a pedra acompanha a torre. Galileu introduziu outro princípio, o princípio da inércia circular, isto é, aquele que afirma que um objeto dotado de movimento circular uniforme sobre uma esfera livre de atrito continuará dotado de tal movimento para todo o sempre ou até que algo se lhe oponha a esse movimento. Assim, juntando a aparência da pedra caindo, o princípio da relatividade e o da inércia circular, Galileu articulou a proposta copernicana.

Feyerabend acrescenta que essas hipóteses formuladas e assumidas por Galileu têm todas as características de hipóteses *ad hoc*, isto é, ele alterou sua concepção de movimento para fazê-la compatível com a ideia de rotação da Terra.

Além disso, Feyerabend destaca que Galileu louvava sobremaneira o fato de que Copérnico não tenha levado em consideração sensações que o teriam impedido de levar avante seu projeto. De novo o argumento da propaganda joga seu papel como, por exemplo, quando Galileu, através de Salviatti, “explicava” porque havia tão poucos copernicanos:

“**Salviatti:** Você se espanta por existirem tão poucos seguidores da opinião pitagórica, ao passo que eu me espanto por já haver surgido alguém que a abraça e acompanhe. Jamais poderei louvar suficientemente a notável perspicácia dos que se ligaram àquela opinião e a acolheram como verdadeira: em apoio na pura força do intelecto, fizeram eles tal violência aos próprios sentidos que chegaram a preferir o que a razão lhes dizia ao que, em sentido contrário, a experiência sensível apontava claramente.”<sup>85</sup>

---

<sup>84</sup> Trecho dos **Diálogos**, de Galileu. Citado por Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 124-125.

<sup>85</sup> Trecho dos **Diálogos**, de Galileu. Citado por Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 154-155.

## 5.6 Para garantir uma teoria racional, a razão foi abandonada

Feyerabend a seguir afirma que Galileu fez uso de suas observações com o telescópio para afastar tais sensações, porém sem apontar claramente as razões de porque se poderia confiar que o telescópio descreveria um quadro mais verdadeiro. Embora a aceitação terrestre do telescópio não fosse problemática, em função da concepção que separava o celeste do terrestre, a aceitação desse instrumento para descrever o que se passava nos céus não era tão pacífica. Afinal, como ensinavam os antigos gregos, cujo pensamento ainda era dominante no período vivido por Galileu, os objetos celestes e terrestres constituíam-se de materiais diferentes. Assim, como não imaginar que o telescópio pudesse interferir com o que se observava? Deste modo, a aceitação pura e simples do telescópio como um “*sentido superior e mais aperfeiçoado que o sentido natural e comum*”<sup>86</sup> não deixava de ser também uma hipótese *ad hoc*.

Para oferecer um exemplo desse problema, Feyerabend cita um trecho de uma carta de Kepler:

“Não desejo esconder-lhe que vários italianos enviaram cartas a Praga, afirmando que não chegaram a ver aquelas estrelas em seu telescópio. Pergunto-me como pode ocorrer que tantos neguem o fenômeno, inclusive aqueles que usam um telescópio. Ora, levando em conta o que por vezes acontece comigo, não considero impossível que uma pessoa possa ver o que milhares são incapazes de ver (...).”<sup>87</sup>

A aceitação, por parte de Galileu, do que mostrava o telescópio deveu-se ao fato de que o que ele “via” ajustava-se à doutrina de Copérnico, daí ser denominada de hipótese *ad hoc*, portanto, casuísta.

“Deste modo, diz Feyerabend, Galileu usou duas hipóteses que não contavam com qualquer outra forma de suporte – a teoria copernicana e a hipótese do telescópio – para se apoiarem mutuamente. Ambas as hipóteses eram *ad hoc*, mas o fato de se reforçarem mutuamente tornou-as mais plausíveis do que teriam sido separadamente.”<sup>88</sup>

---

<sup>86</sup> Trecho dos **Diálogos**, de Galileu. Citado por Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 157.

<sup>87</sup> Carta de Kepler datada de 9 de agosto de 1610. Citada por Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 193.

<sup>88</sup> G. F. Kneller, **op. cit.**, nota 57, p. 81.

Assim, duas hipóteses aparentemente inadequadas transformaram-se em armas poderosas quando usadas conjuntamente e com hábeis argumentos persuasivos e propagandísticos.

“Claro se torna que a adesão às novas idéias terá de ser conseguida por meios outros que não argumentos. Terá de ser conseguida por *meios irracionais*, como a propaganda, a emoção, as hipóteses *ad hoc* e os preconceitos de toda espécie. Tornam-se necessários esses ‘meios irracionais’ para dar apoio àquilo que não passa de fé cega, até que disponhamos das ciências auxiliares, de fatos, de argumentos que transformam a fé em ‘conhecimento’ bem fundado.”<sup>89</sup>

Encontramos aí uma argumentação que diz que em determinadas condições históricas a razão pode ser posta de lado. O paradoxo é que, segundo Feyerabend, esse abandono da razão foi necessário para que uma teoria racional tivesse sua existência garantida.

## 5.7 A “profissão de fé” de Feyerabend

Para concluir este breve resumo das principais ideias de Paul Feyerabend, contidas no seu livro *Contra o método*, transcrevemos a seguir um trecho onde comparece uma espécie de “profissão de fé” epistemológica de Feyerabend.

“Em resumo: para onde quer que olhemos, sejam quais forem os exemplos por nós considerados, verificamos que os princípios do racionalismo crítico (tomar os falseamentos a sério; aumentar o conteúdo; evitar hipóteses *ad hoc*; ‘ser honesto’ - signifique isso o que significar; e assim por diante) e, *a fortiori*, os princípios do empirismo lógico (ser preciso; apoiar as teorias em medições; evitar idéias vagas e imprecisas; e assim por diante) proporcionam inadequada explicação do passado desenvolvimento da ciência e são suscetíveis de prejudicar-lhe o desenvolvimento futuro. Proporcionam inadequada versão da ciência, porque esta é muito mais ‘fugidia’ e ‘irracional’ do que sua imagem metodológica. E são suscetíveis de prejudicar a ciência, porque a tentativa de torná-la mais

---

<sup>89</sup> Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 238.

‘racional’ e mais precisa pode, como vimos, destruí-la. (...) Sem ‘caos’, não há conhecimento. Sem freqüente renúncia à razão, não há progresso. Idéias que hoje constituem a base da ciência só existem porque houve coisas como o preconceito, a vaidade, a paixão; (...) Não há uma só regra que seja válida em todas as circunstâncias, nem uma instância a que se possa apelar em todas as situações. (...)

Há mitos, há dogmas de teologia, há metafísica e há muitas outras maneiras de elaborar uma cosmovisão. Faz-se claro que uma conveniente interação entre a ciência e essas cosmovisões ‘não científicas’ necessitará do anarquismo ainda mais que a própria ciência. E, assim, o anarquismo não é apenas possível, porém, necessário, tanto para o progresso interno da ciência, quanto para o desenvolvimento de nossa cultura como um todo.”<sup>90</sup>

Tudo isso é apenas uma provocação? Cabe a cada um de nós decidir.

---

<sup>90</sup> Paul Feyerabend, **op. cit.**, nota 72, p. 278-279.

## Capítulo 6

### O novo espírito científico de Bachelard

*“Os sábios julgam libertar-se da filosofia ignorando-a ou vituperando-a. (...) Por muito que façam, os sábios mantêm-se dominados pela filosofia. A questão consiste apenas em saber se querem ser dominados por alguma má filosofia da moda, ou se pretendem deixar-se guiar por uma forma de pensamento teórico que repouse sobre o conhecimento da história do pensamento e das suas aquisições.”*

F. Engels <sup>91</sup>

#### 6.1 Introdução

Ultimamente tem havido um ressurgimento internacional da obra bachelardiana, inclusive aqui no Brasil, principalmente em trabalhos sobre ensino e aprendizagem de ciências. Isso tem ocorrido tanto com relação à vertente poética, do pensador noturno, quanto à vertente epistemológica, do pensador diurno, dos trabalhos de Gaston Bachelard. Porém, na discussão ainda dominante na filosofia das ciências, particularmente nos países sob influência maior do pensamento anglo-saxão, a menção ao pensamento do filósofo francês é rara. Como exemplo dessa omissão podemos citar o estudo do grupo liderado por Larry Laudan, já mencionado no capítulo 1.

Como deverá ficar claro ao longo do breve estudo que faremos a seguir, essa epistemologia do “novo espírito científico” não pode ficar ausente do estudo a respeito do desenvolvimento das ciências naturais contemporâneas e da iluminação do seu passado através de uma recorrência histórica que só tem sentido se referenciada à própria evolução do discurso epistemológico.

O filósofo brasileiro Hilton Japiassú procurou corrigir a ausência do pensamento de Bachelard entre nós através de um livro introdutório onde destaca a contribuição epistemológica do filósofo francês mesclada um pouco com sua vertente poética. Logo no início desse seu livro, Japiassú destaca a importância do trabalho de Bachelard:

---

<sup>91</sup> Friedrich Engels. **Dialética da natureza**. Lisboa: Editorial Presença, 1974, p. 216-217; e Paris: Ed. Sociales, 1968, p. 211.

“Gaston Bachelard pode ser justamente considerado, em nossos dias, o mais notável filósofo das ciências de língua francesa. Podemos dizer que foi sua epistemologia da ruptura que instaurou uma nova maneira de se conceber a história das ciências. Ao recusar terminantemente fixar a ciência contemporânea num estado definitivo e perenizado, esta epistemologia assume, como seu ‘outro eu’, a historicidade constitutiva do conhecimento racional.”<sup>92</sup>

Nos últimos anos muitos dos livros de Bachelard sobre a construção poética, sobre o imaginário do sonhador, foram editados no Brasil pela primeira vez. Alguns dos seus livros sobre epistemologia científica conheceram as prateleiras de nossas livrarias a partir de meados da década de 1970.

Os filósofos da ciência que estudamos nos capítulos anteriores não fazem referência a Bachelard nos seus trabalhos. Thomas Kuhn apenas o menciona em uma nota de rodapé num de seus livros. Quais as razões dessa omissão?

Talvez uma das razões seja devido à peculiaridade do discurso de Bachelard que torna difícil enquadrá-lo numa determinada escola de pensamento bem definida.

Neste capítulo trataremos apenas de algumas categorias do seu pensamento, privilegiando aquelas que se referem às mudanças teóricas evidenciadas pela física.

## 6.2 Alguns dados sobre a vida intelectual de Bachelard

Gaston Bachelard nasceu na França em 1884. Sua obra inicia-se com a publicação de seu primeiro livro em 1928 e prosseguiu até o ano de sua morte, em 1962. Ao todo ele publicou catorze livros sobre epistemologia e outros tantos sobre o imaginário poético.

Ele se dedicou ao estudo das mais variadas áreas do saber: matemática, engenharia, física, filosofia, poética e crítica literária. Alguns de seus comentadores afirmam que ele próprio é um contra-exemplo de uma frase sua: “(...) *não há correspondência entre as virtudes de uma vida e os valores de uma filosofia*”. Isso porque a vida de Bachelard determinou muitos de seus passos filosóficos, poéticos e interesses de investigação.

---

<sup>92</sup> Hilton Japiassú. **Para ler Bachelard**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1976, p. 9. Recomendo fortemente a leitura desse livro para todos aqueles que desejem conhecer mais detalhes do pensamento de Bachelard.

Bachelard foi muito apegado ao campo – quase um camponês – e daí tirou sua forte dependência dos elementos da natureza que iriam alimentar o seu imaginário, a sua racionalidade, o seu devaneio, a sua poética, que tratam do fogo, da água, do ar, dos rios, das flores e da terra.

Bachelard foi professor secundário por cerca de dezesseis anos, lecionando as mais diferentes disciplinas. É dessa experiência que ele extrai a inspiração para algumas importantes incursões pedagógicas encontradas ao longo de seus livros.



Gaston Bachelard (1884-1962)

Em 1940, após publicar uma série de livros, passou a lecionar na Universidade Sorbonne, onde permaneceu até o fim da sua vida.

Na sua obra estão presentes duas vertentes do pensamento que complementam e completam o imaginário do “*indivíduo pensante das vinte e quatro horas*”, o *diurno* da descoberta científica, do pensamento essencialmente racional, e o *noturno* da vertente onírica, pensamento guiado pelo devaneio. São duas modalidades de consciência: uma da racionalidade e outra da imaginação, uma levando ao pensamento científico e a outra conduzindo à criação poética.

Há um laço que une essas duas vertentes e sua busca fundamental: Bachelard queria desvelar o lado secreto do mundo e ele dizia que isso somente seria possível rompendo com o aparente. É assim que o filósofo Gaston Bachelard, tanto o diurno quanto o noturno, tanto o científico quanto o poético, tornou-se conhecido como o filósofo da ruptura.

Eis um pequeno trecho bastante significativo de um livro da vertente poética de Bachelard:

“A imaginação não é, como sugere a etimologia, a faculdade de formar imagens da realidade; é a faculdade de formar imagens que ultrapassam a realidade, que cantam a realidade. É uma faculdade de sobre-humanidade (...) A imaginação inventa mais do que coisas e dramas; ela inventa vida nova, inventa espírito novo; abre olhos que possuem tipos novos de visão. Ele verá se ela tem ‘visões’. Terá visões se ela se educar com devaneios

antes de se educar com experiências; se as experiências vierem, em seguida, como provas de seus devaneios.”<sup>93</sup>

### 6.3 A motivação epistemológica de Bachelard

As imagens e os conceitos formam os dois polos opostos da atividade intelectual representados pela imaginação e pela razão. Enquanto no reino do imaginário, do poético, a imaginação tem o máximo de liberdade, isto é, os produtos literário-poéticos não precisam ter necessariamente vínculo com o real, o mesmo não ocorre no reino da razão, no campo do pensamento científico. Aí as construções intelectuais não podem ser totalmente livres pois há um estreito compromisso com o real, seja lá o que isso significar. Vera Lucia Felicio enlaça as concepções de imaginação e de razão de Bachelard com estas palavras:

“Por diferentes que sejam, a razão e a imaginação, a ciência e a poesia dão acesso igualmente ao universo do espírito, que é irreal enquanto nega a percepção, mas que por isso mesmo é profundamente ‘super-real’. Bachelard dirá que o homem é aquele que tem o poder de ‘despertar as fontes’, e esse poder inesgotável encontra-se na origem tanto do aspecto polêmico da razão científica, em sua oposição ao realismo empírico e ao dado imediato, quanto da imaginação poética.”<sup>94</sup>

O fio condutor da motivação epistemológica de Bachelard foi o advento da física contemporânea, a teoria da relatividade e a mecânica quântica, nas primeiras décadas do século XX. Há uma mudança epistemológica significativa entre o seu advento e a física clássica que a precedia, como nos relata o próprio Bachelard:

“Em fins do século passado, acreditava-se ainda no caráter empiricamente unificado de nosso conhecimento do real. (...) O cientista era ‘um de nós’, no sentido de Conrad. Ele vivia em nossa realidade, manjava nossos objetos, educava-se com nosso fenômeno, achava a evidência na clareza de nossas intuições. Expunha suas demonstrações de acordo com a nossa geometria e nossa mecânica. Não discutia os princípios e as medidas, e deixava

---

<sup>93</sup> Gaston Bachelard. *L'eau et les rêves*, p. 23-24. Citado por Hilton Japiassú, *op. cit.*, nota 92, p. 154.

<sup>94</sup> Vera Lucia G. Felicio. *A imaginação simbólica*. São Paulo: EDUSP, 1994, p. 3.

o matemático ao sabor dos axiomas. Contava coisas separadas, não postulava números que não fossem totalmente nossos números. Dele a nós, era muito naturalmente a mesma aritmética. Ciência e Filosofia falavam a mesma linguagem. (...)

Eis, porém, que a Física contemporânea nos traz mensagens de um mundo desconhecido.”<sup>95</sup>

E que tipo de mensagem é portadora a física contemporânea nascida no início deste século? Embora normalmente, ao sermos introduzidos à física contemporânea, não se faça menção às refutações e revoluções ou rupturas no conhecimento científico, cada um de nós tem alguma noção da resposta a essa questão. Do ponto de vista epistemológico, o próprio Bachelard apresenta sua resposta:

“Em seu desenvolvimento contemporâneo, as ciências físicas e químicas podem ser caracterizadas epistemologicamente como domínios de pensamentos que rompem nitidamente com o conhecimento vulgar. (...) O caráter *indireto* das determinações do real científico por si só nos coloca num reino epistemológico novo. (...) Os fenômenos elétricos dos átomos estão *ocultos*. É preciso instrumentá-los num aparelhamento que não tem significação direta na vida comum.”<sup>96</sup>

Na física contemporânea, particularmente na relatividade e na mecânica quântica, a relação entre a matemática e a experiência, que abalou as concepções filosóficas vigentes, como o positivismo e o realismo, recebeu de Bachelard uma atenção especial, como perceberemos na sequência desta apresentação.

#### 6.4 Mudando o sentido do vetor epistemológico

Já no início da década de 30 do século passado, Bachelard adiantava algumas concepções que iriam marcar sua obra epistemológica como um aríete contra as filosofias positivista e neo-positivista.

---

<sup>95</sup> Gaston Bachelard. **Epistemologia**. Trechos escolhidos por Dominique Lecourt. Rio de Janeiro: Zahar, 1977, p. 13-14.

<sup>96</sup> Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 95, p. 16.

Nesta breve introdução ao pensamento epistemológico de Bachelard, vamos destacar a sua proposição de um caminho rumo ao *novo espírito científico*. Logo nas primeiras páginas de um livro seu, publicado em 1934, encontramos sua sugestão de mudança no sentido do vetor epistemológico, ainda fortemente marcado pela seta positivista. Dizia ele:

“Qualquer que seja o ponto de partida da atividade científica, esta atividade não pode convencer plenamente senão deixando o domínio de base: se ela experimenta, é preciso raciocinar; se ela raciocina, é preciso experimentar. Toda aplicação é transcendência. Na mais simples das diligências científicas, mostraremos que se pode colher uma dualidade, uma espécie de polarização epistemológica que tende a classificar a fenomenologia sob a dupla rubrica do pitoresco e compreensível, noutras palavras, sob a dupla etiqueta do realismo e do racionalismo. Se soubéssemos, a propósito da psicologia do espírito científico, colocar-nos precisamente na fronteira do conhecimento científico, veríamos que é de uma verdadeira síntese das contradições metafísicas que se ocupa a ciência contemporânea. Todavia o sentido do vetor epistemológico parece-nos bem claro. Ele vai seguramente do racional ao real e de nenhum modo, ao contrário, da realidade ao geral como o professavam todos os filósofos, desde Aristóteles até Bacon. Noutras palavras, a aplicação do pensamento científico parece-nos essencialmente realizante. Procuraremos, pois, mostrar no decurso desta obra o que chamaremos a realização do racional ou mais geralmente a realização do matemático.”<sup>97</sup>

Nessa citação observa-se uma forte semelhança com o pensamento e construção histórica de Alexandre Koyré, principalmente quando este menciona, ao se referir aos trabalhos de Galileu e Descartes sobre a inércia e a queda dos corpos, a “*matematização do real*”.

“E descobrimos, a meditar o trabalho matemático, que ele sempre provém de uma extensão de um conhecimento tomado sobre o real e que, nas próprias matemáticas, a realidade se manifesta em sua função essencial: fazer pensar. Sob uma forma mais ou menos clara, em funções mais ou menos misturadas, um realismo matemático vem cedo ou tarde encorpar o pensamento, dar-lhe permanência psicológica, desdobrar enfim a atividade espiritual, fazendo aparecer, aí como em toda parte, o dualismo do subjetivo e do objetivo.”<sup>98</sup>

<sup>97</sup> Gaston Bachelard. **O novo espírito científico**. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1985, p. 12-13.

<sup>98</sup> Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 97, p. 13-14.

E, o próprio Bachelard completa:

“O corpúsculo e a onda não são coisas ligadas por mecanismos. Sua associação é de ordem matemática; deve-se compreendê-los como momentos diferentes da matematização da experiência.”<sup>99</sup>

## 6.5 Os obstáculos epistemológicos

Bachelard promove uma luta contra os preconceitos e barreiras que se colocam contra o desenvolvimento do pensamento científico. Ele os denominou *obstáculos epistemológicos*. Exemplos de obstáculos epistemológicos são os conceitos ou pré-conceitos adquiridos através de uma relação supostamente ingênua com os fenômenos, sejam eles relativos ao universo físico ou psíquico. Assim, a crença de que os objetos mais pesados chegam antes ao solo, a concepção não-inercial dos movimentos, a concepção de espaço e tempo como entidades absolutas e até mesmo a ideia de que uma partícula quântica é uma partícula pequena, como destaca Bachelard, são alguns exemplos de obstáculos epistemológicos que um conhecimento mais elaborado tem que enfrentar, para ser aceito como uma outra forma de dialogar com o mundo.

Bachelard afirmava que esses obstáculos epistemológicos se devem ao psiquismo humano, às resistências psicológicas em abandonar determinadas concepções que causariam certa instabilidade psíquica, às crenças que são produzidas por fatores culturais os mais diversos como, por exemplo, os religiosos e ideológicos.

Creio que vale a pena retornar mais uma vez ao filósofo inglês Francis Bacon que, embora atrelado às concepções lógicas e metodológicas de sua época, mostrou um grau apurado de antecipação noutro de seus aforismos:

“XXXVIII - Os ídolos e noções falsas que ora ocupam o intelecto humano e nele se acham implantados não somente o obstruem a ponto de ser difícil o acesso da verdade, como, mesmo depois de seu pórtico logrado e descerrado, poderão ressurgir como obstáculo à

---

<sup>99</sup> Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 97, p. 87.

própria instauração das ciências, a não ser que os homens, já precavidos contra eles, se cuidem o mais que possam.”<sup>100</sup>

Percebemos pelo conteúdo desse aforismo como Bacon também propunha uma luta contra o que Bachelard veio a denominar de obstáculo epistemológico. Num livro publicado em 1938, onde ele procurava conceituar e exemplificar detalhadamente sua concepção de obstáculo epistemológico, Bachelard relaciona a presença desses obstáculos epistemológicos nas aulas introdutórias de ciências para adolescentes, explorando uma temática que está atualmente muito presente entre pesquisadores de ensino de ciências. Por exemplo, ele faz a seguinte crítica aos professores de sua época que, certamente, continua válida nos dias que correm:

“Os professores de ciências imaginam que o espírito começa como uma aula, que é sempre possível reconstruir uma cultura falha pela repetição da lição, que se pode fazer entender uma demonstração repetindo-a ponto por ponto. Não levam em conta que o adolescente entra na aula de física com conhecimentos empíricos já constituídos: não se trata, portanto, de *adquirir* uma cultura experimental, mas sim de *mudar* de cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana.”<sup>101</sup>

No capítulo III de seu livro sobre o *novo espírito científico*, ao discutir a interação entre matéria e radiação, Bachelard apresenta alguns exemplos mais sofisticados de obstáculos epistemológicos. Reproduzo a seguir um longo trecho de seu texto onde ele discute o efeito Raman:

“É somente em 1928 que um físico genial hindu, Sir Raman, assinalou que ‘a luz difundida contém raios de frequências inferiores e superiores à frequência incidente’. O alcance científico da descoberta do efeito Raman é muito conhecido, mas como negligenciar-lhe o alcance metafísico? Com efeito, ao nível da microfísica apreende-se uma cooperação da irradiação e da molécula; a molécula reage acrescentando à irradiação recebida suas características irradiantes próprias. A vibração que vem tocar a molécula não ricocheteará como um objeto inerte, nem tampouco como um eco mais ou menos abafado; ela terá um

---

<sup>100</sup> Francis Bacon, **op. cit.**, nota 31, p. 20-21.

<sup>101</sup> Gaston Bachelard. **A formação do espírito científico**. Trad. de Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996, p. 23.

outro timbre, pois que vibrações múltiplas virão aí se acrescentar. Mas ainda estão aí um modo de ver e uma expressão demasiado materialista para dar conta da interpretação quântica do fenômeno. É verdadeiramente um espectro luminoso que sai da molécula tocada por um raio? Não é antes um *espectro de números* que nos transmitem as novas matemáticas de um novo mundo? Em todo caso, quando se vai ao fundo dos métodos quânticos, damos bem conta de que não se trata mais de um problema de choque, de ricochete, de reflexão, nem tampouco de uma simples troca energética, mas que as permutas de energia e de luz se estabelecem segundo um duplo jogo de escrita, regulado por conveniências numéricas complicadas. Assim, o azul do céu interpretado matematicamente é atualmente um tema de pensamento científico cuja importância não se poderia exagerar. O azul do céu, do qual avançávamos mais acima a pouca ‘realidade’, é tão instrutivo para o novo espírito científico como o foi, há alguns séculos, o mundo estrelado sobre nossas cabeças.”<sup>102</sup>

Dessa forma, Bachelard elaborava um aspecto importante de sua filosofia: a nova interpretação a respeito dos *fenômenos* do micromundo. Para ele, com o advento da microfísica, ficou impossível uma designação direta do real da forma como a física clássica vinha fazendo. Esse vir fazendo é que se constitui o obstáculo epistemológico, isto é, algo aprendido anteriormente com convicção e que dificulta a apreensão de uma nova forma de pensar ou ver o mundo. O diálogo com o novo mundo da microfísica fica dificultado, obstaculizado por conceitos aprendidos anteriormente.

Retiramos de uma obra bem posterior de Bachelard, publicada em 1951, um outro exemplo de obstáculo epistemológico ainda associado à física do micromundo, à física quântica.

“Seria fácil relacionar muitas observações semelhantes. De resto, basta pensar em fenômenos de interação de partículas de *natureza diferente* como fóton e elétron para compreender que essa interação não pode ser estudada como o choque de duas bolas do mesmo marfim. É preciso então, pelo menos, dar ao ‘choque’ novas definições. O efeito de Compton que estuda tal interação é grávido de novos pensamentos. Perderíamos seu valor instrutivo se desprezássemos a variação de frequência do fóton, se nos limitássemos a ver no encontro um ‘choque’.

---

<sup>102</sup> Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 97, p. 69-70.

(...) De fato, a noção de corpúsculo definido como ‘um pequeno pedaço de espaço’ nos conduziria a uma física cartesiana, a uma física democriteana contra as quais é preciso pensar se quisermos enfocar os problemas da ciência contemporânea. A noção de corpúsculo concebido como um pequeno corpo, a noção de interação corpuscular concebida como o choque de dois corpos, eis exatamente *noções-obstáculos*, noções de cessa-cultura, contra as quais devemos nos prevenir.

E a esse propósito, é todo o drama da ‘explicação nas ciências’ que é preciso lembrar: por que se explica e a quem se explica? Sem dúvida, explica-se a quem precisa de explicação, e a quem não sabe. Mas acaso sabe-se um pouco e se quer saber mais? E se o ignorante quer saber *mais*, estará disposto a saber *de modo diferente*? Estará pronto a receber progressivamente toda a problemática do tema estudado? Em suma, tratar-se-á de curiosidade ou de cultura? Se a ‘explicação’ não passa de uma *redução* ao conhecimento vulgar, ao conhecimento comum, nada tem a ver com a essencial *produção* do pensamento científico. Ora, muito freqüentemente, repitamo-lo sobre essa questão precisa de nossa discussão, a filosofia ao interrogar o cientista lhe pede para *reduzir* o conhecimento científico ao conhecimento usual, isto é, ao conhecimento sensível. Ele recua séculos para encontrar a feliz ingenuidade das intuições primeiras.”<sup>103</sup>

Com base nesse modo de argumentação podemos destacar duas classes distintas de obstáculos epistemológicos. Uma primeira é aquela relacionada com as chamadas *experiências primeiras*<sup>104</sup>, que estão sempre mais carregadas de opinião do que de considerações racionalmente construídas. A opinião não pode ser entendida como conhecimento pois

“(...) Não se pode basear nada na opinião: antes de tudo, é preciso destruí-la. Ela é o primeiro obstáculo a ser superado. (...) O espírito científico proíbe que tenhamos uma opinião sobre

---

<sup>103</sup> Gaston Bachelard. **L'Activité rationaliste de la physique contemporaine**. Paris: Presses Universitaires de France, 1951, p. 85-86. Extraído de Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 95, p. 59-60.

<sup>104</sup> Um educador francês contemporâneo, Georges Snyders, ao referir-se à experiência primeira, generaliza essa concepção substituindo-a por *cultura primeira*, que seria aquela construída pelo acúmulo do conhecimento mais próximo do senso comum. A cultura que nasce a partir do conhecimento mais acadêmico, construído a partir das pesquisas sistemáticas empreendidas por pesquisadores orgânicos, Snyders denomina *cultura elaborada*. Assim, para ele a cultura primeira seria portadora dos obstáculos epistemológicos que se oporiam ao advento dos conceitos próprios da cultura elaborada. Para mais detalhes consultar: Georges Snyders. **Alegria na escola**. São Paulo: Manole, 1988.

questões que não compreendemos, sobre questões que não sabemos formular com clareza.”<sup>105</sup>

Uma segunda classe de obstáculos epistemológicos nasce com a transformação do conhecimento científico numa espécie de verdade última e definitiva. Isto também levaria o conhecimento à estagnação, ao conformismo. Em função desse raciocínio, Bachelard em algum lugar chega a afirmar que “*o principal inimigo da ciência é a própria ciência*”.

As duas classes de obstáculos epistemológicos funcionam da mesma forma. Bachelard propõe que se lute contra elas. É daí que nasce a sua concepção de ruptura, que levou o filósofo francês Althusser a falar em *cortes epistemológicos*.

“A prática teórica de uma ciência é sempre completamente distinta da prática teórica ideológica de sua pré-história: esta distinção toma a forma de uma descontinuidade teórica e histórica *qualitativa* que eu, seguindo Bachelard, chamarei de um *corte epistemológico*.”<sup>106</sup>

É disso que trata a próxima seção.

## 6.6 Introduzindo o conceito de ruptura epistemológica

A breve introdução presente nas seções anteriores já dá uma ideia de como o pensamento de Bachelard diverge da proposta de desenvolvimento científico de Popper, que estava em gestação no período em que foi publicado o livro *O novo espírito científico*.

Na citação seguinte, Bachelard analisa a relação entre a física clássica de Newton e a física relativista de Einstein. Sua posição é próxima daquela que, quase três décadas mais tarde, seria encontrada no livro sobre a estrutura das revoluções científicas de Thomas Kuhn, como tivemos oportunidade de analisar brevemente no capítulo 4:

“Do ponto de vista astronômico, a refundição do sistema einsteiniano é total. A astronomia relativista não sai de modo algum da astronomia newtoniana. O sistema de Newton era um

<sup>105</sup> Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 101, p. 18.

<sup>106</sup> Louis Althusser. **For Marx**. Harmondsworth, UK: Penguin Books, 1969, p. 167-168.

sistema acabado. Corrigindo parcialmente a lei de atração, aperfeiçoando a teoria das perturbações, havia numerosos meios para dar conta do ligeiro avanço do perihélio de Mercúrio assim como das outras anomalias. Deste lado não havia necessidade de subverter de cima para baixo o pensamento teórico para adaptá-lo aos dados da observação. Vivíamos, aliás, no mundo newtoniano como numa residência espaçosa e clara. O pensamento newtoniano era de saída um tipo maravilhosamente transparente de pensamento fechado; dele não se podia sair a não ser por arrombamento.”<sup>107</sup>

Esse arrombamento mencionado por Bachelard leva-nos a compreender a força dos obstáculos epistemológicos, mesmo quando estes têm a chancela de um conhecimento científico racionalmente construído, como é o caso da física newtoniana.

A aproximação entre o pensamento de Bachelard e o de Kuhn fica ainda mais evidente na sequência desse texto que deixa a impressão de estarmos lendo algo escrito por Kuhn, particularmente quando este trata da revolução científica:

“Mesmo sob aspecto simplesmente numérico, enganamo-nos, acreditamos, quando vemos no sistema newtoniano uma primeira aproximação do sistema einsteiniano, pois que as sutilezas relativistas não decorrem de uma aplicação aperfeiçoada dos princípios newtonianos. Não se pode, portanto, dizer corretamente que o mundo newtoniano prefigura em suas grandes linhas o mundo einsteiniano. É bem depois, quando nos instalamos de improviso no pensamento relativista, que reencontramos nos cálculos astronômicos da Relatividade - por mutilações e abandonos - os resultados numéricos fornecidos pela astronomia newtoniana. Não há portanto, transição entre o sistema de Newton e o sistema de Einstein. Não se vai do primeiro ao segundo acumulando conhecimentos, redobrando os cuidados nas medidas, retificando ligeiramente os princípios. É preciso, ao contrário, um esforço de novidade total. Segue-se, pois, uma indução transcendente e não uma indução amplificante, indo do pensamento clássico ao pensamento relativista. Naturalmente, após esta indução pode-se, por redução, obter a ciência newtoniana. A astronomia de Newton é, pois, finalmente um caso particular da Panastronomia de Einstein, como a geometria de Euclides é um caso particular da Pangeometria de Lobatchewsky.”<sup>108</sup>

---

<sup>107</sup> Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 97, p. 43.

<sup>108</sup> Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 97, p. 43-44.

Notamos, nessa longa citação, que a análise de Bachelard é próxima daquela formulada por Kuhn no que respeita a transição de uma teoria para outra. Por outro lado, no que diz respeito às situações-limite, às fronteiras entre as duas teorias, percebemos também uma aproximação com o pensamento de Karl Popper, se bem que com outra significação. Isso porque, na sua forma de interpretar a transição, Bachelard prefigura a existência da *ruptura*, ou da *revolução científica*, nos termos de Kuhn. Afinal, como afirma o filósofo francês, só se pode sair do sistema newtoniano “*por arrombamento*”. A razão de ser dessa ruptura de conhecimento fica mais clara se a associarmos com o conceito de obstáculo epistemológico discutido na seção anterior.

### 6.7 Uma nova concepção de fenômeno

Quando abordamos a noção de obstáculo epistemológico, na 5ª seção deste capítulo, vimos como Bachelard menciona a concepção clássica de fenômeno como um possível obstáculo a ser superado. Nesta seção analisaremos brevemente a nova interpretação que Bachelard dá aos fenômenos associados ao mundo quântico, ao que ele denomina microfísica.

Para tratar desse problema, Bachelard introduz a ideia de *nômeno* ou noumeno. Ele afirma que o *real* da ciência contemporânea não aparece como fenômeno, mas como nômeno, isto é, como um sentido escondido atrás do fenômeno.

Bachelard entendia que com o surgimento das micropartículas, que não são simplesmente partículas pequenas (!), era preciso renunciar à noção clássica de objeto, de “coisa”, pelo menos no reino do mundo atômico isso seria inevitável. Assim, a microfísica seria uma ciência não-fenomenológica, seria uma ciência nomenológica. O fenômeno seria um objeto da percepção enquanto que o nômeno seria um objeto do pensamento. Eis mais um pequeno trecho de *O novo espírito científico* onde Bachelard exalta o papel da razão:

“Como nos propomos estudar principalmente a filosofia das ciências físicas, é a realização do racional na experiência física que será preciso esclarecermos. Esta realização que corresponde a um realismo técnico, parece-nos um dos traços distintivos do espírito científico contemporâneo, bem diferente a este respeito do espírito científico dos últimos séculos, bem afastado em particular do agnosticismo positivista ou das tolerâncias pragmáticas, sem relação enfim com o realismo filosófico tradicional. Com efeito, trata-se de um realismo de segunda posição, de um realismo em reação contra a realidade usual, em

polêmica contra o imediato, de um realismo constituído de razão realizada, de razão experimentada. O real que lhe corresponde não é rejeitado ao domínio da coisa em si incognoscível. Tem ele uma riqueza noumenal bem outra. Enquanto que a coisa em si é um noumeno por exclusão dos valores fenomenais, bem nos parece que o real científico é feito de uma contextura noumenal própria a indicar os eixos da experimentação. A experiência científica é assim uma razão confirmada. Este novo aspecto filosófico da ciência prepara uma volta do normativo na experiência: a necessidade da experiência sendo apreendida pela teoria antes de ser descoberta pela observação, a tarefa do físico consiste em depurar suficientemente o fenômeno para recobrar o noumeno orgânico.”<sup>109</sup>

## 6.8 A evolução da ciência e da filosofia em períodos históricos

Fecho nesta introdução ao pensamento bachelardiano mencionando algumas de suas argumentações sobre a história das ciências.

Bachelard destacava que, ao lado da evolução do conhecimento científico em si mesmo, havia uma evolução metodológica passando por sucessivas escolas: animismo, realismo, positivismo, racionalismo, até chegar ao racionalismo completo e dialético, ao surracionalismo.

Ele argumentava que o próprio racionalismo é mutável, produzindo um pluralismo na cultura filosófica. Em função dessa evolução metodológica do pensamento científico, Bachelard introduziu a noção de *perfil epistemológico*, que é sempre associado à possibilidade de que uma pessoa utilize diferentes modos de pensar quando se depara com algum conceito científico. Segundo suas palavras seria através do perfil epistemológico ou perfil mental:

“(…) que poderia medir-se a ação psicológica efetiva das diversas filosofias na obra do conhecimento. Expliquemos o nosso pensamento sobre o exemplo do conceito de massa. Quando nós próprios nos interrogamos, damo-nos conta de que as cinco filosofias que consideramos (realismo ingênuo – empirismo claro e positivista – racionalismo newtoniano ou kantiano – racionalismo completo – racionalismo dialético) orientam em direções diversas utilizações pessoais da noção de massa. Tentaremos então pôr grosseiramente em evidência a sua importância relativa colocando em abcissas as filosofias sucessivas e em ordenadas um valor que – se pudesse ser exato – mediria a frequência de utilização efetiva

---

<sup>109</sup> Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 97, p. 14.

da noção, a importância relativa das nossas convicções. Com uma certa reserva relativamente a esta medida muito grosseira, obtemos então para nosso perfil epistemológico pessoal da noção de massa um esquema do tipo seguinte:”<sup>110</sup>



Perfil epistemológico da noção de massa, Bachelard, 1972 p25

Sempre que fala em evolução do pensamento científico, Bachelard ressalta a descontinuidade, a ruptura com os obstáculos epistemológicos que se sucedem, como característica dessa evolução histórica. Assim, com relação ao conceito de massa, interiorizamos uma certa noção do mesmo quando compreendemos as diferenças entre o tamanho e o peso de um determinado corpo. A noção de massa estará associada ao uso da balança. Essa visão, denominada por Bachelard de realista, se constitui num obstáculo epistemológico ao racionalismo associado à noção newtoniana de massa. Esta, por seu turno, se converterá em novo obstáculo para a noção de massa da teoria da relatividade, que ele associa ao racionalismo completo. Assim vemos que Bachelard utiliza a ideia de uma certa evolução do pensamento científico de um indivíduo e do próprio conceito através de continuidades e rupturas.

Diz ele:

“Uma das objeções mais naturais dos *continuistas da cultura* consiste em evocar a *continuidade da história*. Dado que se faz um *relato contínuo* dos acontecimentos, acredita-se facilmente reviver os acontecimentos na continuidade do tempo e dá-se insensivelmente a toda a história a unidade e a continuidade de um livro. Desenhando-se então as dialéticas sob uma sobrecarga de acontecimentos menores. E no que se refere a acontecimentos

<sup>110</sup> Gaston Bachelard. **A filosofia do não. Filosofia do novo espírito científico**. Lisboa: Editorial Presença, 1972, p. 57-58.

epistemológicos que nos ocupam, não se aproveitam da extrema sensibilidade dialética que caracteriza a história das ciências.”<sup>111</sup>

Assim, Bachelard ressalta as rupturas na evolução histórica do desenvolvimento científico, mas não deixa de reconhecer uma verdadeira *evolução* ou progresso da ciência. Ele destaca três grandes períodos na história da ciência:

1º: caracterizado pelo estado *pré-científico*, que corresponde à Antiguidade Clássica, aos séculos do Renascimento e aos novos esforços dos séculos XVI, XVII e XVIII;

2º: caracterizado pelo estado *científico*, que se inicia no final do século XVIII e se estende pelo século XIX e início do século XX;

3º: caracterizado pelo *novo espírito científico*, que se instaura com o advento da ciência contemporânea, talvez em 1905, com a publicação dos primeiros trabalhos de Einstein sobre a relatividade.

Esta divisão provocou o seguinte comentário:

“A direção desse processo é balizada em direção ao progresso científico ou, o que dá no mesmo, pelo avanço da racionalidade e recuo da irracionalidade. Como se processa esse movimento fundamental descontínuo do pensamento científico em direção a um saber cada vez mais racional? Superando os obstáculos, os *obstáculos epistemológicos*, por meio dos *atos epistemológicos*.

O pensamento científico avança da pré-ciência para a ciência e desta para a nova ciência. O caminho do progresso é denunciado pelas próprias palavras empregadas: pré-ciência, ciência, nova ciência. O movimento, porém, ocorre em saltos descontínuos, por viradas, quando torna necessário ao cientista *refazer a cabeça*.”<sup>112</sup>

## 6.9 Conclusão

Encerramos este capítulo com algumas palavras de Gaston Bachelard, que resumem de forma explícita e implícita várias de suas noções discutidas ao longo do texto, sinalizando a sua

---

<sup>111</sup> Gaston Bachelard. **Le materialisme rationnel**. Paris: Presses Universitaires de France, 1953, p. 209. Extraído de Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 95, p. 171 (já existe tradução para o português dessa obra pelas Edições 70, de 1990).

<sup>112</sup> Isaac Epstein. **Revoluções científicas**. São Paulo: Ática, 1988, p. 24.

profissão de fé epistemológica e, ao mesmo tempo, advertindo todos aqueles que pretendam trabalhar com a física e com seu ensino:

“É no momento em que um conceito muda de sentido que ele tem mais sentido (...) Mesmo se colocando do simples ponto de vista pedagógico - do ponto de vista do qual se desconhece freqüentemente a importância psicológica - o aluno compreenderá melhor o valor da noção galileana de velocidade se o professor souber expor o papel aristotélico da velocidade no movimento. Prova-se assim o **incremento psicológico** realizado por Galileu. Acontece exatamente o mesmo quanto à retificação dos conceitos realizados pela Relatividade. O pensamento não-newtoniano absorve assim a mecânica clássica e distingue-se dela.”<sup>113</sup>

---

<sup>113</sup> Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 97, p. 51.

## Poema para Galileo (trechos)

**Antonio Gedeão** (Pseudônimo de Rômulo de Carvalho (1906-1997), metodólogo, professor e autor de livro de ciências português)

“(...) Estavam todos a ralar contigo,  
que parecia impossível que um homem da tua idade  
e da tua condição,  
se estivesse tornando um perigo  
para a Humanidade  
e para a Civilização. (...)

(...) Mal sabiam os teus doutos juízes, grandes senhores deste pequeno mundo,  
que assim mesmo, empertigados nos seus cadeirões de braços,  
andavam a correr e a rolar pelos espaços  
à razão de trinta quilômetros por segundo.

Tu é que sabias, Galileu Galilei.  
Por isso eram teus olhos misericordiosos,  
por isso era teu coração cheio de piedade,  
piedade pelos homens que não precisam de sofrer, homens ditosos  
a quem Deus dispensou de buscar a verdade.

Por isso, estoicamente, mansamente,  
resististe a todas as torturas,  
a todas as angústias, a todos os contratemplos,  
enquanto eles, do alto inacessível das suas alturas,  
foram caindo,  
caindo,  
caindo,  
caindo sempre,  
e sempre,  
ininterruptamente,  
na razão direta dos quadrados dos tempos.”

## Capítulo 7

### A sociologia do conhecimento de Fleck<sup>114</sup>

André Ferrer Pinto Martins

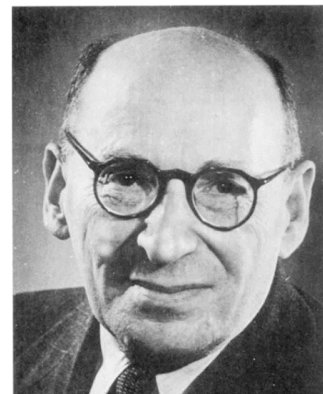
*“Os processos do intelecto não são autônomos. Sejam quais forem a natureza das relações entre a ciência e a sociedade onde está embutida e a conjuntura histórica particular onde ocorre, essa relação existe. Os problemas que os cientistas identificam, os métodos que usam, os tipos de teorias que consideram satisfatórias em geral ou adequadas em particular, as ideias e modelos que usam para resolvê-los são os de homens e mulheres cujas vidas, mesmo no presente, não se restringem ao laboratório ou ao estudo”*

Eric Hobsbawm<sup>115</sup>

#### 7.1 Introdução e alguns dados biográficos

Os autores trazidos até esse ponto, nestas *Notas de Aula*, dialogam mais diretamente com a área da Física, inclusive, devido às suas áreas específicas de formação. Não é esse o caso de Ludwik Fleck (1896-1961), médico atuante e que se dedicou apenas de modo periférico a publicações de natureza epistemológica.

Fleck, como veremos a seguir, permaneceu esquecido por algumas décadas antes de ser redescoberto e ganhar destaque no terreno da epistemologia e da sociologia do conhecimento. Suas ideias têm influenciado, mais recentemente, reflexões em diversas áreas, desde a epistemologia da medicina até a área de ensino de ciências da natureza. Especificamente no Brasil, o volume de publicações que fazem referência a esse autor tem crescido significativamente nos últimos anos.



Ludwik Fleck (1896-1961)

A riqueza das ideias epistemológicas de Fleck torna-se ainda mais evidente quando nos damos conta do período histórico em que foram escritas, assim como da atmosfera intelectual e

<sup>114</sup> Alguns trechos desse capítulo foram retirados e traduzidos de André Ferrer Pinto Martins. Knowledge about Science in Science Education Research from the Perspective of Ludwik Fleck's Epistemology. **Research in Science Education**, v. 46, p. 511-524, 2015.

<sup>115</sup> Eric J. Hobsbawm. **A era dos impérios – 1875-1914**. São Paulo: Paz e Terra, 2010, p. 388.

do contexto político e social da época. Fleck nasceu em Lwów, situada atualmente no oeste da Ucrânia, mas, à época, pertencente à Galícia Polonesa e sob o domínio do Império Austro-húngaro. Trata-se de uma região que presenciou inúmeros conflitos e que, durante a Segunda Guerra Mundial, foi ocupada inicialmente por tropas soviéticas e, em seguida, pelos alemães.

Fleck formou-se em medicina em 1922, aos 26 anos, e passou a se dedicar à área de microbiologia. Entre 1922 e 1939 veio a trabalhar em diversos hospitais e laboratórios de pesquisa, publicando, nesse período, cerca de 39 trabalhos científicos. Realizou pesquisas sobre o tifo e investigou também o aprimoramento do diagnóstico de outras doenças, como a sífilis e a tuberculose.

A vida de Fleck – que era judeu – foi bastante conturbada e marcada pela perseguição nazista que o levou ao confinamento no gueto de Lwów e nos campos de concentração de Auschwitz e Buchenwald durante a Segunda Guerra Mundial. Aparentemente, sua sobrevivência deveu-se ao seu conhecimento da medicina, sendo requisitado por seus algezes para trabalhar numa vacina contra o tifo. De sua família, apenas sua mulher e filho sobreviveram à guerra.

Apesar disso, Fleck teve uma vida intelectual bastante ativa, tanto antes quanto depois da guerra. Suas leituras sobre epistemologia ocorriam em suas horas de lazer. O ambiente intelectual em Lwów era bastante rico, multicultural e marcado, dentre outros aspectos, pela existência de pessoas que discutiam filosofia da medicina. Além disso, Fleck também teve contato com alguns filósofos de Lwów que podem tê-lo influenciado. Publicou alguns poucos artigos sobre epistemologia ao longo da vida (sete, no total), sendo dois deles ainda na década de 1920 e outros dois na década de 1930. Nesses trabalhos encontram-se os principais fundamentos que estão presentes e mais desenvolvidos em sua obra principal, de 1935: *Gênese e desenvolvimento de um fato científico*.

Após a guerra, Fleck retomou seu trabalho de pesquisa na área médica, passando pelas cidades de Lublin, Wrocław e Varsóvia. Entre 1946 e 1957, assumiu cargos em universidades polonesas, orientou diversos trabalhos acadêmicos (aproximadamente 50 teses de doutorado) e publicou cerca de 87 artigos científicos em revistas polonesas e internacionais. A partir de 1957 sua saúde começa a piorar em função de um infarto sofrido no ano anterior e da descoberta de um câncer. Nesse mesmo ano, muda-se com a esposa para Israel para ficar próximo ao único

filho, assumindo um cargo em um instituto israelense de pesquisa biológica. Vem a falecer em 1961, aos 64 anos.

## 7.2 Estilos e coletivos de pensamento

Passemos, então, a um breve esboço das ideias de Fleck, sem perder de vista que se trata de uma apresentação consideravelmente limitada e focada somente em alguns dos conceitos centrais de seu pensamento, presentes em sua principal obra<sup>116</sup>.

O conhecimento, para Fleck, é resultado de um processo que é histórico, social e coletivo. Isso não significa apenas dizer que o conhecimento, em geral, e o conhecimento científico, em particular, muda com o tempo e com as sociedades. De modo um pouco mais profundo, os saberes carregam em si mesmos as marcas históricas e sociais dos coletivos que os constroem. A relação propriamente epistemológica se dá entre os pólos tradicionais – sujeito e objeto – acrescidos de um terceiro pólo/elemento: o “estado do saber” de uma determinada época e lugar. É impossível, segundo Fleck, compreender o conhecimento numa perspectiva puramente lógica, sem recorrer a uma sociologia do saber. O conhecimento é o “produto social por excelência”<sup>117</sup>.

“Qualquer teoria do conhecimento que não leva em conta esse condicionamento social de todo conhecimento é uma brincadeira. Quem, entretanto, considera o condicionamento social como um mal necessário, como uma lamentável imperfeição humana a ser combatida, não sabe que, sem esse condicionamento, o conhecimento simplesmente não é possível, e – eu diria ainda – que a palavra ‘conhecer’ somente ganha um significado no contexto de um coletivo de pensamento.”<sup>118</sup>

Nesse aspecto já vislumbramos a discordância de Fleck em relação aos filósofos do Círculo de Viena, pois, para ele, as respostas às questões da epistemologia não viriam do formalismo lógico e nem da consideração tão somente da díade sujeito-objeto do conhecimento.

<sup>116</sup> Ludwik Fleck. **Gênese e desenvolvimento de um fato científico**. Belo Horizonte: Fabrefactum, 2010.

<sup>117</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 85. Cabe apontar que os trechos citados não seguem linearmente a sequência do seu aparecimento no livro. Optamos por isso por entendermos que Fleck trata de vários conceitos de modo recorrente e, muitas vezes, uma citação “fora da ordem” é mais esclarecedora.

<sup>118</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 86.

A obra é dividida em quatro capítulos. Nos capítulos 1 e 3 Fleck analisa dois casos históricos, respectivamente: como surgiu o conceito “atual” de sífilis e a “descoberta” da reação de Wassermann, no campo da medicina. Nos capítulos 2 e 4, são discutidas as consequências para a teoria do conhecimento. A partir dessa análise histórica, Fleck introduz dois conceitos centrais de sua epistemologia: o de *estilo de pensamento* e o de *coletivo de pensamento*.

Faz parte de um estilo de pensamento (EP) uma predisposição a um olhar direcionado. Não há algo como uma observação neutra e isenta de um fenômeno. A percepção da forma (e Fleck se utiliza aqui da *Gestalt*) se dá em conformidade ao estilo. É ele que orienta o ver, sentir e agir de um determinado grupo que o compartilha. Os conceitos têm uma história que só pode ser compreendida em sua relação com os estilos de pensamento que os engendraram.

Nas palavras de Fleck:

“O estilo de pensamento, assim como qualquer estilo, consiste numa determinada atmosfera (*Stimmung*) e sua realização. Uma atmosfera (*Stimmung*) possui dois lados inseparáveis: ela é a disposição (*Bereitschaft*) para um sentir seletivo e para um agir direcionado correspondente. Ela gera as formas de expressão adequadas: religião, ciência, arte, costumes, guerra etc, de acordo com a predominância de certos motivos coletivos e dos meios coletivos investidos. Podemos, portanto, *definir o estilo de pensamento como percepção direcionada em conjunção com o processamento correspondente no plano mental e objetivo*. Esse estilo é marcado por características comuns dos problemas, que interessam a um coletivo de pensamento; dos julgamentos, que considera como evidentes e dos métodos, que aplica como meios do conhecimento. É acompanhado, eventualmente, por um estilo técnico e literário do sistema do saber.”<sup>119</sup>

Já o coletivo de pensamento (CP) é o “portador comunitário do estilo”<sup>120</sup>. Corresponde ao grupo de indivíduos que, num determinado contexto histórico-social, compartilham determinado estilo de pensamento. Um indivíduo pode fazer – e normalmente faz – parte de diversos coletivos simultaneamente. A noção de coletivo traduz a dimensão e o condicionamento social do conhecimento.

Nas palavras de Fleck:

---

<sup>119</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 149 (grifos do autor).

<sup>120</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 154.

“Se definirmos o ‘coletivo de pensamento’ como a *comunidade das pessoas que trocam pensamentos ou se encontram numa situação de influência recíproca de pensamentos, temos, em cada uma dessas pessoas, um portador do desenvolvimento histórico de uma área de pensamento, de um determinado estado do saber e da cultura, ou seja, de um estilo específico de pensamento.*” <sup>121</sup>

O CP representa, para Fleck, um conceito funcional e que não deve ser identificado com um grupo fixo ou de uma classe social, por exemplo. Há coletivos casuais e momentâneos e os estáveis ou relativamente estáveis, correspondentes a grupos socialmente organizados e existentes por períodos mais extensos.

Um estilo de pensamento não é algo fixo, mas sofre transformações (“mutações”) ao longo do tempo. Outro conceito trazido por Fleck é o de protoideias (ou pré-ideias). Representam ideias pré-científicas, mais ou menos vagas, que guardam ligações evolutivas com ideias científicas atuais, ainda que tais ligações não sejam legitimadas pelos conteúdos. Fleck apresenta a noção de sangue sífilítico (corrompido) como exemplo de uma protoideia, e cita também o atomismo da antiguidade grega. É explícito ao afirmar que não se poderia encontrar uma protoideia para cada descoberta científica.

“As protoideias devem ser consideradas como pré-disposições histórico-evolutivas (*entwicklungsgeschichtliche Anlagen*) de teorias modernas e sua gênese deve ser fundamentada na sociologia do pensamento (*denksozial*).” <sup>122</sup>

A percepção da forma desenvolvida e conforme a um estilo representa um estágio maduro de um estilo de pensamento, precedido pela percepção pouco clara das primeiras observações, seguida pela experiência irracional que forma novos conceitos e transforma o estilo. Fleck exemplifica longamente essa ideia apresentando o desenvolvimento histórico do conceito de sífilis enquanto entidade nosológica.

O desenvolvimento de um estilo de pensamento e o compartilhamento de ideias, em seu interior, leva ao que Fleck chama de “harmonia das ilusões”, uma tendência a considerar

---

<sup>121</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 82 (grifos do autor).

<sup>122</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 66 (grifos do autor).

observações e experiências novas sempre em conformidade ao estilo, e a repelir interpretações alternativas. Esse aspecto é bastante forte no interior de coletivos de pensamento altamente especializados. O EP define “o que não pode ser pensado de outra maneira”<sup>123</sup>. Nesse sentido, pode-se falar numa “persistência dos sistemas de opinião” própria dos estilos de pensamento. Não se trata de mera inércia ou cautela, mas de um procedimento ativo. Os sistemas de opinião funcionam como totalidades fechadas, harmoniosas, e tendem a promover o silenciamento das “exceções”, assim como conciliar e acomodar aquilo que é destoante (reinterpretar conforme o estilo).

A iniciação numa determinada área do saber tem, para Fleck, a característica de uma “‘condução-para-dentro’, uma suave coação”<sup>124</sup>, em que o iniciante (jovem pesquisador, no caso da ciência) é apresentado de forma dogmática ao modo de ver, sentir e agir próprios do estilo. Aqui, ganham um papel especial os “manuais”, de que trataremos mais adiante. No capítulo em que trata da reação de Wassermann, Fleck assim caracteriza a iniciação a-histórica numa área do saber:

“A introdução didática, isto é, vinda de uma autoridade, não é simplesmente racional, pois o estágio momentâneo do saber permanece pouco claro sem o conhecimento da história, assim como a própria história permanece pouco clara sem o conhecimento de um estágio momentâneo. Toda introdução didática numa área envolve um tempo em que predomina um ensino puramente dogmático. Prepara-se um intelecto para uma área, acolhe-se o mesmo num mundo fechado, dá-se a ele uma espécie de bênção de iniciação. Se essa iniciação passou a ser tão difundida como, por exemplo, no caso da introdução nos fundamentos da física, ela se torna tão natural que as pessoas se esquecem de tê-la recebido, uma vez que não têm contato com nenhum não iniciado.”<sup>125</sup>

### 7.3 Acoplamentos ativos e passivos

Mas não devemos ficar com a impressão de que o conhecimento, cujo processo de construção dá-se no âmbito de um coletivo e é guiado pelo estilo, é “apenas” uma construção

---

<sup>123</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 150.

<sup>124</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 155.

<sup>125</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 99.

social, numa perspectiva próxima a de vertentes relativistas mais “extremas”. A parte coletiva do conhecimento é formada pelo que Fleck denomina de *acoplamentos ativos*, em que o coletivo e o estilo desempenham um papel central. Mas há resultados inevitáveis que correspondem aos denominados *acoplamentos passivos* e que são percebidos como realidade objetiva. Os acoplamentos passivos não são explicados nem psicologicamente, nem historicamente. Nas palavras de Fleck:

“Conhecer, portanto, significa, em primeiro lugar, constatar os resultados inevitáveis sob determinadas condições dadas. Estas condições correspondem aos acoplamentos ativos, formando a parte coletiva do conhecimento. Os resultados inevitáveis equivalem aos acoplamentos passivos e formam aquilo que é percebido como realidade objetiva. O ato da constatação compete ao indivíduo.”<sup>126</sup>

Fleck exemplifica essas ideias falando sobre a massa atômica dos elementos. Uma vez estabelecida, convencionalmente (acoplamento ativo, portanto), a massa atômica do oxigênio, p.ex., resulta, de modo impositivo, a massa atômica de outros elementos. O valor relacional entre as massas seria um elemento passivo do saber. Tanto o número de acoplamentos ativos quanto o de passivos crescem quanto mais nos aprofundamos numa área do saber. As noções de acoplamentos ativos e acoplamentos passivos não são abordadas por Fleck de maneira muito detalhada.

O fato científico surge, para Fleck, como uma coerção no pensamento, como um sinal de resistência à voluntariedade livre do pensamento. Ele evidencia a “associação inseparável das partes ativas e passivas do saber”. O fato é uma “relação de conceitos conforme o estilo de pensamento”, como afirma Fleck nesse trecho:

“Podemos definir o fato científico provisoriamente como uma *relação de conceitos conforme o estilo de pensamento, que, embora possa ser investigável por meio dos pontos de vista históricos e da psicologia individual e coletiva, nunca poderá ser simplesmente construída, em sua totalidade, por meio desses pontos de vista*. Assim fica constatado o

---

<sup>126</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 83.

fenômeno da associação inseparável das partes ativas e passivas do saber, e ainda o fenômeno de o número das duas partes crescer com o número dos fatos.”<sup>127</sup>

Não há sentido em se falar de “fato” de modo desconectado das noções de estilo e de coletivo de pensamento. O fato surge sob o pano de fundo do EP. Pode-se falar em efeitos recíprocos entre o indivíduo, o coletivo e o fato. Daí que exista uma *gênese do fato científico* no interior do estilo, como é destacado no próprio título da obra.

Fleck sintetiza algumas dessas ideias no trecho a seguir, ao analisar as consequências epistemológicas do caso histórico da reação de Wassermann:

“Assim nasce o fato: primeiro um sinal de resistência no pensamento inicial caótico, depois uma certa coerção de pensamento e, finalmente, uma forma (*Gestalt*) a ser percebida de maneira imediata. Ele sempre é um acontecimento que decorre das relações na história do pensamento, sempre é resultado de um determinado estilo de pensamento.”<sup>128</sup>

#### **7.4 Círculo esotérico, círculo exotérico, tráfego intracoletivo e tráfego intercoletivo de ideias**

Os coletivos de pensamento não são agrupamentos monolíticos. Os indivíduos posicionam-se em relação a um determinado estilo de pensamento de modo diferenciado. Há o chamado *círculo esotérico*, que pode ser considerado uma espécie de “núcleo” do coletivo, onde se encontram – no caso da ciência – os pesquisadores atuantes numa determinada área, os “iniciados”. Em torno dele se forma o chamado *círculo exotérico*, formado por indivíduos que compartilham do estilo de pensamento de modo indireto, ou seja, intermediado pelo círculo esotérico. Um exemplo seriam os médicos que, em relação ao círculo esotérico – mais restrito – de pesquisadores na área da medicina, estariam no círculo exotérico<sup>129</sup>.

Fleck afirma que:

---

<sup>127</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 132 (grifos do autor).

<sup>128</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 144-145 (grifos do autor).

<sup>129</sup> Podemos pensar em um exemplo análogo no âmbito de um EP da física. Os professores de física estariam situados no círculo exotérico em relação aos pesquisadores em física, no círculo esotérico.

“(...) em torno de qualquer formação do pensamento, seja um dogma religioso, uma ideia científica ou um pensamento artístico, forma-se um pequeno círculo esotérico e um círculo exotérico maior de participantes do coletivo de pensamento. Um coletivo de pensamento consiste em muitos desses círculos que se sobrepõem, e um indivíduo pertence a vários círculos exotéricos e a poucos círculos esotéricos.”<sup>130</sup>

É importante notar que, para Fleck, mesmo os “iniciados” não estão isentos da influência do círculo exotérico. Eles dependem, em certa medida, da “opinião pública”.

A circulação de ideias pode se dar de duas maneiras: por meio do tráfego intracoletivo e pelo tráfego intercoletivo<sup>131</sup>. O tráfego intracoletivo é caracterizado por um sentimento específico de dependência e fortalece as formações de pensamento dentro de um estilo. Contribui para a criação de hábitos de pensamento que passam a ser vistos como óbvios e garantem a “harmonia das ilusões”. Ajuda a criar uma atmosfera particular que reforça e identifica os membros de um coletivo. Quanto mais especializada é uma área, mais forte é a vinculação de pensamento específica dos membros. Apesar disso, pode-se falar em nuances, variedades e diferenças dentro de um mesmo estilo.

Os coletivos se entrecruzam e se relacionam. A circulação de ideias entre coletivos se dá por meio do tráfego intercoletivo, responsável pelos deslocamentos e alterações dos valores do pensamento. “A palavra como tal representa um bem intercoletivo peculiar” e circula sempre com certa alteração de significado, certo deslocamento de sentido. Isso gera novas possibilidades no interior dos coletivos. Desse modo, os “mal-entendidos” poderiam assumir uma função positiva. Quanto maior a diferença entre dois estilos de pensamento, menor é o tráfego intercoletivo.

## **7.5 Ciência dos periódicos, ciência dos manuais, ciência dos livros didáticos e ciência popular**

Ao tratar de “algumas características do coletivo de pensamento na ciência moderna”, no capítulo 4, Fleck analisa as marcas dos saberes esotérico e exotérico dentro de um CP. Os

---

<sup>130</sup> Ludwik Fleck, *op. cit.*, nota 116, p. 157.

<sup>131</sup> Na tradução da obra para o português optou-se pelo termo “tráfego” em vez de “circulação”. Mas autores brasileiros têm optado também pelo último termo.

pesquisadores altamente especializados, no núcleo esotérico, produzem o que Fleck denomina de *ciência dos periódicos*, marcada por seu caráter provisório, incerto e pessoal. Quanto a esse caráter pessoal, ressalta Fleck que

“Qualquer pesquisador tem consciência disso, sentindo ao mesmo tempo que o aspecto pessoal do seu trabalho é também seu defeito: quase sempre quer fazer desaparecer sua pessoa. Trata-se de algo reconhecível, por exemplo, pelo característico ‘nós’ no lugar do ‘eu’, isto é, pelo plural de modéstia (*pluralis modestiae*) específico, que é uma invocação dissimulada do coletivo. Disso e da cautela característica acima descrita, compõe-se a modéstia específica – a obrigação de que a pessoa do pesquisador se retraia.”<sup>132</sup>

Essa ciência dos periódicos transforma-se, devido à migração intracoletiva de pensamentos, na *ciência dos manuais*. Os manuais seriam formas consolidadas do estilo, depuradas a partir da ciência dos periódicos. Fruto de seleção e composição ordenada, eles carregam a linguagem específica da área e promovem uma introdução didática do jovem pesquisador numa área determinada. Ele deve ser capaz de reconhecer, enquanto membro do coletivo e partícipe do estilo, quais são os “problemas reais” de pesquisa e os “pseudo-problemas” que não devem ser objeto de atenção.

“No sistema ordenado de uma ciência, da maneira como um manual o apresenta, uma proposição se apresenta por si só com muito mais certeza e muito mais caráter comprobatório do que na exposição fragmentária dos periódicos. Torna-se uma determinada coerção de pensamento.”<sup>133</sup>

Já a *ciência dos livros didáticos* estaria ligada a uma iniciação à ciência que ocorre segundo métodos pedagógicos particulares, segundo Fleck.

Do centro esotérico à periferia exotérica, chega-se ao saber popular, uma “formação peculiar e emaranhada”<sup>134</sup>, segundo Fleck. A *ciência popular* seria a ciência para não

---

<sup>132</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 172-173 (grifos do autor).

<sup>133</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 175.

<sup>134</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 165.

especialistas, de caráter simplificado, ilustrativo e apodítico. Essas seriam as marcas mais importantes do saber exotérico.

“Se entendemos por fato apenas algo firme e comprovado, ele existe somente na ciência dos manuais: antes, no estágio do sinal solto de resistência da ciência dos periódicos, ele é, na verdade, apenas predisposição do fato. Depois, no estágio do saber cotidiano e popular, ele se torna carne: uma coisa imediatamente perceptível, isto é, realidade.”<sup>135</sup>

## 7.6 Fleck e Kuhn

*Gênese e desenvolvimento de um fato científico* não teve o destino que merecia. Algumas razões costumam ser elencadas para entendermos o apagamento e a não repercussão da obra de Fleck. Isso teria ocorrido, em parte, devido à atmosfera intelectual da Filosofia da Ciência europeia, dominada pela visão do Círculo de Viena – ao qual Fleck se opõe – e, em parte, devido ao contexto geopolítico da época. O livro foi publicado em alemão por uma editora da Basileia, na Suíça, com uma tiragem pequena. As poucas resenhas a seu respeito foram publicadas em periódicos da área médica, e não de filosofia.

De todo modo, é inegável que, apenas um ano após o surgimento de obras importantes de Popper (*A lógica da pesquisa científica*) e de Bachelard (*O novo espírito científico*), Fleck trouxe ideias bastante inovadoras, numa perspectiva mais próxima do que hoje chamaríamos de uma sociologia do conhecimento. Lembrando que, alguns anos antes, em 1931, houvera o famoso congresso internacional de história da ciência marcado pela presença da equipe soviética e que deu início à “disputa” entre internalismo e externalismo. E que nesse período, também, começam a ganhar destaque as posições de Robert Merton no terreno da sociologia da ciência.

Se a epistemologia de Fleck permaneceu ignorada em boa parte do mundo durante décadas, recuperou parte da atenção devido a uma menção ao trabalho de Fleck no prefácio de *A estrutura das revoluções científicas*, de Thomas Kuhn. O livro revolucionário de Kuhn foi publicado pela primeira vez em 1962, apenas um ano após a morte de Fleck em Israel.

---

<sup>135</sup> Ludwik Fleck, **op. cit.**, nota 116, p. 179.

Kuhn, nessa obra, não deixou claro que conceitos ou ideias teria aproveitado da obra de Fleck, que havia lido em alemão por volta de 1949-1950. Ao tratar, no Prefácio, de algumas das perspectivas que o influenciaram, Kuhn escreve:

“Encontrei<sup>136</sup> a quase desconhecida monografia de Ludwik Fleck, *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache* (Basiléia, 1935), um ensaio que antecipa muitas das minhas próprias idéias. Junto com uma observação de um outro Junior Fellow, Francis X. Sutton, a obra de Fleck me fez compreender que essas idéias poderiam necessitar de uma colocação no âmbito da sociologia da comunidade científica.”<sup>137</sup>

Em 1979, *Gênese e desenvolvimento de um fato científico* ganha tradução para o inglês, com apresentação (Foreword) escrita por Kuhn. De modo incomum a uma apresentação, o autor de *A estrutura...* critica algumas das ideias de Fleck e reforça o aspecto “nebuloso” relativo ao uso que fez delas:

“Eu tenho mais de uma vez sido perguntado o que eu tomei de Fleck e posso apenas responder que eu estou quase totalmente incerto (...) o conhecimento do texto de Fleck me ajudou a perceber que os problemas que me preocupavam tinham uma dimensão fundamentalmente sociológica. De qualquer forma, essa é a conexão em que citei seu livro em minha *Estrutura das Revoluções Científicas*. Mas não tenho certeza se tomei algo muito mais concreto do trabalho de Fleck, embora eu obviamente possa e sem dúvida deva ter feito isso.”<sup>138</sup>

---

<sup>136</sup> Curioso o caminho que levou Kuhn a Fleck. A referência a Fleck fora feita numa nota de rodapé de um livro de Hans Reichenbach (1891-1953), lido por Kuhn na década de 1950. Mas, aparentemente, o que chamou a atenção de Reichenbach foi algum aspecto específico do trabalho de Fleck e não sua concepção epistemológica como um todo. A mensagem é clara: as notas de rodapé são importantes!

<sup>137</sup> Thomas S. Kuhn. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva, 1970, p. ix. Trecho no original em inglês: “(...) I have encountered Ludwik Fleck’s almost unknown monograph, *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache* (Basel, 1935), an essay that anticipates many of my own ideas. Together with a remark from another Junior Fellow, Francis X. Sutton, Fleck’s work made me realize that those ideas might require to be set in the sociology of the scientific community” (Thomas S. Kuhn. **The structure of scientific revolutions**. Chicago: The University of Chicago Press, 1962, p. viii-ix).

<sup>138</sup> Thomas S. Kuhn. Foreword. In: Ludwik Fleck. **Genesis and development of a scientific fact** (pp. vii-xi). Chicago: The University of Chicago Press, 1979, p. viii-ix (tradução minha). Trecho no original em inglês: “I have more than once been asked what I took from Fleck and can only respond that I am almost totally uncertain. (...) acquaintance with Fleck’s text helped me to realize that the problems which concerned me had a fundamentally sociological dimension. That, in any case, is the connection in which I cited his book in my *Structure of Scientific*

Kuhn também faz referência, em outro momento, à sua dificuldade com a língua alemã na leitura de Fleck.

Não temos a intenção, nesse capítulo, de abordar a relação entre as obras de Kuhn e Fleck. No entanto, a referência a Kuhn é importante na medida em que se trata de um autor bastante conhecido na área de pesquisa em ensino de ciências e cuja visão influenciou sobremaneira o modo como concebemos o desenvolvimento científico. Leitores que desconhecem a obra de Fleck podem ficar surpresos com certas semelhanças de ideias entre esses autores.

Mas seria simplificador acreditar que Kuhn “plagiou” a obra de Fleck. Certamente a relação entre o pensamento desses dois autores é complexa e, seguindo Fleck, deve ser analisada em função dos seus respectivos contextos históricos e sociais, bem como considerando os diferentes CPs nos quais ambos estavam inseridos.

Foi a partir da citação de Fleck por Kuhn, em *A estrutura...*, que as ideias do médico polonês no terreno da sociologia do conhecimento foram “redescobertas” e ganharam notoriedade. Nos anos seguintes, W. Baldamus publica dois trabalhos em que aborda a obra de Fleck<sup>139</sup> e orienta uma tese de doutorado, de Thomas Schnelle, que culmina na realização de um evento e na publicação de *Cognition & Fact – materials on Ludwik Fleck*<sup>140</sup>, já na década de 1980. A partir de então pode-se dizer que Fleck passa a ser mais conhecido internacionalmente, tendo sua principal obra ganhado traduções em diversas línguas. No Brasil, a tradução de *Gênese e desenvolvimento de um fato científico* surge em 2010, e o interesse pelo pensamento de Fleck tem crescido nos últimos anos, em particular, na área de ensino de ciências da natureza.

---

*Revolutions*. But I am not sure that I took anything much more concrete from Fleck’s work, though I obviously may and undoubtedly should have” (Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, p. viii-ix).

<sup>139</sup> W. Baldamus. The role of discoveries in social science. In: T. Shanin (Ed.) **The rules of the game: cross-disciplinary essays on models in scholarly thought**. London: Tavistock, 1972, p. 276-302; e W. Baldamus. Ludwig Fleck and the development of the sociology of science. In: P. R. Gleichmann et al. (Eds.) **Human figurations: essays for Norbert Elias**. Amsterdam: Stichting Amsterdams Sociologisch Tijdschrift, 1977, p. 135-156.

<sup>140</sup> R. Cohen; T. Schnelle (Eds.) **Cognition and fact: materials on Ludwik Fleck**. Dordrecht: Reidel Publish Company, 1986. Essa obra contém os sete artigos de Fleck no campo da epistemologia e uma série de trabalhos de comentadores, além de um excelente texto de Schnelle (Parte I) que traz uma biografia de Fleck e uma análise geral de sua obra.

## Capítulo 8

### Observações quase finais

*“(...) fazemos ciência com os fatos assim como uma casa é feita com tijolos; mas uma acumulação de fato não é ciência assim como um conjunto de tijolos não é uma casa.”*

Henri Poincaré <sup>141</sup>

Quero nestas observações quase finais, destacar que pretendi, nesta primeira parte das *Notas de Aula* para a disciplina de *Evolução dos Conceitos da Física*, apresentar uma introdução aos estudos epistemológicos contemporâneos, que se opõem à visão positivista da prática científica. Como deve ter ficado claro ao longo do texto deixei de lado uma série de filósofos da ciência que apresentam outras propostas seguindo, às vezes, algumas das epistemologias que foram tratadas nas *Notas*. Basta mencionar as ausências de Lakatos e Laudan.

Quero, ao mesmo tempo, destacar que o estudo epistemológico isoladamente não é suficiente para oferecer um quadro completo do que é a ciência no mundo contemporâneo.

Portanto, essa introdução não esgota de forma alguma o estudo de como se processa a *fabricação da ciência*, aproveitando aqui o título de um interessante livro de Alan Chalmers. Nesse livro, utilizando entre outros autores três dos epistemólogos apresentados nestas *Notas* – Popper, Kuhn e Feyerabend – e substituindo Bachelard por Lakatos, ele busca apresentar uma análise filosófica mesclada com a história da ciência com a preocupação que ele destaca ao final de seu livro:

“Neste livro estive preocupado em identificar e caracterizar a meta da ciência, distinguindo-a de outras atividades com diferentes objetivos. Disso não se deve concluir que eu considere a meta da ciência algum bem absoluto e sem restrições, necessariamente superior a outras metas.” <sup>142</sup>

<sup>141</sup> Henri Poincaré. **A ciência e a hipótese**. Brasília: Editora da UnB, 1984. Citado por Alberto Oliva, **op. cit.**, nota 10, p. 22.

<sup>142</sup> Alan Chalmers. **A fabricação da ciência**. São Paulo: Editora da Unesp, 1994, p. 160. Original inglês de 1990.

É possível encontrar pesquisadores que se situam no campo denominado “antropologia<sup>143</sup> das ciências” ou “estudos sociais da ciência”. Isabelle Stengers, química e filósofa da ciência mundialmente conhecida principalmente por ter publicado dois livros com o Prêmio Nobel de Química Ilya Prigogine<sup>144</sup>, afirma que esses investigadores questionam o isolamento entre ciência e sociedade, buscando

“estudar a ciência à maneira de um projeto social como outro qualquer, nem mais descolado das preocupações do mundo, nem mais universal ou racional do que qualquer outro.”<sup>145</sup>

Apenas como eventual aperitivo para algum curioso dessa linha de investigação cito um pequeno trecho da conclusão de um dos últimos livros de Bruno Latour, um dos mais destacados pesquisadores desse campo:

“Se não respondi aos argumentos dos guerreiros da ciência palavra por palavra – ou sequer mencionei seus nomes –, foi porque eles costumam perder tempo atacando outros que *têm o mesmo nome* que eu e, segundo se supõe, defendem todos os absurdos que venho contestando há 25 anos: que a ciência é socialmente construída; que tudo é discurso; que não existe uma realidade exterior; que a ciência não tem conteúdo conceitual; (...).”<sup>146</sup>

Além desses estudos existem outros que buscam analisar a ciência com base na ontologia, que é uma investigação “*relativa aos modos mais gerais de entender o mundo, isto é, às realidades deste mundo*”.<sup>147</sup> Por coincidência, o mesmo Bruno Latour, teria afirmado que Isabelle Stengers “*escolheu distinguir a ‘boa ciência’ da ‘má ciência’ não por meio da epistemologia, mas da ontologia; não através da palavra, mas do mundo.*”<sup>148</sup>

---

<sup>143</sup> A antropologia estuda agrupamentos humanos levando em consideração os diferentes aspectos biológicos, sociais e culturais que os caracterizam.

<sup>144</sup> Trata-se dos livros: 1. **A nova aliança**. Brasília: Editora da UnB, 1984. Original francês do mesmo ano; 2. **Entre o tempo e a eternidade**. São Paulo: Companhia das Letras, 1992. Original francês de 1988.

<sup>145</sup> Isabelle Stengers. **A invenção das ciências modernas**. São Paulo: Editora 34, 2002, p. 11. Original francês de 1993.

<sup>146</sup> Bruno Latour. **A esperança de Pandora. Ensaio sobre a realidade dos estudos científicos**. Bauru: EDUSC, 2001. Original de 1999.

<sup>147</sup> José Ferrater Mora, **op. cit.**, nota 37, p. 530-531.

<sup>148</sup> Como consta da apresentação na primeira orelha do livro de Stengers, **op. cit.**, nota 145.

Vou me alongar sobre outra vertente de análise muito importante que procura estabelecer uma ponte entre a epistemologia e o marxismo.<sup>149</sup> Embora considere idealista a filosofia bachelardiana, Dominique Lecourt, seguindo o exemplo de Marx que fez “uma leitura materialista dum filósofo idealista”, nesse caso Hegel, pretendeu também fazer “o mesmo tipo de leitura a propósito de Bachelard”.<sup>150</sup> Com esse procedimento ele pensou os “limites da epistemologia bachelardiana”, e os caminhos que permitam superá-la. Não pretendo expor detalhes dessa análise, mas apenas destacar algumas conclusões relevantes ao que me propus. Um dos aspectos ressaltados por Lecourt diz respeito ao princípio orientador do trabalho de Bachelard que se localiza

“(...) fora da filosofia nas perturbações que a história real das ciências conheceu no princípio deste século: desenvolvimento das geometrias não-euclidianas, teoria da relatividade, início da microfísica...”<sup>151</sup>

Não-euclidiano, não-newtoniano, não-lavoisieriano..., todas essas negativas de sistemas bem constituídos e fechados levaram Bachelard à “filosofia do não”. À não-contradição é oposta a contradição, ao princípio da continuidade (tão caro à filosofia das ciências tradicional) é oposto o princípio da ruptura. Discutimos um pouco disso na interpretação popperiana e kuhniana da transição da física newtoniana à física relativista de Einstein. Eis como se manifesta Bachelard sobre este tema:

“Mesmo sob aspecto simplesmente numérico, enganamo-nos, acreditamos, quando vemos no sistema newtoniano uma primeira aproximação do sistema einsteiniano, pois que as sutilezas relativistas não decorrem de uma aplicação aperfeiçoada dos princípios newtonianos. Não se pode, portanto, dizer corretamente que o mundo newtoniano prefigura em suas grandes linhas o mundo einsteiniano. É bem depois, quando nos instalamos de improviso no pensamento relativista, que reencontramos nos cálculos astronômicos da Relatividade – por mutilações e abandonos – os resultados numéricos fornecidos pela

---

<sup>149</sup> Dominique Lecourt. **Para uma crítica da epistemologia**. Lisboa: Ed. Assirio e Alvim, 1980, p. 7. Original francês de 1972. Este pesquisador realizou verdadeira exegese da obra de Bachelard, com uma interpretação crítica segundo as teses do materialismo dialético.

<sup>150</sup> Dominique Lecourt. **op. cit.**, nota 149, p. 20.

<sup>151</sup> Dominique Lecourt. **op. cit.**, nota 149, p. 21.

astronomia newtoniana. **Não há, portanto, transição entre o sistema de Newton e o sistema de Einstein.** Não se vai do primeiro ao segundo acumulando conhecimentos, redobrando os cuidados nas medidas, retificando ligeiramente os princípios. É preciso, ao contrário, um esforço de novidade total.”<sup>152</sup>

Esta longa citação de Bachelard é significativa por dois aspectos, que volto a repetir, a inevitabilidade da ruptura total e o fato de Bachelard ter escrito essa passagem três décadas antes de Kuhn. Irineu R. dos Santos, chama a atenção para a extrema semelhança entre os escritos de Kuhn e os de outros autores bem anteriores a ele, particularmente os de Wright Mills. Ele se pergunta por que a teoria do desenvolvimento científico de Kuhn causou tanta celeuma?

“Parte da explicação pode estar no fato de surgir ela num contexto intelectual profundamente marcado pelas idéias das versões modernas do positivismo.”<sup>153</sup>

Santos afirma que uma das consequências do predomínio da escola neopositivista na epistemologia anglo-americana é a

“(...) desconsideração generalizada pelas produções epistemológicas de outras escolas e tendências, sobretudo em relação às originadas na França.”<sup>154</sup>

Santos situa Popper como um arqui-inimigo da sociologia do conhecimento e, assim, a obra de Kuhn assumia contorno de ultraje; daí, provavelmente, a reação dos epistemólogos contra Kuhn, a pretexto de sua incontida “irracionalidade”, disfarçada na “incomensurabilidade” entre teorias. E, é claro, a presença da ênfase na contradição e não na continuidade; no papel preponderante desempenhado pela história “real” das ciências e não pela “reconstrução racional” dessa história.

Este procedimento que envolve o pensar científico repleto de rupturas, de vitórias contra obstinados obstáculos epistemológicos, valoriza, como já mencionei, o valor da história “real” das ciências.

---

<sup>152</sup> Gaston Bachelard, **op. cit.**, nota 97, p. 43-44 (grifos meus).

<sup>153</sup> Irineu Ribeiro dos Santos. **Os fundamentos sociais da ciência**. São Paulo: Polis, p. 71.

<sup>154</sup> Irineu Ribeiro dos Santos, **op. cit.**, nota 153, p. 81.

Desta forma, Lecourt considera que, da mesma forma como Alexandre Koyré em suas investigações sobre Galileu, por exemplo, a epistemologia bachelardiana dá muita atenção ao “erro”, ao “insucesso”, às “hesitações” e menos atenção à forma tradicional de referência à “verdade”. E mais ainda, essa filosofia não pode se prender à sua “adequação” à atividade científica “a posteriori”; ela tem implicações na própria organização futura do trabalho científico.<sup>155</sup> Aqui estaria uma referência clara à célebre frase de Marx nas “teses contra Feuerbach”:

“Os filósofos limitaram-se a interpretar o mundo de diversas maneiras, o que importa é transformá-lo.”<sup>156</sup>

Lecourt oferece um resumo de sua análise de Bachelard:

“A epistemologia histórica de Gaston Bachelard permanece uma não-filosofia **na** filosofia. O que é verdade é que, pelo seu respeito pelo materialismo dialético espontâneo<sup>157</sup> da prática científica, ela nos oferece elementos preciosos para uma teoria de filosofia e da sua história; e que, se se souber lê-la, ela nos revela, pela sua incoerência, as vias da sua passagem na construção duma teoria materialista da história das ciências.”<sup>158</sup>

Vimos acima como a epistemologia de Bachelard permite uma leitura através da ótica da dialética ou do materialismo dialético.

Alguns estudos mostram também uma confluência entre a concepção de desenvolvimento de Kuhn e o discurso dialético. Como exemplo deste modo de análise vou mencionar brevemente o papel da *Estrutura* de Kuhn em alguns estudos da antiga União Soviética. Acredito que tanto esta incursão como a anterior, referente a Bachelard, são relevantes pois problematizam as várias epistemologias existentes num quadro de análise mais dinâmico.

---

<sup>155</sup> Dominique Lecourt, **op. cit.**, nota 149, p. 24-25.

<sup>156</sup> Karl Marx. Teses sobre Feuerbach. In: **Textos filosóficos**. Lisboa: Editorial Estampa, 1975, p. 30. Original alemão de 1856.

<sup>157</sup> Lecourt afirma que este seria o resultado que advém de uma “crise” da ciência, quando os cientistas buscam reconstruir “de alto a baixo” o edifício de sua ciência. Nesses momentos históricos, no início da física contemporânea, por exemplo, surge a dialética espontânea da prática científica. Lecourt afirma que nesta conceituação encontram-se Lênin e Bachelard, até no nível do vocabulário, quando afirmam que o conhecimento é uma “produção histórica”. Dominique Lecourt, **op. cit.**, nota 149, p. 27-28.

<sup>158</sup> Dominique Lecourt, **op. cit.**, nota 149, p. 32.

O químico e filósofo soviético Nikolai Semionov, num artigo referente à gnoseologia dialético-materialista na investigação da natureza, descrevia o “pensamento criador” ou dialético com estas palavras (os parênteses com a nomenclatura kuhniana são meus):

“Como regra, os experimentos são feitos para pôr em claro umas e outras questões particulares da teoria dentro do quadro dos conceitos existentes. Semelhantes investigações são muito úteis para especificar e ampliar a teoria, para fixar as condições de seu emprego na prática. Porém não ultrapassam o marco dos conceitos existentes e não provocam mudanças revolucionárias na ciência. (**ciência normal**) O avanço considerável da ciência depende de descobrimentos que entram em contradição com o sistema de conceitos já existentes. (**descoberta e anomalia**) A solução destas contradições (**crise**) dá lugar ao surgimento de novas concepções que, às vezes, fazem época e realizam uma revolução em toda a ciência. (**revolução científica**).”<sup>159</sup>

Embora o autor não cite em parte alguma de seu artigo o nome de Kuhn ou de seu livro mais importante, é clara a inspiração original ou, pelo menos, a incrível coincidência de análise.<sup>160</sup>

Paul R. Josephson afirma que a sequência proposta por Kuhn se ajustava à explanação dialética de revoluções e que alguns pesquisadores soviéticos propunham que se melhorasse a teoria de Kuhn. Esses historiadores/filósofos soviéticos consideravam a *Estrutura* uma boa refutação das interpretações positivistas da ciência, como também das neopositivistas, que procuram estabelecer em seu programa uma linguagem neutra de observação e o falseacionismo como método de descoberta. Josephson considerava ainda que a boa recepção do livro de Kuhn, na antiga União Soviética, era devida

“(...) a sua proximidade com o pensamento marxista através de sua interpretação dialética da revolução científica.”<sup>161</sup>

---

<sup>159</sup> Nikolai Semionov. La dialectica marxista y la obra científica. In: Academia de Ciencias de la URSS. **La revolución tecnocientífica: aspectos y perspectivas sociales**. Moscou: Editorial Progreso, 1973, p. 35.

<sup>160</sup> *A Estrutura das revoluções científicas* de Kuhn foi traduzida e publicada na URSS, em 1975, com tradução de L. A. Marcova e S. R. Mikulinski, dois historiadores da ciência. No mesmo artigo de Semionov encontram-se ainda semelhanças com Feyerabend, Bachelard e até Popper.

<sup>161</sup> Paul R. Josephson. Soviet historians and The Structure of Scientific Revolutions. **ISIS**, v. 76, n. 552, 1985.

Segundo Josephson as principais críticas dos soviéticos ao livro de Kuhn eram:

- i. consideravam muito vago o conceito de paradigma;
- ii. Kuhn falhava em discutir as fontes do conhecimento;
- iii. o conceito de incomensurabilidade podia envolver aspectos não-rationais no progresso da ciência;
- iv. criticava-se um possível “anti-historicismo” pelo fato da verdade ser relativa a um dado paradigma;
- v. alguns críticos consideravam Kuhn um “internalista” que não levava em conta o contexto social da ciência.<sup>162</sup>

Como podemos notar das críticas dos soviéticos a Kuhn, elas não diferiam muito de qualidade das críticas de outros pesquisadores de outros países.

Para finalizar este capítulo apresento um breve balanço do que foi apresentado. O profissional em física precisa estar ciente de que o “método científico” não se resume àquele conjunto de regras bem estabelecidas, que existem diferentes concepções que buscam explicar o processo de desenvolvimento das teorias e que algumas dessas concepções são antagônicas entre si. Estas diferentes visões epistemológicas, bem como a “redescoberta” do discurso dialético, colaboram no sentido de oferecer uma base filosófica da chamada “cultura científica”, da recuperação da física como cultura.

Desta forma deve-se saber que o método indutivo tinha sua razão de ser à época em que foi proposto mas que, nem por isso, estava isento de críticas como as formuladas por David Hume.

A proposta de Karl Popper apresenta uma interessante crítica do método indutivo e solução do “problema de Hume”. A valorização do papel desempenhado pela hipótese, se bem que limitado pela oposição entre o contexto da descoberta e o contexto da justificação, avança numa direção positiva mas, ao mesmo tempo, mantém traços da direção positivista. Isto determina o distanciamento desse programa epistemológico da prática real das ciências.

Outras vertentes de epistemologia têm suas raízes na mudança, na ruptura, no corte epistemológico, na revolução científica, de um lado, e no forte embasamento na história das ciências, de outro. É o caso das obras Kuhn, de Feyerabend e de Bachelard. Embora a epistemologia de Kuhn defenda concepções presentes na obra de Bachelard, sua construção ao

---

<sup>162</sup> Paul R. Josephson, **op. cit.**, nota 161, p. 553-556.

longo da *Estrutura*, sua riqueza em exemplos históricos num estilo influenciado por Koyré, sua clareza de exposição e seu anti-positivismo claro e didático, tornam sua proposta epistemológica imprescindível na educação do professor de física, bem como do físico profissional. O trabalho de Kuhn é particularmente relevante pois, além da argumentação filosófico/epistemológica, penetra na área da sociologia do conhecimento, da psicologia e da história das ciências.

As perspectivas histórica e social são, justamente, os alicerces do pensamento de Fleck que, como vimos, dialoga com a epistemologia kuhniana. Fleck alinha-se a Kuhn, Bachelard e Feyerabend, por exemplo, na crítica ao positivismo e às epistemologias a-históricas. Embora fundada na história da medicina, sua sociologia do conhecimento possui um caráter bastante geral e transcende, inclusive, o terreno do próprio conhecimento científico, contribuindo a um entendimento das formações de pensamento e da circulação das ideias, seja na física ou em outras áreas.

A proposta epistemológica de Paul Feyerabend é das mais provocativas e altamente estimulante, se bem que, apesar de utilizar amplamente a história da ciência (quase limitada às contribuições de Galileu), tem uma base histórica fraca quando comparada às propostas de Kuhn e Bachelard. Porém, a argumentação (ou será, propaganda?) utilizada por Feyerabend para defender concepções como a atitude contra-indutiva, a desconfiança das primeiras experiências, a proliferação de teorias e a utilização da história da ciência, tornam a sua epistemologia obrigatória nas salas de aula de cursos de física.

Finalmente, a epistemologia de Bachelard traz algo de novo nesta tentativa de apresentação da física como cultura. Pode-se captar da leitura de sua obra epistemológica preocupações que ganham, no seu discurso, aspectos complementares: sua ênfase no desenvolvimento da cultura científica que é expressa, por exemplo, no papel desempenhado pela história recorrente que fornece uma característica dinâmica, onde a continuidade da ciência é abruptamente interrompida em cortes epistemológicos; o aspecto pedagógico pode ser apreendido na sua preocupação com os obstáculos epistemológicos; a aprendizagem da ciência deve estar preocupada com a “normalidade” envolvida na necessária especialização em determinados campos e no preparo, através de recorrência histórica, para suplantar tais obstáculos. Isto, pelo menos, na formação dos cientistas. Na educação geral também

encontraremos dificuldades similares a superar. Essa presença marcante da continuidade/ruptura<sup>163</sup> é que gera a prática dialética “espontânea” dos pesquisadores.

Estas epistemologias, tão fortemente lastreadas na história da ciência, permitiram-me enfocar o papel da dialética no desenvolvimento científico, recuperando o aspecto formativo que estava presente tanto em Hegel como em Marx.

---

<sup>163</sup> Semionov acrescenta que: “(...) para o conhecimento científico a confirmação das idéias já existentes não é tão importante como o surgimento de idéias que são contraditórias. Estas contradições servem de estímulo para o progresso da ciência. Para um sábio, o tropeço numa contradição grande ou pequena é um presente dos céus. Não se pode deixar que escape. E como é fácil deixá-la escapar, não percebê-la, sobretudo quando se tem pressa em publicar um artigo ou defender uma tese”. Nikolai Semionov, **op. cit.**, nota 159, p. 48.

**Uma discussão epistemológica: procure associar esses escritos de Einstein com epistemologias apresentadas nestas Notas de Aula.**

1. *“Antes de iniciar a crítica da mecânica como base fundamental da física, devo abordar algumas generalidades sobre o ponto de vista crítico que pode ser aplicado às teorias físicas. O primeiro é óbvio: a teoria não deve contradizer os fatos empíricos. Por mais evidente que seja essa exigência, sua aplicação é bastante complexa. Pois é possível, muitas vezes, talvez até sempre, conservar um fundamento teórico geral adaptando-o aos fatos, adicionando-se pressupostos artificiais. Entretanto, em qualquer caso, este primeiro ponto de vista refere-se à confirmação do fundamento teórico por meio dos fatos empíricos disponíveis.”* (A. Einstein. **Notas autobiográficas**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2.ed., 1982, p. 29-30).

2. *“A razão humana, eu o creio muito profundamente, parece obrigada a elaborar antes e espontaneamente formas cuja existência na natureza se aplicará a demonstrar em seguida. A obra genial de Kepler prova esta intuição de maneira particularmente convincente. Kepler dá testemunho de que o conhecimento não se inspira unicamente na simples experiência, mas fundamentalmente na analogia entre a concepção do homem e a observação que faz.”* (A. Einstein. Johannes Kepler. In: A. Einstein. **Como vejo o mundo**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 7.ed., 1981, p. 181).

3. *“A Física constitui um sistema lógico de pensamento que está em estado de evolução, e cuja base não pode ser obtida através da destilação por nenhum método indutivo a partir de experiências comprovadas, mas que somente pode ser alcançada pela invenção livre. A justificação (conteúdo de verdade) do sistema repousa na prova da utilidade dos teoremas resultantes na base das experiências sensoriais, onde as relações dessas últimas com os primeiros só podem ser compreendidas intuitivamente.”* (A. Einstein. *A Física e a Realidade*. In: A. Einstein. **Pensamento político e últimas conclusões**. São Paulo: Brasiliense, 1983, p. 87).

# **EVOLUÇÃO DOS CONCEITOS DA FÍSICA**

**- Notas de Aula -**

*(Versão revisada em 2019-2020)*

**2ª parte: Alguns tópicos de história da física**

**João Zanetic / IFUSP**

**(em colaboração com Erika Regina Mozena)**

## Índice

|                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 1: Uma breve discussão sobre o que pode ser história .....</b>                     | <b>112</b> |
| <b>Capítulo 2: A física clássica em busca da solução de uma “catástrofe” .....</b>             | <b>129</b> |
| <b>Anexo I – Derivação da lei de Kirchhoff .....</b>                                           | <b>168</b> |
| <b>Anexo II – O desenvolvimento de Boltzmann .....</b>                                         | <b>170</b> |
| <b>Capítulo 3: A radiação do corpo negro e o quantum de ação de Planck .....</b>               | <b>174</b> |
| <b>Anexo III – Estudo de um oscilador harmônico nas paredes de um corpo negro .....</b>        | <b>204</b> |
| <b>Anexo IV – Análise Combinatória .....</b>                                                   | <b>213</b> |
| <b>Capítulo 4: Dando um fecho nessa “história internalista” do surgimento do quantum .....</b> | <b>215</b> |
| <b>Capítulo 5: Uma verdadeira catástrofe nos manuais didáticos universitários .....</b>        | <b>230</b> |
| <b>Capítulo 6: A física como instituição social – uma história externalista .....</b>          | <b>238</b> |

## Capítulo 1

### Uma breve discussão sobre o que pode ser história

*“Só se pode entender a essência das coisas quando se conhecem sua origem e seu desenvolvimento.”*

Heráclito<sup>1</sup>

#### 1.1 Introdução

História ou histórias? História do Brasil ou histórias do Brasil? Durante as comemorações do quinto centenário da “descoberta” do Brasil, ocorridas há poucos anos, inúmeros livros sobre a história da viagem de Cabral e de seus desdobramentos, foram publicados no Brasil. Por quê? Porque, dependendo da concepção de mundo do historiador ou de sua formação profissional ou de sua posição política, diferentes tratamentos poderiam ser dados ao tema, por maior esforço de neutralidade investigativa que esse indivíduo praticasse. Dependendo ainda do enfoque adotado (o desenvolvimento do mercantilismo, as grandes navegações, o papel da ciência da época, a presença indígena, os temas culturais, o mundo novo e a velha civilização, Portugal e a colonização das terras tropicais, etc.) outros tantos livros poderiam ser escritos sobre o mesmo acontecimento. Essas diferentes leituras podem acabar se complementando dando uma visão mais adequada do tema em estudo.

Ocorrerá o mesmo com a história do desenvolvimento científico? Certamente que sim. Vale lembrar aqui uma advertência do historiador da ciência brasileiro Roberto de Andrade Martins:

“O que fazer, então? Estudar tudo sem idéias pré-concebidas? Isso é impossível. Ninguém pode apagar sua mente e começar a partir do zero. Mas um bom historiador da ciência se

---

<sup>1</sup> Heráclito (535-470 AC), filósofo grego do período jônico, conhecido como o filósofo da mudança, acreditava no contínuo fluir das coisas por um processo de tensão de forças opostas em constante busca de equilíbrio. Para ele o motor desta contínua transformação, ou o elemento básico do universo, seria o fogo. Alguns autores vêm em suas ideias relativas à interação e transformação dos opostos o nascimento do pensamento dialético.

treina para perceber seus próprios preconceitos e expectativas, de tal modo que essas idéias não o tornem cego.”<sup>2</sup>

Este texto foi escrito com a finalidade de ser uma breve introdução sobre a história da física para estudantes de física dos cursos de bacharelado e licenciatura do Instituto de Física da USP. Os autores deste texto não são historiadores da ciência, mas pesquisadores em ensino de física que creem que a história e a filosofia da ciência constituem dois referenciais essenciais para esse ensino, tanto na formação de físicos quanto na formação de professores de física.

Um historiador ou historiadora da ciência que trabalhe academicamente com sua área do conhecimento pode ter uma concepção histórica que difira da que elegemos como orientadora deste texto e das reflexões sobre os temas que serão abordados mais adiante. Portanto, o que será tratado nestas aulas e neste texto sobre história da ciência não substitui de forma alguma as disciplinas/textos sobre história da ciência ministradas/escritos por historiadores com ou sem formação específica em física.

Mesmo a utilização da história da ciência no ensino da ciência é algo polêmico. Há cientistas que defendem e outros que atacam a introdução de temas da história da ciência no seu ensino. Como exemplo de um ilustre cientista que sempre defendeu o papel desempenhado pela história da ciência na formação de jovens estudantes de qualquer idade, menciono o depoimento do físico brasileiro Mário Schenberg (1914-1990). A citação seguinte é um exemplo de sua ênfase da importância da história da ciência:

“A História da Ciência é mais fascinante que um romance policial. (...)

O estudo da História da Ciência é muito importante, sobretudo para os jovens. Acho que os jovens deveriam ler História da Ciência porque freqüentemente o ensino universitário é extremamente dogmático, não mostrando como ela nasceu. Por exemplo, um estudante pode facilmente imaginar que o conceito de massa seja simples e intuitivo, o que não corresponde à verdade histórica.”<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Roberto de Andrade Martins. Como não escrever sobre história da física - um manifesto historiográfico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 1, p. 126, março/2001.

<sup>3</sup> Mário Schenberg. **Pensando a física**. São Paulo: Brasiliense, 1984, p. 30.

A história da física teve seu crescimento acentuado no final do século XIX. Como que antecipando as grandes mudanças que ocorreriam no início do século seguinte e que provocariam o surgimento de teorias que elucidavam problemas que se mostravam insolúveis na física clássica, alguns historiadores da física, que viveram esse momento de transição, pareciam desejosos de preservar uma memória mais significativa das intrincadas trilhas que levaram ao enorme desenvolvimento ocorrido na física a partir do século XVII. Para exemplificar tal procedimento, basta aqui lembrar os trabalhos históricos de Pierre Duhem (1861-1916) e o resgate por ele efetuado das contribuições dos físicos medievais para a construção da mecânica.<sup>4</sup> Não podemos deixar de mencionar também o importante trabalho histórico de Ernst Mach (1838-1916), particularmente sua intrigante análise crítica do conceito de massa e o detalhado exame dos conceitos newtonianos de espaço e tempo absolutos.<sup>5</sup> Esse estudo crítico da física de Newton foi marcante para muitos cientistas que viveram aquela transição, em particular para os trabalhos iniciais de Albert Einstein (1879-1955) ao elaborar a sua teoria da relatividade.

Mas foi principalmente no decorrer do século XX que esses estudos acabaram dando origem a uma área de conhecimento específica: a história da ciência, com seus diferentes enfoques, metodologias e objetos de estudo. A história da física, em particular, conheceu um grande crescimento nas últimas décadas.<sup>6</sup>

Ana Maria Alfonso-Goldfarb, historiadora da ciência brasileira, é autora de um livro em que expõe suas ideias sobre o que é história da ciência. Nesse livro ela apresenta uma história da história da ciência acompanhando seu desenvolvimento lado a lado com o desenvolvimento

---

<sup>4</sup> Pierre Duhem. *Salvar os fenômenos: ensaio sobre a noção de teoria física de Platão a Galileu*. Trad. Roberto A. Martins. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**. Campinas, Supl. 3, p. 1-105, 1984.

<sup>5</sup> Ernst Mach. **The science of mechanics: a critical and historical account of its development**. Illinois: The Open Court Publ. Co., 1960. Original alemão de 1883.

<sup>6</sup> Numa “resource letter” (artigo que apresenta um quadro do estado de determinado campo acompanhado de listas de leituras, desde introdutórias até avançadas) sobre a história da física, Stephen G. Brush, apenas para dar um exemplo, informa que o número de trabalhos publicados nos anos recentes, sobre a física de 1800 a 1914, é várias vezes superior ao número de físicos daquele período. Para uma estimativa do público interessado em literatura especializada sobre história da física, nos Estados Unidos, ele oferece dois exemplos: o livro de A. Pais (“**Sutil é o Senhor**”: **a Ciência e a Vida de Albert Einstein**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995), publicado em 1982, vendeu 60.000 exemplares nos três primeiros anos de vendas; por outro lado, **A Estrutura das Revoluções Científicas**, de Thomas Kuhn, nos 12 anos seguintes à sua publicação atingiu a marca de 250.000 exemplares vendidos.

Stephen G. Brush. Resource letter HP-1: History of Physics. **Am. J. Phys.**, v. 55, n. 8, p. 683-691, agosto/1987.

da própria ciência. Ela narra a evolução da história da ciência desde seu início como uma *imagem no espelho da própria ciência*, até sua construção crítica transformando-se num *espaço independente de reflexão sobre a ciência*. Portanto, ela concordaria com Georges Canguilhem que afirmara que o objeto da história da ciência não coincide inteiramente com o objeto da ciência. Fechamos esta introdução com a seguinte reflexão de Ana Maria Alfonso-Goldfarb:

“Embora envolva muitos problemas, gostaria que ficasse a imagem de uma História da Ciência complexa mas interessantíssima. Interessante porque recuperou conhecimentos sobre a natureza que pareciam errados pelos critérios científicos; porque recuperou outras formas de ciência que a Ciência Moderna apagara; porque recuperou para a Ciência seu papel de conhecimento produzido pela cultura humana. Um conhecimento especial, sim, mas que, como outros conhecimentos, foi construído e inventado pelo ser humano e, portanto, cheio de idas e voltas. E daí será preciso apagar aquela imagem da Ciência como um processo de grandes descobertas de grandes gênios que pairam acima da capacidade dos pobres mortais.”<sup>7</sup>

## 1.2 “Internalismo” versus “externalismo”

Foi comum durante algum tempo a divisão desses estudos históricos em duas grandes áreas temáticas correspondentes a análises ditas “internalistas” e “externalistas”. As primeiras abordariam a ciência de um ponto de vista exclusivamente epistemológico, comparando as teorias entre si, explorando sua consistência interna, desvendando a lógica da descoberta, interpretando o papel desempenhado pelos grandes nomes da ciência durante os episódios revolucionários em que estavam envolvidos. Por outro lado, as análises externalistas estudariam o desenvolvimento da ciência tentando desvendar as influências sociais sobre ela, isto é, como as necessidades sociais de diferentes épocas poderiam afetar a temática e, eventualmente, o conteúdo das teorias científicas que dominavam a cena nesses diferentes períodos históricos.

Segundo essa distinção o desenvolvimento estritamente conceitual das leis de Newton, do princípio da conservação de energia, da experiência de Millikan, entre outros, seriam exemplos de aspectos internos. Thomas Kuhn sugeria outros exemplos menos óbvios que estes

---

<sup>7</sup> Ana Maria Alfonso-Goldfarb. *O que é história da ciência*. São Paulo: Brasiliense (Coleção primeiros passos; 286), 1994, p. 13-14.

como, por exemplo, a idiossincrasia pessoal na escolha de uma teoria e os erros de avaliação teórica (eventualmente corrigidos por uma geração posterior de cientistas).<sup>8</sup> Como aspectos externos podemos nomear fatores econômicos, religiosos, educacionais, culturais e outros, devidos ao desenvolvimento tecnológico, necessidades militares etc. É claro que os temas mencionados no início deste parágrafo também podem ser analisados à luz desses aspectos externos.

O filósofo da ciência Imre Lakatos (1922-1974), influenciado pela epistemologia popperiana, utilizava concepções diferentes de história interna e externa, como teremos oportunidade de mencionar e criticar mais adiante, quando abordaremos a questão da reconstrução racional.

Apesar dessa divisão entre essas duas formas de procedimento histórico ser por demais simplificadora e não ter atualmente o mesmo impacto que tinha há cerca de um quarto de século, a maioria dos artigos sobre história da ciência ainda se situa em uma ou outra dessas duas categorias. Um editor da revista *ISIS*<sup>9</sup> afirmava que a partir da década de oitenta o cenário tem sido dominado por posições mais ecléticas.

“O problema não é o contexto oposto à cognição, mas entender a estrutura de sua integração.”<sup>10</sup>

Essa divisão não abrange outras formas de fazer ou de apresentar a história da física, principalmente quando estamos nos referindo a textos didáticos utilizados nas disciplinas dos cursos superiores ou dos destinados ao ensino médio. Nesses textos, quando estão presentes capítulos, apêndices ou notas históricas, temos quase sempre arremedos de história da ciência: são aquelas sequências cronológicas de datas de grandes invenções, de descobertas sensacionais ou de nascimento e morte das principais personagens envolvidas nesses acontecimentos, acompanhadas de ilustrações que representam essas personagens ou seus feitos.

---

<sup>8</sup> Thomas S. Kuhn. Notas sobre Lakatos. In: Imre Lakatos. **Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales**. Madrid: Editorial Tecnos, 1987, p. 86. Original inglês de 1971.

<sup>9</sup> A revista *ISIS*, criada pelo matemático e historiador da ciência belga George Sarton (1884-1956), em 1912, foi uma das primeiras publicações voltadas para a história da ciência e da tecnologia e é hoje uma das referências desse campo de atividades.

<sup>10</sup> Charles Rosenberg. Woods and trees? Ideas and actors in the history of science. *ISIS*, v. 79, p. 565, 1988.

### 1.3 Uma visão positivista de história?

Essa espécie de história factual e cronológica dominou até recentemente mesmo a apresentação da história geral, como também a própria pesquisa em história se resumia na mera composição de átomos elementares e impessoais de acontecimentos em sucessão. É o que o historiador inglês Edward Hallet Carr (1892-1992) denominava visão “senso comum” da história que estaria disponível para os historiadores *nos documentos, nas inscrições, e assim por diante, como os peixes na tábua do peixeiro*<sup>11</sup>, bastando que eles os recolham, registrem, sistematizem dados correlatos e os divulguem. Segundo Carr, essa é a visão de história construída pelos historiadores positivistas, transferindo para a história um método vitorioso na ciência.

“Os positivistas, ansiosos por sustentar sua afirmação da história como uma ciência, contribuíram com o peso de sua influência para este culto dos fatos. Primeiro verifique os fatos, diziam os positivistas, depois tire suas conclusões. (...) A teoria empírica do conhecimento pressupõe uma separação completa entre sujeito e objeto. (...) A convicção num núcleo sólido de fatos históricos que existem objetiva e independentemente da interpretação do historiador é uma falácia absurda, mas que é muito difícil de erradicar.”<sup>12</sup>

Vemos assim como a visão indutivista ou positivista ingênua dominava fortemente a cena histórica assim como dominava a cena científica. Imre Lakatos também critica a história da ciência indutivista pois ela reconheceria apenas *duas classes de descobertas genuínas: as firmes proposições fatuais e as generalizações indutivas*.

Era a crença de que os dados da realidade organizados adequadamente forneceriam a verdade da natureza ou do fenômeno científico, no seu sentido mais amplo. Tudo isso traz à lembrança aqueles passos do método indutivo prescrito por Francis Bacon, como estudamos na 1ª parte destas *Notas de Aula*.

---

<sup>11</sup> Edward H. Carr. **Que é história?** Trad. Lúcia M. de Alverga. São Paulo: Paz e Terra, 1985, p. 13. Original inglês de 1961.

<sup>12</sup> Edward H. Carr, **op. cit.**, nota 11, p. 13 e 15.

Ao contrário dessa concepção, seguindo o pensamento de Carr, só teria sentido falar que a história consiste em ver o passado com os olhos do presente, com seus problemas, com a mentalidade que forja o historiador; é esse historiador que vai avaliar os dados e as informações que lhe são fornecidas não apenas pelos dados brutos como também por outros historiadores através de suas descrições factuais (no sentido que isso seja possível) e através análises “contemporâneas”<sup>13</sup>. Carr sintetiza essa situação com as seguintes palavras:

“A função do historiador não é amar o passado ou emancipar-se do passado, mas dominá-lo e entendê-lo como a chave para a compreensão do presente.”<sup>14</sup>

Portanto, a concepção de história defendida por esse historiador inglês está muito distante dessa história cronológica, “fatual”, anedótica, “neutra”, com a qual a maioria de nós se deparou nos bancos escolares. Nada mais natural, então, que a mesma forma de história da ciência domine o cenário quando comparece nos livros didáticos.

#### 1.4 Uma história “subversiva”?

Num interessante artigo intitulado **Should the History of Science be rated X?**, que poderia ser traduzido por “A história da ciência deveria ser proibida para menores de idade?”, o físico e historiador da física Stephen G. Brush discute, baseado em vários exemplares históricos, o papel da moderna história da ciência na educação. Logo no início do artigo ele situa sua preocupação central:

“Meu interesse neste artigo está relacionado com os possíveis perigos de utilização da história da ciência na educação científica. Vou examinar argumentos de que estudantes jovens e impressionáveis no início de suas carreiras científicas deveriam ser protegidos dos escritos de historiadores da ciência contemporâneos (...) tais textos violentam o ideal profissional e a imagem pública dos cientistas, como investigadores de mente aberta e racionais, que trabalham metodicamente guiados seguramente pelo resultado de

<sup>13</sup> É importante frisar que não se trata de *anacronismo*, mas de um olhar crítico da história.

<sup>14</sup> Edward H. Carr, **op. cit.**, nota 11, p. 25.

experimentos controlados e procurando objetivamente pela verdade, seja lá isso o que for.”<sup>15</sup>

Brush afirma que está havendo um crescente interesse pela história da física, mas ao mesmo tempo há certas reservas como as indicadas pela citação acima. Se um professor estiver interessado em preparar estudantes que irão seguir a carreira acadêmica e terão que publicar artigos num breve intervalo de tempo, seria “mais seguro” para ele evitar a história. Ele diz que há aspectos subversivos na história da ciência. Por exemplo, discute a reorientação sofrida pela história da ciência na década de trinta, após a publicação dos **Estudos Galilaicos**, de Alexandre Koyré (1892-1964). Essa obra apresentava uma nova imagem de um Galileu muito pouco experimental, ao contrário da imagem de “pai da física experimental” normalmente associada ao nome do físico italiano. É claro que essa posição de Koyré é bastante polêmica e vários historiadores de renome, como por exemplo Stillman Drake (1910-1993), discordavam categoricamente desta imagem de Galileu pintada pelo historiador franco-russo. Esse debate serve para exemplificar o que dissemos mais acima sobre as diferentes histórias da física que refletem diversos posicionamentos filosóficos dos historiadores envolvidos.<sup>16</sup> Brush alonga-se

<sup>15</sup> Stephen G. Brush. Should the History of Science be Rated X? **Science**, v. 183, p. 1164, march/1974. O “X” do título deste artigo é explicado pelo próprio autor como referindo-se à campanha eleitoral à presidência dos Estados Unidos no ano anterior (1973), quando um editorial do Washington Post sugeriu que as reportagens públicas da campanha eleitoral fossem submetidas à censura para crianças (daí a marca X tradicional nos Estados Unidos na programação de filmes, por exemplo) por “serem danosas aos ideais dos jovens leitores”.

<sup>16</sup> Num artigo em que trata dos trabalhos de Galileu, relativos à lei da queda dos graves e à trajetória parabólica dos projéteis lançados horizontalmente, S. Drake argumentava que, apesar do fato de Galileu não falar sobre suas experiências em suas obras, para ele é claro que Galileu realizou acuradas medidas. Ele criticava Koyré por afirmar que a maioria dos experimentos de Galileu eram fictícios. (Stillman Drake. Galileo's physical measurements. **Am. J. Phys.**, v. 54, n. 4, p. 302-306, abril/1986).

Por outro lado, Koyré afirmara o seguinte sobre Galileu:

*“Um plano absolutamente liso, uma esfera absolutamente esférica, ambos absolutamente duros: são coisas que não se encontram na realidade física. Não são conceitos que se tirem da experiência; são conceitos que se lhe supõem. (...)”*

*As ‘experiência’ de que Galileu se vale - ou de que se valerá mais tarde -, mesmo as que ele realmente executa, não são, e nunca serão, mais do que experiências de pensamento.”*

Alexandre Koyré. **Estudos Galilaicos**. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1986, p. 98-99. Original francês de 1939.

Num trabalho escrito quase duas décadas após a publicação dos **Estudos Galilaicos**, a convicção de Koyré continuava a mesma como demonstra esta citação:

*“... a maneira pela qual Galileu concebe um método científico correto implica um predomínio da razão sobre a simples experiência... (...)”*

*... (Galileu) deve sua fama de experimentador aos esforços infatigáveis dos historiadores positivistas...”*

neste tema oferecendo vários exemplos da física clássica e da física contemporânea. Após essa discussão, ele chega à seguinte posição, que é relevante à linha de discussão que estamos desenvolvendo neste texto:

“A conclusão que eu tiraria destes exemplos não é que as experiências não sejam importantes na escolha entre teorias, mas que é dada menos relevância ao teste experimental da hipótese que sua conformidade com sua superestrutura teórica geral ou com teorias mais prestigiosas de ramos afins da ciência.”<sup>17</sup>

Ou seja, a sua conclusão joga um pouco mais no time dos historiadores que seguem a linha Koyreana. São necessários maiores estudos sobre essa polêmica que é de fundamental importância para a utilização da história. Ainda nessa linha o artigo de Brush aborda a “objetividade”, um ideal indissociável da investigação científica para a maioria dos filósofos e historiadores da ciência. E neste ponto Brush toca na discussão que envolve a “reconstrução”.

Ele afirma que o professor poderá ficar numa encruzilhada, como a que pode ser encontrada na discussão de uma citação de Dirac presente no volume 1, **Mecânica**, do Curso de Berkeley.

---

Alexandre Koyré. Los orígenes de la ciencia moderna. In: Alexandre Koyré, **Estudios de historia del pensamiento científico**. México: Siglo Veintiuno, 1978, p. 71-72). Existe versão mais recente em português.

Essa é uma polêmica que certamente ainda vai prosseguir por muito tempo e que mostra bem a importância da história epistemológica que não se limita à mera crônica dos acontecimentos científicos. Foi exatamente uma crônica de acontecimentos, escrita logo após a morte de Galileu (1642), que deu início à “lenda” ou verdade sobre os trabalhos de Galileu. Vincenzo Viviani (1622-1703) foi amanuense de Galileu nos seus últimos anos de vida. A pedido de um dos príncipes de Toscana, escreveu um relato da vida e obra de Galileu. **O Racconto istorico della vita del Sign. Galileo Galilei**, publicado em 1717, enfatizou o caráter empiricista dos trabalhos de Galileu, sendo o primeiro escrito a relatar que Galileu teria descoberto o princípio do pêndulo pela observação da oscilação de um lustre da Catedral de Pisa, e também o primeiro a afirmar que ele rejeitara a lei de queda de Aristóteles após sua experiência de queda de graves a partir do alto da Torre de Pisa.

S. Drake se alinha entre aqueles historiadores que aceitam o “racconto” de Viviani, enquanto A. Koyré dizia que se tratava apenas de uma lenda.

Michael Segre, numa resenha do livro de Viviani, assim conclui seu artigo:

*“Ao invés de perguntar ‘quais das experiências descritas por Viviani, ou pelo próprio Galileu, foram por ele realizadas?’, dever-se-ia perguntar ‘por que Viviani (e Galileu) pensavam que era importante relatar tais experimentos?’. A resposta a esta questão pode mudar a discussão para um nível mais histórico que filosófico.”*

Michael Segre. Viviani’s life of Galileo. **ISIS**, v. 80, p. 207-231, 1989.

<sup>17</sup> Stephen G. Brush, **op. cit.**, nota 15, p. 1169.

“Parece que se alguém está trabalhando a partir do ponto de vista de obtenção de beleza em suas equações, e se esse alguém tem realmente um ‘insight’ seguro, ele está com certeza na linha do progresso. Se não há um completo acordo entre seus resultados e a experiência, não deve desesperar pois a discrepância bem pode ser devida a características menores que não foram levadas em consideração de forma adequada e que desaparecerão com ulteriores desenvolvimentos da teoria.”<sup>18</sup>

Porém, como afirma Brush, o texto de Berkeley prossegue recomendando que os estudantes não sigam ao pé da letra essa recomendação de Dirac, pois apenas as *melhores cabeças do tempo, como Einstein ou Dirac*, podem trabalhar adequadamente as sutilezas do “*mundo real*”. Isto é, diz o articulista, o estudante é “encorajado” a assumir que *ele não será um Einstein ou um Dirac*. Será que existiriam duas espécies de estudantes e, portanto, duas espécies de cientistas? O cientista médio do futuro seria o estudante médio de hoje que poderia ficar “impressionado” com os rigores dessa história da sua futura profissão, e assim ver perturbada sua crença na objetividade, do papel crucial da experimentação como porto seguro da melhor teoria e do *publish or perish* que é a espada de Damocles permanentemente presente sobre a cabeça dos pesquisadores. Exagero? Nem tanto, como bem sabe quem vivencia o cotidiano dos maiores centros de pesquisa do mundo. Assim, essa reação à história da ciência, dita “subversiva” por Brush, encontra respaldo tanto institucional como também “inconsciente”, constituindo algo semelhante ao que o filósofo Gaston Bachelard (1884-1962) denominava “obstáculo epistemológico”.

Julgamos interessante citar ainda algumas reflexões finais desse artigo de S. G. Brush:

“Eu sugiro que o professor, que deseja doutrinar seus estudantes no papel tradicional do cientista como um investigador neutro, não deveria usar os materiais históricos da espécie que está sendo preparada agora pelos historiadores da ciência: eles não servirão a seus propósitos. (...) Por outro lado, aqueles professores, que desejam neutralizar o dogmatismo dos textos didáticos e transmitir algum entendimento da ciência como uma atividade que

---

<sup>18</sup> Paul A. M. Dirac. *Sci. Am.*, v. 208, n. 45, may 1963. Está republicada no volume 1, Mecânica, do Curso de Física de Berkeley. Citado por Brush, *op. cit.*, nota 15, p. 1170.

não pode estar divorciada de considerações metafísicas ou estéticas, podem encontrar algum estímulo na nova história da ciência.”<sup>19</sup>

Portanto, cabe a cada um de nós, futuros ou atuais pesquisadores e/ou professores de física, decidir que caminho seguir, seja na investigação seja nas salas de aula.

### 1.5 “Reconstrução racional” ou “recorrência histórica”?

A recomendação da “reconstrução racional” do desenvolvimento científico está presente nos escritos de uma série de filósofos e historiadores da ciência que procuram levar avante o ideal contido na primeira parte da citação acima.

Algo similar a essa reconstrução é destacado por outros autores sob outros nomes. O historiador da ciência Martin J. Klein (1924-2009) utiliza o termo “pseudo-história” que seria um procedimento que levaria à escolha de exemplos, conceitos e situações que têm uma importância para a física dominante da atualidade. Isso nos induziria a escrever a história de trás para frente, garantindo a construção lógica mesmo que ao preço de não respeitar a cronologia dos acontecimentos.<sup>20</sup>

Por outro lado, fala-se também de “quase-história” que seria uma história que sustentaria os fatos num referencial que os faz ter sentido. M. A. B. Whitaker fornece uma série de exemplos de “quase-história” da física contemporânea presente nos livros didáticos de nível universitário. Este autor menciona também o fato de que este tipo de história elimina a dimensão social do desenvolvimento científico.<sup>21</sup>

Comparando-se esta discussão sobre os vários tipos de reconstrução racional da história com a função do historiador mencionada há pouco, faz-se necessária uma observação importante. Enquanto a reconstrução quer, a meu ver, justificar a visão de mundo fornecida pela física contemporânea olhando para uma linha comprobatória que vai dessa visão e retrocede até

---

<sup>19</sup> Stephen G. Brush, *op. cit.*, nota 15, p. 1170-1171.

<sup>20</sup> Martin J. Klein. History in the teaching of Physics. In: S. G. Brush and A. L. King (Eds.) **Proc. Int. Working Seminar on the Role of History of Physics in Physics Teaching**. Univ. Press of New England, 1972, p. 21.

<sup>21</sup> M. A. B. Whitaker. History and quasi-history in physics education - part 1. **Phys. Educ.**, v. 14, p. 108-112, 1979. Idem - part. 2. **Phys. Educ.**, v. 14, p. 239-242, 1979.

Voltaremos a tratar desses dois artigos no capítulo 5, após termos abordado os trabalhos de Planck, a radiação do corpo negro e o surgimento da física quântica nos capítulos 2, 3 e 4.

os mais antigos “defensores primitivos e/ou ingênuos” (isto é, a história da ciência só seria importante enquanto confirmação do presente), a função para a história dada por Carr é completamente distinta. O papel da história seria o de permitir uma compreensão mais rica tanto do passado como, e principalmente, do presente. Ou, com as palavras de Carr:

“O passado é inteligível para nós somente à luz do presente; só podemos compreender completamente o presente à luz do passado. Capacitar o homem a entender a sociedade do passado e aumentar o seu domínio sobre a sociedade do presente é a dupla função da história.”<sup>22</sup>

Creemos que essa afirmação de Carr aplica-se também para o caso da história da física. É para a moderna história da ciência, para a qual Brush utiliza a qualificação de “subversiva”, que temos de nos referir como um exemplo dessa função da história presente em Carr. E aqui eu me refiro não somente à tendência internalista, que é a visada no artigo de Brush, como também à tendência externalista. Ou seja, o referencial social no qual determinado desenvolvimento científico foi produzido e o referencial epistemológico respectivo, devem favorecer a compreensão e o domínio sobre as teorias aceitas como válidas atualmente, bem como a compreensão das teorias do passado.

Neste ponto cabe falar do conceito de “*história recorrente*” presente em Gaston Bachelard, que guarda estreita similaridade com o “*uso recorrente da história da ciência*”, afirmado por Paul Feyerabend (1924-1994). A argumentação em favor da história da ciência desses dois epistemólogos guarda certa analogia também com a interpretação que Thomas Kuhn (1922-1997) oferece para não aceitar que a mecânica Newtoniana seja um caso particular da relatividade de Einstein, como já mencionamos na primeira parte destes textos. Para exemplificar esse posicionamento, eis uma breve citação de Bachelard sobre o assunto:

“Vê-se, então, a necessidade educativa de formular uma história recorrente, uma história que esclareça pela finalidade do presente, uma história que parta das certezas do presente e descubra, no passado, as formações progressivas da verdade. Assim, o pensamento científico se afirma no relato de seu progresso. Essa história recorrente aparece nos livros

---

<sup>22</sup> Edward. H. Carr, **op. cit.**, nota 11, p. 49.

de ciência atuais sob a forma de preâmbulo histórico. Mas não raro ela é abreviada. Ela esquece muitos intermediários. Ela não prepara suficientemente a formação pedagógica dos diferentes limiares de cultura.”<sup>23</sup>

É a partir desse tipo de análise que Bachelard atribui grande importância à história da ciência. E sua concepção de história da ciência envolve o conceito de *recorrência histórica*. A história da ciência seria recorrente na medida em que se esclarece pela finalidade do presente, isto é, percorrendo o passado da ciência tendo já percorrido o seu presente. Construindo um encadeamento entre as sucessivas ideias científicas, numa interação dialética, que vai compor uma estrutura ordenada e racional, plena de objetividade. Numa afirmação muito próxima à de Carr, já mencionada, vamos ver Bachelard dizendo que o

“(...) historiador da ciência só pode julgar o passado se conhece o presente. (...)

É o presente que ilumina o passado e lhe dá sentido, permitindo-lhe reviver.”<sup>24</sup>

Assim como E. H. Carr critica a concepção de história geral reconstruída para acomodar fatos do passado com fatos do presente, assim também o uso da história da ciência preconizada por Bachelard, Kuhn e Feyerabend não se acomoda a uma concepção que envolva a “reconstrução racional”. Bachelard entendia que a visão de mundo fornecida pelas teorias contemporâneas da física oferecia um novo referencial a partir do qual as teorias clássicas ou ainda as ideias mais antigas poderiam ser avaliadas no momento de sua criação, porém levando em consideração as peculiaridades epistemológicas então vigentes. Da mesma forma pode-se afirmar que, segundo a visão de Bachelard, as teorias físicas do presente de modo algum podem ficar limitadas a receber seu sentido e explicação a partir das teorias do passado. É, de novo, um processo dinâmico de duas mãos: uma que vem do passado ao presente, outra que vai do presente ao passado.

---

<sup>23</sup> Gaston Bachelard. **Epistemologia**. Trechos escolhidos por Dominique Lecourt. Trad. de Nathanael C. Caixeiro. Rio de Janeiro: Zahar, 1977, p. 184. Original francês de 1971.

<sup>24</sup> Gaston Bachelard. Citado em: Elyana Barbosa. **O segredo do mundo (uma leitura de Gaston Bachelard)**. Tese de doutoramento, FFLCH/USP, 1985, p. 112.

A releitura dos trabalhos de Newton realizada no século XIX não é igual à sua leitura no início do século XVIII. O contexto é outro, é outra a epistemologia. Isto é coerente com a seguinte conclusão de Mário Schenberg:

“A História da Ciência mostra assim que idéias aparentemente incorretas são posteriormente válidas e que haviam correspondido a intuições profundas.

Vemos então que a evolução dos conceitos da Física é algo paradoxal e extremamente interessante porque não é processo retilíneo, mas um verdadeiro ziguezague. Contudo, a ciência vai progredindo, cada vez descobrindo novas verdades. Mesmo quando se volta para uma idéia que já existia antes, não se volta do mesmo modo com que ela havia sido formulada anteriormente.”<sup>25</sup>

Fica assim estabelecida uma crítica aos que entendem a história da ciência como uma sucessão progressiva em desenvolvimento, um mero acúmulo linear de fatos, descobertas, invenções, dando a impressão de uma sequência de herdeiros fiéis aos seus ancestrais. Elyana Barbosa sintetiza a concepção de história da ciência de Bachelard com as seguintes palavras:

“A concepção de Bachelard de recorrência histórica mostra que se a história da ciência pode apontar, muitas vezes, uma certa continuidade nos problemas investigados é porque os continuistas da cultura fazem um relato contínuo dos acontecimentos, acreditando reviver os acontecimentos na continuidade do tempo e desta maneira toda história parece ter a unidade e a continuidade de um livro.”<sup>26</sup>

Queremos deixar claro que, se por um lado a recorrência histórica de Bachelard não pode ser confundida com a reconstrução racional<sup>27</sup>, por outro lado, ela não pode ser traduzida como

---

<sup>25</sup> Mário Schenberg, **op. cit.**, nota 3, p. 52.

<sup>26</sup> Elyana Barbosa, **op. cit.**, nota 24, p. 115.

<sup>27</sup> A ênfase dada à experiência de Michelson-Morley (chamada de “experimento crucial” por Popper) na construção da relatividade de Einstein, ou a apresentação da fórmula de radiação de Planck são dois exemplos dessa “reconstrução”. O próprio Lakatos, na sua defesa da reconstrução racional, assim comenta o “programa de Bohr”: “Bohr, em 1913, não podia ter pensado ainda na possibilidade do spin do elétron. Tinha mais que suficiente com que ocupar-se sem contar o spin. Entretanto, o historiador, ao descrever posteriormente o programa bohriano, incluirá dito spin do elétron, pois este encaixa-se de modo natural na descrição original do programa. Bohr poderia ter-se referido a ele em 1913. Porque não o fez, é um interessante problema que merece ser indicado numa nota de rodapé.” (In: Imre Lakatos, **op. cit.**, nota 8, p. 40).

sendo a busca dos precursores, tão normal de acontecer na historiografia tradicional. É inevitável que, vitoriosa uma determinada explicação do mundo, procuremos no passado seus antecessores e os interpretemos à luz dessa explicação. Porém, é necessário enquadrá-los no seu contexto histórico e epistemológico. Bachelard entendia sua recorrência histórica não como uma reconstrução, mas como um rever, isto é, estudar o passado tendo o presente já estudado, procurando respeitar as respectivas visões epistemológicas. Sobre este tema e, ao mesmo tempo, exemplificando um aspecto cultural muito mais amplo, vale a pena reproduzir o pensamento de Jorge Luis Borges:

“O escritor argentino Jorge Luis Borges, num de seus escritos, afirma que em cada período histórico um autor inventa os seus predecessores. Pode-se dizer que com a publicação dos “Principia” de Isaac Newton, há exatamente trezentos anos, ou melhor ainda, com a aceitação da mecânica newtoniana, a partir do século XVIII, inicia-se uma espécie de “arqueologia” do pensamento pré-newtoniano buscando descobrir raízes, as fontes de inspiração, os personagens, os acontecimentos históricos, enfim, todo o clima que permitiu o nascimento da mecânica moderna.”<sup>28</sup>

No final do século XIX, equivocaram-se também aqueles que afirmavam que a física estaria acabando, pois para completar o edifício da física clássica aparentemente bastava esclarecer alguns pequenos problemas como, o efeito fotoelétrico, a medida da velocidade da Terra com relação ao éter, a radiação do corpo negro, entre outros. Cabe aqui uma breve citação de David Bohm (1917-1994) sobre esse assunto:

“(…) Lord Kelvin, um dos físicos de renome da época, expressou a opinião de que o esboço geral básico das teorias físicas estava muito bem estabelecido e que restavam somente “duas pequenas nuvens” no horizonte, a saber, os resultados negativos da experiência de Michelson-Morley e a falha da lei de Rayleigh-Jeans em predizer a distribuição da energia radiante num corpo negro. Deve-se admitir que Lord Kelvin soube escolher bem suas

---

Ou seja, isto teria assim ocorrido caso Bohr tivesse pensado racionalmente em 1913. Porém, eis o que diz Kuhn (que estudou amplamente a gênese do átomo de Bohr):

“... *Bohr era completamente cético com respeito à idéia de spin mesmo em 1925.*”

(In: Imre Lakatos, **op. cit.**, nota 8, p. 89).

<sup>28</sup> João Zanetic. Dos “principia” da mecânica aos “Principia” de Newton. **Cad. Cat. Ens. Fís.**, Florianópolis, v. 5 Número Especial, p. 23, 1988.

“nuvens”, uma vez que esses foram precisamente os dois problemas que eventualmente produziram as mudanças revolucionárias na estrutura conceitual da física que ocorreram no século vinte em conexão com a teoria da relatividade e a teoria quântica.”<sup>29</sup>

Alguns autores mencionam que Michelson teria dito algo análogo a Lord Kelvin quanto ao futuro da física e que o professor de Planck da escola média o teria desencorajado a estudar física por motivos semelhantes.

Alexandre Medeiros em artigo recente coloca em dúvida essas afirmações atribuídas a Lord Kelvin e outros<sup>30</sup>. Como vemos, há muito a aprender sobre história da física.

---

<sup>29</sup> David Bohm. **Causality and chance in modern physics**. London: Routledge & Kegan Paul, 1967, p. 68.

<sup>30</sup> Alexandre Medeiros. Entrevista com Einstein. **Física na Escola**, v. 6, n. 1, p. 88-94, 2005.

**“Quanta”, música de Gilberto Gil de 1997:**

*Quanta do latim*  
*Plural de quantum*  
*Quando quase não há*  
*Quantidade que se medir*  
*Qualidade que se expressar*  
    *Fragmento infinitésimo*  
    *Quase que apenas mental*  
    *Quantum granulado no mel*  
    *Quantum ondulado no sal*  
    *Mel de urânio, sal de rádio*  
    *Qualquer coisa quase ideal*  
*Cântico dos cânticos*  
*Quântico dos quânticos*  
    *Canto de louvor*  
    *De amor ao vento*  
    *Vento arte do ar*  
    *Balançando o corpo da flor*  
    *Levando o veleiro pro mar*  
    *Vento de calor*  
    *De pensamento em chamas*  
    *Inspiração*  
    *Arte de criar o saber*  
    *Arte, descoberta, invenção*  
    *Teoria em grego quer dizer*  
    *O ser em contemplação*  
*Cântico dos cânticos*  
*Quântico dos quânticos*  
    *Sei que a arte é irmã da ciência*  
    *Ambas filhas de um Deus fugaz*  
    *Que faz num momento e no mesmo momento desfaz*  
    *Esse vago Deus por trás do mundo*  
    *Por detrás do detrás*  
*Cântico dos cânticos*  
*Quântico dos quânticos*

## Capítulo 2

### A física clássica em busca da solução de uma “catástrofe”

*“O universo não é apenas mais estranho do que imaginamos, é mais estranho do que podemos imaginar”*

Werner Heisenberg

#### 2.1 Introdução

Podemos iniciar este assunto tratando de algo um tanto quanto folclórico, polemizando sobre a possível data do nascimento da física quântica. Jean-Marc Lévy-Leblond, coautor de um livro didático interessante sobre mecânica quântica<sup>31</sup>, participou em 1974 de um colóquio festivo intitulado “Meio Século de Mecânica Quântica”, realizado em Strasbourg, França, comemorativo do cinquentenário da publicação do trabalho original de Louis de Broglie.<sup>32</sup> Lévy-Leblond abriu sua intervenção com as seguintes palavras:

“Apesar do caráter festivo deste nosso encontro, celebrando meio século de mecânica quântica, deixem-me correr o risco de formular umas poucas questões indecorosas. A referência cronológica deste Colóquio, para começar, mereceria alguns considerandos. Não poderíamos imaginar que Colóquios análogos, com títulos similares, poderiam ter sido realizados em Berlin em 1950, Zürich em 1955, Manchester em 1963, Göttingen em 1975, Cambridge em 1975 também, Viena em 1976, etc., celebrando vários possíveis nascimentos da mecânica quântica<sup>33</sup>, comparáveis em importância ao comemorado hoje?”<sup>34</sup>

<sup>31</sup> Jean-Marc Lévy-Leblond e Françoise Balibar. **Quantics – Rudiments of Quantum Physics**. Amsterdam: North-Holland, 1990 (Original francês de 1984).

<sup>32</sup> Louis de Broglie. **Recherches sur la Théorie des Quanta**. Tese de doutorado, Paris, 1924. Traduzido para o inglês em: G. Ludwig (ed). **Selected Readings in Physics-Wave Mechanics**, Oxford: Pergamon Press, 1968.

<sup>33</sup> Lévy-Leblond referia-se aqui aos trabalhos originais de Max Planck (1900), Albert Einstein (1905), Niels Bohr (1913), Werner Heisenberg (1925), Max Born e Paul Jordan (1925), Paul A. M. Dirac (1925) e Erwin Schrödinger (1926).

<sup>34</sup> Jean-Marc Lévy-Leblond. Towards a proper quantum theory. **Dialectica**, v. 30, n. 2/3, p. 162, 1976. Nesse artigo, Lévy-Leblond discute problemas epistemológicos relacionados com a tentativa de “separar a teoria quântica de suas persistentes conexões clássicas”. Disponível em: [http://ucispace.lib.uci.edu/bitstream/handle/10575/1146/levy-leblond%20—%20towards%20a%20proper%20quantum%20theory%20\(1976\).pdf?sequence=1](http://ucispace.lib.uci.edu/bitstream/handle/10575/1146/levy-leblond%20—%20towards%20a%20proper%20quantum%20theory%20(1976).pdf?sequence=1). Acesso em: abril de 2020.

Apesar da dificuldade de situar precisamente quando ocorreu seu nascimento, o que é característico sobre a origem de qualquer outro grande tema da física, não estaremos equivocados se afirmarmos que a física quântica teve sua origem relacionada com a inabilidade da física clássica em conseguir resolver alguns problemas que se afiguravam, para os físicos que haviam lidado com eles nas últimas décadas do século XIX, de breve e fácil solução.

Um desses problemas, que alguns textos didáticos chegam a batizar com a designação apocalíptica de **catástrofe do ultravioleta**<sup>35</sup>, nada mais era que a busca de explicação para a distribuição de energia do espectro de **radiação do corpo negro**, extensamente observada experimentalmente entre o final do século XIX e o início do século XX. Era uma encruzilhada que havia chegado à física da radiação térmica e que colocaria em xeque todo o edifício da física clássica.

O que era aparentemente paradoxal nesse acontecimento científico é que estava ligado a um fenômeno bem simples: o aquecimento de materiais e a emissão de diferentes colorações luminosas correspondentes às diversas temperaturas de aquecimento: quando qualquer objeto é aquecido, ele emite um amplo espectro de radiação, principalmente na região do infravermelho que corresponde àquela situação em que o corpo aquecido tem a aparência de um corpo frio. Quando a radiação emitida é gerada em condições de equilíbrio por uma espécie de cavidade aquecida, como é o caso de um alto forno de siderúrgica, o espectro depende apenas da temperatura. Isto quer dizer que, qualquer que seja a forma ou o material - metal, vidro, ou outra substância qualquer - do alto forno, sua abertura emitirá luz que não permite o reconhecimento dos materiais nele aquecidos. Conforme observado por Werner Heisenberg (1901-1976) “*trata-se de um fenômeno simples que deveria ter uma explicação, igualmente simples, com base nas leis clássicas conhecidas da radiação e do calor*”.<sup>36</sup> Seria simplesmente mais um exemplo de

---

<sup>35</sup> Esta expressão foi utilizada pela primeira vez em 1911, por Paul Ehrenfest (1880-1933), numa parte de um artigo em que ele comentava a limitação da expressão de Rayleigh-Jeans para a radiação do corpo negro. Paul Ehrenfest. Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentlich Rolle? In: **Annalen der Physik**. Band 34, n. 11, 1911. Em português: “Quais características da hipótese quântica da luz desempenham um papel essencial na teoria da radiação térmica?”. Artigo original em alemão disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19113411106>>. Acesso em: abril de 2020.

<sup>36</sup> Werner Heisenberg. **Física e filosofia**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 2. ed., 1987, p. 29. Heisenberg ganhou o prêmio Nobel de Física de 1932. Foi uma das grandes figuras da criação da teoria quântica tendo contribuído com a formulação da mecânica quântica através da **mecânica de matrizes**. É muito conhecido nos livros didáticos de física moderna como o autor do **princípio da incerteza**, básico para a compreensão da discussão sobre medidas microscópicas.

aplicação paradigmática, como diria Thomas Kuhn ao propor a metáfora da resolução de mais um quebra-cabeça na prática da ciência normal.

A história da física está repleta de acontecimentos e fenômenos aparentemente simples que levaram a construções teóricas sofisticadas. É interessante lembrar alguns: o movimento retrógrado dos planetas, a queda acelerada dos graves, o movimento browniano, o espalhamento de partículas alfa por anteparos metálicos finos, o efeito fotoelétrico, a ausência de movimento da Terra com relação ao éter, entre outros. Daí surgiram, respectivamente, o heliocentrismo, a mecânica clássica, a mecânica estatística, a física quântica e a relatividade.

Como teremos oportunidade de estudar mais adiante, a citação de Heisenberg retrata bem a expectativa que os físicos do final do século XIX tinham com relação à possibilidade de explicação desse fenômeno nos limites propostos pela física clássica de então. O mesmo ocorreu com a tentativa de explicar outros fenômenos intrigantes como o efeito fotoelétrico, o movimento browniano, os raios X e vários outros originários da nascente pesquisa atômica do final do século XIX e começo do século XX.

A impossibilidade de resolver tais problemas através da física clássica, então dominante, provocou, intencionalmente ou não, a ruptura com essa física e o nascimento da física quântica que alguns historiadores da ciência e alguns físicos, como o Lévy-Leblond, situam no dia 14 de dezembro de 1900, dia em que Max Planck (1858-1947) apresentou, em Berlin, seu artigo **Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal**<sup>37</sup> (ou, como veremos mais adiante, seria mais bem situada no dia 19 de outubro do mesmo ano quando ele apresentou o artigo **Sobre um aperfeiçoamento da equação de Wien do espectro**<sup>38</sup>). Poucos anos depois, em 1905, Albert Einstein, que também desempenhou um importante papel na consolidação do nascimento dessa teoria, faria nascer mais uma teoria revolucionária do início do século passado, a teoria da relatividade.

---

Sugestão de leitura complementar sobre as contribuições de W. Heisenberg para a construção dos fundamentos da Teoria Quântica: Werner Heisenberg. **A parte e o todo: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. 286p. ISBN 8585910135.

<sup>37</sup> Original em alemão: **Über des Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum**. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19013090310>>. Acesso: abril de 2020. Tradução para o português de Ildeu de Castro Moreira. **Sobre a Lei de Distribuição de Energia no Espectro Normal**. Disponível em: <[http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22\\_538.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_538.pdf)>. Acesso em: abril de 2020.

<sup>38</sup> Original em alemão: **Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung**. Tradução para o português de Nelson Studart. **Sobre um aperfeiçoamento da Equação de Wien para o Espectro**. Disponível em: <[http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22\\_536.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_536.pdf)>. Acesso em: abril de 2020.

George Gamow (1904-1968), ao fazer comentários sobre essas duas teorias “*importantísimas e revolucionárias*” que “*modificaram a face da física durante as primeiras décadas do século XX*”, destacou uma sutil diferença entre o surgimento delas; enquanto a **teoria da relatividade**, nascida em duas etapas, em 1905, com a teoria especial ou restrita e, em 1916, com a teoria generalizada, foi a criação de uma única pessoa (Albert Einstein), a outra, a **teoria quântica**, foi o resultado de um trabalho de pesquisa que envolveu a colaboração de uma série de grandes pesquisadores. Esse comentário de Gamow é bastante polêmico pois sabemos que Einstein, que foi sem dúvida o principal personagem da criação epistemológica da teoria da relatividade especial e geral, vivia um momento particularmente rico que favoreceu o seu trabalho. O historiador da ciência Roberto Martins, ao contrário de Gamow, faz o seguinte balanço:

“Popularmente, atribui-se a Albert Einstein todo o mérito pela criação da teoria da relatividade. A maior parte das pessoas parece acreditar que foi necessário e suficiente o nascimento desse indivíduo para que brotassem de seu cérebro diversos trabalhos revolucionários. O presente trabalho mostrará que a contribuição de Einstein foi um passo dentro de uma fase de complexa evolução da física, que dependeu dos trabalhos de muitos pesquisadores e que tinha atingido um amadurecimento, em 1905, que permitiu o surgimento do trabalho de Einstein.”<sup>39</sup>

Embora, como foi mencionado anteriormente, seja difícil situar precisamente quando ocorreu o nascimento da física quântica, podemos dizer que foi Max Planck o primeiro a introduzir na física, nos artigos mencionados anteriormente, a noção de **quantum de ação** e a famosa relação  $E = h\nu$  ao procurar construir uma formulação mais elegante e completa para a equação de Wilhelm Wien (1864-1928) da radiação do corpo negro.<sup>40</sup> Como destaca Roger Penrose, essas proposições originais de Planck não faziam sentido no interior da física praticada

<sup>39</sup> Roberto de Andrade Martins. Física e História. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 57, n. 3, p. 25, 2005. Disponível em: <[http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0009-67252005000300015](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252005000300015)>. Acesso em: abril de 2020.

<sup>40</sup> George Gamow. **Treinta años que conmovieron la física**. Buenos Aires: Ed. Universitária, 1974, p. 13 (Original de 1966).

nos primeiros anos do século XX e “*apenas Einstein parecia ter entendido (decorrido algum tempo) que essas proposições tentativas tinham um significado fundamental.*”<sup>41</sup>

Pretendemos neste capítulo e nos dois próximos ilustrar com algum detalhe uma história “internalista” da radiação do corpo negro que permita, ao mesmo tempo, a divulgação e a discussão dos dois artigos históricos clássicos de 1900 de Planck, a comparação desta construção com o tratamento desse tema em alguns livros didáticos de física, normalmente utilizados em nossos cursos universitários de física e um exercício de aplicação das diversas teorias epistemológicas introduzidas na primeira parte destes textos. Além disso, dado o fato, destacado acima, do reconhecimento e compreensão desses artigos por parte de Einstein e do uso que ele fez de sua interpretação do resultado desse trabalho de Planck na solução do efeito fotoelétrico<sup>42</sup>, estenderemos este apanhado histórico incluindo alguns elementos desses primeiros trabalhos de Einstein que comentam aspectos da radiação do corpo negro.

Apresentamos também breves elementos “externalistas” visando construir algo da atmosfera cultural, social e política em que essas ideias se originaram, aproveitando para tanto o trabalho de alguns historiadores e filósofos da ciência que se debruçaram sobre esse tema.

## 2.2 Antecedentes históricos

O relato que estamos construindo, se bem que historicamente deva ser redimensionado quanto às perguntas e possibilidades de respostas adequadas em virtude da distância temporal, faz-nos lembrar a questão proposta pelo grego Tales de Mileto (624-546 AC) quanto aos modos utilizados pela natureza na construção dos diferentes componentes que constituiriam o mundo. Nas diferentes tentativas de responder a essa questão surgiram os elementos gregos – terra, água, ar e fogo – que seriam responsáveis pela existência de todos os corpos conhecidos, das montanhas à ínfima partícula de poeira.

---

<sup>41</sup> Roger Penrose, no prefácio do livro **Einstein’s Miraculous Year. Five papers that changed the face of Physics**, de John Stachel (edição e introdução), Princeton University Press, 1998, p. X. John Stachel (org.). **O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física**. Trad. de Alexandre C. Tort. 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. da UFRJ, 2005. 222p. ISBN 9788571082410.

<sup>42</sup> Trata-se do artigo original em alemão: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19053220607>>. Acesso em: abril de 2020, publicado no **Annalen der Physik**, v. 17, p. 132-148, 1905 e reproduzido no livro de John Stachel, **op. cit.**, nota 41, p. 177-198.

Enquanto Tales apontava a água como o componente primordial para a construção do universo, Heráclito (535-470 AC) elegia o fogo como esse componente primordial. Na citação a seguir é destacada essa opção de Heráclito, juntamente com um exemplar de sua predileção pelo discurso metodológico da dialética.

“O fogo é uma substância primordial, porque ele possui as propriedades da matéria, pelo menos da matéria corporal, mas ele é mais sutil. Heráclito afirmava que os seres mortais são imortais, os imortais são mortais, um vive da morte do outro e morre da vida do outro. Os fótons, nós sabemos atualmente, podem nascer de uma aniquilação de pares elétron-pósitron, os pares partícula-anti-partícula nascem da morte de um fóton.”<sup>43</sup>

A tentativa de estudar a possibilidade de existência de um limite para a divisão da matéria e a evidência da existência de um mundo invisível, representada pelo movimento do ar, cheiro, som, calor, ... levaram Leucipo (cerca de 440 AC), Demócrito (cerca de 420 AC) e outros filósofos gregos a imaginar um limite para a divisão da matéria. Eles foram os fundadores da doutrina atomista. Essa doutrina dos dois filósofos gregos foi retomada por Epicuro (342-271 AC) e Lucrécio (c. 98-55 AC) que, no seu trabalho **De rerum natura**, escreveu:

“Os corpos são constituídos, de uma parte do princípio simples das coisas, os átomos, e de outra parte, dos compostos formados por esses elementos primitivos. Quanto a estes, nenhuma força é capaz de os destruir; a toda tentativa nessa direção, eles resistem com solidez. Contudo, se não admitirmos na natureza um termo último de pequenez, os corpos ainda menores serão formados de uma infinidade de partes, pois que cada metade possuirá sempre uma metade, e assim por diante até o infinito. Que diferença haverá entre o próprio Universo e os corpos muito pequenos? Nenhuma diferença poderá ser estabelecida: tão pequeno ou tão grande que se suponha o universo, os corpos muito pequenos serão, eles próprios, compostos de uma infinidade de partes. A razão se revolta contra essa consequência e não admite que o espírito a aceite; por isso, é necessário que tu te confesses vencido e que tu reconheças que existem partículas irreduzíveis a toda divisão e que

---

<sup>43</sup> José Leite Lopes e Bruno Escoubès. **Sources et évolution de la physique quantique – Textes fondateurs**. Paris: Masson, 1994, p. 3. Este livro traz uma seleção rigorosa de textos teóricos sobre a origem e desenvolvimento da física quântica.

atingiram o degrau último de pequenez; e como elas existem, é preciso que reconheças também que elas são sólidas e eternas.”<sup>44</sup>

Nascia, assim, a ideia do elemento primário indivisível constitutivo da matéria, **o átomo**. Era também o nascimento de um materialismo que iria se opor às concepções idealistas plantadas por Platão que concebia unicamente a geometria como base de explicação dos fenômenos do universo, constituindo o seu mundo das ideias, base do idealismo.

David Bohm costumava afirmar que esse debate entre o idealismo e o materialismo sempre esteve presente na física, inclusive na física contemporânea.

A concepção atômica derrotada pelo paradigma aristotélico, ficou esquecida, ao lado da concepção heliocêntrica de universo, por quase dois mil anos. Apenas no século XVII, Pièrre Gassendi (1592-1655), um padre e físico da Provença, e Isaac Newton (1642-1727), a colocaram de novo na berlinda. Nascia assim a teoria corpuscular da matéria e da luz que iria marcar profundamente a história da física.

A luz passou a ser um objeto privilegiado de atenção científica. Tradicionalmente se coloca de um lado Newton que, com suas experiências de decomposição da luz branca através de sua passagem por prismas, pôs em movimento um ramo da física que se mostraria importantíssimo nos séculos seguintes, a espectroscopia. Provavelmente influenciado por seu bem sucedido estudo do movimento de partículas, Newton chegou a conceber a luz como um fluxo de pequenas partículas ou corpúsculos.<sup>45</sup> De outro lado, tradicionalmente se coloca um contemporâneo de Newton, Christian Huygens (1629-1695), que chegava à concepção da luz como um fenômeno exclusivamente ondulatório. A comparação entre essas ideias de Newton e de Huygens, publicadas respectivamente na **Óptica**, de 1704, e no **Tratado sobre a luz**, de

---

<sup>44</sup> Lucrécio. **De la Nature**. Paris: Garnier-Flammarion, 1964. Citado por José Leite Lopes e Bruno Escoubès, **op. cit.**, nota 43, p. 4.

Livros em português na USP (biblioteca da FFLCH):

Lucrécio. **Da natureza das coisas**. São Paulo: Cultura, 1941.

Lucrécio. **Da natureza**. Rio de Janeiro: Globo, 1962.

<sup>45</sup> Mesmo essa interpretação da concepção newtoniana precisa ser problematizada. Para tanto, é interessante citar aqui algumas palavras de Newton onde ele diminui a ênfase a respeito da visão corpuscular da luz:

*“É verdade que de minha teoria eu argumento a corporeidade da luz, mas faço isto sem qualquer certeza absoluta, como as palavras talvez intinem, e faço principalmente como uma consequência muito plausível da doutrina, e não como uma suposição fundamental, nem como qualquer parte dela”.*

(**The correspondence of Isaac Newton**. Vol. I (1661-1675). Cássio Costa Laranjeiras. **Redimensionando o ensino de física numa perspectiva histórica**. Dissertação de mestrado, IFUSP/FEUSP, 1994, p. 163).

1679, é polêmica. O historiador da ciência David Knight chega a afirmar que o livro de Huygens não desempenhou um papel importante na história da óptica, ao contrário da crença comum propalada por muitos autores.<sup>46</sup> Muito tempo depois, a partir dessas concepções, numa reconstrução racional da história da física, iria nascer uma oposição entre a teoria corpuscular da luz e a teoria ondulatória da luz. Talvez possamos afirmar que nascia assim um parente distante da dualidade partícula-onda da luz, fruto dos tempos contemporâneos.

Mas essa oposição clássica se daria apenas no início do século XIX quando foram desenvolvidos vários novos instrumentos ópticos. Com eles foram realizadas as mais variadas experiências que culminaram com os trabalhos de Thomas Young (1773-1829), que estudou o fenômeno de interferência da luz e de Augustin Fresnel (1788-1827) e Joseph von Fraunhofer (1787-1826) que estenderam esse tipo de experiências introduzindo a difração e a polarização da luz. Esses trabalhos levaram à proposição de uma teoria ondulatória para a luz em oposição à teoria corpuscular de Newton. Com esse desenvolvimento, ocorrido no início do século XIX, a teoria ondulatória da luz aparentemente ganhava a parada.

Cabe destacar ainda outro ingrediente que ocorreria em 1800 com um início de relacionamento entre radiação térmica e luz, quando William Herschell (1738-1822) observou um efeito térmico à medida que a luz decomposta se deslocava do violeta para o vermelho<sup>47</sup>. Ele chegou a propor nessa época a hipótese da existência dos raios infravermelhos.<sup>48</sup>

É neste cenário que deve ser situado um trabalho lido na Academia de Ciências de Berlin, em dezembro de 1859, que marcou um possível início da **teoria clássica da radiação térmica**. Tratava-se da leitura do trabalho, hoje clássico, de Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), que

---

<sup>46</sup> David Knight. **Sources for the history of science – 1660-1914**. London: The Sources of History Ltd., 1975, p. 151.

<sup>47</sup> Ao buscar melhores arranjos experimentais para observar o Sol com ajuda de telescópios, W. Herschell utilizou várias combinações de vidros escurecidos. Ele observou também que alguns vidros produziam sensação de calor mesmo com baixa incidência de luz e outros iluminavam melhor (transmitiam mais luz), produzindo pouca sensação de calor. Buscou, assim, compreender a relação entre o comportamento dos “raios prismáticos” e seu poder de aquecer e iluminar. Mais informações em: Rilavia Almeida de Oliveira e Ana Paula Bispo da Silva. William Herschel, os raios invisíveis e as primeiras ideias sobre radiação infravermelha. **Rev. Bras. Ens. Fís.**, v. 36, n. 4, p. 1-11, dez/2014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172014000400022](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172014000400022&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: abril de 2020 [<https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000400022>].

<sup>48</sup> Armando Gibert. **Origens históricas da física moderna**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1982, p. 266.

tinha por título **Sobre a relação entre a emissão e absorção de luz e calor**<sup>49</sup>. Um pequeno trecho desse artigo diz o seguinte:

“Há poucas semanas tive a honra de me dirigir à Academia com um histórico de algumas observações que me pareceram muito interessantes pois permitiam tirar conclusões sobre a constituição química da atmosfera solar. Partindo dessas observações agora derivei, com base em considerações térmicas relativamente simples, um teorema geral que, em vista de sua grande importância, permito-me apresentá-lo à Academia. Ele lida com uma propriedade de todos os corpos e refere-se à emissão e absorção de calor e luz.”<sup>50</sup>

No ano seguinte, o mesmo Kirchhoff introduzia a noção de **corpo perfeitamente negro**, ou, simplesmente **corpo negro**, que dizia respeito a um corpo que absorve toda a radiação nele incidente, isto é, tem uma taxa de absorção igual à unidade.<sup>51</sup>

Desse modo, estava nascendo uma linha de pesquisa que, quarenta anos mais tarde, seria responsável por um violento abalo na confiança depositada na física clássica até então.

Vamos seguir alguns passos dessa história do estudo do **Problema da Radiação do Corpo Negro (PRCN)**, que marca também o nascimento da mecânica quântica, procurando ressaltar diferentes procedimentos metodológicos, mudanças conceituais, novas interpretações de velhos resultados, crenças e dúvidas, consequências filosóficas e sociais e os principais personagens envolvidos.

---

<sup>49</sup> Original em alemão: **Ueber das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht**. Publicado em *Annalen der Physik und Chemie*, v. 109, n. 2, p. 275-301, 1960; e disponível também em: <<https://archive.org/details/abhandlungenber00kircgoog/page/n28/mode/2up>>. Acesso em: abril de 2020.

<sup>50</sup> Citado por Max Jammer. **The conceptual development of quantum mechanics**. McGraw-Hill, 1966, p. 2. Boa parte do desenvolvimento histórico da radiação do corpo negro, presente nestes capítulos, baseia-se no capítulo 1 desse livro. Max Jammer é um dedicado estudioso da evolução conceitual de uma série de campos das físicas clássica e contemporânea. Recomendo fortemente a leitura desse livro a todos que queiram se aprofundar na história da mecânica quântica. A biblioteca do IFUSP dispõe de cópias tanto desse livro como de outros desse autor que abordam vários temas interessantes da física.

<sup>51</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 4.

### 2.3 Um breve parêntesis sociológico

Por que havia todo esse interesse em torno do estudo da radiação do corpo negro na segunda metade do século XIX?

Vimos acima a referência ao estudo da radiação emitida por corpos aquecidos e seu relacionamento com um forno a altas temperaturas. Exatamente daí nasceu a ideia de um novo método para se medir temperaturas. Com base nesse desenvolvimento, Jun'ichi Osada sugeria a seguinte resposta à pergunta acima formulada:

“Em meados do século passado [século XIX], na Alemanha, que havia anexado ao seu território os centros de produção de carvão localizados na fronteira com a França, a indústria siderúrgica desenvolveu-se rapidamente. Foram construídas muitas instalações modernas, e enormes esforços foram feitos para produzir aço da melhor qualidade. O fator mais importante na produção de aço de primeira qualidade é o controle delicado da temperatura dos altos fornos. Evidentemente, não se pode usar termômetros comuns para a medição de temperaturas tão altas. A fim de contornar esse problema, pesquisas foram feitas no sentido de determinar as temperaturas usando as cores das radiações térmicas, isto é, mais concretamente, foram recolhidas as luzes provenientes dos fornos às diversas temperaturas. Assim, analisando essas luzes pelos prismas e medindo as intensidades de cada parte espectral, foram obtidas as curvas (...).”<sup>52</sup>

Sabemos que um forno ou qualquer objeto aquecido emite um amplo espectro contínuo de radiação eletromagnética (luzes de diversas cores, inclusive não visíveis) e a esse fenômeno damos o nome de **radiação térmica**. Conforme a temperatura desse corpo aumenta, a emissão mais intensa ocorre para comprimentos de onda diferentes, daí a mudança da cor que vemos.

“Quando o objeto tiver atingido a temperatura do corpo humano, o pico de radiação estará no infravermelho longo [*não visível*]. O corpo humano irradia também ondas de rádio, mas

---

<sup>52</sup> Jun'ichi Osada. **Evolução das idéias da física**. São Paulo: E. Blücher e EDUSP, 1972, p. 48-49.

Sugestão de leitura complementar sobre o contexto sociocultural da Alemanha onde os estudos sobre a radiação de corpo negro se desenvolvem de forma significativa a partir da segunda metade do século XIX: Anton Zeilinger. **A face oculta da natureza: o novo mundo da física quântica**. Trad. de Luiz Sérgio Repa. São Paulo: Globo, 2005 (capítulo 1).

os comprimentos de onda mais curtos e mais energéticos são sempre mais fáceis de serem detectados e, portanto, tornam-se os mais acentuados.

Assim que o objeto atinge a temperatura de aproximadamente 600°C, o pico de radiação se deslocará para o infravermelho curto. Nesse ponto, entretanto, a pequena quantidade de radiação do lado mais energético do pico torna-se particularmente significativa, pois ela atinge a região da luz vermelha visível. A cor do objeto torna-se, então, vermelho-escuro. Este vermelho constitui apenas uma pequena porcentagem da radiação total emitida, mas como somos capazes de vê-lo, damos-lhe toda a atenção e dizemos que o corpo está “aquecido ao rubro”.

À medida que a temperatura subir ainda mais, o pico de radiação continua a deslocar-se para comprimentos de onda mais curtos e cada vez mais luz visível de comprimentos de onda mais e mais curtos é emitida. Embora a luz vermelha seja a mais irradiada, luzes de coloração alaranjada e amarela são acrescentadas em quantidades menores, mas significativas. À temperatura de 1.000°C, a mistura de cores se nos apresenta de cor alaranjada, e lá pelos 2.000°C, de cor amarela. Isso não significa que apenas a luz alaranjada seja irradiada a 1.000°C e apenas amarela a 2.000°C. Se esse fosse o caso, seria realmente de esperar que a seguir o objeto se apresentasse como “aquecido ao verde”. Mas não podemos esquecer que o que vemos são misturas de luzes.

No momento em que 6.000°C forem atingidos (a temperatura da superfície do Sol), o pico de radiação estará no amarelo visível e estaremos recebendo grande quantidade de luz visível, desde o violeta até o vermelho. Toda a gama de luz visível do espectro se nos apresenta com cor branca, de sorte que o Sol está “aquecido ao branco”.

Para objetos ainda mais quentes do que o Sol, todos os comprimentos de onda de luz visível continuam a ser irradiados e em quantidades ainda mais apreciáveis. O pico de radiação desloca-se, porém, para o azul, de modo que a mistura não é perfeitamente balanceada a nossos olhos e o branco tem um matiz azulado.

Tudo isso acontece para os objetos que quando aquecidos emitem o “espectro contínuo”, irradiando luz numa ampla faixa de comprimentos de onda. Certas substâncias, em condições apropriadas, irradiarão luz de apenas determinados comprimentos de onda. O nitrato de bário irradia luz verde quando aquecido e é por isso usado em fogos de artifício.

Podemos então dizer que está “aquecido ao verde”.<sup>53</sup>

---

<sup>53</sup> Isaac Asimov. **Asimov explica**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1990, p. 83-84.

Não necessariamente a cor que vemos é aquela com emissão mais intensa, pois esta última pode ocorrer para um comprimento de onda que não enxergamos, já que nossos olhos são adaptados para ver apenas uma pequena faixa do espectro.<sup>54</sup>

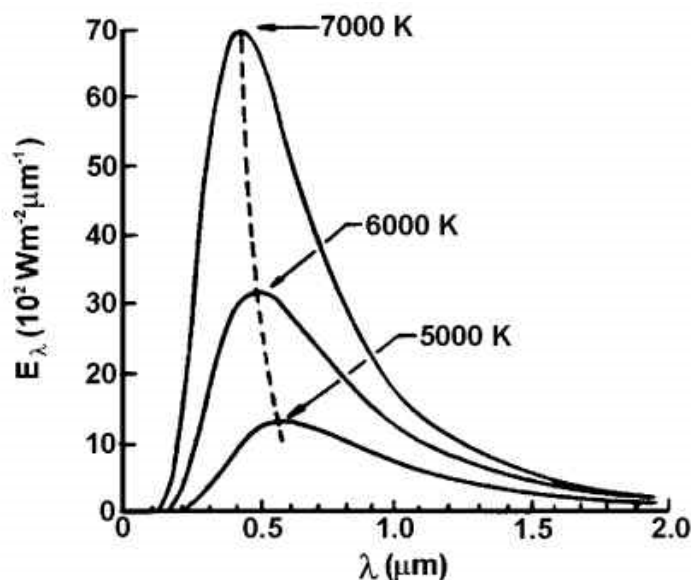
Esse fenômeno não ocorre apenas em altos fornos de siderúrgicas. Todos os corpos emitem radiação térmica (radiação emitida devido a sua temperatura). Para os corpos “frios” (à temperatura ambiente, por exemplo) a maior parte da sua radiação térmica está na região do infravermelho, cuja percepção não é possível aos nossos olhos. Por essa razão não vemos esses corpos no escuro. Só podemos vê-los devido à luz visível (proveniente do sol ou lâmpadas, por exemplo) que é refletida por eles; embora seja importante salientar que existem alguns materiais que absorvem luz de comprimentos de onda fora da região do visível, emitindo em seguida luz visível, como o pó que reveste as paredes das lâmpadas fluorescentes.

Chamamos a vasta gama de comprimentos de onda que um corpo emite de espectro. Podemos representar graficamente, para determinada temperatura, a intensidade da emissão de um corpo em função do seu espectro. Isso é o que chamaremos de *curvas de distribuição de emissão*, como a reproduzida na **Figura 1**.

Os fenômenos descritos, além de envolverem o eletromagnetismo devido à emissão de radiação eletromagnética, também são objeto de estudo da termodinâmica. Todo corpo absorve e emite radiação do meio e para o meio que o cerca. Absorvendo a radiação que sobre ele incide, o corpo está absorvendo energia. Para que a energia interna do corpo não aumente progressivamente até o infinito, o corpo necessita doar energia, o que é feito na forma de energia eletromagnética *também*. Quando um corpo está mais frio que o meio que o cerca, ele irá se aquecer, pois a taxa de absorção de radiação do corpo é maior que a taxa de emissão (ou seja, o corpo absorve mais energia por unidade de tempo do que emite). No *equilíbrio térmico* (ambiente e corpo na mesma temperatura) as taxas de absorção e emissão são as mesmas para o corpo.

---

<sup>54</sup> Podemos situar os limites do espectro visível entre 430 e 690nm. Contudo, é possível enxergar comprimentos de onda ligeiramente fora desses limites, caso a luz seja suficientemente intensa.



**Figura 1 – Curvas de energia luminosa irradiada em função do comprimento de onda e da temperatura para um corpo negro.**

**Fonte:** <<https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-5.html>>

“O equilíbrio de temperaturas entre os corpos se dá pela condução e também pela radiação de calor. A condução de calor é determinada pelo gradiente de temperatura em cada ponto enquanto a radiação de calor num ponto é caracterizada por vários fatores: pela direção, intensidade, frequência e polarização de todos os raios que passam pelo ponto, sendo que estes raios são independentes entre si.”<sup>55</sup>

Uma necessidade tecnológica vinculada ao desenvolvimento do capitalismo alemão do século XIX, portanto, levou à construção de curvas empíricas que provocaram um grande interesse por parte de muitos físicos experimentais, entre eles, Heinrich Rubens (1865-1922), Ernst Pringsheim (1859-1917) e Otto Lummer (1860-1925) que trabalhavam no Physikalisch Technische Reichsanstalt de Berlin, na virada do século XIX para o XX, ao lado de outros físicos

<sup>55</sup> Max Planck. **Theory of Heat**, citado por Ivone Freire da Mota Albuquerque. **Entropia e a quantização da energia: cálculo termodinâmico de Planck**. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências (Modalidade Física), Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988. Original em alemão: **Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung** (1913). Uma tradução para o inglês está disponível em: <<http://mirrors.aggreate.org/gutenberg/4/0/0/3/40030/40030-pdf.pdf>>. Acesso em: abril de 2020.

teóricos, por exemplo, Wilhelm Wien, Lorde Rayleigh (1842-1919), James Hopwood Jeans (1877-1946) e Max Planck, como veremos ainda neste capítulo.<sup>56</sup>

## 2.4 Estudos iniciais sobre a radiação térmica

Historicamente o estudo da radiação térmica desenvolveu-se mais profundamente com a análise da luz solar e o surgimento da espectroscopia. Podemos afirmar que essa última nasceu no momento em que Newton decodificou a decomposição da luz branca através do prisma.

Durante o século XIX a espectroscopia ganhou força especialmente depois que Joseph von Fraunhofer inventou o espectroscópio, que produzia espectros por um acoplamento entre luneta ocular e prismas. Esse dispositivo experimental foi melhorado por Gustav Robert Kirchhoff e Robert Bunsen (1811-1899), na segunda metade do século XIX. Em 1859, os dois chegaram a uma importante lei empírica: todo elemento químico é caracterizado por um espectro que lhe é próprio. A partir daí ampliou-se o estudo da radiação emitida pelo sol: o espectro solar e sua composição<sup>57</sup>.

No mesmo ano, Kirchhoff procurou estudar a relação entre a radiação térmica e a temperatura, através do estudo das linhas de Fraunhofer do espectro solar<sup>58</sup>. Ele verificou ser

---

<sup>56</sup> Emílio Segrè. **Dos raios X aos quarks. Físicos modernos e suas descobertas**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1987, p. 68.

<sup>57</sup> Uma descrição interessante (reproduzida a seguir) sobre o episódio que envolve o trabalho de Kirchhoff e Bunsen a respeito dos espectros de elementos químicos é encontrada em: Timothy Ferrys. **O despertar na Via Láctea**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1990, p. 121.

“Nos anos de 1855 até 1863 os físicos Gustav Kirchhoff e Robert Bunsen (o inventor do queimador de gás Bunsen) verificaram que seqüências distintas das raiais de Fraunhofer eram produzidas pelos vários elementos químicos. Certa noite viram, pela janela de seu laboratório em Heidelberg, um incêndio na cidade portuária de Mannheim, a 15km para o oeste. Usando seu espectroscópio, detectaram raiais reveladoras de bário e emôncio nas chamas. Isso levou Bunsen a indagar se poderia detectar elementos químicos também no espectro do Sol. [...]”

Kirchhoff era bastante louco para tentar, e em 1861 tinha identificado sódio, cálcio, magnésio, ferro, crômio, níquel, bário, cobre e zinco no Sol. Tinha sido estabelecida uma ligação entre a física da Terra e a das estrelas, e aberto o caminho para as novas ciências da espectroscopia e da astrofísica.

Em Londres, um rico astrônomo amador chamado William Huggins ficou sabendo das descobertas de Kirchhoff e Bunsen, segundo as quais as linhas de Fraunhofer eram geradas por elementos químicos conhecidos no Sol, e percebeu imediatamente que seus métodos podiam ser aplicados às estrelas e nebulosas. [...] Estudando cuidadosamente cada espectro até compreender as muitas linhas sobrepostas, [Huggins] conseguiu identificar ferro, sódio, cálcio, magnésio e bismuto no espectro das estrelas brilhantes Aldebaran e Betelgeuse. Foi a primeira prova conclusiva de que outras estrelas eram feitas das mesmas substâncias que encontramos em nosso sistema solar.”

<sup>58</sup> Partindo de contribuições de Fraunhofer (1914) sobre as linhas observadas no espectro do Sol, Kirchhoff passa a estudar a relação entre radiação térmica e temperatura e, juntamente com Bunsen, conclui que o sódio é um dos constituintes básicos da atmosfera solar. Entre 1859 e 1860 Kirchhoff publica quatro artigos sobre a radiação

também o sódio um dos constituintes básicos da atmosfera solar.<sup>59</sup> Chegou a esse resultado através da comparação do espectro solar com o produzido pelo sódio incandescente. Esse estudo o levou a produzir outro trabalho que foi lido na Academia de Ciências de Berlim em dezembro de 1859, no qual ele tratava o problema da emissão e absorção de radiação pela matéria. Entre outras observações, ele mostrava que

“(...) para raios de mesmo comprimento de onda, à mesma temperatura, a razão do poder de emissão para a capacidade de absorção é a mesma para todos os corpos.”<sup>60</sup>

Essa proposição ficou conhecida como a Lei de Kirchhoff. À primeira vista pode parecer uma proposição sem muita importância, mas ela é fundamental e provavelmente instigou as pesquisas sobre o assunto, pois surgia aí um absoluto na natureza.

Simplificando, poderíamos dizer que este enunciado revela que a relação entre a emissão e absorção de radiação por um corpo para uma dada temperatura é sempre a mesma, independentemente da natureza e constituição do corpo<sup>61</sup>.

Para chegar a essa conclusão enunciada acima, Kirchhoff calculou as condições de equilíbrio para a troca de radiação entre duas placas paralelas infinitas, revestidas por superfícies refletoras ideais do lado de fora. Kirchhoff assumiu que a primeira placa (1) absorveria e emitiria

---

emitida e absorvida por corpos aquecidos que contribuíram significativamente para a construção das bases da física quântica. São eles:

- i) Über die Fraunhoferschen Linien. **Monatsbericht der Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin**, 27, p. 662-665, Oktober 1859.
- ii) Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. **Annalen der Physik**, v. 110, n. 6, p. 161-189, 1860 (em colaboração com R. Bunsen).
- iii) Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme. **Monatsbericht der Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin**, 15, p. 783-787, December 1859.
- iv) Über das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht **Annalen der Physik**, v. 109, n. 2, p. 275-301, 1860.

Com exceção do artigo (ii), os demais artigos estão disponíveis na versão original em alemão em: <<https://archive.org/details/abhandlungenber00kircgoog/page/n28/mode/2up>>. Acesso em: abril de 2020.

<sup>59</sup> Em 1868 foi descoberto no espectro solar um elemento ainda desconhecido na Terra: nascia o hélio. Apenas em 1895 o químico escocês William Ramsay (1852-1916) descobriu o hélio terrestre em um mineral de urânio. Para saber mais sobre o tema, ver também: Morris William Travers. Ramsay and Helium. **Nature**, v. 135, n. 619, 1935.

<sup>60</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 102.

<sup>61</sup> Henrique Fleming acredita que a aplicação da lei de Kirchhoff que mais teria interessado a ele mesmo seria o fato de comprovar um resultado anterior seu: um corpo não emite uma frequência que não absorva. **Max Planck e a idéia do quantum**. Mahir S. Hussein e Silvio R. Salinas (Orgs.). **100 anos de física quântica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2001, p. 1-12.

radiação somente de comprimento de onda  $\lambda$ , restrição não imposta à segunda (2). Com esse artifício o problema se restringia apenas à troca de radiação com comprimento de onda  $\lambda$  entre as duas placas, já que outros comprimentos de onda seriam reabsorvidos pela segunda placa depois de repetidas reflexões.

Como no equilíbrio a energia absorvida é igual à energia emitida, o que pressupõe uma temperatura constante e igual para ambas as placas, Kirchhoff chegou ao seguinte resultado, que exprime matematicamente sua lei<sup>62</sup>:

$$\frac{P_{1\lambda}}{a_{1\lambda}} = \frac{P_{2\lambda}}{a_{2\lambda}} \quad (1)$$

Em que  $P_{1\lambda}$  é o *poder emissivo* (a energia irradiada no comprimento de onda  $\lambda$  por unidade de tempo<sup>63</sup>) para a primeira placa, e  $a_{1\lambda}$  é o *poder absorvente*<sup>64</sup> (a fração da energia absorvida da radiação incidente com comprimento de onda  $\lambda$ ). Os símbolos  $P_{2\lambda}$  e  $a_{2\lambda}$  correspondem às mesmas grandezas para a segunda placa.

Essa lei expressa a característica dos corpos de que quanto maior a fração de energia que ele absorve, mais ele emite, já que a razão (1) tem um valor constante.<sup>65</sup>

Simultaneamente às publicações de Kirchhoff, Balfour Stewart (1828-1887) estabeleceu independentemente a validade dessa lei baseado em medidas experimentais<sup>66</sup>.

Fleming<sup>67</sup> ressalta que é importante, ao se efetuar a história do estudo da radiação térmica, estar atento ao fato de que Kirchhoff descreveu a radiação sempre sob a forma de raios, o que não fazemos atualmente. Há também o aspecto de que o problema do equilíbrio entre a radiação e a matéria envolve calor radiante e luz, na época coisas distintas. Os trabalhos de

<sup>62</sup> O desenvolvimento completo dessa lei está no **Anexo I**, incluído no final deste capítulo. Uma interpretação interessante sobre a dedução da lei de Kirchhoff é encontrada em: Floyd Karker Richtmyer. **Introduction to modern physics**. New York, London: McGraw-Hill, 1934, p. 200-203.

<sup>63</sup> Note que o poder emissivo é uma medida de potência (energia por tempo).

<sup>64</sup> A nomenclatura em português para as grandezas físicas descritas foi extraída de Gibert (1982), **op. cit.**, nota 48. Em Segrè (1987), **op. cit.**, nota 56, a grandeza nomeada em nosso texto como *poder absorvente* é descrita como *poder de absorção*.

<sup>65</sup> Para o estudo do corpo negro isso é importante, pois com uma absorção total ( $a_{\lambda}=1$ ), sua emissão é máxima. Portanto o corpo negro seria um emissor ideal.

<sup>66</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 4.

<sup>67</sup> Henrique Fleming, **op. cit.**, nota 61, p. 4-5.

James Clerk Maxwell (1831-1906), que propuseram a luz como radiação eletromagnética dentro de um certo intervalo de frequências, apareceram gradualmente entre os anos de 1860 e 1865, enquanto que o grande trabalho de Kirchhoff foi publicado em 1860.

Também é importante ter em mente que o processo e a resolução do problema da radiação do corpo negro foram desenvolvidos sob a crença (ou dúvida) da existência do éter, o qual era parte integrante dos desenvolvimentos teóricos, principalmente porque a radiação se propagava pelo éter e no interior da cavidade também existia esse “fluido etéreo”. No entanto, em nenhum dos desenvolvimentos históricos que estamos citando os autores discutiram essa questão. A ausência da noção de éter, por exemplo, na solução de Planck do problema da radiação do corpo negro foi motivo de críticas na época.

## 2.5 A noção de corpo negro e sua equivalência com a radiação de cavidade

Em 1860, Kirchhoff, com base em seus estudos fundamentais, introduziu a noção idealizada de **corpo perfeitamente negro**, ou **corpo negro**.

Para facilitar a compreensão desta ideia, vamos recapitular alguns conceitos básicos da física. Podemos dizer (numa análise macroscópica) que quando a luz incide sobre qualquer superfície três fenômenos podem ocorrer (mesmo simultaneamente): parte da luz é refletida pelo objeto, outra parte é absorvida e ainda há a possibilidade de outra parte ser transmitida pela superfície. Quando vemos um objeto que não é uma fonte primária de luz, nossos olhos captam a luz visível que foi refletida por este. Assim, quanto mais luz o objeto absorver ou transmitir, menos ele irá refletir e menos luz chegará aos nossos olhos oriunda do objeto. Dessa maneira, veremos o objeto cada vez mais escuro. Se toda luz visível que incidisse num corpo fosse absorvida pelo mesmo e nada fosse refletido, esse objeto seria perfeitamente preto.

A noção de corpo negro, no entanto, é um pouco mais sofisticada, pois um corpo negro é aquele que absorve **toda** a radiação que sobre ele incide, visível ou não, sem reflexão ou transmissão; ou seja, a taxa de absorção de radiação é igual a 1 (100%), por isso a analogia com um objeto preto que absorve toda a luz visível, sendo o preto a ausência de cor. A diferença está

no fato de que o corpo perfeitamente negro não absorve apenas a radiação na região do visível, mas todo o espectro<sup>68</sup>.

É importante notar que essa noção é uma idealização, pois corpos perfeitamente negros não existem<sup>69</sup>. Como afirma Trigg: “*este tipo de idealização é bastante comum na ciência, e é especialmente válida quando a situação ideal pode ser aproximada da realidade, como parece ser verdadeiro no presente caso*”.<sup>70</sup>

A idealização do corpo negro provavelmente<sup>71</sup> foi baseada no fato de que, independentemente da sua constituição, a sua emissão (ou seja, o seu espectro) seria sempre a mesma. Também há o aspecto de que como o corpo negro absorve toda a radiação que sobre ele incide (poder de absorção  $a_\lambda=1$ ), pela lei de Kirchhoff a sua emissão é máxima, sendo assim um emissor ideal.

Portanto, a noção de corpo negro se mostrava como um absoluto na física, fato que levou muitos cientistas a estudar o assunto com afinco, principalmente Planck<sup>72</sup>.

Com relação à *aproximação com a realidade* na pesquisa da radiação de corpo negro, encontrá-la-emos no Sol. Podemos aproximá-lo para um corpo negro pois a radiação que sobre ele incide passa por reflexões sucessivas sendo quase que completamente absorvida. No entanto, com relação à emissão, o Sol não possui um espectro contínuo como o de um corpo negro, pois apresenta algumas linhas escuras, conhecidas como linhas de Fraunhofer, que representam os comprimentos de onda absorvidos pelos átomos presentes nas camadas mais exteriores do Sol.

---

<sup>68</sup> Newton já havia falado em corpo negro em seu livro *Óptica*: “*os corpos negros conservariam o calor da luz mais facilmente que aqueles de outras cores*”. Citado em Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 4, nota de rodapé 10.

<sup>69</sup> Por definição poderíamos considerar um buraco negro como um corpo negro. No entanto, uma discussão mais aprofundada sobre o assunto deveria analisar se a emissão de um buraco negro fornece um espectro de corpo negro, discussão que foge ao escopo deste trabalho.

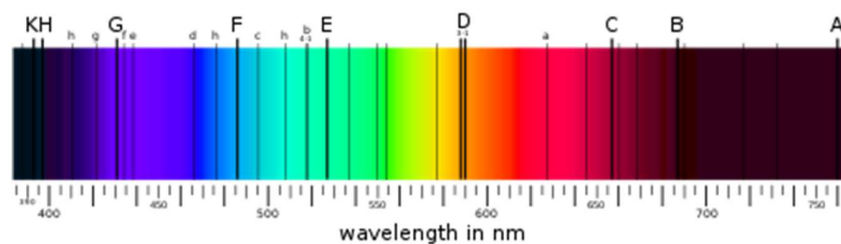
<sup>70</sup> G. L. Trigg. **The origin of the quantum concept**. Crucial experiments in modern physics. New York: Van Nostrand Reinhold, 1971, p. 5.

<sup>71</sup> Dizemos “provavelmente”, pois essa afirmação não se encontra explicitamente em nenhuma literatura que consultamos. Essa é uma inferência que fizemos a partir do estudo que realizamos.

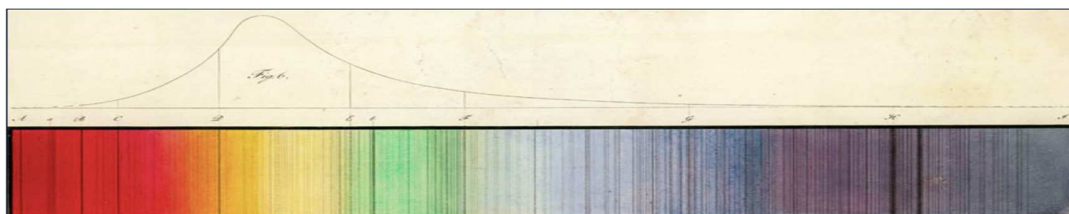
<sup>72</sup> Conforme o próprio Planck narra, em sua autobiografia, sobre a radiação do corpo negro: “(...) a radiação, em todas suas propriedades incluindo sua distribuição espectral de energia, não depende da natureza dos corpos, mas somente e exclusivamente da temperatura. Portanto, esta assim chamada distribuição normal de energia espectral representa algo absoluto, e uma vez que eu sempre considerei a procura por absoluto como o principal objetivo de toda a atividade científica, eu ansiosamente me pus a trabalhar”.

Max Planck. **Scientific autobiography and other papers**. London: Williams and Norgate, 1950, p. 34-35. Edição em português: Max Planck. **Autobiografia Científica e outros Ensaios**. Trad. de Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.

O primeiro a observar tais linhas foi William Hyde Wollaston (1766-1828), em 1802. Em 1814, Fraunhofer contou cerca de 574 dessas linhas no espectro solar e identificou várias delas por letras, como pode ser visto na **Figura 2**, a seguir.



Fonte: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_de\\_Fraunhofer](https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_de_Fraunhofer)>

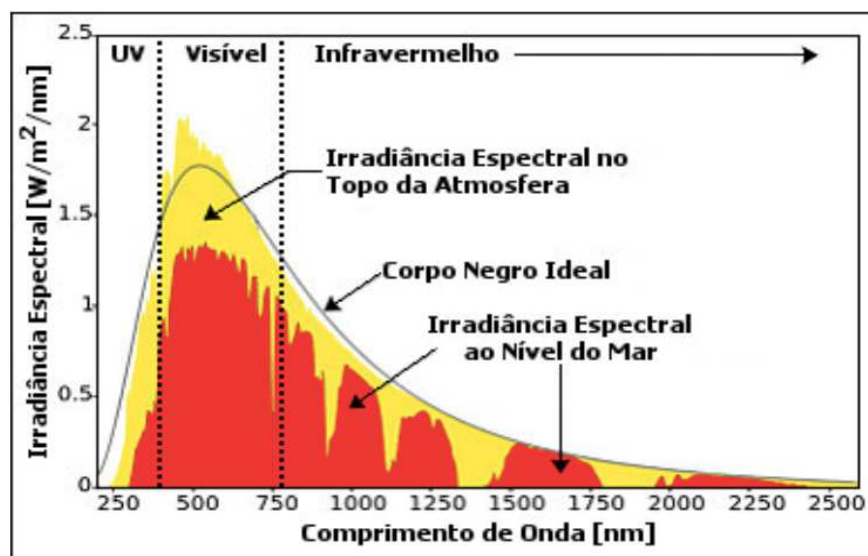


Mapa do espectro solar de Fraunhofer (colorido à mão, ca. 1814)

Fonte: Deutsches Museum, Munich, map collection, StO 1107, cab. 39, shelf 03.

[Copyright Deutsches Museum, Munich]

**Figuras 2a – Faixa do visível das linhas de absorção dos elementos no interior do sol, com as linhas de Fraunhofer.**



Fonte: <[http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol\\_Rad\\_Basic\\_RS.html](http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol_Rad_Basic_RS.html)>

**Figura 2b – Espectro do Sol observado na Terra, com a região do visível em destaque (as falhas nas curvas decorrem de absorção da luz por gases da atmosfera).**

Planck sugeria que um corpo negro deveria satisfazer três condições independentes, reforçando o caráter sofisticado dessa noção:

“Primeira, o corpo deve ter uma superfície negra a fim de permitir que os raios incidentes entrem sem reflexão. Desde que, em geral, as propriedades de uma superfície dependem dos dois corpos que estão em contato, esta condição mostra que a propriedade de negrume aplicada a um corpo depende não somente da natureza do corpo, mas também daquela do meio contíguo. Um corpo que é negro relativamente ao ar pode não sê-lo relativamente ao vidro, e vice versa. Segunda, o corpo negro deve ter uma certa espessura mínima dependente do seu poder absorvente, a fim de assegurar que os raios após passarem para o corpo não serão capazes de deixá-lo de novo num diferente ponto da superfície. Quanto mais absorvente um corpo é, menor o valor dessa espessura mínima, enquanto que no caso de corpos com poder absorvente excessivamente pequeno somente uma camada de espessura infinita pode ser considerada negra. Terceira, um corpo negro deve ter um coeficiente de

espalhamento excessivamente pequeno. Caso contrário os raios recebidos por ele seriam parcialmente espalhados no interior e podem deixá-lo de novo através da superfície.”<sup>73</sup>

Como um corpo negro tem superfície negra, caso ele existisse e estivesse “frio” (pico de emissão no infravermelho) não o veríamos, já que nenhuma radiação seria refletida por ele. No entanto, quando aquecido, seu pico de emissão poderia chegar próximo à faixa do visível, de maneira que o veríamos como uma fonte de luz.

Kirchhoff também mostrou que a emissão de radiação de um corpo negro é da mesma “qualidade e intensidade”<sup>74</sup> que a radiação dentro de uma cavidade de paredes adiabáticas<sup>75</sup> e temperatura  $T$ . Ou seja, ele mostrou que o estudo de um corpo negro poderia se restringir ao da emissão de tal cavidade<sup>76</sup>. Dessa maneira o estudo da radiação de corpo negro aproximava-se ainda mais da realidade.

A radiação no interior dessa cavidade tem origem nas paredes da mesma, e segundo Trigg, Kirchhoff mostrou que esta radiação é isotrópica (a mesma em qualquer direção) e homogênea (a mesma em todos os pontos da cavidade).<sup>77</sup> Se a radiação fosse mais intensa em alguns pontos que em outros, absorvedores idênticos em pontos distintos teriam temperaturas diferentes e poderiam ser utilizados um como fonte e outro como depósito de uma máquina térmica que produziria trabalho indefinidamente.

Para entendermos melhor a equivalência entre a emissão de corpo negro e a radiação no interior da cavidade, vamos supor que um *corpo não negro* à temperatura  $T$  seja colocado no interior de uma cavidade em equilíbrio térmico à mesma temperatura. A energia emitida pelas paredes da cavidade em forma de radiação com comprimento de onda entre  $\lambda$  e  $\lambda+d\lambda$ , por unidade de tempo e área à temperatura  $T$ , é  $R_\lambda$  (radiância espectral). Como essa radiação é homogênea, a energia por unidade de tempo e área que incide sobre o corpo também é  $R_\lambda$ .

---

<sup>73</sup> Max Planck. **The theory of heat radiation**. New York: Dover Publications, 1959, p. 10 (Original de 1914).

<sup>74</sup> Citado em Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 5.

<sup>75</sup> Adiabática é uma superfície que não permite a passagem de radiação térmica.

<sup>76</sup> Acreditamos que o objetivo da equivalência proposta por Kirchhoff entre corpo negro e a radiação de cavidade tenha sido feita com o intuito de facilitar o tratamento matemático do estudo do corpo negro, assim como também talvez facilitar a experimentação ou mesmo fazer a analogia com os fornos. Essa equivalência é importante. Ela facilita o cálculo, pois no interior da cavidade é possível obter os modos estacionários da radiação eletromagnética, de maneira que é possível quantificar a densidade de energia em suas paredes e consequentemente a sua emissão.

<sup>77</sup> G. L. Trigg., **op. cit.**, nota 70, p. 7.

Essa radiação é parcialmente absorvida pelo corpo. A fração de energia absorvida com comprimento de onda  $\lambda$  pelo corpo ( $a_\lambda$  = poder absorvente) depende da temperatura, assim como da composição do material da superfície do corpo não negro. No equilíbrio, as taxas de energia emitida e absorvida pelo corpo devem ser iguais. Assim, sendo  $R_{\lambda C}$  a radiância espectral do corpo, temos:

Taxa de emissão ( $t, \lambda, A$ ) = Taxa de absorção ( $t, \lambda, A$ ),

$$R_{\lambda C} = a_\lambda R_\lambda \quad (2)$$

Agora, suponha que na mesma cavidade é colocado um corpo negro. Nesse caso, a radiação emitida pela cavidade será totalmente absorvida pelo corpo negro (pois, por sua definição,  $a_{\lambda CN} = 1$ ). Assim o balanço de energia, como foi feito no caso anterior, fica:

$$R_{\lambda CN} = R_\lambda \quad (3)$$

Esse resultado mostra que a emissão de radiação no interior da cavidade é equivalente à emissão de um corpo negro.

Utilizando os resultados das equações (2) e (3), temos que <sup>78</sup>:

$$R_{\lambda CN} = F(T, \lambda) = R_{\lambda C} / a_\lambda \quad \text{ou} \quad R_{\nu CN} = \varphi(T, \nu) \quad (4)$$

---

<sup>78</sup> Note que a essência desse resultado pode também ser extraído diretamente da lei de Kirchhoff [equação (1)] fazendo-se  $a_{\lambda CN} = 1$ . Essa formulação evidencia outra característica importante dos corpos negros, a de que a sua emissão independe da sua composição, já que o poder absorvente do corpo negro (grandeza que “carrega” a informação do material) tem valor fixo igual a 1.

Uma interpretação do trabalho de Kirchhoff “Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht” sobre a definição do corpo negro e a equivalência da radiação de corpo negro e radiação de cavidade, bem com a reprodução do texto original, é apresentada por Hans-George Schöpf. **Von Kirchhoff bis Planck.** Theorie der Wärmestrahlung in historisch-kritischer Darstellung. Braunschweig: Vieweg, 1978, p. 11-28 e p. 131-151.

## 2.6 Primeiros resultados: a lei de Stefan-Boltzmann e as leis de Wien

Em 1865, John Tyndall (1820-1893) apresentou um trabalho no qual utilizava um fio de platina aquecido a duas temperaturas diferentes. Ele concluiu que a emissão total de radiação do fio a 1200°C era cerca de 11,7 vezes maior que a emissão a 525°C.

Já em 1879, Josef Stefan (1835-1893), extraiu desses resultados de Tyndall<sup>79</sup> que a emissão era proporcional a  $T^4$  (medida em Kelvin). Essa derivação foi acidental, pois além de puramente empírica, foi baseada em apenas dois dados, e o fio aquecido não correspondia a um corpo negro. Segundo Jammer<sup>80</sup>, uma repetição moderna do experimento de Tyndall forneceu como resultado uma razão de 18,22 ao invés de 11,7.

Posteriormente, em 1884, C. Christiansen (1843-1893) sugeriu que pequenos buracos produzidos em cavidades isotérmicas funcionariam como radiadores de corpo negro, isto é, agiriam como pequenos pontos completamente negros.

Nesse mesmo ano, Ludwig Boltzmann (1844-1906), usando considerações termodinâmicas e eletromagnéticas para o estudo da cavidade, mostrou que a densidade de energia desta deveria ser proporcional a  $T^4$ , formalizando assim o resultado empírico obtido anos antes por Stefan.

Para chegar a esse resultado Boltzmann partiu da noção de que a pressão da radiação ( $P$ ) seria proporcional à densidade de energia<sup>81</sup>. De acordo com a teoria de Maxwell e a estatística de Krönig (1822-1879), Boltzmann chegou à conclusão de que  $P = 1/3 \mu$  (sendo  $\mu$  a densidade de energia radiante) e de que ao se variar o volume da cavidade, haveria variação da temperatura

---

<sup>79</sup> Sérgio Arruda, que consultou o original de Stefan, descreve que esse resultado foi obtido “*analisando as observações sobre a taxa de esfriamento de um grande termômetro de mercúrio colhidas por Dulong e Petit*”. Sérgio Arruda. **Dificuldades no ensino do problema da radiação do corpo negro**. In: 44ª Reunião Anual da SBPC, Resumos, 1992, p. 563.

Sugestão de leitura complementar sobre as contribuições de Stefan, Tyndall e Boltzmann para a consolidação da lei que ficou conhecida como a “lei Stefan-Boltzmann” para a radiação de corpo negro: Simonyi, K. **A Cultural History of Physics**. Boca Raton, FL, EUA: CRC Press, 2012 (cap. 5).

<sup>80</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 6.

<sup>81</sup> Boltzmann usou para a dedução teórica da lei de Stefan o resultado de A. Bartoli, físico italiano, que chegou à conclusão de que a radiação exerce pressão. Em uma experiência de pensamento, Bartoli imaginou que num processo cíclico, com a ajuda de espelhos, podia-se transferir o calor na forma de radiação de um corpo frio para um corpo quente. Uma vez que a transferência de calor exige a produção de trabalho (2ª lei da termodinâmica), ele concluiu que a radiação deveria, necessariamente, exercer uma certa pressão (Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 7).

e realização de trabalho. Associando esse “gás de radiação”<sup>82</sup> à temperatura  $T$  e pressão  $P$ , ele chegou<sup>83</sup> (já utilizando uma notação mais moderna) a

$$\mu = \kappa T^4 \quad (5)$$

sendo  $\kappa$  uma constante de proporcionalidade.

Conforme mostrado no **Anexo II**:

$$\mu = \frac{4\phi}{c} \quad (6)$$

em que  $\phi$  representa o fluxo (energia por área e por tempo) de radiação que atinge as paredes da cavidade. A partir deste resultado Boltzmann chegou à seguinte formulação:

$$\phi = \sigma T^4 \quad (7)$$

Com a consideração de que as paredes do corpo negro estão em equilíbrio, o fluxo de radiação deve ser igual à radiância total<sup>84</sup>  $R$  da superfície. Portanto:

$$R = \sigma T^4 \quad (8)$$

conhecida hoje como **a lei de Stefan-Boltzmann**<sup>85</sup>.

Utilizando uma linguagem e desenvolvimentos mais modernos vamos tomar o brilho  $B_\nu = B(\nu, T)$  como a energia emitida por unidade de frequência no intervalo de  $\nu$  a  $\nu + d\nu$ , por unidade de área, por unidade de ângulo sólido e por unidade de tempo na direção normal à superfície no interior de um corpo negro à temperatura  $T$ . A intensidade de radiação  $K_\lambda = K(\lambda, T)$ <sup>86</sup> é análoga ao brilho, no entanto a análise é para intervalo de comprimentos de onda. Note que, pela definição,  $R_{\lambda CN}$  é proporcional a  $K_\lambda$  que correspondentemente é proporcional a  $B_\nu$ . Dessa maneira restringiremos a busca pela equação do corpo negro à busca por  $B_\nu$  (ou  $K_\lambda$ ).

<sup>82</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 7.

<sup>83</sup> Uma interpretação do desenvolvimento de Boltzmann está apresentado no **Anexo II**, ao final deste capítulo.

<sup>84</sup> A radiância total é a integral da radiância espectral em todas as frequências, ou seja  $R = \int R_\nu d\nu$ .

<sup>85</sup> É importante observar, como aponta Fleming (**op. cit.**, nota 61, p. 7), que a “*existência da pressão de radiação, e a veracidade das fórmulas de Maxwell, só viriam a ser comprovadas experimentalmente em 1905, por Lebedev*”.

<sup>86</sup> Como algumas bibliografias utilizam  $B_\nu$  e outras utilizam  $K_\lambda$ , procuraremos ao longo do texto utilizar as duas notações, utilizando como principal  $B_\nu$ . Note que  $B_\nu = B(\nu, T)$  é proporcional a  $K_\lambda = K(\lambda, T)$ , já que  $\lambda\nu = c$ . Como

$B_\nu d\nu = -K_\lambda d\lambda$ , com  $d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$ , assim  $B_\nu = \frac{\lambda^2}{c} K_\lambda$ .

Para uma leitura complementar sobre a relação entre as grandezas “brilho” ( $B_\nu$ ) e “intensidade” ( $K_\lambda$ ) da radiação, ver também: Floyd Karker Richtmyer, **op. cit.**, nota 62, cap. VII.

O primeiro físico a fornecer uma tentativa coerente de análise teórica, obtendo uma função de distribuição espectral para a radiação de corpo negro, foi Wilhelm Wien (1864-1928), em 1894. Ele inicialmente apenas esboçou a forma desta função, baseando-se nas considerações termodinâmicas e eletromagnéticas de Boltzmann, chegando à expressão:

$$B_\nu = \nu^3 \varphi\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad \text{ou} \quad K_\lambda = \lambda^{-5} f(\lambda T) \quad (9)$$

Ou seja, a partir do conhecimento da emissão (espectro) de um corpo negro  $f(\lambda T)$ <sup>87</sup>, e do conhecimento do poder absorvente<sup>88</sup>  $a_\lambda$  de um dado corpo, sua emissão espectral  $R_{\lambda C}$  podia então ser conhecida<sup>89</sup>. A partir desse resultado passou então a ser muito importante a determinação tanto teórica como experimental da radiação de corpo negro, ou seja,  $f(\lambda T)$ . Era, portanto, um bom exercício de aplicação do paradigma dominante, podendo ampliar ainda mais seu espaço de explicação do mundo físico.

---

<sup>87</sup> Função universal que dependia apenas da temperatura e do comprimento de onda.

<sup>88</sup> Ainda que este dependa do comprimento de onda e da temperatura.

<sup>89</sup> Experimentalmente falando é mais simples o processo reverso, ou seja, aquele que busca conhecer a poder absorvente dos materiais ( $a_\lambda$ ) através do conhecimento da função de distribuição do corpo negro e da determinação de  $R_{\lambda C}$ .

Cabe aqui uma reflexão conceitual e epistemológica. Embora aparentemente a determinação dessa função se mostrava fácil, e teoricamente exigiria apenas a perícia de um cientista habilidoso, não foi isso o que aconteceu e várias tentativas não lograram êxito durante o final do século XIX.

No entanto esse problema não era considerado de muita gravidade na época, ao contrário do que muitos autores apontam. Atualmente, denominamos a tentativa de solução deste como o Problema da Radiação do Corpo Negro (PRCN). Sua importância está no fato de que esse problema se mostrou como uma anomalia cuja solução não se encaixava no escopo da física clássica. Após longa revolução científica uma nova visão de mundo (paradigma) foi estabelecida: a física quântica. Ou, poderíamos dizer que isso possibilitaria a refutação da teoria clássica levando à proposição de hipóteses teóricas que permitiriam a dedução afirmativa e previsões possíveis de serem submetidas aos rigores dos testes de refutabilidade.

Voltemos a Wien. Ele notou que se fosse reduzido o volume da cavidade, como num pistão em movimento, a densidade de energia na cavidade aumentaria, já que a radiação exerceria pressão sobre o pistão, havendo assim realização de trabalho durante a compressão. Também o movimento das paredes da cavidade ocasionaria uma mudança no comprimento de onda da radiação refletida por efeito Doppler, já que neste caso há uma fonte luminosa (as paredes da cavidade) em movimento.

Portanto, Wien concluiu que a mudança de temperatura também altera a distribuição dos comprimentos de onda, de forma que a temperatura sempre está associada com o comprimento de onda.

Conforme descreve Trigg<sup>90</sup>:

---

<sup>90</sup> Toda essa discussão sobre a lei de Wien está exposta em Trigg, **op. cit.**, nota 70, p. 8-9. Uma interpretação do trabalho de Wien “Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie”, bem com a reprodução do texto original, é apresentada por Hans-George Schöpf, **op. cit.**, nota 78, p. 36-44 e p. 156-165.

“As conseqüências quantitativas disto eram duplas. Primeiro, se são feitas comparações de coisas dependentes do comprimento de onda em duas temperaturas diferentes, não é exato comparar valores no mesmo comprimento de onda. Em lugar disso, ao se trabalhar na temperatura  $T'$ , deve-se usar para comparação com o comprimento de onda  $\lambda$  na temperatura  $T$  um comprimento de onda  $\lambda'$  dado por:

$$\lambda' T' = \lambda T.$$

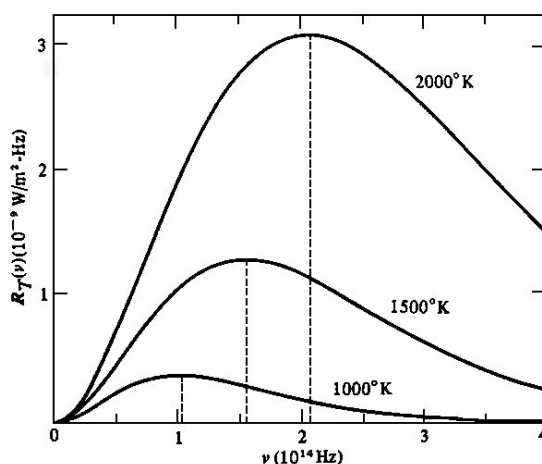
Em segundo lugar, as emitâncias espectrais [equivalente no nosso texto a  $K_\lambda$ ] para comprimentos de onda correspondentes nesta maneira variam com a temperatura de acordo com a relação:

$$K_\lambda / K_{\lambda'} = T'^5 / T^5 \quad (10)$$

Particularmente, se  $K_\lambda$  (para uma temperatura fixa  $T$ ) tem um valor máximo  $K_{\lambda_{\max}}$  no comprimento de onda  $\lambda_{\max}$ , então os valores de  $K_{\lambda_{\max}}$  para várias temperaturas satisfazem a relação cujo resultado é conhecido como **lei do deslocamento de Wien**:

$$\lambda_{\max} T = \text{constante} \quad \text{ou} \quad \frac{\nu_{\max}}{T} = \text{constante} \quad (11)$$

Essa lei, portanto, expressa o fato de que para a distribuição espectral de corpo negro, com o aumento da temperatura, a emissão será máxima para uma frequência maior e vice-versa, e com isso as curvas se “deslocam” no gráfico. A ilustração abaixo (**Figura 3**) nos permite visualizar o resultado desta lei.



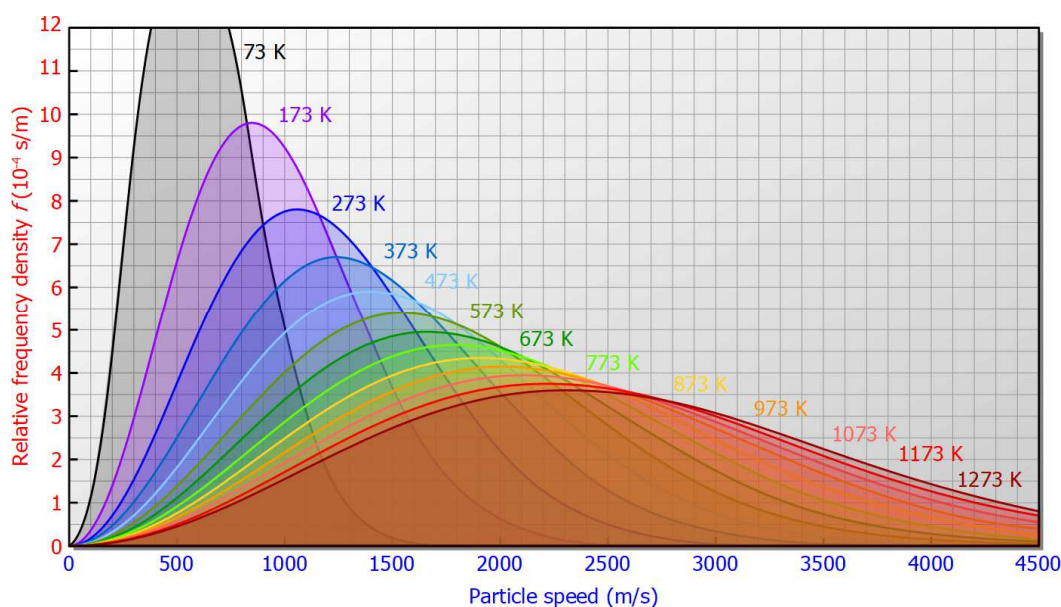
**Figura 3 – Visualização da lei do deslocamento de Wien.**

Fonte: Robert Eisberg e Robert Resnick. **Física quântica**. Rio de Janeiro: Campus, 1994, p. 21

Apesar de Wien não ter notado, segundo Trigg (1971), essa lei implica na expressão (9). Isso pode ser observado através do cálculo do máximo dessa função. Faça isso para verificar o resultado!

Esse desenvolvimento de Wien facilitou a procura pela resolução do problema da radiação de corpo negro para a função  $\phi\left(\frac{v}{T}\right)$  [ou  $f(\lambda T)$ ]. Contudo, essa procura começou a se mostrar difícil.

Albert Abraham Michelson (1852-1931), em 1887, tentou resolver o problema por considerações estatísticas. Ele assumiu que a fórmula de Maxwell para a distribuição de velocidades de moléculas de um gás também valeria para as moléculas do sólido que emitia a radiação do corpo negro, dada a semelhança entre as curvas de emissão da radiação e as curvas de distribuição de velocidade em um gás. Isso pode ser facilmente verificado comparando-se as curvas da **Figura 3** com as da **Figura 4**.



**Figura 4 – Distribuição de Maxwell para as velocidades das moléculas de um gás.**

Fonte: <<https://www.tec-science.com/wp-content/uploads/2019/02/en-temperature-maxwell-boltzmann-distribution-temperatures.png>>

Posteriormente, em 1896, Wien, influenciado pelo trabalho de Michelson, assumiu que a frequência da radiação emitida por qualquer molécula do corpo negro era uma função da sua

velocidade e aplicando a distribuição de Maxwell-Boltzmann (e, portanto, a mecânica estatística), chegou a uma expressão que, embora baseada em argumentos duvidosos, foi verificada experimentalmente em 1897 e 1899, exceto na região do visível (grandes comprimentos de onda) e temperaturas de até 4000° C. Esse resultado ficou conhecido como a **lei de Wien** e teve boa acolhida experimental para a época:

$$K_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} e^{\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right)} \quad \text{ou} \quad B_{\nu} = \eta \nu^3 e^{\left(-\frac{\beta \nu}{T}\right)}$$

$$\Rightarrow \mu_{\nu} = \alpha \nu^3 e^{\left(-\frac{\beta \nu}{T}\right)} \quad (12)$$

Com  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $c_1$  e  $c_2$  constantes.

Em uma série de papers, entre 1897 e 1899, Planck derivou essa lei através de um desenvolvimento termodinâmico, o qual será discutido no próximo capítulo. Essa nova formulação acabaria ganhando a denominação de lei de Wien-Planck.

Em 1900, Planck solucionou o problema da radiação do corpo negro construindo uma equação que se ajustava perfeitamente com os dados experimentais conhecidos, particularmente aqueles produzidos no decorrer desse ano. No entanto, ao contrário de sua expectativa, a derivação da equação não se encaixava na física clássica, como veremos no próximo capítulo.

Do ponto de vista de uma análise epistemológica, com base nos autores que estudamos na primeira parte, poderíamos formular algumas perguntas equivalentes. Teríamos nessa passagem uma refutação da teoria clássica? A presença de um obstáculo epistemológico? Ou seria uma anomalia que provoca uma crise científica? Ou, então, um convite à proliferação de teorias incomensuráveis?

## 2.7 Alguns desenvolvimentos experimentais envolvendo os primeiros resultados do estudo da radiação do corpo negro

Em 1880, Samuel Pierpoint Langley (1834-1906), quando desenvolvia o estudo da absorção atmosférica da radiação solar, construiu o bolômetro<sup>91</sup>, que era um instrumento apropriado para medir a energia radiante. Esse aparelho mede a radiação incidente que é absorvida por dois fios escurecidos de platina colocados em lados opostos de uma ponte de Wheatstone; com o aumento da temperatura do fio, este tem o valor de sua resistência alterado. Logo empregado na espectroscopia, o bolômetro só teve importância fundamental para o estudo da radiação de corpo negro após o desenvolvimento de fontes de radiação adequadas.

O estudo experimental da radiação do corpo negro foi realmente efetivado com o uso do bolômetro combinado à primeira cavidade isotérmica desenvolvida por Otto Lummer e Wilhem Wien em 1895.<sup>92</sup>

Com esses melhoramentos, as investigações sobre a radiação do corpo negro espalharam-se por diversos centros de pesquisa, particularmente no *Physikalische-Technische Reichsanstalt* de Berlin, fundado em 1884, onde Lummer, E. Pringsheim, L. Holborn e Heinrich Rubens, entre outros, dedicaram-se aos estudos experimentais desse problema que, como todos esperavam, a física clássica teria condições de resolver satisfatoriamente.

A confirmação da lei de Stefan-Boltzmann foi obtida em 1897 por vários pesquisadores: F. Paschen, O. Lummer, E. Pringheim, C. E. Mendenhall e F. A. Saunders.

Lummer e Ernst Pringsheim (1859-1925), em Charlottenburg, Alemanha, utilizaram e ampliaram a noção de equivalência entre a radiação de cavidade e a radiação de corpo negro, utilizando uma cavidade com um furo pequeno comparado com as dimensões das paredes. Qualquer radiação que penetra por esse buraco, tem uma probabilidade muito pequena de sair, sofrendo assim múltiplas reflexões nas paredes dessa cavidade, com alguma taxa de absorção. Dessa forma é possível dizer que toda radiação incidente é absorvida pelo corpo, e esse se mostra

---

<sup>91</sup> Cujá denominação é derivada da expressão grega “ $\beta\omicron\lambda\eta$  = feixe de luz” (Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 5, nota 15).

<sup>92</sup> Segundo Max Jammer (**op. cit.**, nota 50, p. 6), ambos se basearam no teorema da cavidade de Kirchhoff para a construção desse “corpo negro experimental”.

uma boa aproximação de um corpo negro. Portanto, pode-se usar a radiação oriunda do interior da cavidade e que passa pelo furo como uma amostra de radiação de corpo negro<sup>93</sup>.

“Foram usadas duas cavidades, uma de cobre, para temperaturas acima de 877 K, e uma de ferro, para temperaturas entre 799 e 1561 K. A cavidade de cobre foi imersa em uma mistura fundida de nitrato de sódio e nitrato de potássio; a temperatura do banho podia ser mantida constante dentro no intervalo de um ou dois graus, durante meia hora, pelo controle de uma fonte de gás incandescente. A cavidade de ferro era aquecida por meio de um forno especial de paredes duplas (...). Temperaturas de até 755 K eram medidas por meio de termômetros de mercúrio; temperaturas superiores, eram medidas por um termopar.”<sup>94</sup>

Lummer e Pringsheim então passaram a especular sobre a dependência da emissão espectral do corpo negro em função do comprimento de onda em uma dada temperatura, ou seja, procuraram obter as curvas de distribuição espectral. Os resultados foram publicados em uma série de artigos entre 1899 e 1900. Os procedimentos de medida eram os mesmos, mas agora eles utilizavam um prisma antes de medir a energia, espalhando a luz e fazendo uma varredura das frequências.

“(…) Várias cavidades foram usadas com temperaturas entre 85 e 1800 K. As temperaturas mais baixas foram conseguidas pela imersão em ar líquido (85 K), água fervente (373 K) e nitrato de potássio fundido (por volta de 600 K, dependendo da composição exata). Altas temperaturas, acima de 1800K, foram obtidas por aquecimento elétrico.”<sup>95</sup>

Os comprimentos de onda estudados variavam de 1 a 18 microns, região espectral na qual o vapor de água e o dióxido de carbono, presentes na atmosfera, absorvem fortemente certos comprimentos de ondas, especialmente em 1.8, 2.7 e 4.5 microns. Isso dificultava as medidas. Para resolver o problema

---

<sup>93</sup> G. L. Trigg., **op. cit.**, nota 70, p. 11.

<sup>94</sup> G. L. Trigg., **op. cit.**, nota 70, p. 12-13.

<sup>95</sup> G. L. Trigg., **op. cit.**, nota 70, p. 13.

“eles fecharam o espectrômetro e o bolômetro em um container no qual o ar foi secado e quimicamente purificado de dióxido de carbono, de forma que a necessária correção foi grandemente reduzida.”<sup>96</sup>

Uma outra complicação adicional vem do fato de que experimentalmente é sempre necessária a certificação de que apenas a radiação de interesse estava atingindo o bolômetro.

No primeiro artigo sobre essas medidas, Lummer e Pringsheim procuraram medir apenas o  $K_{\lambda \max}$  e o  $\lambda_{\max}$  com o intuito de verificar a lei de deslocamento de Wien.

Posteriormente eles compararam seus resultados experimentais com a lei de Wien. Inicialmente construíram as curvas da energia em função do comprimento de onda para várias temperaturas. Embora a concordância com a curva teórica de Wien parecesse satisfatória à primeira vista, eles testaram os dados experimentais de outra forma. Com a formulação de Wien (equação (12)),

$$K_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} e^{\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right)}$$

Tomando o logaritmo<sup>97</sup> de ambos os lados temos:

$$\log K_{\lambda} = \log (c_1 \lambda^{-5}) - (c_2/\lambda T) \log e$$

Ou seja:

$$\log K_{\lambda} = \log (c_1 \lambda^{-5}) - [(c_2/\lambda) \log e] (1/T)$$

Ou, reescrevendo da seguinte forma:

$$F(x) = C_a + C_b x$$

com  $F(x) = \log K_{\lambda}$

$$C_a = \log (c_1 \lambda^{-5})$$

$$C_b = - [(c_2/\lambda) \log e]$$

$$x = 1/T$$

obtém-se a equação de uma reta.

---

<sup>96</sup> G. L. Trigg., **op. cit.**, nota 70, p. 14.

<sup>97</sup> É necessário tomar cuidado com bibliografias estrangeiras, pois em geral é tomado log como sinônimo de ln. Aqui log é o logaritmo na base 10.

Assim, Lummer e Pringsheim construíram a curva de  $\log K_\lambda$  (para um  $\lambda$  fixo) em função de  $1/T$ , a fim de procurar obter retas.

“(…) A natureza dos argumentos usados para deduzir a fórmula de Wien era tal que a quantidade  $c_2$  deveria ser uma constante da natureza, enquanto  $c_1$  poderia variar de uma série de observações para outra, mas deveria ser constante através de qualquer série [isto é,  $c_1$  “carrega” informação do material].”<sup>98</sup>

Em outro trabalho, Lummer e Pringsheim apresentaram curvas isocromáticas que pareciam linhas retas, mas os valores de  $c_1$  e  $c_2$  variavam com o comprimento de onda. Ambos se puseram em dúvida sobre a validade da equação de Wien. Apenas num terceiro trabalho a evidência ficou óbvia. Eles concluíram firmemente que a lei de Wien-Planck era inválida.

## 2.8 O teorema da equipartição da energia

Em 1845, J. J. Waterston (1811-1883) escreveu um artigo que, anos mais tarde, seria considerado como uma “*pedra fundamental de um novo ramo do conhecimento científico*”. Tratava-se do artigo **Sobre a física dos meios que são compostos de moléculas livres e perfeitamente elásticas num estado de movimento** em que concluía que “*num meio misto a velocidade quadrática média é inversamente proporcional ao peso específico das moléculas*”<sup>99</sup>.

Max Jammer acrescenta que esse artigo não havia sido aceito para publicação pela Royal Society, recebendo um parecer que, entre outras avaliações, afirmava que o mesmo “*era uma tolice imprópria até para leitura perante a Sociedade*”. O artigo só foi publicado em 1892, quarenta e sete anos após sua apresentação, devido à insistência de Lord Rayleigh que escreveu as seguintes palavras na introdução ao mesmo:

---

<sup>98</sup> G. L. Trigg., **op. cit.**, nota 70, p. 17.

<sup>99</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 12.

“A omissão em publicá-lo à época foi uma infelicidade que provavelmente atrasou o desenvolvimento da matéria por dez ou quinze anos.”<sup>100</sup>

Entretanto, como estava seguro da importância do seu trabalho, Waterston passou a circulá-lo pessoalmente entre os cientistas.

Cinco anos depois, uma curta passagem de seu texto foi lida no 21º encontro da Associação Britânica, em que dizia que o “*equilíbrio de pressão e calor entre dois gases ocorre quando o número de átomos em unidade de volume é igual, e a vis viva de cada átomo é igual*”.<sup>101</sup> Desta forma, um tanto quanto disfarçada, o **teorema da equipartição de energia**<sup>102</sup> começava a ser enunciado na pesquisa em física.

Em 1860, Maxwell (provavelmente ciente do trabalho de Waterston) havia dado sua primeira formulação do teorema da equi-partição da energia: “*dois diferentes conjuntos de partículas distribuirão suas velocidades, assim que suas vires vivae forem iguais*”.<sup>103</sup>

Inicialmente o resultado de Maxwell só incluía partículas perfeitamente esféricas e posteriormente ele estendeu seu enunciado para o caso de uma mistura de partículas de qualquer forma, além de incluir a rotação.

Em 1868, Boltzmann generalizou o teorema para partículas que não necessariamente fossem rígidas, mas tinham um número interno de graus de liberdade, como, por exemplo, a vibração.

Também Maxwell removeu certas restrições na interação entre as partículas e mostrou, usando coordenadas Lagrangianas para sistemas com um número arbitrário de graus de liberdade, que a equipartição de energia acontece se

“(...) os pontos materiais podem atuar em todas as distâncias e de acordo com qualquer lei consistente com a conservação de energia. A única suposição que é necessária para a prova

---

<sup>100</sup> Citado por Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 13.

<sup>101</sup> Ibidem. A palavra *vis viva*, ou força viva, carrega de certa maneira o sentido de energia cinética, energia de um corpo em movimento. Esse termo era usado em oposição a *vis morta*, associada a um corpo parado no ponto mais alto (energia potencial).

<sup>102</sup> O **teorema da equipartição de energia** diz que num conjunto composto por um grande número de partículas individuais, que se movimentam ao acaso trocando energia entre si através de colisões, a energia total nele contida é igualmente partilhada, em média, por todas as partículas. Ou seja, se a energia total é  $E$  e se há a presença de  $N$  partículas, a energia média de cada partícula será  $E/N$ .

<sup>103</sup> Ibidem, p. 13.

direta é que o sistema, se deixado neste estado em movimento, irá, mais cedo ou mais tarde, passar através de cada fase que é consistente com a equação de energia.”<sup>104</sup>

Dessa maneira, no final do século XIX, o teorema da equipartição de energia “estava no ar” e muitos artigos se ocupavam com esse assunto. Mas havia ainda sérios problemas para efetivar sua compreensão e aceitação desse teorema, principalmente por que não se encaixava nos dados experimentais de calor específico para um gás.<sup>105</sup> E talvez justamente por não estar consolidado e por não fazer parte do programa de pesquisa de Planck, é que este não o utilizou em sua solução para o PRCN, embora muitos textos didáticos teimem em afirmar o contrário (ou simplesmente induzam o leitor a assim interpretar).

## 2.9 O desenvolvimento de Rayleigh e a correção de Jeans

Em junho de 1900, Lord Rayleigh tentou resolver o PRCN utilizando o teorema da equipartição de energia. Ele partiu do pressuposto de que na cavidade estariam dispersas ondas estacionárias somente com frequências fixas, determinadas pela geometria da caixa, ou seja, a radiação poderia vibrar somente em frequências fixas determinadas pelo seu comprimento.

Dessa maneira a radiação na cavidade deveria ser composta pela superposição de ondas estacionárias possíveis dentro desta. Seria assim necessário efetuar o cálculo do número de diferentes modos de vibração de ondas estacionárias com comprimento de onda entre  $\lambda$  e  $\lambda+d\lambda$  por unidade de volume que poderia existir na cavidade. De acordo com a lei de equipartição de energia, cada um desses modos de vibração deve ter a mesma energia média.

Essas considerações levaram Rayleigh à construção de sua equação (com  $k_1$  e  $k_2$  constantes):

$$K_\lambda = k_1 T \lambda^{-4} \quad \text{ou} \quad B_\nu = k_2 \nu^2 T \quad (13)$$

---

<sup>104</sup> Ibidem, p. 14.

<sup>105</sup> Esse problema só seria solucionado com o advento da física quântica.

Seu resultado não era coerente com os resultados experimentais para pequenos comprimentos de onda, pois a curva diverge ao infinito para altas energias, ou seja, há uma tendência ilimitada para as altas frequências. Por outro lado, Rayleigh também observara que sua expressão, quando aplicada ao limite de longos comprimentos de onda, aproximava-se dos resultados previstos pela expressão de Planck, que ainda estudaremos no próximo capítulo. Na verdade, os resultados de aplicação da expressão de Rayleigh eram, nesse intervalo de comprimento de onda, cerca de oito vezes maiores que os previstos pela expressão de Planck.

Procurando melhorar essa situação, J. H. Jeans, em 1905, apontou algumas incorreções no trabalho de Rayleigh como, por exemplo, o fato deste ter introduzido nos seus cálculos vetores de onda com componentes positivas e negativas que foram responsáveis por essa resposta oito vezes maior, detectada por Jeans. Ele corrigiu o modelo proposto por Rayleigh, chegando à expressão:

$$K_\lambda = (8\pi/\lambda^4)kT \quad \text{ou} \quad \beta_\nu = (8\pi\nu^2/c^3)kT, \quad (14)$$

que ficou conhecida como **equação ou fórmula de Rayleigh-Jeans** para a radiação do corpo negro.

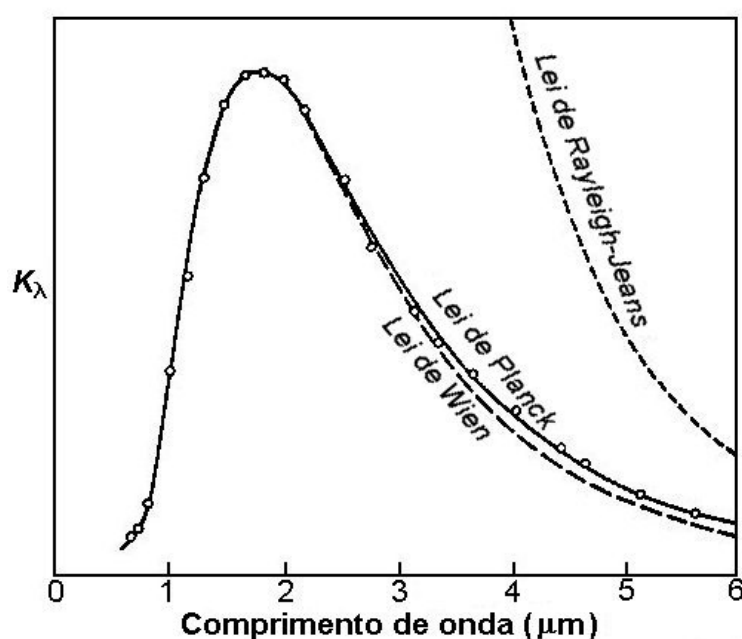
Nessa dedução, tanto Rayleigh quanto Jeans utilizaram exclusivamente o princípio da equipartição de energia associado à condição de equilíbrio da radiação representada por ondas estacionárias dentro de uma cavidade. Ou seja, eles calcularam o número e modos de oscilações eletromagnética livres por unidade de volume da cavidade e por unidade de comprimento de onda, para um determinado  $\lambda$ , dando  $8\pi/\lambda^4$ . Considerando, de acordo com o princípio da equipartição, que a energia média correspondente a cada modo de vibração é a igual a  $kT$ , este valor multiplicado por aquele número dá a densidade de energia em termos do comprimento de onda, que é exatamente a expressão da equação (14).<sup>106</sup>

Fica claro dessa descrição do procedimento de Rayleigh e de Jeans que em momento algum eles levaram em consideração a interação da radiação com a matéria, ao contrário do método adotado tanto por Wien quanto por Planck.

---

<sup>106</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 16-17.

A **Figura 5** apresenta a curva teórica correspondente à expressão de Rayleigh-Jeans. Duas observações podem ser feitas aqui: em primeiro lugar, nota-se que a curva diverge para o infinito para pequenos comprimentos de onda, isto é, pela predição teórica desse modelo haveria uma espécie de corrida para as altas frequências, ou seja, em direção ao ultravioleta, daí esta previsão, não verificada experimentalmente, passar a ser conhecida como **catástrofe do ultravioleta**<sup>107</sup>; em segundo lugar, a integral sob a curva, isto é, a radiância total, também é infinita, o que mais uma vez evidencia a limitação do modelo clássico. Deve-se acrescentar que, naquela época, 1905, o modelo de Planck também ganharia o adjetivo “clássico”.



**Figura 5 – Pontos experimentais e leis de radiação.**

Fonte: F. K. Richtmyer et al. **Introduction to modern physics**. New York: McGraw-Hill, 1955

Vale a pena repetir a observação que George Gamow fez sobre essa suposta tendência prevista pela fórmula de Rayleigh:

<sup>107</sup> No livro **Treinta años que conmovieron la física**, Gamow (op. cit., nota 40) sugeriu uma analogia da radiação do corpo negro, analisada segundo o modelo do cubo de Jeans, em que uma luz vermelha se converteria até na radiação gama, como a batida de uma única nota em um piano de cauda de teclado infinito que permitisse a tênue propagação sonora até a região ultrassônica.

“(...) a energia de uma luz vermelha introduzida no cubo de Jeans se converteria em raios azuis, violetas, ultravioletas, X, gama, etc, sem limitação alguma de comprimento de onda. Em verdade, permanecer sentado diante de um forno aceso se converteria então em exibicionismo estúpido, pois o agradável resplandecer avermelhado proveniente das lenhas que tão acolhedoramente ardem se transformaria rapidamente em uma perigosa radiação de altíssima frequência como a emitida pelos produtos da fissão do urânio.”<sup>108</sup>

Vamos finalizar esta seção com alguns breves comentários sobre os trabalhos de Rayleigh e Jeans sobre o PRCN.

Segundo Whitaker, Rayleigh não calculou, em sua formulação, a constante de proporcionalidade, pois para ele era evidente que sua expressão não era satisfatória. Ele apenas sugeriu que poderia “*incluir um fator exponencial de corte para levar a resultados sensatos.*”<sup>109</sup>

Como foi destacado anteriormente a designação da tendência para o infinito para valores grandes de frequência como catástrofe do ultravioleta veio apenas em 1911. Contudo, na época da publicação, o artigo de Rayleigh não chamou muito a atenção e não existia sentido trágico algum com relação aos resultados discrepantes. Num artigo que faz uma avaliação crítica da equação de Rayleigh-Jeans, Kragh endossa essa conclusão crítica ao afirmar que:

“(...) Apesar do seu proeminente papel nos livros-textos de física, a fórmula [de Rayleigh-Jeans] não atuou em nenhuma parte de toda a fase originária da teoria quântica. Planck não aceitou o teorema da equipartição como fundamental, e portanto ignorou-o. Provavelmente nem Rayleigh nem Jeans consideravam o teorema universalmente válido. A “catástrofe do ultravioleta” (...) apenas transformou-se num assunto de discussão numa fase posterior da teoria quântica.”<sup>110</sup>

Segundo Klein<sup>111</sup> (1966), para Jeans não deveria haver um equilíbrio termodinâmico da radiação, o que explicaria a inabilidade de se resolver o problema da radiação do corpo negro com o teorema da equipartição de energia.

---

<sup>108</sup> George Gamow, **op. cit.**, nota 40, p. 33.

<sup>109</sup> M. A. B. Whitaker, **op. cit.**, nota 21, p. 109.

<sup>110</sup> Helge Kragh. Max Planck: the reluctant revolutionary. **Physics World**, v. 13, n. 12, p. 33, 2000.

<sup>111</sup> Martin J. Klein. Thermodynamics and quanta in Planck's work. **Physics Today**, v. 19, n. 11, p. 23, 1966.

O próprio James Jeans, em sua curta descrição a respeito da teoria dos quanta, não mencionava a contribuição de Lord Rayleigh e nem mesmo a correção que ele próprio realizou.<sup>112</sup>

Pela brevíssima retrospectiva de diversas tentativas de resolver o problema da radiação do corpo negro classicamente, que atinge o ano de 1905, acima apresentada, percebemos que eram utilizados três campos teóricos clássicos dominantes: a termodinâmica, o eletromagnetismo e a mecânica estatística.

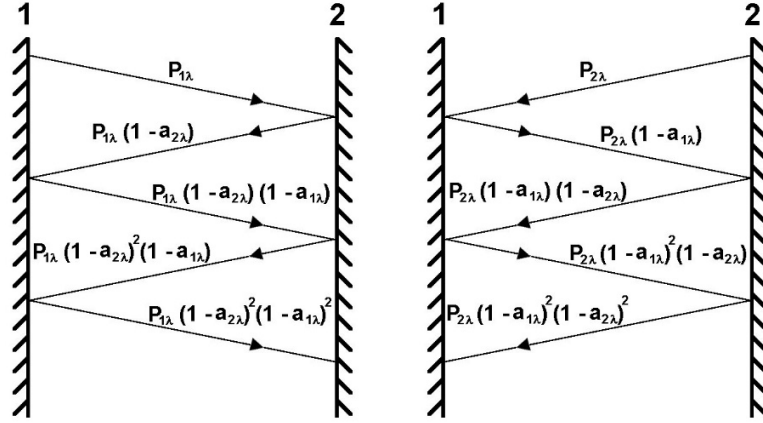
Neste ponto, finalmente, podemos introduzir o principal personagem desta breve discussão dessa construção que nos leva ao surgimento da física quântica: Max Planck. Ele, que já era um físico veterano quando se propôs a estudar o problema da radiação do corpo negro, dedicou boa parte da sua carreira de físico estudando esses três campos clássicos da física, acima mencionados. Dentre esses campos, Planck escolheu dedicar-se detalhadamente ao estudo da termodinâmica e essa deliberação, como estudaremos no próximo capítulo, foi fundamental para o nascimento da física quântica.

---

<sup>112</sup> James Jeans. **Historia de la física**. México: Fondo de Cultura Económica, 1953.

## Anexo I – Derivação da lei de Kirchhoff

Neste apêndice mostramos como Kirchhoff, através do exemplo de troca de radiação entre duas placas discutido na seção 2.4, chegou à sua lei. Utilizamos o desenho abaixo para ilustrar o exemplo.



Na figura da esquerda mostramos uma onda que é emitida pela placa 1 com poder emissivo  $P_{1\lambda}$ . Após ela interagir com a placa 2, uma fração  $a_{2\lambda}$  será absorvida, de modo que a onda refletida terá poder emissivo  $P_{1\lambda}(1-a_{2\lambda})$ . Assim, a placa 1 absorverá um total de  $P_{1\lambda}(1-a_{2\lambda})a_{1\lambda}$ , enquanto  $P_{1\lambda}(1-a_{2\lambda})(1-a_{1\lambda})$  será refletido, reiniciando o processo. O total de energia absorvida por unidade de tempo pela placa 1 após infinitas reflexões é:

$$\sum_{n=1}^{\infty} P_{1\lambda} a_{1\lambda} (1-a_{2\lambda})^n (1-a_{1\lambda})^{n-1}$$

A figura do lado direito mostra uma sequência semelhante de raios, mas com a onda inicial sendo emitida pela placa 2. Usando o mesmo raciocínio anterior, a potência total absorvida pela placa 1 é:

$$\sum_{n=1}^{\infty} P_{2\lambda} a_{1\lambda} (1-a_{1\lambda})^{n-1} (1-a_{2\lambda})^{n-1}$$

No equilíbrio, a potência emitida deve ser igual à potência absorvida pela placa. Assim:

$$P_{1\lambda} = \sum_{n=1}^{\infty} P_{1\lambda} a_{1\lambda} (1-a_{2\lambda})^n (1-a_{1\lambda})^{n-1} + \sum_{n=1}^{\infty} P_{2\lambda} a_{1\lambda} (1-a_{1\lambda})^{n-1} (1-a_{2\lambda})^{n-1} \quad (1.1)$$

Reescrevendo o lado direito da equação:

$$P_{1\lambda} = (1-a_{2\lambda}) \sum_{n=1}^{\infty} P_{1\lambda} a_{1\lambda} (1-a_{2\lambda})^{n-1} (1-a_{1\lambda})^{n-1} + \sum_{n=1}^{\infty} P_{2\lambda} a_{1\lambda} (1-a_{1\lambda})^{n-1} (1-a_{2\lambda})^{n-1}$$

$$P_{1\lambda} = [P_{1\lambda} a_{1\lambda} (1-a_{2\lambda}) + P_{2\lambda} a_{1\lambda}] \sum_{n=1}^{\infty} (1-a_{2\lambda})^{n-1} (1-a_{1\lambda})^{n-1} \quad (1.2)$$

A somatória da equação anterior representa a soma dos infinitos termos de uma progressão geométrica de razão  $(1-a_{2\lambda})(1-a_{1\lambda})$  e primeiro termo igual a 1. A matemática básica nos fornece o valor  $S_n$  da soma dos  $n$  primeiros termos de uma progressão geométrica cuja razão é  $q$ :

$$S_n = \frac{\text{termo}[n] \cdot q - \text{termo}[1]}{q-1} \quad (1.3)$$

Na expressão acima,  $\text{termo}[n]$  representa o  $n$ -ésimo termo da progressão.

A nossa somatória tem infinitos termos. Como  $\text{termo}[\infty] = [(1-a_{2\lambda})(1-a_{1\lambda})]^\infty = 0$ , o valor da soma será:

$$S_\infty = \frac{-1}{(1-a_{2\lambda})(1-a_{1\lambda})-1} = \frac{-1}{a_{1\lambda}a_{2\lambda} - a_{1\lambda} - a_{2\lambda}} = \frac{1}{a_{1\lambda}(1-a_{2\lambda}) + a_{2\lambda}} \quad (1.4)$$

Voltando a equação (1.2):

$$P_{1\lambda} = \frac{[P_{1\lambda} a_{1\lambda} (1-a_{2\lambda}) + P_{2\lambda} a_{1\lambda}]}{a_{1\lambda}(1-a_{2\lambda}) + a_{2\lambda}} \quad (1.5)$$

Tal que:

$$P_{1\lambda} a_{1\lambda} (1-a_{2\lambda}) + P_{1\lambda} a_{2\lambda} = P_{1\lambda} a_{1\lambda} (1-a_{2\lambda}) + P_{2\lambda} a_{1\lambda}$$

$$P_{1\lambda} a_{2\lambda} = P_{2\lambda} a_{1\lambda}$$

Chegando assim à lei de Kirchhoff:

$$\frac{P_{1\lambda}}{a_{1\lambda}} = \frac{P_{2\lambda}}{a_{2\lambda}} \quad (1.6)$$

## Anexo II – O desenvolvimento de Boltzmann

Pelo eletromagnetismo a luz exerce pressão  $p$  sobre uma superfície opaca segundo a relação:

$$p = \frac{\mu}{3} \quad (2.1)$$

sendo  $\mu$  a densidade de energia da radiação.

Tomando como corpo negro uma cavidade opaca, a radiação no seu interior exerce pressão nas suas paredes. Escrevendo a Primeira Lei da Termodinâmica em sua forma diferencial:

$$dQ = dU + p dV \Rightarrow T dS = dU + p dV \quad (2.2)$$

com  $U$  representando a energia total do sistema ( $U = V\mu$ ),  $V$  o seu volume,  $T$  sua temperatura,  $S$  sua entropia e  $Q$  o calor resultante.

Podemos escrever a diferencial exata  $dU$  como:

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \quad (2.3)$$

com o subscrito indicando que tal grandeza é mantida constante na derivada.

Assim:

$$dS = \frac{1}{T} \left( \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \right) + \frac{p}{T} dV = \frac{1}{T} \left( V \frac{d\mu}{dT} dT + \mu dV \right) + \frac{p}{T} dV$$

Na última equação utilizamos uma derivada total (e não parcial) de  $\mu$  em relação a  $T$ , pois a densidade de energia não depende do volume  $V$ . Pela equação (2.1) temos:

$$dS = \frac{V}{T} \frac{d\mu}{dT} dT + \frac{4}{3} \frac{\mu}{T} dV \quad (2.4)$$

Como:

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T dV \quad (2.5)$$

Então, por comparação:

$$\left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_V = \frac{V}{T} \frac{d\mu}{dT} \quad \text{e} \quad \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \frac{4}{3} \frac{\mu}{T} \quad (2.6)$$

Como a quantidade  $S$  é função do macroestado do sistema (de modo que  $dS$  é uma diferencial exata), as segundas derivadas de  $S$  não devem depender da ordem da diferenciação<sup>113</sup>. Isto é:

$$\left(\frac{\partial}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial}{\partial T}\right)_V \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T \Leftrightarrow \frac{\partial^2 S}{\partial V \partial T} = \frac{\partial^2 S}{\partial T \partial V} \quad (2.7)$$

Desse modo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 S}{\partial V \partial T} &= \frac{1}{T} \frac{d\mu}{dT} \quad e \quad \frac{\partial^2 S}{\partial T \partial V} = -\frac{4}{3} \frac{\mu}{T^2} + \frac{4}{3} \frac{1}{T} \frac{d\mu}{dT} \\ \Rightarrow \frac{1}{T} \frac{d\mu}{dT} &= -\frac{4}{3} \frac{\mu}{T^2} + \frac{4}{3} \frac{1}{T} \frac{d\mu}{dT} \\ \Rightarrow \frac{d\mu}{dT} &= 4 \frac{\mu}{T} \quad (2.8) \end{aligned}$$

Integrando essa equação diferencial:

$$\begin{aligned} \int \frac{d\mu}{\mu} &= \int 4 \frac{dT}{T} \\ \ln \mu &= 4 \ln T + cte \\ \ln \mu &= \ln T^4 + cte \\ e^{\ln \mu} &= e^{\ln T^4 + cte} \\ \mu &= T^4 \cdot e^{cte} \end{aligned}$$

E sendo  $\kappa$  uma constante de proporcionalidade:

$$\mu = \kappa T^4 \quad (2.9)$$

É interessante ainda encontrar como que a densidade de energia  $\mu$  se relaciona com a energia emitida pela superfície da cavidade. Para isso, utilizamos o procedimento de Ritchmyer.<sup>114</sup>

Se tivermos várias ondas de radiação (com densidade de energia  $\mu$ ) dirigindo-se todas na mesma direção, o fluxo  $\phi$  (energia por unidade de tempo por unidade de área) que atravessa uma superfície perpendicular a essa direção é:

<sup>113</sup> Frederick Reif. **Fundamentals of statistical and thermal physics**. Singapore: McGraw-Hill, 1985, p.154.

<sup>114</sup> F. K. Richtmyer et al. **Introduction to modern physics**. New York: McGraw-Hill, 1955, p. 108-110.

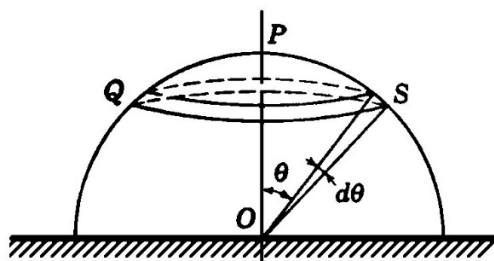
$$\phi = c \mu$$

sendo  $c$  a velocidade das ondas (no caso, a velocidade da luz).

Já se o feixe atinge a superfície formando um ângulo  $\theta$  com sua normal, o fluxo será menor, já que as ondas atingirão uma área maior da superfície. Neste caso, o fluxo será:

$$\phi = c \mu \cos \theta \quad (2.10)$$

Tomamos agora uma cavidade de corpo negro (ou seja, a radiação no seu interior é homogênea). Consideraremos as ondas que atingem o ponto  $O$  da superfície da cavidade indicada na Figura II.1. Construindo uma superfície hemisférica (de raio unitário) ao redor deste ponto, as ondas podem atingir  $O$  vindo de várias direções, ou seja, vindo de vários pontos do hemisfério.



**Figura II.1: Construção geométrica para cálculo do fluxo de radiação incidente na superfície.**<sup>115</sup>

Pelo raciocínio anterior, quanto menor o ângulo  $\theta$  da figura, maior será o fluxo de energia que atravessa  $O$  na superfície. Por outro lado, menor será a área do anel ao redor do hemisfério cuja radiação incide em  $O$  com ângulo entre  $\theta$  e  $\theta + d\theta$ . Pela figura vemos que essa área<sup>116</sup> é igual a  $2\pi \sin \theta d\theta$ . Ou seja, o fluxo que atinge  $O$  através da superfície, vindo de um anel definido pelos ângulos  $\theta$  e  $\theta + d\theta$ , é proporcional a  $\cos \theta \sin \theta$ .

Como a radiação é homogênea dentro da câmara, enquanto há um feixe dirigindo-se ao ponto  $O$  existe outro na direção oposta. Assim, apenas metade das ondas que atravessam a superfície hemisférica atingem ao ponto  $O$ . Isto equivale a dizer que a densidade de energia das

<sup>115</sup> F. K. Richtmyer et al., **op. cit.**, nota 114, p. 109.

<sup>116</sup> A área do anel é encontrada multiplicando-se a sua espessura  $d\theta$  pelo seu perímetro dado por  $2\pi r$ , em que  $r$  é o raio do anel, que conforme a ilustração é  $\sin \theta$ . Portanto a área do anel é dada por  $2\pi \sin \theta d\theta$ .

ondas que se propagam em direção ao ponto  $O$  é na verdade  $\frac{\mu}{2}$ . Portanto, para encontrar o fluxo total vindo do hemisfério que atinge  $O$ , devemos calcular a seguinte integral:

$$\phi = \int_0^{\pi/2} c \frac{\mu}{2} \cos \theta \sin \theta d\theta$$

De onde encontramos:

$$\phi = \frac{c}{4} \mu \quad (2.11)$$

Como as paredes do corpo estão em equilíbrio, o fluxo de radiação que atinge as paredes deve ser igual à radiância  $R$  da superfície. Assim, pelas equações (2.9) e (2.11):

$$R = \sigma T^4 \quad (2.12)$$

## Capítulo 3

### A radiação do corpo negro e o quantum de ação de Planck

*“Mas, ainda que a fórmula da radiação estivesse perfeita e irrefutavelmente correta, teria sido, afinal de contas, apenas uma fórmula de interpolação descoberta por um feliz acaso de raciocínio e isso nos teria deixado relativamente insatisfeitos. Em consequência, a partir do dia da descoberta, dispus-me a dar-lhe uma interpretação física, o que me levou a examinar as relações entre entropia e probabilidade segundo os conceitos de Boltzmann. Após algumas semanas do mais intenso trabalho que já realizei na vida, as coisas começaram a clarear e visões inesperadas revelaram-se a distância”.*

Max Planck

#### 3.1 Max Planck e seus trabalhos preliminares

Max Planck, assim como aconteceu com Richard Feynman algumas décadas mais tarde ao relembrar suas caminhadas com seu pai, ficou impressionado e inclinado pela investigação científica da natureza desde o início de sua adolescência, como é ilustrado pelo seguinte episódio de sua vida escolar:

“Max Planck começou a gostar da física quando era muito jovem. Na escola, no Gymnasium, como a denominam na Alemanha, conheceu uma lei da física e nunca esqueceu aquele dia. – Imaginem – disse o professor – um pedreiro levantando um pesado bloco de pedra e fatigando-se sob seu peso até levá-lo ao teto de uma casa. A energia deste trabalho não desaparece. Afinal, um dia, anos depois, a pedra se desprende e cai na cabeça de alguém que está passando abaixo.

Este exemplo da lei de conservação de energia impressionou tanto ao pequeno Planck quanto se a pedra tivesse caído sobre sua própria cabeça.”<sup>117</sup>

Max Planck realizou uma série de investigações em física clássica antes de se dedicar ao estudo intensivo da radiação do corpo negro e enveredar na busca de uma função de distribuição

---

<sup>117</sup> Barbara Lovett Cline. **Los creadores de la física**. México: Fondo de Cultura Económica, 1992, p. 51.

do espectro. O principal campo teórico a que Planck se dedicou foi a termodinâmica, particularmente tudo o que dissesse respeito ao conceito de entropia e sua variação. Provavelmente devido à sua formação e estudo nessa área é que Planck não tentou resolver o PRCN por meio do teorema da equipartição de energia e se o fizesse certamente chegaria apenas à formulação de Rayleigh. Planck também não tinha familiaridade com a estatística de Boltzmann e Gibbs e era avesso à teoria molecular.<sup>118</sup>

Vamos reproduzir alguns poucos trechos significativos de um livro em que Thomas Kuhn procurava situar a importância da termodinâmica nos trabalhos iniciais de Planck:

“A termodinâmica, como uma teoria quantitativa abstrata do papel do calor em processos físicos macroscópicos, era uma relativa novidade quando Planck a encontrou pela primeira vez na década de [18]70. (...)

[*O livro sobre*] a termodinâmica, de Rudolph Clausius, foi publicado em 1876, e Planck estava entre os primeiros a utilizá-lo. Foi enorme a influência formativa em sua carreira. No início de 1879 ele submeteu à Universidade de Munich sua tese de doutoramento baseada nos trabalhos de Clausius mas recomendando uma reformulação fundamental no seu procedimento. Como era de se esperar, a subsequente pesquisa do próprio Planck foi a primeira a ser afetada por aquela recomendação.”<sup>119</sup>

Cabem aqui algumas observações sobre como caminhava o estudo da termodinâmica nesse período. Na verdade, a termodinâmica estava sendo estruturada como uma teoria independente exatamente à época em que Planck iniciava seus estudos escolares. Basta mencionar que a primeira monografia sobre a termodinâmica, ou seja, a primeira edição do livro **A teoria mecânica do calor**, de Rudolph Julius Emmanuel Clausius (1822-1888), foi publicada em 1864, quando Planck tinha 8 anos e frequentava ainda a escola primária em Kiel.

Thomas Kuhn destaca que no início do século XIX inúmeras experiências envolvendo transformações mútuas de energia – por exemplo, a energia química em energia elétrica, presente nos trabalhos de Alessandro Volta (1745-1827) quando produziu suas pilhas (1800), a energia térmica aplicada numa junção bimetálica em energia elétrica, presente nos trabalhos de

<sup>118</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 14.

<sup>119</sup> Thomas S. Kuhn. **Black-body theory and the quantum discontinuity 1894-1912**. New York: Oxford University Press, 1978, p. 12-13.

Thomas Johann Seebeck (1770-1831) e que levaram à invenção do par termoelétrico (1822), entre outros – levaram à enunciação da hipótese da lei de conservação de energia por Joule, entre 1842 e 1847<sup>120</sup> que, por sua vez, transformou-se na primeira lei da termodinâmica.

A segunda lei da termodinâmica, numa formulação mais sofisticada, foi enunciada, por volta de 1850/51, simultaneamente por Clausius e Lord Kelvin (1824-1907) quando buscavam uma nova derivação do teorema de Carnot referente às máquinas térmicas e que considerava o calor uma espécie de fluido calórico que podia realizar trabalho ao passar de um reservatório de determinada temperatura para um de temperatura menor. A forma que Clausius encontrou para essa lei foi a seguinte:

“O calor não pode por si mesmo passar de um corpo frio para um corpo quente, permanecendo imutável o resto do universo.”<sup>121</sup>

Kuhn informava que, em 1854, Clausius apresentou a segunda lei da termodinâmica na forma

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0, \quad (15)$$

onde a igualdade aparece apenas quando o ciclo é reversível,  $dQ$  é a quantidade de calor absorvida pelo sistema do seu meio ambiente e  $T$  é a temperatura absoluta na qual o calor é absorvido. Em 1865, Clausius introduziu o símbolo  $S$  e o nome **entropia** para o valor daquela integral:

$$S_1 = S_0 + \int_0^1 \frac{dQ}{T}, \quad (16)$$

onde o caminho da configuração 0 para a configuração 1 deve ser reversível.<sup>122</sup>

Kuhn argumentava que Planck, com base nas expressões (15) e (16), no final da década de 1870, apresentou sua versão da segunda lei da termodinâmica na forma:

---

<sup>120</sup> Thomas S. Kuhn. Energy conservation as an example of simultaneous discovery. In: Marshall Clagett (ed.). **Critical problems in the history of science** (Proceedings of the Institute for the History of Science at the University of Wisconsin, September 1-11, 1957). Madison: The University of Wisconsin Press, 1959, p. 321-356. Em português: Thomas S. Kuhn. A Conservação da Energia como Exemplo da Descoberta Simultânea. In: Thomas S. Kuhn (ed.). **A Tensão Essencial** (R. Pacheco, trad.). Lisboa: Edições 70, 1989, p. 101-141.

<sup>121</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 119, p. 13.

<sup>122</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 119, p. 15.

$$S' - S \geq 0. \quad ^{123} \quad (17)$$

Eis um comentário feito por Thomas Kuhn sobre esta formulação de Planck:

“Assim como a primeira lei governava o comportamento da energia no tempo, a segunda lei governava o comportamento equivalente da entropia. Mais importante, incorporando o paralelo entre as duas leis absolutas das quais a termodinâmica derivava, a nova formulação realçava sua decisiva diferença. A energia total de um sistema isolado deve permanecer constante no tempo; sua entropia pode somente aumentar ou, no caso limite ideal, permanecer constante. A equação [16] proibia não apenas a passagem espontânea de calor de uma certa temperatura para uma temperatura maior, mas qualquer processo que diminuísse a entropia de um sistema isolado. Vista deste modo, a segunda lei rapidamente tornou-se para Planck “O Princípio do Aumento de Entropia”.<sup>124</sup> Sua função, enfatizada por Planck no parágrafo de abertura de sua tese de doutoramento, era determinar a direção na qual os processos naturais se desenvolvem “de tal forma que o retorno do mundo para um estado previamente ocupado é impossível”.<sup>125</sup>

Kuhn destacava que a formulação de Planck para a segunda lei era especialmente útil para o estudo de sistemas em equilíbrio e a radiação do corpo negro, que seria estudada por Planck, é um bom exemplo de um equilíbrio térmico. E Kuhn acrescentava:

“Se uma distribuição inicial arbitrária de energia é injetada numa cavidade isolada, então a distribuição tenderá ao equilíbrio enquanto a energia é absorvida e reemitida por quaisquer

<sup>123</sup> Em que  $S$  e  $S'$  correspondem respectivamente às entropias iniciais e finais de um processo termodinâmico.

<sup>124</sup> Esse título (em alemão: Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie) foi utilizado por Planck em 4 artigos (\*) publicados entre 1887 e 1891, nos quais ele discute processos termodinâmicos em diferentes sistemas físico-químicos em equilíbrio.

(\*) [1] Max Planck. Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie. 1. Abhandlung. In: **Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie**, v. 30, p. 562–582, 1887. [2] Max Planck. Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie. 2. Abhandlung. In: **Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie**, v. 31, p. 189–203, 1887. [3] Max Planck. Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie. 3. Abhandlung. In: **Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie**, v. 32, p. 462–503, 1887. [4] Max Planck. Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie. 4. Abhandlung. In: **Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie**, v. 44, p. 385–428, 1891. Comentários sobre os artigos podem ser encontrados em: Dieter Hoffmann (org.). **Max Planck und die moderne Physik**. Berlin: Springer-Verlag, 2010, p. 62-64.

<sup>125</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 119, p. 16.

pedaços de material negro contido na cavidade. A aproximação ao equilíbrio térmico é irreversível, e a entropia portanto deve aumentar até que o equilíbrio é alcançado. Se temos a fórmula para a entropia da radiação como uma função das variáveis de campo, então a função de distribuição do corpo negro seria uma que maximizasse a entropia total da radiação na cavidade.”<sup>126</sup>

Foi nesse contexto que Max Planck, a partir de 1878, começou a produzir inúmeros trabalhos sobre processos irreversíveis, procurando esclarecer e estender a aplicação dos fundamentos da termodinâmica. Em 1889 isso foi facilitado em função de sua nomeação como sucessor de Kirchhoff na Universidade de Berlin.

Posteriormente, estimulado pela teoria de Maxwell, na forma especialmente apresentada por Heinrich Hertz (1857-1894), passou a trabalhar, a partir de 1891, na aplicação da termodinâmica em processos eletromagnéticos.<sup>127</sup> De 1897 a 1899, Planck escreveu uma série de artigos em que procurava estabelecer uma derivação mais rigorosa da função de distribuição de Wien. Embora ele tenha sido aluno de Kirchhoff, sua principal inspiração, como vimos acima, foram os escritos de Clausius sobre a termodinâmica, como também as medidas realizadas por Lummer e Pringsheim sobre a radiação do corpo negro. A atração sobre este último tema é confirmada em sua autobiografia publicada em 1947, ano de sua morte, onde ele afirmava que este problema exercera uma verdadeira “*fascinação*” sobre ele em vista de seu caráter universal e também por representar “*algo absoluto*” e que ele

“(...) tinha sempre encarado a busca do absoluto como o mais sublime objetivo de toda atividade científica.”<sup>128</sup>

A segunda lei da termodinâmica evidencia que a tendência natural de um sistema isolado é mudar de tal forma que sua entropia aumente. No estado de equilíbrio essa entropia tem um valor máximo. Planck vislumbrou uma possibilidade de estudar a radiação de corpo negro por

---

<sup>126</sup> Thomas S. Kuhn, **op. cit.**, nota 119, p. 16-17.

<sup>127</sup> Hans Kangro (ed.). **Planck's original papers in quantum physics**. London: Taylor & Francis, 1972, p. 33. Disponível em edição bilíngue (alemão-inglês) em: <<https://archive.org/details/PlancksOriginalPapersInQuantumPhysics>>. Acesso em: junho de 2020.

<sup>128</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 10.

meio do cálculo da entropia de uma cavidade adiabática mantida a temperatura constante, uma vez que este sistema configura uma situação de equilíbrio. Assim ele procurou estudar a situação de equilíbrio utilizando o eletromagnetismo de Maxwell (emissão de dipolo, modelando a emissão e absorção de radiação por ressoadores) e a termodinâmica.

Para tal intento, Planck rejeitou a interpretação estatística da termodinâmica de Boltzmann, esperando que esta pudesse ser evitada e que

“o princípio do aumento da entropia pudesse ser preservado intacto como um teorema rigoroso em alguma teoria mais compreensível e fundamental.”<sup>129</sup>

Provavelmente, procurando por subsídios para fundamentar o estudo da radiação do corpo negro por meio do cálculo da entropia, em março de 1895, Planck apresentou um trabalho, na Academia de Ciências de Berlim, cuja linha de pesquisa divergia de suas anteriores, e no qual discutia

“o problema do espalhamento ressonante de ondas eletromagnéticas planas por um dipolo oscilante de dimensões pequenas comparadas ao comprimento de onda.”<sup>130</sup>

Em fevereiro de 1896, Planck

“(...) estendeu seus estudos do amortecimento de radiação de seus osciladores carregados, e ele ficou impressionado pela diferença entre amortecimento de radiação e amortecimento por meio da ordinária resistência do oscilador. Amortecimento de radiação era um mecanismo completamente conservativo que não requeria um mecanismo para invocar a transformação de energia em calor, ou para fornecer outra característica constante do oscilador de forma a descrever esse amortecimento. Planck pensou que isto poderia ter grandes implicações para esta questão fundamental da irreversibilidade e da segunda lei. Como ele afirmou, ‘o estudo do amortecimento conservativo parece para mim ser de grande importância, uma vez que abre a perspectiva de uma possível explicação geral de processos

---

<sup>129</sup> Martin J. Klein, **op. cit.**, nota 111, p. 25.

<sup>130</sup> Idem.

irreversíveis por meio de forças conservativas - um problema que exige a pesquisa em física teórica mais urgentemente a cada dia’.”<sup>131</sup>

No ano seguinte (fevereiro de 1897), Planck deu início a um estudo que se estendeu por mais de dois anos sobre a irreversibilidade da radiação, procurando assim deduzir a lei de Wien.

“(…) Ele começou asseverando que ninguém tinha explicado com sucesso como um sistema governado por interações conservativas podia evoluir irreversivelmente para um estado final de equilíbrio termodinâmico. (...) Planck então anunciou seu próprio programa para derivar a segunda lei da termodinâmica para um sistema constituído de radiação e osciladores carregados numa cavidade com paredes refletoras. Ele introduziria nenhum amortecimento além do amortecimento da radiação, mas tomaria o mecanismo básico para irreversibilidade como sendo a alteração da forma da onda eletromagnética pelo processo de espalhamento – sua aparentemente irreversível conversão da onda plana incidente para onda esférica emergente. O último objetivo deste programa seria a explicação da irreversibilidade para sistemas conservativos e, como um valioso subproduto, a determinação da distribuição espectral da radiação de corpo negro.

Planck tinha grandes esperanças: seu objetivo era precisamente correto para um discípulo de Clausius. Teria sido uma esplêndida conclusão para seu trabalho em termodinâmica, e teria colocado um fim, de uma vez por todas, às afirmações de que a segunda lei era meramente uma matéria de probabilidade.”<sup>132</sup>

Num artigo de maio de 1899, Planck apresenta  $a$  e  $b$ , duas constantes universais, segundo ele. Utilizando dados experimentais para a radiação do corpo negro ele calcula esses valores.<sup>133</sup>

---

<sup>131</sup> Ibidem.

<sup>132</sup> Idem.

<sup>133</sup> Em seu artigo “Sobre processos irreversíveis da radiação” (\*) Planck retoma o tema apresentado em uma série de publicações anteriores com o mesmo título (\*\*) e em resultados experimentais obtidos por Kurlbaum (1898) para definir as duas constantes “a” e “b”. (\*) Max Planck. Über irreversible Strahlungsvorgänge. In: **Annalen der Physik**, v. 1, p. 69-122, 1900. (\*\*) [1] Max Planck. Über irreversible Strahlungsvorgänge. 1. Mitteilung. In: **Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin**, p. 57-68, 1897. [2] Max Planck. Über irreversible Strahlungsvorgänge. 2. Mitteilung. In: **Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin**, p. 715-717, 1897. [3] Max Planck. Über irreversible Strahlungsvorgänge. 3. Mitteilung. In: **Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin**, p. 1122-1145, 1897. [4] Max Planck. Über irreversible Strahlungsvorgänge. 4. Mitteilung. In: **Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin**, p. 449-476, 1898. [5] Max Planck. Über irreversible Strahlungsvorgänge. 5. Mitteilung. In: **Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin**, p. 440-480, 1899.

Planck percebe que essas constantes, juntamente com a velocidade da luz  $c$  e a constante gravitacional  $G$ , poderiam servir para definir novas unidades de massa, comprimento, tempo e temperatura, que ele nomeou como “unidades naturais”. Segundo ele, essas novas unidades deveriam ser verdadeiras

“(…) independentemente dos corpos particulares ou substâncias, deveriam necessariamente reter seu significado por todos os tempos e para todas as culturas, incluindo extraterrestres e não humanas.”<sup>134</sup>

Essas constantes seriam importantes, pois se encaixariam em sua visão da busca do absoluto.

A constante  $b$  foi logo renomeada ( $h$ ) e reinterpretada no artigo de dezembro de 1900, como veremos mais adiante.

---

Os valores obtidos por Planck foram:

$a = 0,4818 \cdot 10^{-10}$  [sec x Celsiusgrad] e  $b = 6,885 \cdot 10^{-27}$  [cm<sup>2</sup> g / sec]. (ver também Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 46).

A partir das constantes “a” e “b” e, também, de  $c = 3,00 \cdot 10^{10}$  [cm / sec] (velocidade da luz no vácuo) e  $f = 6,885 \cdot 10^{-8}$  [cm<sup>3</sup> / g sec<sup>2</sup>] (constante gravitacional) Planck avança no mesmo artigo e, então, redefine as unidades de comprimento =  $(bf/c^3)^{1/2}$ , massa =  $(bc/f)^{1/2}$ , tempo =  $(bf/c^5)^{1/2}$  e temperatura =  $a(c^5/bf)^{1/2}$ .

Planck termina seu artigo afirmando que: “Essas grandezas mantêm seu significado natural enquanto as leis da gravitação, da propagação da luz no vácuo e os dois principais teoremas da teoria do calor permanecerem válidos; portanto medidas pelas mais variadas inteligências e usando os mais diferentes métodos elas devem permanecer as mesmas”. Schöpf, Hans-Georg. Von Kirchhoff bis Planck: **Theorie der Wärmestrahlung** in histor.-krit. Darst. – 1. Aufl. Braunschweig: Vieweg, 1978, p. 171 (tradução livre).

**Notação e valores modernos** (The Review of Particle Physics. **The Europ. Phys. Journal C15**, n. 1-4, p. 73-74, 2000):

$$h/k (= a) = 0,4799237 \times 10^{-10} \text{ s} \cdot \text{K}$$

$$k (= b/a) = 1,3806503(24) \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$h (= b) = 6,62606876(52) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$G (= f) = 6,673(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

<sup>134</sup> A citação é extraída do último parágrafo do artigo de Planck, **op. cit.**, nota 133. No original em alemão: “Diese Grösse behalten ihre natürliche Bedeutung solange bei, als die Gesetze der Gravitation, der Lichtfortpflanzung im Vakuum und die beiden Hauptsätze der Wärmetheorie in Gültigkeit bleiben, sie müssen also, von den verschiedensten Intelligenzen nach den verschiedensten Methoden gemessen, sich immer wieder als die namlichen ergeben”.

### 3.2 A derivação da lei de Wien

Conforme já comentamos, Max Planck fez também várias tentativas e escreveu vários artigos procurando desenvolver uma derivação mais rigorosa da função de distribuição de Wilhelm Wien, aplicando a termodinâmica em processos eletromagnéticos. Assim, Planck tentou mostrar que as equações de Maxwell-Hertz, quando aplicadas a ressoadores<sup>135</sup> com condições iniciais arbitrárias, levariam a processos irreversíveis convergindo para um estado estacionário cuja distribuição de energia era a da radiação de cavidade e que, portanto, determinaria o espectro de energia da radiação do corpo negro. Também, conforme discutimos, em seu estudo de absorção e emissão, Planck pensou que tinha encontrado um processo irreversível na interação entre ressoadores absorventes e emissores.

Foi Boltzmann quem apontou a principal falha nos propósitos de Planck, pois

“(...) as equações da eletrodinâmica não podiam produzir uma abordagem monotônica para o equilíbrio assim como as equações da mecânica; ambas precisavam ser complementadas por suposições estatísticas. Nada nas equações da eletrodinâmica proibiria, por exemplo, a inversão do processo de espalhamento de Planck.”<sup>136</sup>

Finalmente, em julho de 1898, Planck se convenceu de que os processos estatísticos eram necessários e introduziu a hipótese de “radiação natural”<sup>137</sup>, usando o teorema H e de

---

<sup>135</sup> A palavra ressoador atualmente pode ser entendida sem prejuízo conceitual como oscilador. Mantivemos o termo ressoador para permanecermos fiéis aos textos originais e históricos sobre o assunto.

<sup>136</sup> Martin J. Klein, **op. cit.**, nota 111, p. 25.

<sup>137</sup> “Planck chamou a radiação natural desde que - como ele argumentava - o fenômeno de absorção e emissão de raios térmicos indica que as ondas excitadas do campo de radiação na natureza não estão sem conexão com a energia  $U$  dos ressoadores. Matematicamente esta conexão não será garantida desde que são desconhecidos certos coeficientes das vibrações parciais na decomposição de Fourier da energia do ressoador como uma função da intensidade de campo. Então, as vibrações parciais - tantas quantas possíveis - (de pequena amplitude) devem ser reduzidas na média a zero. A radiação de campo, portanto, não deveria ser considerada sincronizada com o ressoador, mas sim desordenada. A natureza, um conceito predileto de Planck, demonstra a existência de processos irreversíveis. A natureza, ele dizia, decide que conexão existe entre as propriedades (comprimento de onda, amplitude, fase) da onda excitada e do condutor secundário (= ressoador hertziano).” (Nota de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 54).

Em **Max Planck und die moderne Physik** lemos, em tradução livre (\*) que: “de início Planck acreditava que o comportamento do ressonador, ao atingir o equilíbrio com o campo eletromagnético no qual estava imerso, poderia ser descrito como um processo irreversível. A aplicação das equações de Maxwell forneceria, assim, uma explicação para o aumento da entropia eletromagnética. Após receber críticas de Boltzmann, apontando que as equações de Maxwell, bem como as leis de Newton, são invariantes no tempo e, portanto, não podem descrever o

acordo com a qual as vibrações parciais harmônicas compondo uma onda de radiação térmica são completamente incoerentes.

Comparando a emissão e a absorção dos ressoadores, Planck obteve, em condições de equilíbrio, somente usando princípios de eletrodinâmica clássica, a equação<sup>138</sup>:

$$\mu_\nu = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 U \quad (18)$$

Com  $U = \bar{U} = U(\nu, T)$ <sup>139</sup> a energia média vibracional de um ressonador linear à temperatura  $T$  e  $\mu_\nu = \mu(\nu, T)$  a densidade da radiação dentro de uma cavidade à temperatura  $T$  por unidade de frequência no intervalo entre  $\nu$  e  $\nu + d\nu$ .

A partir desse resultado e da própria lei de Wien<sup>140</sup> ( $\mu_\nu = \alpha \nu^3 e^{-\left(\frac{\beta\nu}{T}\right)}$ ), por simples substituição Planck chegou ao resultado:

$$U = C \nu e^{-\left(\frac{\beta\nu}{T}\right)} \quad (19)$$

Tomando o logaritmo neperiano (base  $e$ ) de ambos os lados da equação, e lembrando que  $\ln e = 1$ ,

$$\ln U = \ln C + \ln \nu - \frac{\beta\nu}{T} \ln e$$

De maneira que

---

comportamento dos ressonadores como processos irreversíveis, Planck introduz a noção de “radiação natural”. Esse conceito – cunhado a partir de uma analogia com o conceito de “desordem molecular”, proposto por Boltzmann no início 1890 para explicar seu teorema H – pode ser pensado como semelhante à noção de luz coerente. De acordo com a ideia de “radiação natural”, o amortecimento dos ressonadores de Planck não ocorreria para uma única frequência, mas sim numa faixa estreita de frequências descritas como componentes de Fourier. Com isso Planck mostra que as componentes de Fourier, chamadas por ele de “ondas parciais”, são independentes e variam aleatoriamente; e é essa propriedade que vai impor restrições ao cálculo da energia média do ressonador”. Os resultados dessa investigação foram apresentados em um artigo (\*) que sintetiza uma série de 5 trabalhos anteriores de Planck, intitulados “Sobre processos irreversíveis da radiação”, **op. cit.**, nota 133. (\*) Max Planck. Über irreversible Strahlungsvorgänge. In: **Annalen der Physik**, v. 1, p. 69–122, 1900. Clayton A. Gearhart. Max Planck und die Wärmestrahlungstheorie In: Dieter Hoffmann (org.). **Max Planck und die moderne Physik**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, p. 98-100. Duas décadas mais tarde, Planck vai retomar a ideia de “radiação natural” em outros artigos nos quais transparece seu ceticismo em relação aos “quanta de Einstein”; mesmo após a descoberta do Efeito Compton e quando essa ideia já tinha sido aceita por muitos físicos da época. Michael Eckert. **Plancks Spätwerk zur Quantentheorie**, **idem**, p. 117.

<sup>138</sup> No **Anexo III**, ao final deste capítulo, apresentamos um desenvolvimento detalhado desse problema da interação entre a radiação da cavidade e os ressoadores, no qual chegamos a essa expressão.

<sup>139</sup> Atualmente obtemos o valor de  $U$  com o teorema da equipartição de energia (Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 12).

<sup>140</sup> Note que Planck usou a própria equação de Wien para derivá-la!

$$\frac{1}{T} = -\frac{\ln U}{\beta v} + \frac{1}{\beta v}(\ln C + \ln v)$$

Com os resultados da termodinâmica Planck sabia que

$$\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T} \text{ ou seja } S = \int \frac{1}{T} dU \quad (20)$$

Com  $S$  igual à entropia de um ressonador. Assim:

$$S = \int -\frac{\ln U}{\beta v} dU + \int \frac{(\ln C + \ln v)}{\beta v} dU$$

A menos de uma constante aditiva:

$$S = -\frac{1}{\beta v}(U \ln U - U - (\ln C + \ln v)U)$$

$$S = -\frac{U}{\beta v}(\ln U - 1 - \ln C - \ln v)$$

Como  $\ln e = 1$ ,

$$S = -\frac{U}{\beta v} \ln \left( \frac{U}{e C v} \right) \quad (21)$$

Segundo Klein, Planck convenceu-se de que esta definição era a única possível no sentido de que “*se, e somente se, a entropia tivesse essa forma ele poderia provar que a entropia total do sistema aumentava monotonicamente para um valor de equilíbrio*”. Dessa maneira, em um certo sentido, Planck completou seu programa, pois “*ele realmente usou a segunda lei para fixar a função de entropia e portanto a distribuição espectral da radiação do corpo negro.*”<sup>141</sup>

Utilizando, então, esses princípios, Planck chegou inicialmente à sua lei de Wien, que foi publicada em maio de 1899:

$$\frac{\partial S}{\partial U} = -\frac{1}{\beta v} \left[ \ln \left( \frac{U}{e C v} \right) + U \cdot \frac{1}{U} \right]$$

$$\frac{\partial S}{\partial U} = -\frac{1}{\beta v} \left[ \ln \left( \frac{U}{e C v} \right) + 1 \right] = -\frac{1}{\beta v} \ln \left( \frac{U}{C v} \right)$$

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{1}{\beta v} \cdot \frac{1}{U}$$

---

<sup>141</sup> Martin J. Klein, **op. cit.**, nota 111, p. 26.

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = \frac{const}{U} \quad (22)$$

Segundo Kangro (1972),  $d^2 S/dU^2$  era interpretada por Planck como a variação do aumento da entropia. Apenas para esta última Planck atribuiu um sentido físico (março 1900): “a medida numérica da irreversibilidade do processo ou para a não compensada transformação de trabalho em calor’ (Planck 1900, p. 731). A entropia em si mesma – ele argumentou – não tem sentido físico”<sup>142</sup>.

É importante salientar a circularidade no trabalho de Planck pois ele utilizou a própria lei de Wien para derivá-la pela via da entropia.

“(…) Consistente com sua suposição com relação à irreversibilidade associada com a “radiação natural”, ele então mostrou que a “entropia elétrica total”  $S_t = \sum S + \int s dV$ , em que a soma se estende sobre todos os osciladores e a integração sobre todos os elementos de volume  $dV$  do campo de radiação com densidade de entropia  $s$ , é uma função de estado que aumenta com o tempo e alcança um máximo no equilíbrio. Planck agora assumiu que uma pequena porção de energia passa de um oscilador de frequência  $\nu$ , entropia  $S$  e energia  $U$ , para outro de frequência  $\nu'$ , entropia  $S'$  e energia  $U'$ . Os princípios da entropia e da energia requerem que  $\delta S_t = \delta S + \delta S' = 0$  e  $\delta U + \delta U' = 0$ .”<sup>143</sup>

Assim, esse resultado com a equação (21) nos fornece:

$$\begin{aligned} \delta S + \delta S' &= -\frac{\delta U}{\beta \nu} \ln\left(\frac{U}{eC\nu}\right) - \frac{U}{\beta \nu} \frac{eC\nu}{U} \delta U - \frac{\delta U'}{\beta \nu'} \ln\left(\frac{U'}{eC\nu'}\right) - \frac{U'}{\beta \nu'} \frac{eC\nu'}{U'} \delta U' = 0 \\ -\frac{\delta U}{\beta \nu} \ln\left(\frac{U}{eC\nu}\right) + \frac{\delta U}{\beta \nu'} \ln\left(\frac{U'}{eC\nu'}\right) - \frac{eC}{\beta} (\delta U + \delta U') &= 0 \\ \delta U \left[ -\frac{1}{\beta \nu} \ln\left(\frac{U}{eC\nu}\right) + \frac{1}{\beta \nu'} \ln\left(\frac{U'}{eC\nu'}\right) \right] &= 0 \end{aligned}$$

<sup>142</sup> Nota de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 50.

<sup>143</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 15.

$$\begin{aligned}\frac{1}{\beta\nu} \ln\left(\frac{U}{eC\nu}\right) &= \frac{1}{\beta\nu'} \ln\left(\frac{U'}{eC\nu'}\right) \\ \frac{1}{\beta\nu} \ln\left(\frac{U}{C\nu}\right) &= \frac{1}{\beta\nu'} \ln\left(\frac{U'}{C\nu'}\right).\end{aligned}\quad (23)$$

A expressão do lado esquerdo é uma constante para todos os osciladores considerados.

$$\frac{1}{\beta\nu} \ln\left(\frac{U}{C\nu}\right) = cte = \rho$$

Tomando o exponencial de ambos os lados, temos:

$$U = C\nu \exp(\rho\beta\nu)$$

Da comparação com a equação (23) temos que  $\rho = -1/T$ , de maneira que:

$$U = C\nu \exp\left(-\frac{\beta\nu}{T}\right)$$

Que, em combinação com a equação (14), produz a lei de radiação de Wien, conforme a equação (12).

$$\mu_\nu = \alpha\nu^3 \exp\left(-\frac{\beta\nu}{T}\right)$$

É também muito importante notar bem a afirmação de Max Jammer de que

“(...) afortunadamente para o futuro desenvolvimento da física, Planck não utilizou o teorema (...) tivesse ele utilizado o teorema da equipartição de energia neste estágio de seu trabalho, ele teria chegado necessariamente à lei da radiação de Rayleigh-Jeans [*da qual falaremos mais adiante*], que é incompatível com a experiência e teria provavelmente abandonado as pesquisas neste problema.”<sup>144</sup>

Essa opinião de Jammer é compartilhada por uma série de estudos como, por exemplo,

“(...) é impossível falar de Planck sem mencionar a entropia. Mesmo que seja verdade que não faz nenhuma falta entender a entropia para apreciar o que significa a teoria quântica, é

---

<sup>144</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 14-15.

essencial para compreender como Planck chegou a tal teoria e que tipo de cientista ele era.”<sup>145</sup>

### 3.3. Os artigos de 1900

Logo no início de 1900, medidas de Lummer e Pringsheim mostraram que a lei de Wien não se ajustava bem para o intervalo de pequenas frequências. Nesse ano, muitos cientistas passaram a tentar encontrar novas formulações para a função de distribuição.

Em março de 1900, M. Thiesen chegou a algo parecido com o que Rayleigh fez, em junho de 1900. Em outubro do mesmo ano, Lummer e E. Jahnke chegaram a uma equação que, de acordo com a escolha dos parâmetros envolvidos, se reduzia ora à expressão de Wien, ora à de Thiesen, ora à de Rayleigh. Assim parecia que, dependendo da faixa de comprimento de onda em que se trabalhasse, o fenômeno era regido por equações diferentes.

Ainda em outubro de 1900, Heinrich Rubens e Ferdinand Kurlbaum (1857-1927) estabeleceram uma nova série de medidas mostrando que a lei de Wien realmente não era válida para pequenas frequências. Ambos comunicaram o fato a Planck que passou a procurar por uma nova formulação para a função de distribuição. Ele resolveu o problema conseguindo uma expressão satisfatória e apresentou-a, em 19 de outubro, na Sociedade Alemã de Física. Essa comunicação transformou-se no artigo **“Sobre um aperfeiçoamento da equação de Wien para o espectro”**. Contudo, Planck não apresentou um desenvolvimento teórico satisfatório nesse artigo.

#### 3.3.1 O artigo de 19 de outubro de 1900<sup>146</sup>: **“Sobre um aperfeiçoamento da equação de Wien para o espectro”**

<sup>145</sup> Barbara Lovett Cline, **op. cit.**, nota 117, p. 60-61.

<sup>146</sup> O artigo publicado em edição bilíngue (alemão-inglês) está disponível também em: Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 3-5 (alemão) / p. 35-37 (inglês). Existe também uma tradução desse artigo para o português: Sobre um aperfeiçoamento da Equação de Wien para o Espectro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 4, p. 536-537, 2000. Tradução: Nelson Studart. Disponível em: <[http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22\\_536.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_536.pdf)>. Acesso em: julho de 2020.

Esse foi o artigo apresentado por Planck à Sociedade Alemã de Física em 19 de outubro de 1900, considerado por muitos pesquisadores como sendo o marco de “nascimento” da teoria quântica.

Nesse artigo, Planck imaginou que talvez a equação (22) não era completamente válida e passou a construir, segundo suas próprias palavras,

“(...) expressões completamente arbitrárias para a entropia que, embora sejam mais complicadas que a expressão de Wien, ainda parecem satisfazer tão completamente todos os requisitos da termodinâmica e da teoria eletromagnética.”<sup>147</sup>

Dessa maneira, ele foi atraído

“(...) para uma das expressões assim construídas que é aproximadamente tão simples como a expressão de Wien e que mereceria ser investigada já que a expressão de Wien não é suficiente para cobrir todas as observações.”<sup>148</sup>

Essa expressão era:

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = \frac{a}{U(b+U)} \quad (24)$$

Integrando essa expressão:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} = \frac{dS}{dU} &= a \int \frac{1}{U(b+U)} dU \\ \frac{1}{T} &= a' \ln \left[ \frac{U+b}{U} \right] \end{aligned}$$

Com  $a' = -\frac{a}{b}$

$$\begin{aligned} \exp\left(\frac{1}{Ta'}\right) &= \frac{U+b}{U} = 1 + \frac{b}{U} \\ \frac{b}{U} &= \exp\left(\frac{1}{Ta'}\right) - 1 \end{aligned}$$

---

<sup>147</sup> Max Planck, **op. cit.**, nota 146, H. Kangro, p. 4 (No original: “[...] bin ich schliesslich dahin gekommen, ganz willkürlich Ausdrücke für die Entropie zu construiren, welche, obwohl complicirter als Wien’sche Ausdruck, doch allen Anforderungen der thermodynamischen und elektromagnetischen Theorie ebenso vollkommenen Genüge zu leisten scheinen wie dieser”).

<sup>148</sup> Ibidem, p. 537.

$$U = \frac{b}{\exp\left(\frac{1}{Ta'}\right) - 1} \quad (25)$$

Max Jammer afirma que a partir dessa construção Planck então chegou à sua lei de radiação que se ajustava muito bem aos dados experimentais conhecidos.<sup>149</sup>

De outra maneira, igualando as equações (12) e (18):

$$\frac{8\pi}{c^3} \nu^2 U = \alpha \nu^3 e^{\left(\frac{\beta\nu}{T}\right)}$$

$$U = C \nu e^{\left(\frac{\beta\nu}{T}\right)} = \frac{C \nu}{\exp\left(\frac{\beta\nu}{T}\right)} \quad (26)$$

e comparando as equações (25) e (26), levando-se em conta que  $a'$  e  $b$  são funções de  $\nu$ , Planck obteve, segundo Jammer:

$$U = \nu \phi\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad (27)$$

Em que  $\phi\left(\frac{\nu}{T}\right)$  é uma função de  $\frac{\nu}{T}$ . Assim ele concluiu que:

$$U = \frac{cte \nu}{\exp\left[\frac{c' \nu}{T}\right] - 1} \quad (28)$$

Juntando-se esse resultado para  $U$  com a equação (18), chega-se finalmente a

$$\mu_\nu = \frac{A \nu^3}{\exp(\beta\nu/T) - 1} \quad (29)$$

Com  $c'$ ,  $C$ ,  $A$  e  $\beta$  constantes. Essa equação é conhecida como a **lei de Planck para a radiação de corpo negro**.

Max Jammer afirma ainda que embora a interpolação realizada por Planck nesse artigo, com o intuito de chegar a uma expressão da variação do aumento de entropia, tenha sido matematicamente trivial, como é reconhecido pelo próprio Planck na epígrafe que abre este capítulo, ela foi

---

<sup>149</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 18.

“(...) uma das mais significativas e momentosas contribuições feitas na história da física. Não apenas ela levou Planck, na sua busca de uma corroboração lógica, à proposição de seu quantum elementar de ação e, portanto, iniciar o desenvolvimento da teoria quântica, mas, ela também continha certas implicações que, uma vez reconhecidas por Einstein, afetaram decisivamente os próprios fundamentos da física como também suas pressuposições epistemológicas. Nunca na história da física uma simples interpolação matemática provocou tamanhas consequências físicas e filosóficas.”<sup>150</sup>

Na mesma noite da apresentação desse histórico artigo, Rubens comparou-o favoravelmente com seus dados há pouco obtidos. Pouco depois, o mesmo foi feito com relação aos dados de Lummer e Pringsheim.

Nos dois meses seguintes, Planck empenhou-se numa tarefa muito importante: transformar o status de sua bem sucedida interpolação matemática de um mero “chute bem sucedido” em uma fundamentação física de real significado. No dia 14 de dezembro de 1900, numa outra sessão da Sociedade Alemã de Física, Planck leu seu novo artigo, do qual apresentamos apenas alguns trechos, com alguns comentários de H. Kangro e de M. Jammer.

### 3.3.2 O artigo de 14 de dezembro 1900<sup>151</sup>: “Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal”

Se o artigo anterior consistia basicamente de algumas hipóteses fortemente ancoradas nos dados experimentais e na incompatibilidade das expressões com a curva de emissão até então existente, o novo artigo de Planck tinha um cunho muito mais teórico, como o próprio

<sup>150</sup> M. Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 18.

<sup>151</sup> Esse artigo (\*) foi apresentado por Planck na reunião da Sociedade Alemã de Física em Berlim, em 14 de dezembro de 1900. Muitos pesquisadores consideram esse artigo (e não o de 19 de outubro do mesmo ano) como sendo o marco de nascimento da física quântica. (\*) Max Planck. Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum. In: **Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft**, v. 2, p. 237–245, 1900. Uma edição bilíngue desse artigo é encontrada em: Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 6-29 (alemão) / p. 38-60 (inglês).

Com um título semelhante é publicada também uma versão posterior do artigo de 1900: Max Planck. Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. In: **Annalen der Physik**, v. 4, p. 503–563, 1901. Essa versão foi traduzida para o português por Ildeu de Castro Moreira. Disponível em: <[http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22\\_538.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_538.pdf)>. Acesso em: julho de 2020.

título de seu novo artigo sugeria: **Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal**, onde espectro normal pode ser interpretado como espectro do corpo negro.

Planck iniciava seu artigo com estas palavras:

“Cavalheiros: quando, há algumas semanas, tive a honra de chamar sua atenção para uma nova fórmula que me parecia ser apropriada para expressar a lei de distribuição de energia da radiação sobre o alcance inteiro do espectro normal (...), mencionei então que em minha opinião a utilidade dessa equação era baseada não apenas na concordância aparentemente perfeita dos poucos números, que eu pude então comunicar-lhes, com os dados experimentais disponíveis (...), mas principalmente devido à estrutura simples da fórmula e especialmente ao fato de que ela dava uma expressão logarítmica muito simples [*Fórmula (21) da p. 184*] para a dependência da entropia de um ressonador monocromático irradiado com sua energia vibracional.”

Hans Kangro chama a atenção, neste trecho do artigo, sobre o **princípio da simplicidade** que guia os passos de Planck e que teve uma presença constante através da história da física, desde os trabalhos de Galileu. Einstein, em particular, fez extenso uso deste princípio ao longo de seus principais trabalhos.

E Planck prosseguia:

“(...) Desde que a entropia de um ressonador é, portanto, determinada pelo modo através do qual a energia é distribuída num determinado instante entre muitos ressonadores, suspeitei que deveria avaliar esta quantidade introduzindo considerações probabilísticas na teoria eletromagnética da radiação, a importância da qual foi originalmente descoberta por Ludwig Boltzmann para a segunda lei da termodinâmica.”

Percebemos ao longo desse histórico artigo de Planck a importância por ele atribuída às inovações probabilísticas introduzidas por Boltzmann na sua interpretação da segunda lei da termodinâmica que, como vimos, ele custou a introduzir na sua construção.

Planck, assim, abandonou de certa maneira seu desenvolvimento termodinâmico e optou por usar o conceito probabilístico de entropia. Para tal ele usou a *Memória* de Boltzmann de 1877 sobre a mecânica estatística probabilística. Utilizando para a entropia de um sistema de  $N$

osciladores de frequência  $\nu$  o resultado<sup>152</sup>  $S = k \ln W$ , com  $k$  a constante de Boltzmann e  $W$  o número de distribuições compatíveis com a energia do sistema.

Na sequência para calcular a “probabilidade termodinâmica” do estado no qual uma certa energia estava dividida entre muitos osciladores (ressoadores) de mesma frequência, quer dizer, o número de modos nos quais essa divisão poderia ser feita, foi essencial que Planck imaginasse a energia ( $U$ ) desses osciladores composta por um número finito de idênticas unidades. Este por si só não deveria ter sido um passo inovador: Boltzmann fazia-o frequentemente como uma ferramenta computacional, como fez particularmente na *Memória* de 1899 que Planck usou como guia.<sup>153</sup>

Muitos autores atribuem a autoria da quantização de energia a Max Planck no artigo de dezembro de 1900, mais especificamente nesta longa passagem:

“(…) Vamos considerar um grande número de ressoadores lineares vibrando monocromaticamente – sendo  $N$  de frequência<sup>154</sup>  $\nu$  (por segundo),  $N'$  de frequência  $\nu'$ ,  $N''$  de frequência  $\nu''$ , ..., com grandes números  $N$  – que estão apropriadamente separados e encerrados num meio diatérmico<sup>155</sup> com velocidade da luz  $c$  e limitados por paredes refletoras. Deixemos o sistema conter uma certa quantidade de energia, a energia total  $E_t$  (erg), que está presente parcialmente no meio como radiação em trânsito e parcialmente nos ressoadores como energia vibracional. A questão é como num estado estacionário esta

<sup>152</sup> Na verdade, Boltzmann utilizava essa expressão na forma  $S = R/N \log W$ , com  $R$  a constante de Clapeyron e  $N$  o número de Avogadro. Foi Planck que em 1900 substituiu  $R/N$  por  $k$ .

A fórmula “ $S = k \ln W$ ” está gravada na lápide de Boltzmann, erguida na década de 1930, após o reconhecimento de seu imenso significado para o desenvolvimento conhecimento científico. No entanto, essa fórmula não foi escrita dessa forma por Boltzmann em nenhum de seus trabalhos. Certamente ela não é apresentada em seu artigo de 1872 (L. Boltzmann. Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. **Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften Wien (II)**, v. 66, p. 275–370, 1872). Contudo, no artigo de 1877 (L. Boltzmann. Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. **Sitzungsberichte der Wiener Akademie**, Band 76, n. 11, Oktober 1877) fica evidente que essa relação – entre a entropia ( $S$ ) e a distribuição dos estados de um sistema ( $W$ ) – já era bem estabelecida para Boltzmann. Ingo Müller. **A history of thermodynamics**. Berlin Heidelberg: Springer, 2007, p. 102.

A relação “ $S = k \ln W$ ” – escrita dessa forma, com a constante  $k$  (que, posteriormente, passou a ser conhecida como a “constante de Boltzmann”) – foi apresentada por Planck pela primeira vez no seu artigo de 1901 (Max Planck. Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. **Annalen der Physik**, p. 553-563, 1901.

<sup>153</sup> Martin J. Klein, **op. cit.**, nota 111, p. 27.

<sup>154</sup> Planck utilizava preferencialmente a frequência ao invés do comprimento de onda que era de uso comum entre os físicos experimentais dessa época.

<sup>155</sup> Diatérmico é um meio penetrável pelo calor.

energia é distribuída entre as vibrações dos ressoadores e as várias cores da radiação presente no meio, e qual será a temperatura do sistema total.

Para responder a esta questão antes de tudo consideramos as vibrações dos ressoadores e procuramos associar a eles certas energias arbitrárias, por exemplo, uma energia  $E$  para os  $N$  ressoadores  $\nu$ ,  $E'$  para os  $N'$  ressoadores  $\nu'$ , .... A soma

$$E + E' + E'' + \dots = E_0$$

deve, naturalmente, ser menor que  $E_t$ . O resto,  $E_t - E_0$ , pertence então à radiação presente no meio. Devemos agora dar a distribuição de energia sobre os diferentes ressoadores de cada grupo, antes de tudo a distribuição da energia  $E$  sobre os  $N$  ressoadores de frequência  $\nu$ . Se se considera  $E$  uma quantidade continuamente divisível, esta distribuição poderia ser realizada num número infinito de modos. Consideramos, contudo – e este é o ponto essencial de todo o cálculo –  $E$  composto de um número bem definido de partes iguais e empregamos para este propósito a constante da natureza  $h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ erg seg}^{156}$ . Esta constante multiplicada pela frequência  $\nu$  dos ressoadores dá o elemento de energia<sup>157</sup>  $\epsilon$  em

<sup>156</sup> “Valor moderno:  $h = 6,626 \cdot 10^{-27} \text{ erg seg}$ .

Cálculo de Planck: a diferença entre os dois valores medidos  $S_{t1}$ ,  $S_{t2}$  da energia radiada por segundo no ar pelo mesmo centímetro cúbico de um corpo negro a duas temperaturas diferentes, digamos  $t_2 = 100^\circ\text{C}$  e  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ , é comparado com a densidade de energia total no espaço,

$$\int_0^\infty u_\nu d\nu = \int_0^\infty \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

que dá:

$$\frac{4(S_{100} - S_0)}{c(T_2^4 - T_1^4)} = \frac{48\pi k^4}{e^3 h^3} \sum_1^\infty \frac{1}{\nu^4} \quad (1)$$

( $c$  = velocidade da luz).

Da equação transcendental obtida calculando a energia  $u$  para o comprimento de onda onde ela é um máximo, ele encontrou

$$\lambda_m = \frac{ch}{Tk\beta} \quad (2)$$

onde  $\beta = 4,9651...$  De (1) e (2) e de um valor medido de  $\lambda T$  segue:

$$h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ erg seg}$$

$$k = 1,346 \cdot 10^{-16} \text{ erg/grau}$$

(segundo cálculos de Planck de 1901). O valor moderno de  $k$  é  $1,3805 \cdot 10^{-16} \text{ erg/grau}$ .

(Nota de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 54-55).

O valor atual da constante de Planck é:  $h = 6,62607015 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$

No Sistema Internacional:  $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Disponível em <<https://www.bipm.org/fr/CGPM/db/26/1/>>. Acesso em: julho de 2020.

<sup>157</sup> “Isso estabelece, em palavras, a equação  $\epsilon = h \nu$ .

A expressão “quantum de energia” para  $\epsilon$  foi inventada por Einstein (1905). Planck primeiro falou de um quantum de ação  $h$  em 1906, todavia não havia ainda menção à ‘hipótese quântica’ mesmo nesta época, para não dizer de

erg, e dividindo  $E$  por  $\varepsilon$  obtemos o número  $P$  de elementos de energia que são distribuídos entre os  $N$  ressoadores. Se a razão assim calculada não é um inteiro, tomamos para  $P$  um inteiro na vizinhança.”<sup>158</sup>

Planck adotou esse procedimento, pois, se considerasse a energia contínua, seria impossível calcular a probabilidade de o ressoador adquirir certa energia, visto que haveria infinitos modos de distribuí-la entre os ressoadores. Assim, Planck usou a energia quantizada como um truque matemático no qual ele imaginava que se tomando o limite de  $\varepsilon$  tendendo a zero, a distribuição de energia poderia ser tomada como contínua. Ou seja, para ele o fato de que a energia estivesse quantizada deveria ser apenas um truque matemático não trazendo intrinsecamente nada de novo: “... em nenhum lugar deste artigo, nem em nenhum dos seus outros escritos, Planck colocou em proeminência o fato fundamental de que  $U$  é um múltiplo inteiro de  $h\nu$ ”.<sup>159</sup>

Assim, assumindo que a energia total do sistema  $U_N = NU$  consistiria de  $P$  elementos  $\varepsilon$ , ou seja  $U_N = P\varepsilon$ , a distribuição da energia se daria de múltiplas formas entre os  $N$  osciladores.

Interpretando  $W$  (“complexions”), como representando o número possível de distribuir os  $P$  elementos de energia entre os  $N$  osciladores, Planck obteve<sup>160</sup> para  $N \gg 1$ :

$$W = \frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!} \quad (30)$$

Usando assim a aproximação de Stirling  $N! = N^N$

---

uma ‘teoria quântica’. Nos anos seguintes, Planck, referindo-se ao espaço de fase de J. W. Gibbs, enfatizou a quantidade de ação, enquanto Einstein preferia falar de energia.” (Nota de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 55.)

<sup>158</sup> “Este postulado nunca foi utilizado de novo. L. Boltzmann tinha sugerido uma aproximação similar em 1877 a fim de aproximar um continuum pela estatística de um conjunto discreto de valores de energia. Ele usava valores discretos de energia desde pelo menos 1872 e destacava explicitamente o fato de que o método de aproximar quantidades contínuas por quantidades discretas é baseado numa tradição bem estabelecida (Lagrange, Stefan e Riemann). [...] A idéia é ainda mais antiga; ela é encontrada, por exemplo, na derivação geométrica da lei da gravidade por Isaac Beeckman.”

(Nota de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 55-56.)

<sup>159</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 22.

<sup>160</sup> O desenvolvimento está no **Anexo IV**, ao final deste capítulo.

$$W = \frac{(N+P)^{N+P}}{N^N P^P} \quad (31)$$

Na sequência de seu artigo, sem mostrar os detalhes dos cálculos, Planck afirma que utilizando as equações (18) e (20) e a relação  $S = k \ln W$ , obtém-se o espectro de corpo negro dado pela equação (29).

Nesse artigo ainda Planck obteve um valor muito acurado para o número de Avogadro e também para a carga elétrica do elétron. Vale reproduzir o trecho, também bastante longo, em que ele introduz esses valores.

“Para concluir posso destacar uma consequência importante desta teoria que, ao mesmo tempo, torna possível um teste suplementar de sua admissibilidade. Boltzmann<sup>161</sup> mostrou que a entropia de um gás monoatômico em equilíbrio é igual a  $wR \ln P_0$ , onde  $P_0$  é o número de possíveis complexions<sup>162</sup> (a “permutabilidade”) correspondendo à mais provável distribuição de velocidade,  $R$  é a bem conhecida constante dos gases ( $8,31 \times 10^7$  para o O = 16),  $w$  é a razão da massa de uma molécula real pela massa de um mol, que é a mesma para todas as substâncias. Se existem alguns ressoadores radiantes presentes no gás, a entropia

<sup>161</sup> “L. Boltzmann, specially S. B. Kais. **Akad. Wiss. Wien II**, v. 76, n. 428, 1877 [=1878].” (N. do A.)  
L. Boltzmann. Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatz der Mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. **Wiener Berichte**, v. 76, p. 373-435, 1877. Reprint in: **Wiss. Abhandlungen**, v. 2. Leipzig: Barth, #42, F. Hasenöhl, p. 164–223, 1909.

<sup>162</sup> O conceito de “Complexions”, que Planck “emprestou” de Boltzmann, é comentada por Kangro: “Complexion, de acordo com Boltzmann, é um método de distribuir múltiplos inteiros  $p$  de energia que pertencem a uma dada energia total  $E = \lambda \epsilon$  entre  $n$  moléculas. Boltzmann considerou a distribuição dos elementos de energia  $\epsilon, 2\epsilon, \dots, p\epsilon$  de tal modo que  $w_0, \dots, w_p$  moléculas tenham energia  $0, \dots, p\epsilon$ . Uma particular distribuição  $k$  tem

$$P_k = \frac{n!}{(w_0)!(w_1)! \dots}$$

permutações. Para esta distribuição de estados a probabilidade é definida por Boltzmann como  $P_k/J$ , onde  $J$  é a soma  $\sum_k P_k$  de todas as possíveis distribuições:

$$J = \frac{(\lambda + n - 1)!}{(n - 1)! \lambda!} \quad (\text{Boltzmann})$$

Em contraste a Boltzmann, Planck deixou de lado o primeiro passo e definiu de uma vez o número de complexions de todas as distribuições de estado como o “número de todos os possíveis complexions”:

$$\frac{(N + p - 1)!}{(N - 1)! p!}$$

esta expressão correspondendo ao  $J$  de Boltzmann (cf. Martin J. Klein. Max Planck and the beginnings of the quantum theory. **Archive for History of Exact Sciences**, 1, 473, 1962).” (Nota 33 de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 117, p. 54-55).

do sistema total deve, de acordo com a teoria aqui desenvolvida, ser proporcional ao logaritmo do número de todos os possíveis complexions, incluindo as velocidades e a radiação. Desde que, contudo, de acordo com a teoria eletromagnética da radiação, as velocidades dos átomos são completamente independentes da distribuição de energia de radiação, os números totais de complexions são simplesmente iguais ao produto dos números referentes às velocidades e o número relativo à radiação. Para a entropia total nós temos, portanto

$$f \ln(P_O R_O) = f \ln P_O + f \ln R_O,$$

onde  $f$  é um fator de proporcionalidade. A primeira parte da soma é a entropia cinética, a segunda parte é a entropia de radiação. Comparando esta com a expressão anterior encontramos

$$f = wR = k,$$

$$\text{ou} \quad w = k/R = 1,62 \times 10^{-24},$$

isto é, uma molécula real é  $1,62 \times 10^{-24}$  de um mol, ou, um átomo de hidrogênio pesa  $1,64 \times 10^{-24} \text{ g}$ <sup>163</sup>, desde que  $H = 1,01$ , ou, num mol de qualquer substância há  $1/w = 6,175 \times 10^{23}$ <sup>164</sup> moléculas reais. O. E. Meyer<sup>165</sup> dá para este número  $640 \times 10^{21}$  que está bem próximo deste.

O número de Loschmidt  $L$ , isto é, o número de moléculas do gás em  $1 \text{ cm}^3$  a  $0^\circ\text{C}$  e  $1 \text{ atm}$  é<sup>166</sup>

$$L = \frac{1013200}{R 273 w} = 2,76 \cdot 10^{19}.$$

Drude<sup>167</sup> encontrou  $L = 2,1 \times 10^{19}$ .

<sup>163</sup> Valor moderno (1971):  $m = 1,67 \times 10^{-24} \text{ g}$ . Nota 44 de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 59.

<sup>164</sup> Valor moderno (1971):  $6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . Nota 45 de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 59.

<sup>165</sup> Oskar E. Meyer. Die kinetische Theorie der Gase. In: **Elementare Darstellung mit mathematischen Zusätzen**. 2nd ed. Vol 2. Breslau: Maruschke & Berendt, 1899 (N. do A.).

<sup>166</sup> “ $L = \frac{p}{RT} \frac{1}{w} = \frac{p}{RT} \frac{M}{m} = \frac{n}{V}$

$$p = l_{Hg} \cdot \rho_{Hg} = 76 \cdot 13,595 \cdot 981 \text{ gcm}^{-1} \text{ s}^{-2} = 1013500 \text{ gcm}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

onde  $w = m/M$  (veja acima),  $pV = RT$ ,  $V$  = volume molar,  $n$  = número de moléculas num mol,  $p=1$  atmosfera de pressão a  $0^\circ\text{C}$ ,  $l_{Hg}$  = comprimento da coluna de mercúrio correspondente,  $\rho_{Hg}$  = gravidade específica ( $=d_{Hg} \cdot g$ ),  $g$  = aceleração da gravidade na superfície terrestre.”

Nota de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 59.

<sup>167</sup> Paul Drude. Zur Elektronentheorie der Metalle. In: **Annalen der Physik**, Band 306, n. 3, p. 566–613, 1900. Disponível em: <<https://archive.org/stream/annalenderphysi71unkngoog#page/n597/mode/2up>>. Acesso em: julho de 2020 (N. do A.).

A constante de Boltzmann-Drude  $\alpha$ , isto é, a energia cinética média de um átomo à temperatura absoluta 1 é

$$\alpha = 3/2wR = 3/2k = 2,02 \times 10^{-16}$$

Drude encontrou  $\alpha = 2,65 \times 10^{-16}$ .

O quantum elementar de eletricidade  $e$ , isto é, a carga elétrica de um íon monovalente positivo ou de um elétron é, se  $\xi$  é a carga conhecida de um mol monovalente

$$e = \xi w = 4,69 \times 10^{-10} \text{ e.s.u.}$$

F. Richarz encontrou  $1,29 \times 10^{-10}$  e J. J. Thomson, recentemente,  $6,5 \times 10^{-10}$  <sup>168</sup>

Se a teoria é de todo correta, todas estas relações não deveriam ser aproximadamente, mas absolutamente, válidas. <sup>169</sup> A precisão dos números calculados é portanto essencialmente como daquela relativamente pior conhecida, a constante de radiação  $k$ , e é portanto muito melhor que todas as determinações daquelas quantidades feitas até agora. Testá-las por métodos mais diretos seria uma tarefa importante e necessária para posteriores pesquisas.” <sup>170</sup>

Sem dúvida a grande precisão desses valores determinados por Planck foram muito significativos para ele valorizar ainda mais as consequências de seu artigo, que ele próprio destacava muito mais que a própria concepção de quantização presente nesse histórico artigo. M. J. Klein, por outro lado, escreveu os seguintes comentários sobre esses resultados obtidos por Planck:

“Eu estou convencido que, com a particular sensibilidade de Planck para a importância das constantes naturais, foram estes resultados que garantiram a ele que os quanta eram mais que uma hipótese ad hoc, apenas útil para chegar à lei da radiação.” <sup>171</sup>

---

<sup>168</sup> “ $\xi$  (constante de Faraday) =  $1,29 \times 10^{10}$  c.g.s. (Richarz and Thomson) [= 96 100 coulombs mol<sup>-1</sup>]. Valor moderno (1971): 96 487 coulombs mol<sup>-1</sup>.”

O valor moderno (1971) para  $e$  é  $4,803 \times 10^{10}$  c.g.s.; portanto, o valor de Planck era de longe o mais preciso que se conhecia até 1900.” (Nota de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 59).

<sup>169</sup> “Planck referiu-se à massa do átomo de hidrogênio  $m$  e ao quantum elementar de eletricidade e pelos nomes coletivos ‘quanta elementares de matéria e eletricidade’ (1901).” (Nota 48 de Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 59).

<sup>170</sup> Max Planck. On the theory of the Energy Distribution Law on the Normal Spectrum. In: Hans Kangro, **op. cit.**, nota 127, p. 44-45.

<sup>171</sup> M. J. Klein, **op. cit.**, nota 111, p. 27.

Infelizmente contemporâneos de Planck não apreciaram esses resultados; os handbooks apresentavam determinações rústicas do número de Avogadro, ignorando o valor de Planck.<sup>172</sup>

### 3.4 O artigo de 1901<sup>173</sup>

No artigo de dezembro de 1900, Planck apresentou poucos desenvolvimentos matemáticos, afirmando que iria apresentar cálculos mais detalhados em artigo posterior, o que ele fez em 1901.

No entanto, gostaríamos de ressaltar que este último artigo apresentava, além de cálculos detalhados, uma grande diferença no que diz respeito à quantização de energia.

No artigo de 1900 Planck iniciou seu desenvolvimento baseado na hipótese de que  $\varepsilon = h\nu$ , sem nenhuma justificativa para essa igualdade. Também está evidente que a idéia de quantização, mesmo sendo um truque matemático, não estava clara para Planck, pois este afirmou que  $P$ , o número de elementos de energia que são distribuídos entre os  $N$  ressoadores, poderia não ser um número inteiro.<sup>174</sup>

Já no artigo de 1901, Planck refina sua quantização tomando *explicitamente*  $P$  como um número inteiro. Além disso, ele não impõe inicialmente a condição de que  $\varepsilon = h\nu$ , mas a estabelece através do desenvolvimento abaixo.

No artigo de dezembro de 1900, Planck calculou o valor de  $W$ . Se o substituirmos na expressão para a entropia dos  $N$  osciladores  $S_N = k \ln W$ .

$$S_N = k[(N+P)\ln(N+P) - N \ln N - P \ln P]$$

$$\text{Como } U_N = NU = P\varepsilon \Rightarrow P = \frac{NU}{\varepsilon}$$

<sup>172</sup> M. J. Klein, **op. cit.**, nota 111, p. 28.

<sup>173</sup> Original: Max Planck. Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. In: **Annalen der Physik**, v. 4, p. 503-563, 1901. Português: Sobre a lei de distribuição de energia no espectro normal. Tradução: Ildeu de Castro Moreira. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 4, p. 538-542, 2000. Max Planck, **op. cit.**, nota 151.

<sup>174</sup> Observação feita pelo professor Roberto Martins no Simpósio Comemorativo do Centenário da Constante de Planck, realizado na UNICAMP em 2000 (Roberto de Andrade Martins. **A natureza da quantização: o trabalho de Planck e suas interpretações até 1912**. Conferência – Simpósio Comemorativo do Centenário da Constante de Planck, Instituto de Física, Unicamp, 19 de outubro de 2000).

$$\begin{aligned}
S_N &= k \left[ \left( N + \frac{NU}{\varepsilon} \right) \ln \left( N + \frac{NU}{\varepsilon} \right) - N \ln N - \frac{NU}{\varepsilon} \ln \frac{NU}{\varepsilon} \right] \\
S_N &= kN \left[ \left( 1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) \ln \left( 1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) - \ln N - \frac{U}{\varepsilon} \ln N \cdot \frac{U}{\varepsilon} \right] \\
S_N &= kN \left[ \left( 1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) \ln N + \left( 1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) \ln \left( 1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) - \ln N - \frac{U}{\varepsilon} \ln N - \frac{U}{\varepsilon} \ln \frac{U}{\varepsilon} \right] \\
S_N &= kN \left[ \left( 1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) \ln \left( 1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \frac{U}{\varepsilon} \right] \quad (32)
\end{aligned}$$

Como a entropia é uma grandeza extensiva, isto é,  $S_N = N S$ , podemos encontrar a entropia de um único oscilador:

$$S = k \left[ \left( 1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) \ln \left( 1 + \frac{U}{\varepsilon} \right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \frac{U}{\varepsilon} \right] \quad (33)$$

A seguir, Planck mostrou que a lei de deslocamento de Wien pode ser enunciada pela simples relação  $S = f\left(\frac{U}{\nu}\right)$ . Comparando esse resultado com a expressão obtida acima para  $S$ , necessariamente o elemento de energia deveria ser proporcional à frequência. Assim Planck demonstrou a igualdade  $\varepsilon = h\nu$ .

Ainda, usando  $\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T}$  ele obteve a energia média  $U$  dos osciladores de frequência  $\nu$ :

$$\frac{\partial S}{\partial U} = k \left[ \frac{1}{h\nu} \cdot \ln \left( 1 + \frac{U}{h\nu} \right) + 1 - \frac{1}{h\nu} \cdot \ln \left( \frac{U}{h\nu} \right) - 1 \right] = \frac{1}{T}$$

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{h\nu} \cdot \ln \left( \frac{1 + \frac{U}{h\nu}}{\frac{U}{h\nu}} \right) = \frac{k}{h\nu} \ln \left( 1 + \frac{h\nu}{U} \right)$$

$$\frac{h\nu}{kT} = \ln \left( 1 + \frac{h\nu}{U} \right)$$

$$\exp \left( \frac{h\nu}{kT} \right) = 1 + \frac{h\nu}{U}$$

Assim:

$$U = \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (34)$$

Utilizando, portanto, a equação (18) Planck obteve a sua lei de distribuição de energia:

$$\mu_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad \text{ou}$$

$$K_\lambda d\lambda = \frac{8\pi ch}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{k\lambda T}\right] - 1} d\lambda \quad (35)$$

Integrando sobre todas as frequências, Planck obteve a lei de Stefan-Boltzmann e estabeleceu a relação entre  $k^4/h^3$  e  $\sigma$ . Dos valores de  $\sigma$  e  $h/k$  ele calculou a constante de Planck com o valor  $h = 6,55 \times 10^{-27}$  erg.s.

Para Planck a constante  $h$  teria uma significação mais profunda<sup>175</sup>, ligada à *ação*, daí o nome *quantum de ação*. Essa constante foi assim chamada, pois tem a dimensão de *ação*, que é energia multiplicada pelo tempo e cuja dedução é oriunda do *princípio de mínima ação*. Sabemos hoje que a constante  $h$  não tem essa significação proposta por Planck, além do que, como argumentado por Louis de Broglie (1892-1987), isso levaria a muitas complicações, pois não existe uma mecânica de conservação da *ação* e seria difícil representar uma grandeza que não se conserva como pertencente a uma estrutura atômica.

Numa carta, a R. W. Wood, datada de 7 de outubro de 1931, Planck tentava se lembrar das razões psicológicas que o teriam motivado a postular os quanta de energia. Num trecho dessa carta, Planck afirmava que:

*“Em poucas palavras, eu posso caracterizar todo o procedimento como um ato de desespero, desde que, por natureza, eu sou sossegado e contrário a aventuras duvidosas. Contudo, eu já tinha lutado por seis anos (desde 1894) com o problema do equilíbrio entre*

---

<sup>175</sup> Segundo Roberto de Andrade Martins, a escolha da letra  $h$  para a constante de Planck provavelmente tenha sido pelo fato de que esta caracteriza a radiação de corpo negro numa cavidade, que em alemão é *hohlraum* = objeto oco. Idem.

O físico francês François Vannucci afirma, contudo, em uma passagem de seu livro “O verdadeiro romance das partículas elementares” (\*) reproduzida em tradução livre a seguir, que: “Já em 1900, Max Planck havia introduzido uma nova constante da natureza,  $h$  (para *Hilfe*, cujo significado em alemão é *ajuda*), porque se tratava de resolver um problema desesperado, o da interpretação da distribuição da energia emitida por um corpo negro.” (\*) François Vanucci. *Le vrai roman des particules élémentaires*, Dunod, 2011, chapitre 4, p. 27.

*radiação e matéria sem ter alcançado nenhum resultado positivo. Eu estava ciente que este problema era de importância fundamental para a física, e eu conhecia a fórmula que descrevia a distribuição de energia no espectro normal [isto é, o espectro de um corpo negro]; portanto, uma interpretação teórica **tinha** de ser fornecida a todo custo, qualquer que fosse o preço, por mais alto que ele fosse.”*<sup>176</sup>

Ele chegou a admitir em sua autobiografia, publicada em 1947, que procurara “encaixar”, a qualquer custo, a constante  $h$  na física clássica. Isto significa que, quando propôs sua explicação para a radiação do corpo negro, que produziu as equações (35), Planck não esperava que sua teoria fosse contradizer qualquer parte da física clássica. Como dizem Mehra e Rechenberg:

“Ele acreditava que todos os passos que tinha tomado permaneceriam perfeitamente dentro do escopo da termodinâmica, da eletrodinâmica de Maxwell e da mecânica estatística de Maxwell e Boltzmann. Em sua opinião, ele tinha apenas contribuído um pouco para a mecânica estatística de Maxwell e Boltzmann oferecendo uma interpretação estatística adequada da entropia de radiação.”<sup>177</sup>

Como já observamos, tanto Einstein quanto Rayleigh, e mesmo Jeans, em 1905, perceberam novidades na formulação de Planck. Einstein inclusive iria utilizar o resultado da quantização na sua explicação do efeito fotoelétrico, introduzindo a descontinuidade na própria radiação emitida. Já Planck, ao contrário, nos anos seguintes, embora reconhecendo a importância de seu trabalho e a novidade que trazia para a física, procurou acomodar a sua idéia quântica original com a eletrodinâmica clássica. Planck acreditava, inicialmente, que a descontinuidade associada à sua equação aplicava-se ao emissor não ao que era emitido!

Em 1905, em carta a Ehrenfest, Planck afirmou ser possível que a constante  $h$  tivesse algum significado direto na eletrodinâmica, pois tinha as mesmas dimensões e também a mesma ordem de magnitude de  $e^2/c$ .<sup>178</sup>

---

<sup>176</sup> Citado por Jagdish Mehra e Helmut Rechenberg. **The historical development of quantum theory**. New York: Springer-Verlag, 1982, p. 49-50.

<sup>177</sup> Jagdish Mehra e Helmut Rechenberg, **op. cit.**, nota 176, p. 83.

<sup>178</sup> M. J. Klein, **op. cit.**, nota 111, p. 28.

É importante salientar aqui a diferença entre a quantização de energia como entendemos hoje e aquela que de certa maneira Planck estava propondo. O conceito de elementos de energia pensados por Planck era aplicável somente ao mecanismo de interação entre a matéria e a radiação.

Planck também utilizava as fórmulas do eletromagnetismo de Maxwell, que supõem a emissão e a absorção de energia contínua. Dessa forma a energia de cada ressoador e a energia total de um conjunto de ressoadores de determinada frequência não podiam ser descontínuos. Era apenas o oscilador de frequência  $\nu$  que podia emitir e absorver energia em múltiplos de  $h\nu$ .<sup>179</sup>

Planck não estendeu seu conceito de quantização para o resto da natureza, ou seja, ele entendeu que apenas no caso particular do corpo negro era possível se tratar o oscilador como tendo energia quantizada. Hoje em dia, segundo a mecânica quântica, sabemos que qualquer sistema que possua estados ligados (ou ainda, que esteja “preso” por um potencial sendo limitado a uma região do espaço, como o caso do oscilador harmônico) irá possuir estados quantizados, ou seja valores discretos de energia.<sup>180</sup>

Procuramos mostrar neste breve histórico que todo o trabalho de Planck é muito rico conceitualmente e matematicamente, como também que ele envolve todos os grandes ramos da física clássica: a eletrodinâmica (usada para estudar a emissão dos ressoadores), a termodinâmica, acompanhada pelos recentes desenvolvimentos na mecânica estatística e em menor escala a própria mecânica.

Dessa maneira, estudar a solução do PRCN é compreender melhor a própria estrutura da física clássica que antecedeu à teoria quântica, e conseqüentemente também aprofundar a compreensão desta última, através do contato com as dificuldades teóricas da época e as soluções encontradas. E, no que respeita particularmente o início do desenvolvimento da mecânica estatística, esse estudo ressalta a discretização da energia praticada por Boltzmann cerca de 30 anos antes de sua aplicação no PRCN. Vale mencionar estas palavras de Cássio Costa Laranjeiras:

---

<sup>179</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 28.

<sup>180</sup> E essa quantização não é necessariamente igual a múltiplos de  $h\nu$ .

“Este método de trabalho, que vimos chamando de “método de discretização de energia” (...) marca um importante aspecto da heurística Boltzmanniana que qualquer quantidade contínua é considerada como um limite de uma quantidade discreta. Este tratamento se constituiu em uma fonte de inspiração para Planck, quando do tratamento de questões relacionadas a radiação de corpo negro no final do século XIX e início do XX.”<sup>181</sup>

No entanto, toda essa riqueza não é bem aproveitada na formação de cientistas e professores e basicamente encontramos apenas a quantização de energia destacada na maior parte da literatura básica sobre a resolução do PRCN por Planck.

Ao contrário da opinião vigente nesses textos, julgamos que não tenha sido a quantização a grande contribuição de Planck, já que nos parece que ele mesmo não tenha se convencido muito a seu respeito. Além da inserção da constante  $h$  na física, que ele mesmo percebeu como importante e fundamental, o ponto central de todo o seu desenvolvimento estava na entropia do corpo negro em equilíbrio. Entretanto, como discutiremos mais adiante neste texto, o cálculo termodinâmico de Planck não é nem mesmo citado em muitos livros históricos, de divulgação científica, ou mesmo manuais didáticos.

---

<sup>181</sup> Cássio Costa Laranjeiras. **O programa de pesquisa de Ludwig Boltzmann para a mecânica estatística**. Tese de doutoramento, FFLCH, USP, São Paulo, 2002, p. 169-170.

### Anexo III – Estudo de um oscilador harmônico nas paredes de um corpo negro

Neste apêndice pretendemos encontrar a relação entre a energia média dos osciladores e a densidade de energia no interior da cavidade de um corpo negro. Vamos iniciar o estudo do problema com um modelo simplificado – o oscilador harmônico simples – que depois será aprimorado nas seções seguintes. O desenvolvimento que adotamos foi baseado no texto de Jammer<sup>182</sup>.

#### Oscilador Harmônico Simples

Seja um oscilador de carga  $q$  e massa  $m$  oscilando numa direção qualquer com constante de mola  $k$ . Tomando esta direção como o eixo  $x$ , com a origem no ponto de energia potencial nula, escrevemos o momento de dipolo  $f$  como:

$$f = q x \quad (3.1)$$

A energia  $U$  do oscilador numa dada posição é dada por:

$$U = \frac{1}{2} m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} k x^2$$

sendo o primeiro termo da direita a energia cinética e o segundo a energia potencial do oscilador.

Escrevendo  $K = k / q^2$  e  $L = m / q^2$ :

$$U = \frac{1}{2} L \left( \frac{df}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} K f^2 \quad (3.2)$$

A equação de força pode ser obtida diferenciando a equação acima:

$$\frac{d}{dt} U = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L \left( \frac{df}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} K f^2 \right) \Rightarrow L \frac{d^2 f}{dt^2} + K f = 0 \quad (3.3)$$

Esta equação tem como solução uma função oscilatória. Escolhendo  $f = A \cos \omega t$ :

$$-\omega^2 L A \cos \omega t + K A \cos \omega t = 0$$

---

<sup>182</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50.

Assim encontramos a frequência natural de oscilação:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{L}} \Rightarrow \nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{L}} \quad (3.4)$$

A constante  $A$  representa a amplitude de oscilação do oscilador. Quando  $x = A$ , a energia cinética é nula, portanto:

$$U = \frac{1}{2} K A^2 \Rightarrow A^2 = \frac{2U}{K} \quad (3.5)$$

em que  $U$  é a energia do oscilador.

Contudo, essa solução não é exata, visto que tal oscilador irá perder energia por radiação. Da teoria do eletromagnetismo uma carga oscilando (sendo assim acelerada) emite radiação com potência  $P$  dada pela equação<sup>183</sup>:

$$P = \frac{2}{3} \frac{(d^2 f / dt^2)^2}{c^3} \quad (3.6)$$

Se considerarmos que a perda de energia não é muito grande, de modo que o movimento continua sendo descrito pela solução anterior para  $f$ :

$$P = \frac{2}{3c^3} A^2 \omega^4 \cos^2 \omega t$$

Assim, a energia perdida em um período de oscilação  $T (=1/\nu)$  é:

$$\begin{aligned} \Delta U &= - \int_0^T P dt = - \int_0^T \frac{2}{3c^3} A^2 \omega^4 \cos^2 \omega t dt = - \frac{2}{3c^3} A^2 \omega^3 \int_0^{\omega T} \cos^2 \omega t d(\omega t) \\ \Delta U &= - \frac{2}{3c^3} A^2 \omega^3 \left( \frac{\omega T + \cos \omega T \sin \omega T}{2} \right) = - \frac{1}{3c^3} A^2 \omega^4 T \end{aligned}$$

visto que  $\omega T = 2\pi \Rightarrow \sin \omega T = 0$ .

Substituindo os valores para  $A$ ,  $\omega$  e  $T$ :

$$\Delta U = - \frac{1}{3c^3} \frac{2U}{K} (2\pi\nu)^4 \frac{1}{\nu} \Rightarrow \Delta U = - \frac{32\pi^4 \nu^3 U}{3c^3 K} \quad (3.7)$$

---

<sup>183</sup> Mark A Heald e Jerry B. Marion. **Classical electromagnetic radiation**. New York: Saunders College, 1995, p. 276.

Dessa forma, para obtermos uma descrição mais precisa do problema, iremos substituir o oscilador harmônico simples, por um amortecido, de maneira que a sua perda de energia seja dada pela expressão anterior.

### Oscilador Harmônico Amortecido

Como estudamos nos livros de Mecânica Geral, por exemplo Symon<sup>184</sup>, podemos relacionar a perda de energia de um oscilador com um amortecimento, que pode ser considerado adicionando um termo proporcional à derivada primeira na equação de força. Uma forma conveniente de escrevê-la é:

$$L \frac{d^2 f}{dt^2} + \frac{\sigma}{\pi} \sqrt{KL} \frac{df}{dt} + K f = 0 \quad (3.8)$$

Ou ainda em termos da frequência de oscilação do oscilador não amortecido:

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + \frac{\sigma}{\pi} \sqrt{\frac{K}{L}} \frac{df}{dt} + \frac{K}{L} f = 0 \Rightarrow \frac{d^2 f}{dt^2} + 2\nu\sigma \frac{df}{dt} + 4\pi^2 \nu^2 f = 0$$

No texto de Symon<sup>185</sup>, vemos que para um oscilador deste tipo a perda de energia é expressa por:

$$\frac{1}{U} \frac{dU}{dt} = -2\nu\sigma \quad (3.9)$$

Assim, substituímos na expressão anterior a perda de energia durante um período de oscilação ( $\Delta t = 1/\nu$ ) calculado na equação (3.7):

$$\begin{aligned} \frac{1}{U} \frac{\Delta U}{\Delta t} = -2\nu\sigma &\Rightarrow -\frac{1}{U} \frac{32\pi^4 \nu^3 U}{3c^3 K} \nu = -2\nu\sigma \\ \sigma &= \frac{16\pi^4 \nu^3}{3c^3 K} \end{aligned} \quad (3.10)$$

O valor de  $\sigma$  deve ser pequeno para que o oscilador não perca energia considerável durante um período de oscilação, visto que a expressão para  $\Delta U$  foi obtida no caso do oscilador harmônico simples (no qual não há perda de energia).

<sup>184</sup> Keith R. Symon. **Mecânica**. Rio de Janeiro: Campus, 1986, p. 67.

<sup>185</sup> Keith R. Symon, **op. cit.**, nota 184, p. 69.

Contudo, o oscilador que desejamos estudar não é ainda exatamente este. Como existe radiação no interior da cavidade que interage com a carga  $q$ , o sistema será um oscilador forçado, descrito na próxima seção.

### Oscilador Harmônico Forçado

Adicionando na equação (3.8) mais um termo de força, representado pelo campo  $Z$ <sup>186</sup> obteremos:

$$L \frac{d^2 f}{dt^2} + \frac{\sigma}{\pi} \sqrt{KL} \frac{df}{dt} + K f = Z$$

Ou em termos de  $\nu$ , utilizando o valor de  $L$  a partir de (3.4) e (3.10):

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + 2\nu \sigma \frac{df}{dt} + 4\pi^2 \nu^2 f = \frac{3c^3 \sigma}{4\pi^2 \nu} Z$$

No texto de Arfken<sup>187</sup>, vemos que qualquer função pode ser representada por uma série de Fourier, isto é, por uma série de senos e cossenos, com frequências  $\nu'$ ,  $2\nu'$ ,  $3\nu'$  etc. Podemos ainda representar qualquer função por uma série usando apenas cossenos, com a adição de uma fase apropriada  $\theta_n$  em cada termo. Usamos tal série para descrever  $Z$  (com os termos  $C_n$  constantes):

$$Z = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T'} t + \theta_n\right) \quad (3.11)$$

Para escrever  $f$ , é mais conveniente manter os senos e cossenos da série (com  $A_n$  e  $B_n$  constantes para cada termo da somatória):

$$f = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T'} t + \theta_n\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T'} t + \theta_n\right) \quad (3.12)$$

Em cada uma destas expressões,  $n$  varia de 1 a infinito, com  $T' = 1/\nu'$ .

<sup>186</sup> O campo  $Z$  será uma componente do campo elétrico ( $E_x$ ). O campo magnético não entra nessa equação pois este não realiza trabalho, visto que a força magnética é perpendicular ao deslocamento.

<sup>187</sup> George B. Arfken e Hans J. Weber. **Mathematical methods for physicists**. San Diego: Academic Press, 1995, p. 808.

Para facilitar a notação, denominamos  $\phi_n$  o argumento das funções *sen* e *cos* das expansões anteriores. Além disso, escrevemos  $\omega = 2\pi/T$ . Substituindo  $f$  e  $Z$  na equação de força:

$$-\omega^2 n^2 (A_n \cos \phi_n + B_n \sin \phi_n) + 2\sigma v n \omega (-A_n \sin \phi_n + B_n \cos \phi_n) + 4\pi^2 v^2 (A_n \cos \phi_n + B_n \sin \phi_n) = \frac{3c^3 \sigma}{4\pi^2 v} C_n \cos \phi_n$$

Para essa equação ter solução para qualquer tempo  $t$ , ou seja, para qualquer valor de  $\phi_n$ , os termos em *sen* e *cos* devem ser iguais dos dois lados da igualdade. Assim:

$$A_n (-n^2 \omega^2 + 4\pi^2 v^2) + B_n 2\sigma v n \omega = \frac{3c^3 \sigma}{4\pi^2 v} C_n$$

e

$$B_n (-n^2 \omega^2 + 4\pi^2 v^2) - A_n 2\sigma v n \omega = 0$$

Escrevendo:

$$\frac{4\pi^2 v^2 - n^2 \omega^2}{2\sigma v n \omega} = \frac{\pi(v^2 - n^2/T^2)}{\sigma v n/T} = \cot \gamma_n^{188} \quad (3.13)$$

Temos da segunda relação:

$$\frac{A_n}{B_n} = \cot \gamma_n \quad (3.14)$$

Da primeira relação:

$$A_n (-n^2 \omega^2 + 4\pi^2 v^2) + A_n 2\sigma v n \omega \operatorname{tg} \gamma_n = \frac{3c^3 \sigma}{4\pi^2 v} C_n$$

$$\Rightarrow A_n (\cot \gamma_n + \operatorname{tg} \gamma_n) = \frac{3c^3 \sigma}{4\pi^2 v} \frac{C_n}{2\sigma v n \omega} \Rightarrow A_n = \frac{3c^3 C_n \cos \gamma_n \sin \gamma_n}{8\pi^2 v^2 n \omega} \quad (3.15)$$

no qual utilizamos:

$$\cot \gamma_n + \operatorname{tg} \gamma_n = \frac{\cos \gamma_n}{\sin \gamma_n} + \frac{\sin \gamma_n}{\cos \gamma_n} = \frac{\cos^2 \gamma_n + \sin^2 \gamma_n}{\cos \gamma_n \sin \gamma_n} = \frac{1}{\cos \gamma_n \sin \gamma_n}$$

Assim, solução para  $f$  fica:

---

<sup>188</sup> Utilizamos *cot* para denominar cotangente.

$$f = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3c^3 C_n}{8\pi^2 \nu^2 n \omega} \left( \sin \gamma_n \cos \gamma_n \cos \phi_n + \sin^2 \gamma_n \sin \phi_n \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3c^3 C_n \sin \gamma_n}{8\pi^2 \nu^2 n \omega} \cos(\phi_n - \gamma_n)$$

$$f = \frac{3c^3}{16\pi^3 \nu^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n T}{n} \sin \gamma_n \cos \left( \frac{2\pi n}{T} t + \theta_n - \gamma_n \right) \quad (3.16)$$

no qual utilizamos a relação:  $\cos \gamma_n \cos \phi_n + \sin \gamma_n \sin \phi_n = \cos(\phi_n - \gamma_n)$

Como  $\sigma$  é pequeno, o valor de  $\cot \gamma_n$  será em geral grande, de modo que  $\sin \gamma_n$  será pequeno, pouco contribuindo então para  $f$ . Isto só não acontece se  $\nu \approx n/T' = n\nu'$  (ver expressão de  $\cot \gamma_n$ ). Assim, apenas os termos com  $n \approx \nu/\nu'$  precisam ser considerados na expansão de  $f$ . Podemos reescrevê-la como:

$$f = \frac{3c^3}{16\pi^3 \nu^3} \sum C_n \sin \gamma_n \cos \left( \frac{2\pi n}{T} t + \theta_n - \gamma_n \right) \quad (3.17)$$

A expressão para  $\cot \gamma_n$  também pode ser rescrita para esta situação. Escrevendo  $\nu - n/T' = w$ , temos:

$$\cot \gamma_n \cong \frac{\pi}{\sigma \nu^2} (\nu^2 - (\nu - w)^2) = \frac{\pi}{\sigma \nu^2} (2\nu w - w^2)$$

Como  $w \approx 0$ :

$$\cot \gamma_n \cong \frac{2\pi}{\sigma \nu} (\nu - n/T') \quad (3.18)$$

Uma vez encontrada a expressão para o momento de dipolo  $f$ , podemos encontrar a energia média do oscilador com frequência natural de oscilação  $\nu$ :

$$U_\nu = K \overline{f^2} = \frac{16\pi^4 \nu^3}{3c^3 \sigma} \overline{f^2} \quad (3.19)$$

Onde a barra indica o valor médio em uma oscilação:

$$\overline{f^2} = \frac{1}{T'} \int_0^{T'} f^2 dt \quad (3.20)$$

Então:

$$U_\nu = \frac{16\pi^4 \nu^3}{3c^3 \sigma} \left( \frac{3c^3}{16\pi^3 \nu^3} \right)^2 \times$$

$$\times \frac{1}{T'} \int_0^{T'} \sum_n \sum_m C_n C_m \sin \gamma_n \sin \gamma_m \cos \left( \frac{2\pi n}{T} t - \theta_n - \gamma_n \right) \cos \left( \frac{2\pi m}{T} t - \theta_m - \gamma_m \right)$$

Mas:  $\int_0^{T'} \cos\left(\frac{2\pi m}{T'} t\right) \cos\left(\frac{2\pi n}{T'} t\right) dt = \frac{T'}{2} \delta_{nm}$  para  $n = m \neq 0$ , com  $\delta_{nm}$  sendo a função Delta

de Kronecker<sup>189</sup>. Assim:

$$U_v = \frac{3c^3}{32\pi^2 \sigma v^3} \sum C_n^2 \sin^2 \gamma_n \quad (3.21)$$

Chamando  $J = \overline{Z^2}$  e utilizando o mesmo procedimento anterior para a média:

$$J = \frac{1}{2} \sum C_n^2 \quad (3.22)$$

O valor de  $J$  é importante, pois ele é proporcional a densidade de energia  $\mu$  no interior da cavidade. Novamente pelo eletromagnetismo<sup>190</sup>, a expressão para  $\mu$  é:

$$\mu = \frac{1}{8\pi} (\overline{E^2} + \overline{H^2}) \quad (3.23)$$

com  $E$  e  $H$  representando os campos elétrico e magnético respectivamente.

O campo no interior da cavidade é homogêneo:  $E_x = E_y = E_z$ . Além disso, no vácuo, as componentes do campo elétrico são iguais as do campo magnético<sup>191</sup>. Portanto:

$$\mu = \frac{1}{8\pi} 6\overline{Z^2} = \frac{3}{4\pi} J \quad (3.24)$$

Podemos decompor a densidade de energia  $\mu$  em termos dependentes da frequência  $\psi$  (utilizamos essa letra para não confundirmos com as frequências  $\nu$ , frequência natural, e  $\nu'$ , utilizada na expansão de  $f$ ):

$$\mu = \int_0^\infty \mu_\psi d\psi \quad \text{ou} \quad J = \int_0^\infty J_\psi d\psi \quad \text{com} \quad \mu_\psi = \frac{3}{4\pi} J_\psi$$

Agora, relacionamos as componentes de frequência de  $J$  com as de  $U$  através da relação:

$$J_\psi = k_\psi U_\psi \quad (3.25)$$

com  $k_\psi$  função de  $\psi$ .

Lembramos mais uma vez que nesse apêndice desejamos encontrar a relação entre a energia média dos osciladores e a densidade de energia no interior da cavidade de um corpo

<sup>189</sup> George B. Arfken, **op. cit.**, nota 187, p. 11.

<sup>190</sup> Mark A. Heald e Jerry B. Marion, **op. cit.**, nota 183, p. 145.

<sup>191</sup> Ibidem, p. 173.

negro para uma dada frequência. Ou seja, a relação entre  $U_\psi$  e  $\mu_\psi$ . Resta-nos assim calcular o valor de  $k_\psi$ .

Comparando as duas expressões para  $J$ :

$$\frac{1}{2} \sum C_n^2 = \frac{3c^3}{32\pi^2} \int_0^\infty \frac{k_\psi}{\sigma \psi^3} \sum C_n^2 \sin^2 \gamma_n d\psi$$

Trocando a ordem da somatória e da integral:

$$1 = \frac{3c^3}{16\pi^2} \int_0^\infty \frac{k_\psi}{\sigma \psi^3} \sin^2 \gamma_n d\psi$$

Como vimos que os termos que precisamos levar em conta são aqueles em que  $\psi \approx \nu \approx n/T'$ , portanto:

$$1 = \frac{3c^3}{16\pi^2} \frac{k_\nu}{\sigma \nu^3} \int_0^\infty \sin^2 \gamma_n d\psi \quad (3.26)$$

Mas, como  $\sin^2 \gamma_n = (1 + \cot^2 \gamma_n)^{-1}$ ; utilizando (3.18):

$$\int_0^\infty \sin^2 \gamma_n d\psi = \int_0^\infty (1 + \cot^2 \gamma_n)^{-1} d\psi = \int_0^\infty \left( 1 + \frac{4\pi^2 (\psi - \nu)^2}{\sigma^2 \nu^2} \right)^{-1} d\psi$$

Fazendo uma troca de variáveis:

$$\frac{2\pi(\psi - \nu)}{\sigma \nu} = \tan \chi \Rightarrow \psi = \frac{\sigma \nu}{2\pi} \tan \chi + \nu \Rightarrow d\psi = \frac{\sigma \nu}{2\pi} \frac{d\chi}{\cos^2 \chi}$$

Para os novos limites de integração:

$$\psi = \infty \Rightarrow \chi = \frac{\pi}{2}$$

$$\psi = 0 \Rightarrow \tan \chi = -\frac{2\pi}{\sigma}$$

Como  $\sigma$  é pequeno,  $\tan \chi$  é grande em módulo, de modo que:

$$\psi = 0 \Rightarrow \chi \approx -\frac{\pi}{2}$$

$$\int_0^\infty \sin^2 \gamma_n d\psi = \frac{\sigma \nu}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{1}{1 + \tan^2 \chi} \frac{d\chi}{\cos^2 \chi} = \frac{\sigma \nu}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\chi = \frac{\sigma \nu}{2}$$

Portanto, voltando a (3.26):

$$1 = \frac{3c^3}{16\pi^2} \frac{k_\nu}{\sigma \nu^3} \frac{\sigma \nu}{2} \Rightarrow k_\nu = \frac{32\pi^2 \nu^2}{3c^3} \quad (3.27)$$

$$J_\nu = \frac{32\pi^2 \nu^2}{3c^3} U_\nu \quad (3.28)$$

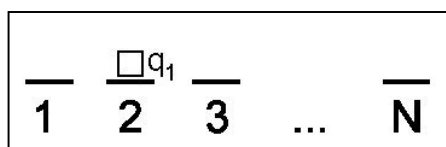
Como  $\mu_\nu = \frac{3}{4\pi} J_\nu$ , chegamos na relação utilizada por Planck entre a energia média dos osciladores e a densidade de energia do campo de radiação para uma frequência  $\nu$ :

$$\mu_\nu = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} U_\nu \quad (3.29)$$

## Anexo IV – Análise Combinatória

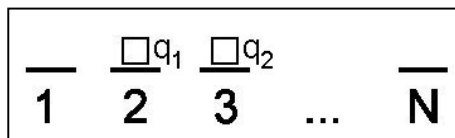
Queremos calcular o número de modos em que  $P$  quanta de energia podem ser divididos em  $N$  osciladores.

Sem o uso de fórmulas prontas da análise combinatória, podemos fazer o seguinte raciocínio: imaginemos inicialmente que os quanta de energia sejam elementos distinguíveis, rotulando cada um deles por  $q_i$  ( $q_1...q_P$ ). O primeiro quantum de energia pode ser colocado em qualquer oscilador. Existem  $N$  modos de se fazer isso. Na figura abaixo vemos um exemplo no qual este quantum é colocado no oscilador número 2.

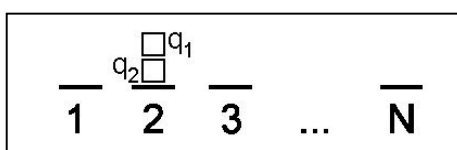


situação 1

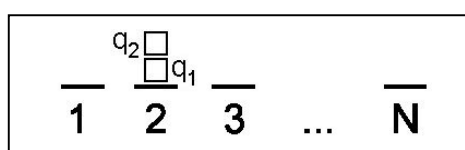
Para colocar o quantum  $q_2$ , podemos escolher qualquer um dos  $N-1$  osciladores “vazios” (situação 2), ou ainda escolher o oscilador 2 novamente. Neste último, contudo, existem 2 maneiras possíveis, colocando-o antes ou depois de  $q_1$  (situações 3a e 3b).



situação 2



situação 3a



situação 3b

Dessa forma, existem  $(N-1)+2$  maneiras de colocar o quantum  $q_2$  nos osciladores, ou seja,  $N+1$  possibilidades.

Para colocar  $q_3$ , temos que analisar a maneira como  $q_2$  foi disposto. Na situação 2,  $q_3$  pode ser disposto nos  $N-2$  osciladores “vazios” ou nos outros dois “ocupados”. Em cada um dos osciladores “vazios”, pelo raciocínio anterior, o quantum pode ser colocado de 2 modos, de forma que o número de possibilidades de colocar  $q_3$  nessa situação é  $N+2$ .

Na situação 3, além de posicionar  $q_3$  nos  $N-1$  osciladores “vazios”, podemos colocá-lo de três maneiras no oscilador 2 (antes de  $q_1$ , entre  $q_1$  e  $q_2$  e após  $q_2$ ).

Vemos então que, em ambos casos, existem  $N+2$  modos de dispor  $q_3$ .

Continuando o raciocínio, o quantum  $q_4$  poderá ser disposto de  $N+3$  modos, não importando a disposição dos quanta anteriores. Assim, o último quantum  $q_P$  poderá ser disposto de  $N+P-1$  modos.

Portanto, o número total de modos de arranjar todos os quanta será:

$$N \times (N+1) \times (N+2) \times \dots \times (N+P-1)$$

Entretanto, fisicamente, os quanta são indistinguíveis e a permutação entre dois deles não altera o sistema físico. Como existem  $P!$  maneiras de permutar os quanta, o número de modos ( $W$ ) de distribuir os  $P$  quanta entre os  $N$  osciladores é dado por:

$$W = \frac{N \times (N+1) \times (N+2) \times \dots \times (N+P-1)}{P!} \quad (4.1)$$

Multiplicando o numerador e o denominador dessa fração por  $(N-1)!$ , temos:

$$W = \frac{(N-1)! \times N \times (N+1) \times (N+2) \times \dots \times (N+P-1)}{(N-1)! P!}$$

De modo que:

$$W = \frac{(N+P-1)!}{(N-1)! P!} \quad (4.2)$$

## Capítulo 4

### Dando um fecho nessa “história internalista” do surgimento do quantum

*“Enquanto Planck limitou-se cautelosamente a argumentos estatísticos e enfatizou as dificuldades de abandonar os fundamentos clássicos na descrição detalhada da natureza, Einstein apontou ousadamente para a necessidade de levar em conta o quantum de ação nos fenômenos atômicos individuais.”*

Niels Bohr<sup>192</sup>

#### 4.1 Uma breve cronologia dos primeiros 30 anos da física quântica

Apenas para situar cronologicamente na escala da evolução dos principais desenvolvimentos ocorridos nos trinta anos que se seguiram aos dois trabalhos de Planck, vale a pena prestar atenção aos destaques apresentados por George Gamow:

1. 1900: Max Planck rompia com a distribuição contínua de energia e introduz seus pacotes discretos de energia nos mecanismos de emissão e absorção de radiação pelos átomos constituintes da matéria;

2. 1905: Albert Einstein utilizava o quantum de ação para explicar a interação da luz com a matéria, na explicação das conclusões empíricas do “efeito fotoelétrico”, introduzindo o quantum de luz independente da emissão e absorção da radiação pelos átomos;

3. 1913: o físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) descrevia a energia mecânica dos elétrons dentro dos átomos estabelecendo “regras de quantização” para dimensões atômicas dando uma interpretação significativa para o modelo atômico planetário de Ernest Rutherford (1871-1937);

4. 1923: o físico norte-americano Arthur Holly Compton (1892-1962) realizou uma importante experiência, comprovando mais uma vez o aspecto granular da luz sugerido por

---

<sup>192</sup> Niels Bohr. **Física atômica e conhecimento humano - ensaios 1932-1957**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995, p. 108. Esse livro de Bohr apresenta um conjunto de sete ensaios onde ele não apenas discute sua visão da física do século XX, como também propõe uma extensão de suas ideias sobre a complementaridade constituindo uma espécie de lição epistemológica que ele aplicou em diversas áreas do conhecimento, como atestam vários dos ensaios aí apresentados. A epígrafe foi extraída do discurso proferido em Copenhague, em outubro de 1955, e que recebeu o título: **Os átomos e o conhecimento humano**.

Einstein, explicando a dispersão de raios-X por elétrons livres utilizando as leis da mecânica da colisão de esferas elásticas; essa experiência ficou conhecida como “efeito Compton”;

5. 1925: o físico francês Louis de Broglie (1892-1987), procurando uma interpretação para as órbitas quantizadas introduzidas por Bohr, acabou associando ao movimento de cada elétron um mecanismo ondulatório que ele batizou de “onda piloto”; onda e partícula encontravam-se mais uma vez na história da física;

6. 1926: inspirado pelo trabalho de de Broglie, o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) apresentou uma formulação matemática mais adequada para as ideias de de Broglie, introduzindo sua famosa equação; nascia assim a “mecânica ondulatória”;

7. 1926: o físico alemão Werner Heisenberg oferecia um tratamento alternativo ao de Schrödinger para todos esses avanços quânticos usando uma “álgebra não comutativa” expressa através de uma linguagem matemática matricial;

8. 1929: o físico inglês Paul A. M. Dirac (1902-1984) apresentava a “equação de onda relativística” unificando pela primeira vez as teorias da relatividade de Einstein e a mecânica quântica, que até esse ano caminhavam distanciadas uma da outra; dessa feliz aproximação surgiram os anti-elétrons de carga elétrica positiva (pósitron) e a teoria das anti-partículas.<sup>193</sup>

Foi certamente influenciado por esse desenvolvimento extraordinário, e para ele surpreendente, que George Gamow, parodiando um livro clássico de John Reed, deu o título *Trinta anos que abalaram a física* para seu livro de 1966.

Muito ainda poderia ser dito sobre o estudo da radiação do corpo negro e a passagem ou ruptura da física clássica para a física quântica, juntamente com o início da história da ideia do quantum de ação, provocados pelos dois trabalhos fundamentais de Planck de 1900. Há uma extensa quantidade de textos que tratam desse acontecimento segundo as mais variadas perspectivas, desde a discussão da construção da Lei da Radiação de Planck até a recepção de suas ideias nos anos iniciais do século XX.

Neste capítulo, pretendemos finalizar este estudo de caso de uma história construída quase exclusivamente segundo o referencial de uma “história internalista”. Apresentaremos um balanço efetuado por alguns autores incluindo o próprio Planck e vários de seus importantes contemporâneos, sobre a reação a essas ideias iniciais sobre a física quântica.

---

<sup>193</sup> Baseamo-nos aqui em diferentes partes do livro de Gamow já referido anteriormente, **op. cit.**, nota 40.

No capítulo seguinte, discutiremos brevemente os principais problemas nas abordagens dos manuais didáticos de nível superior sobre o assunto e procuraremos mostrar que o potencial pedagógico do PRCN é muito amplo e rico para se restringir apenas como introdução aos cursos de física moderna.

No último capítulo, concluindo a apresentação de diferentes abordagens da história, apresentaremos um breve estudo de caso de uma “história externalista” baseado nas possíveis origens sociais do livro *Principia* de Newton, centrado no trabalho clássico do físico soviético Boris Hessen (1893-1936).

## 4.2 Repercussão e consequências da solução de Planck para o PRCN

Já comentamos o fato de que Planck tardou muito a aceitar o caráter revolucionário de sua descoberta ou invenção teórica, ou seja, traduzindo em termos de algumas das propostas epistemológicas que estudamos na 1ª parte destas *Notas de Aula*, ele recusava a ideia de que tivesse provocado uma refutação da física clássica (Popper) ou ruptura/revolução com a ciência normal/obstáculo epistemológico da mecânica e do eletromagnetismo clássicos (Kuhn e/ou Bachelard).

Embora sua formulação matemática tenha se mostrado satisfatória, seu desenvolvimento teórico não chamou atenção, não evocando rapidamente um abandono da física clássica. Em 1909, por exemplo, Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) afirmou que “*não podemos dizer que o mecanismo do fenômeno tenha sido invalidado [pela teoria de Planck], e deve ser admitido que é difícil ver a razão para esta distribuição de energia por porções finitas, que não são iguais entre cada um, mas variam de um ressoador para outro*”.<sup>194</sup>

Assim, a dedução teórica de Planck não foi muito discutida na época, sua lei foi confirmada e aceita, já que se adequava aos dados experimentais e a constante  $h$  se mostrava como um truque matemático sem importância. Outra dificuldade para sua aceitação é que esta não representava nenhuma conservação, já que não existe nenhum princípio de conservação da ação (energia x tempo). Também como Lorentz observou, Planck não levou em conta a interação da radiação com o éter, cujo escopo teórico ainda fazia parte da física teórica.

---

<sup>194</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 24.

Albert Einstein (1879-1955), em 1906, reconheceu uma inconsistência lógica no trabalho de Planck. Na primeira parte de sua resolução Planck tratou a energia dos osciladores como uma variável contínua<sup>195</sup>, como estabelecido na teoria eletromagnética e depois tratou essa mesma energia como discreta, assumindo valores múltiplos de  $h\nu$ . Para que a consistência interna do trabalho de Planck fosse mantida cada porção de energia  $\varepsilon = h\nu$  deveria ser pequena comparada com a energia média  $U$  de um ressonador, propiciando assim que a quantização fosse desprezível. E este não era o caso, como Einstein mostrou em 1909.

No entanto, essa inconsistência interna no trabalho de Planck não foi suficiente para que Einstein rejeitasse seu trabalho, ele apenas observou que a teoria da radiação é que deveria ser alterada.

Peter Joseph Wilhelm Debye (1884-1966) também trabalhou procurando sanar a inconsistência lógica no trabalho de Planck. Sua resolução para o problema, em 1910, é muito parecida com aquela apresentada nos manuais didáticos atualmente. Inicialmente ele calculou o número  $N d\nu$  de ondas estacionárias com frequência entre  $\nu$  e  $\nu + d\nu$  numa caixa de volume unitário:

$$N d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} d\nu \quad (36)$$

Ao assumir que as  $N d\nu$  vibrações consistiam de  $f(\nu)$  quanta de energia contendo cada uma a energia  $h\nu$ , ele propôs assim uma quantização da energia sem a necessidade do conhecimento das propriedades e do mecanismo dos ressoadores:

$$u d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} f(\nu) d\nu \quad (37)$$

Definindo “radiação de corpo negro” como a “mais provável radiação”, isto é, como o estado com o maior número possível de distribuições de quanta  $f(\nu)$  sobre os  $N d\nu$  receptores, Debye provou usando a fórmula combinatória de Planck que, neste caso,  $f(\nu) = \left[ \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}$ , um resultado que em combinação com a fórmula anterior implica na lei de Planck da radiação.<sup>196</sup>

---

<sup>195</sup> Como discutido no **Anexo III**.

<sup>196</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 26.

### 4.3 O trabalho de Einstein

Em 1905, no artigo “Um ponto de vista heurístico concernente à produção e transformação da luz”, ano da publicação de outros quatro grandes trabalhos, entre os quais a teoria da relatividade especial, Einstein discutiu o efeito fotoelétrico<sup>197</sup> e propôs que a radiação fosse composta por um número finito de quanta de energia (que hoje denominamos de fótons<sup>198</sup>). Para chegar a esse resultado Einstein também utilizou, entre outros, o conceito de entropia.

No entanto, mesmo conhecendo o trabalho de Planck, Einstein não se baseou neste para desenvolver sua teoria e não usou<sup>199</sup> a constante  $h$ , embora cite o desenvolvimento de Planck para a resolução do problema da radiação de corpo negro.

Ele chegou à conclusão que:

“(...) na propagação de um raio de luz emitido de uma fonte pontual, a energia não é distribuída continuamente sobre volumes crescentes de espaço, mas consiste de um finito número de quanta de energia localizados em pontos do espaço que se movem sem divisão, e podem ser absorvidos ou gerados apenas como unidades completas.”<sup>200</sup>

<sup>197</sup> O efeito fotoelétrico, assim denominado depois de 1905, consistia na emissão de elétrons da superfície de um metal ao se incidir radiação de determinadas frequências. Três aspectos básicos do fenômeno não conseguiam ser explicados pela teoria ondulatória da luz. Primeiramente a energia cinética máxima dos elétrons emitidos não dependia da intensidade da luz. Em segundo lugar havia uma frequência mínima da radiação a partir da qual o fenômeno acontecia. E por fim, mesmo para intensidades bastante baixas de radiação, os elétrons podiam ser quase que instantaneamente emitidos (isto é, não era necessário um tempo longo para absorção de energia do campo elétrico por parte do material e posterior emissão).

<sup>198</sup> O termo fóton foi introduzido por G. N. Lewis em 1926 (Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 30). O historiador da ciência dinamarquês Helge Kragh aponta, porém, que “Após G. N. Lewis (1875-1946) ter proposto o termo “fóton” em 1926, muitos físicos o adotaram como o termo mais adequado para o quantum de luz de Einstein. No entanto, o conceito de fóton para Lewis era muito diferente, algo que poucos físicos conheciam ou se preocupavam em conhecer. Além disso, o termo adotado por Lewis também não era o neologismo que geralmente se supõe ser. O mesmo termo já havia sido proposto ou usado anteriormente; e aparentemente de forma independente, por pelo menos quatro outros cientistas. Três dentre os quatro significados que originaram o termo estavam relacionados ao campo da fisiologia ou da percepção visual e apenas um ao da física quântica. O precursor na utilização do termo foi o físico e psicólogo americano L. T. Troland (1889-1932), que cunhou o conceito em 1916. Cinco anos depois ele foi introduzido independentemente pelo físico irlandês J. Joly (1857-1933). Em 1925, o fisiologista francês Rene Wurmser (1890-1993) escreveu sobre o fóton e em julho de 1926, seu compatriota, o físico F. Wolfers (ca. 1890-1971) fez o mesmo no contexto da ótica física. Nenhuma das quatro versões que antecederam a versão de Lewis se tornaram muito conhecidas e rapidamente foram esquecidas.” (tradução livre). Helge Kragh. **Photon: New light on an old name**. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1401.0293v3>>. Acesso em: julho de 2020.

<sup>199</sup> No lugar de  $h$  ele usou  $R\beta N$ .

<sup>200</sup> John Stachel (edição e introdução). **O ano miraculoso de Einstein – cinco artigos que mudaram a face da física**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2001.

Ou seja, a radiação monocromática comporta-se como se consistisse de quanta independentes de energia de magnitude  $R\beta v / N$ , com  $R$  sendo a constante dos gases e  $N$  o número de Avogadro<sup>201</sup>. Ou seja, enquanto a quantização de Planck se relacionava com a interação da luz com a matéria, Einstein quantizava a radiação em trânsito e também assumia que a interação da luz com a matéria consistia da emissão e absorção de tais quanta.

Suas ideias confrontavam com a tão já bem estabelecida compreensão da luz pelo modelo ondulatório. Contudo, apesar de que na época não fosse notório, os experimentos realizados até então, que evidenciavam a natureza ondulatória para a luz, não provavam que ela não podia também ser granular. De certa maneira, Einstein inseriu na discussão onda *ou* partícula para a luz o conectivo *e*, abolindo o *ou*. Até então esse possível aspecto dual para a luz nunca fora colocado em questão.

Entretanto, esse trabalho de Einstein não foi levado a sério, pois não explicava os fenômenos de interferência, difração e polarização da luz.

O primeiro autor a utilizar a noção de quanta de luz de Einstein foi Johannes Stark (1874-1957), em 1907, sugerindo inclusive que a quantização de energia se aplicava até mesmo aos elétrons<sup>202</sup>.

---

<sup>201</sup>  $R/N = k$  e  $\beta = h/k$ .

<sup>202</sup> Roberto de Andrade Martins (2000). Vide nota 174.

Entre 1900 e 1910 surgiu um grande número de artigos sobre o efeito fotoelétrico, que na época também se tornou tema de pesquisa de muitos físicos experimentais.

Quatro meses antes de Einstein submeter o seu artigo sobre os quanta de luz nos *Annalen der Physik*, em março de 1905, um trabalho de Egon Ritter von Schweidler (1873-1948) sobre “os fenômenos fotoelétricos” já havia sido publicado no primeiro volume do anuário de radioatividade e eletrônica (*Jahrbuchs der Radioaktivität und Elektronik*) editado por Johannes Stark (1874–1957).

Stark foi uma das personagens mais controversas da física dos anos 1900. De um lado, publicou importantes trabalhos experimentais nos campos de descarga de gases e espectroscopia, descobriu o efeito Doppler em feixes de canal e a divisão das linhas espectrais no campo elétrico (conhecido atualmente como o efeito Stark). Em 1919 recebeu o Prêmio Nobel de Física pelo trabalhos sobre como campos elétricos afetam a luz emitida pelos átomos. De outro lado, tentou tornar-se dirigente da física na Alemanha durante o nazismo aderindo, juntamente com Philipp Lenard (prêmio Nobel em 1905), ao movimento em prol da “física alemã” (*Deutsche Physik*) contra a “física judaica” de Albert Einstein e Werner Heisenberg (que não era judeu). Após Werner Heisenberg defender a teoria da relatividade de Einstein, Stark escreveu um artigo difamatório no “*Das Schwarze Korps*”, acusando-o de ser um “judeu branco”.

Paradoxalmente, Stark foi também um dos primeiros e mais apaixonados defensores da hipótese do quantum de luz de Einstein. Em um debate entre Einstein e Planck, em 1909, durante a reunião de cientistas naturais em Salzburgo, Stark ficou do lado de Einstein. Isso fez dele um dos primeiros defensores da concepção de Einstein de que o próprio campo de radiação, e não apenas a sua interação com a matéria, era quantizado. Klaus Hentschel (ed.). *Lichtquanten. Die Geschichte des komplexen Konzepts und mentalen Modells von Photonen*. Stuttgart: Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2017, p. 137-146.

Em 1914, estudando o efeito fotoelétrico, Robert Andrews Millikan (1868-1953) realizou a primeira determinação direta da constante de Planck, que corroborou o resultado calculado por Planck. Com essa confirmação o quantum de ação transformou-se numa realidade física.

Em 1922, Arthur Holly Compton (1892-1962) realizou um experimento idealizado por Stark em 1909, no qual confirmou a hipótese dos quanta de luz e sua transferência de momento.

Contudo, o completo entendimento da natureza dual da luz só foi obtido com o estabelecimento da mecânica quântica, visto que as dificuldades na aplicação simultânea dos modelos corpuscular e ondulatório para a luz levaram à rejeição das ideias de Einstein. Podemos notar essa discordância no ato da indicação de Einstein para membro da Academia de Ciências Prussiana, em junho de 1913. Num documento assinado pelos mais eminentes físicos alemães, entre os quais se encontrava Planck, foi declarado ao término da recomendação:

“(...) podemos dizer que não existe, entre os grandes problemas nos quais a física moderna é tão rica, um único em que Einstein não tenha feito uma importante contribuição. Que ele possa às vezes ter errado o alvo em suas especulações, como, por exemplo, em suas hipóteses dos quanta de luz, não pode realmente ser tomado muito contra ele, pois não é fundamentalmente possível introduzir novas idéias, como na maioria das ciências exatas, sem ocasionalmente se arriscar.”<sup>203</sup>

Deve-se ressaltar que apesar de Planck ter sido um físico conservador no que diz respeito às suas concepções metodológicas, como destacamos ao longo do estudo que fizemos de suas contribuições de 1894 a 1901, ele foi um dos primeiros físicos a defender a teoria da relatividade de Einstein que, nos primeiros anos depois de 1905, tinha ainda pouquíssimos defensores. Portanto, não há dúvida de que ele tivesse Einstein em alta conta desde então. Mesmo assim não aceitava muito bem as contribuições quânticas de Einstein que, aliás, seria sempre, até o final de sua vida, uma espécie de “marginal” face aos desenvolvimentos subsequentes da física quântica.

Provavelmente devido a essa característica como um físico metódico e cauteloso nos leve a compreender porque, em 1905/6, por ocasião da publicação dos artigos de Einstein sobre

---

<sup>203</sup> Citado por Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 44.

a explicação do “efeito fotoelétrico” e sobre a distribuição da radiação do corpo negro, Planck não aceitasse o quantum de luz sugerido por Einstein.

Segundo Jammer, o trabalho de Planck, de dezembro de 1900, continha certas implicações que, ao serem reconhecidas por Einstein, afetariam de maneira decisiva os fundamentos da física. Segundo esse autor, as raízes da teoria quântica que surgiriam nos anos seguintes podem ser vislumbradas num artigo de Einstein de 1909, **Sobre o estado atual do problema da radiação**, no qual ele calculou as flutuações da energia num volume parcial  $V$  de uma cavidade isotérmica a temperatura  $T$ . Sendo  $E_\nu$  a energia instantânea com frequência entre  $\nu$  e  $\nu+d\nu$ ,  $\overline{E}_\nu$  a energia média e  $E_{flut}$  a flutuação de energia ( $E_{flut} = E_\nu - \overline{E}_\nu$ ), ele chegou à seguinte expressão:

$$\overline{E_{flut}^2} = \overline{E}_\nu h\nu + \frac{c^3 \overline{E}_\nu^2}{8\pi\nu^2 V d\nu} \quad (38)$$

O segundo termo da soma na equação acima seria então

“(…) a flutuação média da energia ao quadrado devido a interferências entre ondas parciais, como Einstein mostrou em seu artigo por uma simples análise dimensional e como Lorentz subsequentemente demonstrou em detalhes rigorosos. Isto é, portanto, exatamente o termo que tinha sido esperado com base na teoria ondulatória ou Maxwelliana da luz. O primeiro termo, por outro lado, enquanto inexplicável deste ponto de vista, podia facilmente ser tomado, como Einstein apontou, com base em sua hipótese dos quanta de luz.”<sup>204</sup>

Jammer afirma ainda que a razão definitiva para a descoberta estatística da dualidade da luz foi a lei de radiação de Planck. Segundo esse autor se a radiação era tratada na forma

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = \frac{const}{U^2} \quad (39)$$

que desembocaria na lei de Rayleigh-Jeans, o cálculo da flutuação de energia daria o segundo termo da equação (38), o que corresponderia a uma compreensão ondulatória para a luz. Já se a lei de Wien for usada na forma:

---

<sup>204</sup> Ibidem, p. 38.

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = \frac{const}{U} \quad (40)$$

o cálculo da flutuação de energia se restringiria ao primeiro termo da soma da equação (38), o que corresponderia a uma compreensão corpuscular para a luz.

Assim Planck, ao realizar a sua interpolação entre as equações acima usando

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = \frac{a}{U(b+U)} \quad (41)$$

fez um amálgama dos aspectos ondulatórios e corpusculares para a luz, embora ele não tenha percebido o fato. Max Jammer afirma que

“(...) esta conclusão também segue do fato de que para baixas frequências, o range de validade da equação (1.10) [equação (39)], o primeiro termo da soma sob discussão pode ser negligenciado em comparação com o segundo, enquanto que para altas frequências, em que a equação (1.8) [equação (40)] é válida, a equação (1.19) [equação (38)] se reduz para  $\overline{E_{flut}^2} = \overline{E}_\nu h\nu$ , a fórmula de flutuação para partículas de um gás ideal.”<sup>205</sup>

É por essa razão que Jammer prefere adotar o dia 19/10/1900 como a data do nascimento da mecânica quântica.

#### 4.4 Alguns dos trabalhos posteriores de Planck

Numa revisão sobre as teorias para a radiação feita em 1910, Planck, dispondo as teorias num espectro, colocou a sua teoria como central, a de Rayleigh-Jeans à extrema direita e a de Einstein (entre outros) completamente oposta a esta última.

Para Einstein a radiação seria considerada como uma coleção de independentes partículas de quanta de luz-energia. Planck não aceitava esse ponto de vista, embora estivesse inteiramente comprometido com o quantum. Também “*estava certo de algo mais: a descontinuidade expressa por seu quantum de ação era real e deveria ser levada em conta*”<sup>206</sup>.

<sup>205</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 45.

<sup>206</sup> Martin J. Klein, **op. cit.**, nota 111, p. 24.

Ele chegou à conclusão de que deveria concordar com posições mais radicais como a de Einstein, mas somente para o caso do problema da radiação do corpo negro.

Planck não queria abrir mão dos desenvolvimentos de Huygens, Maxwell e Hertz, o que já não ocorria com relação à mecânica, pois ele acreditava que talvez não fossem tão geralmente válidas as equações de Hamilton.

Em um artigo lido em 1911 para a Sociedade Física Alemã, Planck revisou sua teoria inicial, no qual procurava rebater as críticas recebidas, principalmente de Lorentz.

“A objeção foi basicamente que a intensidade da radiação em altas frequências era muito baixa, enquanto que nestas frequências o quantum de energia era muito grande. Como consequência o tempo que um oscilador levaria para absorver um quantum deveria ser excessivamente grande, e o oscilador poderia não ser capaz de absorver um quantum completo se a radiação fosse cortada.”<sup>207</sup>

Na verdade, essa aparente contradição poderia ter sido resolvida com a solução de Einstein para o efeito fotoelétrico, mas Planck não foi por esse caminho.

“Ele propôs ao invés disso abandonar sua hipótese de que a energia de um oscilador tinha que ser um múltiplo inteiro de  $h\nu$  e poderia, portanto, absorver ou emitir energia somente em unidades discretas. Em sua nova teoria o oscilador poderia absorver energia continuamente, como no caso clássico (...).”<sup>208</sup>

Contudo, a emissão ainda continuava quantizada.

Com essa teoria Planck também eliminava um problema de consistência interna de sua teoria, pois classicamente não era possível os osciladores terem energias descontínuas.

Em 1912, completando sua assim chamada “segunda teoria”, Planck chegou a uma nova expressão para a quantização de energia com um termo adicional, o que correspondia ao fato de que a energia do oscilador não era nula no zero absoluto de temperatura, ficava em  $h\nu/2$ . Hoje

---

<sup>207</sup> Idem, p. 30.

<sup>208</sup> Ibidem.

conhecida como energia de ponto-zero. Planck também nesse artigo realizou mudanças significativas no conceito de probabilidade de emissão dos osciladores.

Ainda sobre a complexa relação de Planck com a conceituação dos quanta, vale reproduzir um trecho do prefácio, escrito em novembro de 1912, do seu livro sobre radiação térmica:

“Enquanto muitos físicos, de índole conservadora, rejeitam as idéias que desenvolvi, ou, de qualquer forma, mantêm uma atitude de expectativa, alguns autores têm-nos atacado por razão oposta, a saber, como sendo inadequadas, e foram compelidos a suplementá-las com suposições de uma natureza ainda mais radical, por exemplo, pela suposição de que qualquer energia radiante, mesmo que se desloque livremente no vácuo, consiste de quanta ou células indivisíveis. Desde que nada é provavelmente um obstáculo maior para o desenvolvimento bem sucedido de uma nova hipótese que a transgressão de suas fronteiras, eu tenho sempre defendido uma conexão tão próxima quanto possível entre a hipótese quântica e a dinâmica clássica, e por não caminhar fora das fronteiras da última até que fatos experimentais deixem nenhum outro caminho aberto. Eu tenho tentado manter este ponto de vista na revisão deste tratado, necessária para uma nova edição.”<sup>209</sup>

Em 1914, Planck colocou o  $h$  governando somente a interação entre osciladores e partículas livres, sendo que a absorção e emissão de radiação seguiam as leis clássicas. Planck estava sempre argumentando sobre a lei de radiação e tentando restringir o uso do quantum para um mínimo suficiente para derivar aquela lei.

Assim, podemos dizer que, no início do desenvolvimento da física quântica, ao lado da proposta de quebra de continuidade da energia, existiam duas concepções diferentes do quantum: de um lado, o quantum de energia de Planck associado apenas à interação da radiação com a matéria, de outro, o quantum de luz de Einstein associado à energia radiante em trânsito.

---

<sup>209</sup> Max Planck, **op. cit.**, nota 73, p. vii. O ceticismo de Planck em relação aos desenvolvimentos da teoria quântica da radiação se expressa também em correspondências que troca com Wilhelm Wien durante os muitos anos em que trabalharam juntos no corpo editorial dos “Annalen der Physik”. Em uma carta de 1909, Planck escreve que para Einstein “o quantum elementar  $h$  também é importante para os processos no vácuo puro”, mas que ele (Planck) “não acredita nisso”, assim como Lorentz e o próprio Wien (a quem a carta é endereçada). Planck destaca ainda que: “Por que alguém deveria complicar a teoria desnecessariamente? Já existem dificuldades suficientes e a gente pode ficar totalmente satisfeito se conseguir reunir tudo em um só lugar, todos os processos dentro da molécula.” Citado em: Dieter Hoffmann (org.). **Max Planck und die moderne Physik**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, p. 27.

## 4.5 O Primeiro Congresso de Solvay

No contexto da discussão que estamos fazendo, quando frisamos a ligação entre o desenvolvimento histórico e a filosofia da ciência, é interessante mencionar outro acontecimento destacado por Jammer, pois serve para demonstrar a resistência de ilustres cientistas para aceitar as novidades científicas que se lhes apresentavam. O famoso “Congresso Solvay”, realizado em Bruxelas de 30/10 a 03/11/1911, teve a finalidade de tentar resolver, de uma vez por todas, a problemática associada à concepção dos quanta. Dele participaram os mais importantes físicos do momento, entre outros, Henri Poincaré (1854-1912), Marcel Brillouin, Maurice de Broglie, Paul Langevin, Albert Einstein, Walter Nerst (1864-1941), Max Planck, Ernest Rutherford (1871-1937), James Jeans, Arnold Sommerfeld, Wilhelm Wien e Hendrik. A. Lorentz.

Esse Congresso foi extremamente importante para a fundamentação da física quântica futura. Vamos reproduzir a seguir longos trechos de um livro escrito pelo historiador da ciência alemão Armin Hermann que o dedicou exatamente ao desenvolvimento da teoria quântica desse período e que envolveu, como veremos, vários dos principais nomes que apareceram na cronologia apresentada na seção 4.1. Com relação às repercussões do Congresso de Solvay de 1911, ele diz que:

“O relatório oficial do congresso, que foi publicado na França durante o verão de 1912 e a tradução alemã ao final de 1913, representou um manual sintético do problema quântico. Devido à importância fundamental das questões que ele tratou e em função da participação dos mais importantes físicos da época, sua publicação estimulou fortemente o interesse de todos os físicos envolvidos em novos desenvolvimentos. (...)

(...) como resultado do congresso internacional de Bruxelas o conceito quântico atravessou as fronteiras do mundo de fala alemã e tornou-se uma matéria de interesse na França e na Inglaterra. (...)

Na Inglaterra, James Jeans e Lord Rayleigh tinham, desde o início, rejeitado a derivação de Planck da fórmula da radiação. J. J. Thomson acreditava que ele poderia explicar a estabilidade do átomo com base na física clássica, enquanto que Rutherford era um físico muito empiricista para reconhecer o significado do problema. Bohr notou que ‘os velhos

Bragg<sup>210</sup> (...) eram os únicos na Inglaterra que demonstravam algum interesse na teoria quântica.’

Após o congresso nós encontramos, por exemplo, que Louis de Broglie ‘tinha lido e estudado em todos os seus detalhes as exposições sobre os quanta para os quais o primeiro Congresso de Solvay estava dedicado.’ Ele descreve o grande impacto que o relatório do congresso tinha provocado nele com as seguintes palavras: ‘Com vigor juvenil, entusiasmei-me com os problemas interessantes que tinham sido pesquisados e prometi a mim mesmo não poupar esforços em conseguir um entendimento da verdadeira natureza desses misteriosos quanta que Planck tinha introduzido dez anos antes na física teórica mas cujo significado não tinha sido entendido naquela época.’ (...)

Numa conversa particular com Ernest Rutherford (na Inglaterra), Niels Bohr obteve, ao final de 1911, ‘um relato vívido’ das discussões que aconteceram no Congresso Solvay; quando o relatório do Congresso apareceu alguns meses mais tarde, Bohr estudou-o cuidadosamente.”<sup>211</sup>

Entre as conclusões gerais do encontro, foi de certa maneira estabelecido, que era necessário introduzir algum tipo de descontinuidade na física e que talvez fosse necessário alterar as leis da física. Nesse congresso Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) expôs que o PRCN era ainda “o mais misterioso e mais difícil problema de ser entendido”<sup>212</sup>.

Notamos, portanto, que uma refutação das teorias da física clássica ou uma revolução científica não ocorre de um momento para outro. Pelo contrário, ela envolve o trabalho de uma grande quantidade de pesquisadores inquietos com o andar da carruagem dominante.

As figuras importantes da física como Planck, Einstein, Bohr, de Broglie, Lorentz, e muitos outros acima mencionados, construíram façanhas, mas também cometeram muitos enganos e erros de avaliação. Planck não foi exceção.

---

<sup>210</sup> Os Bragg a que Bohr aqui se referia, numa entrevista por ele concedida anos mais tarde, eram os dois físicos ingleses William Henry Bragg e William Lawrence Bragg que, entre outros trabalhos, produziram um método para a medida exata do comprimento de onda dos raios X.

<sup>211</sup> Armin Hermann. **The genesis of quantum theory (1899-1913)**. Massachusetts: The MIT Press, 1971, p. 142-143. Esse livro é construído destacando diferentes físicos que contribuíram para o desenvolvimento da física quântica desse período como, por exemplo, Planck, Lorentz, Einstein e Bohr.

<sup>212</sup> Max Jammer, **op. cit.**, nota 50, p. 52.

#### 4.6 Ainda Planck e Einstein

É interessante ler também o que Planck escreveu, em 1913, na conclusão de seu livro sobre a teoria da radiação térmica, ao comentar processos irreversíveis de radiação no interior de uma cavidade:

“(...) se os osciladores e elétrons estão em movimento, haverá choques entre eles, e, em cada impacto, ocorrerão ações que influenciarão a energia de vibração dos osciladores num modo completamente diferente e muito mais radical que a simples emissão e absorção de energia radiante. É verdade que o resultado final de todas essas ações de impactos pode ser antecipado pelo auxílio de considerações probabilísticas discutidas na terceira seção, mas mostrar em detalhe como e em quais intervalos de tempo este resultado é alcançado será o problema de uma teoria futura. É certo que, de tal teoria, pode ser esperada uma informação adicional sobre a natureza dos osciladores que realmente existem na natureza, pela única razão de que ela deve dar uma melhor explicação do significado físico da quantidade elementar de ação universal, um significado que certamente não é de importância secundária se comparado com aquele da quantidade elementar de eletricidade [*grifos nossos*].”<sup>213</sup>

Notamos assim que, apesar de ter ciência de que o problema da radiação térmica não podia ser resolvido apenas com base em considerações relacionadas com a suposição da emissão e absorção de energia radiante pelos átomos constituintes das paredes da cavidade, Planck ainda não fazia menção às contribuições de Einstein sobre o assunto. Uma das poucas possibilidades de ruptura com os fundamentos da física clássica, que encontramos nesse livro de Planck, surge quando ele questiona a utilização do teorema da equipartição de energia por Rayleigh. Essa possibilidade é sugerida na seguinte passagem do mesmo livro:

“Se a lei da equipartição de energia fosse verdadeira em todos os casos, a Lei da Radiação de Rayleigh seria, em consequência, mantida para todos os comprimentos de onda e em todas as temperaturas. Mas desde que essa possibilidade é excluída pelas medidas que temos à mão, a única conclusão possível é que a lei de equipartição de energia e, com ela, o sistema

---

<sup>213</sup> Max Planck, **op. cit.**, nota 73, p. 214-215.

de equações de Hamilton do movimento, não possui a importância geral atribuída a ela pela dinâmica clássica. Aí está a prova mais forte da necessidade de uma modificação fundamental na última.”<sup>214</sup>

Portanto, a aceitação da ruptura com a física clássica foi um processo longo e penoso tanto para Planck quanto para muitos de seus contemporâneos. A aceitação plena da teoria quântica foi concretizada na década de 1920, como a cronologia acima mencionada exemplifica. Bohr, no artigo polêmico em que descreveu seu longo debate quântico com Einstein, que até hoje desperta as mais diversas interpretações, aproxima o Planck de 1900 ao Einstein de 1917, com as seguintes palavras:

“Um importante avanço no desenvolvimento da teoria quântica foi feito pelo próprio Einstein em seu famoso artigo de 1917 sobre o equilíbrio radiante, no qual ele mostrou que a lei de radiação térmica de Planck podia ser deduzida, de forma simples, de pressupostos compatíveis com as idéias básicas da teoria quântica da constituição dos átomos.”<sup>215</sup>

---

<sup>214</sup> Idem, p. 185-186.

<sup>215</sup> Niels Bohr, **op. cit.**, nota 192, p. 45.

## Capítulo 5

### Uma verdadeira catástrofe nos manuais didáticos universitários

*“Por que (re)ler os clássicos? A gente não imagina um escritor que não tenha lido Proust e Faulkner, um filósofo que não tenha trabalhado Husserl e Sartre, um músico que não tenha ouvido Stravinski e Messiaen, um pintor que não tenha visto Picasso e Malevitch. Mas a gente não se espanta que um físico não tenha lido nem Einstein nem Heisenberg – para nos manter neste século. (...) É bom poder reviver 'em contato direto' esses esforços admiráveis, e de reencontrar o vigor e a complexidade, freqüentemente tornados insípidos e esterilizados nos manuais de ensino e nos livros de divulgação.”*

Lévy-Leblond<sup>216</sup>

#### 5.1 Quase-história e reconstruções racionais ruins nos textos de ensino acadêmico

Na leitura de várias fontes que abordam a física quântica, principalmente nos manuais universitários, encontramos várias apresentações sobre o desenvolvimento da radiação do corpo negro que diferem em muitos aspectos do resumo histórico aqui apresentado.

Encontramos vários trabalhos que fazem críticas ao tratamento dos manuais. Por exemplo, M. A. B. Whitaker, ao criticar vários manuais da língua inglesa, em que seus autores utilizam a quase-história, já discutida no capítulo 1, que pode ser entendida como uma espécie de reconstrução racional da história, afirma o seguinte com relação ao tema que estudamos:

*“A quase-história não pode aceitar a idéia que mesmo cientistas geniais podem cometer erros. (...) Nós vemos esses efeitos na maneira como a quase-história trata a lei de Rayleigh-Jeans. Ela coloca-a seguramente temporalmente anterior à lei de Planck, pois, assim que a última fosse conhecida, a quase-história assume que ela seria completamente entendida e aceita, e não haveria necessidade de adicionais procedimentos clássicos. O fato de que em 1905 Rayleigh estava não apenas pensando classicamente, mas não podia mesmo entender o procedimento de Planck apareceria como uma surpresa. E o fato de que Rayleigh teve que*

---

<sup>216</sup> Jean-Marc Lévy-Leblond. Preface. In: José Leite Lopes e Bruno Escoubés, **op. cit.**, nota 43, p. v.

ser corrigido por Jeans é suprimido de tal modo que muitos estudantes imaginam que a lei foi descoberta por um físico chamado Rayleigh-Jeans.”<sup>217</sup>

Certamente muitos de vocês devem ter lido essas palavras identificando-se com as conclusões do autor. Ele chega até a sugerir que os manuais têm suas razões para assim proceder, mas adverte que devemos apresentar a física como uma área do conhecimento viva e dinâmica e não como algo já completamente estruturado.

M. A. B. Whitaker menciona uma resenha de um livro que abordava a física moderna; segundo ele, o “*resenhador corrige o autor do livro*” afirmando que a lei de Rayleigh-Jeans, referente à radiação do corpo negro, já era conhecida antes de Planck ter descoberto sua própria lei.

De fato, Planck anunciou, num encontro da German Physical Society, em 14/12/1900, a sua lei. Seu método não tem nada a ver com o apresentado pelo livro didático de Eisberg (**Fundamentals of Modern Physics**, New York: Wiley). É verdade que “*em 06/1900 Rayleigh havia publicado um pequeno artigo no qual ele apresentava um método de computar o número de graus de liberdade do corpo negro.*”<sup>218</sup>

Ele obteve uma expressão proporcional à densidade de energia, mas não calculou a constante de proporcionalidade. Whitaker afirma que

---

<sup>217</sup> M. A. B. Whitaker, **op. cit.**, nota 21, p. 240.

<sup>218</sup> Idem.  
 “Do ponto de vista metodológico, Rayleigh inicia suas investigações partindo de estudos sobre as vibrações de uma massa de ar em um volume confinado. Ele se remete ao seu trabalho de base “The Theory of Sound” (1877/78) [...] e então analisa as “vibrações etéreas” em analogia às vibrações do ar. Remete-se, assim, a ondas estacionárias, formadas pela sobreposição de ondas incidentes, que são refletidas nas paredes. As condições de contorno impõem que, dependendo da natureza das ondas e das paredes, nós ou barrigas devem existir na parede. No caso do som, por exemplo, uma condição de contorno pode impor que o ar na parede não tenha um componente de velocidade normal. O requisito de que a parede seja aproximadamente uma superfície do nó para um determinado volume obviamente não pode ser atendido para qualquer comprimento de onda. Isso leva à questão de quantas ondas num intervalo de comprimentos de onda podem existir sob essas condições específicas. Assim, por razões puramente dimensionais, espera-se que o número de ondas possíveis seja proporcional a [uma particular relação entre o volume e o comprimento de onda]”. (Hans-George Schöpf. **Von Kirchhoff bis Planck. Theorie der Wärmestrahlung in historisch-kritischer Darstellung**. Braunschweig: Vieweg, 1978, p. 85-86, tradução livre).  
 Para mais detalhes sobre o trabalho de Rayleigh, ver também: Lord Rayleigh. Remarks upon the Law of Complete Radiation. **Philosophical Magazine**, v. 49, p. 539-540, 1900.

“era óbvio para Rayleigh que a expressão era insatisfatória e que ela divergia para o infinito para pequenos comprimentos de onda e que a integral para todas as frequências era também infinita”.

Porém, Rayleigh apenas

“sugeriu a inclusão de um fator de corte exponencial arbitrário para obter resultados sensíveis. Não havia nenhum prenúncio de catástrofe no tom desse artigo de Rayleigh.”<sup>219</sup>

Em 1905 Rayleigh calculou o coeficiente de proporcionalidade! Ou seja, bem após os artigos de Planck de 1900, que Rayleigh já conhecia, tanto é que notou que “*seu resultado era cerca de oito vezes o de Planck*” para grandes comprimentos de onda. Ainda em 1905, outro físico inglês, Jeans, fez uma alteração na expressão de Rayleigh conseguindo que sua nova expressão, que passou após a correção a ser denominada de “lei de Rayleigh-Jeans”, coincidissem com a de Planck naquele limite de grandes comprimentos de onda. Whitaker enfatiza que não se pode, de maneira alguma, afirmar que essa expressão tivesse levado Planck à hipótese quântica, como alguns textos didáticos indicam. Aparentemente, para preservar a “objetividade”, é preferível deixar entendido que a física clássica produziu a expressão de Rayleigh-Jeans e que a substituição da equipartição de energia pela quantização da energia produziu a expressão de Planck. É a “quase-história” desempenhando seu papel. É um exemplo de má reconstrução racional.

Demos aqui esse extrato relativamente longo dos artigos de Whitaker para exemplificar algo que foi longamente discutido no capítulo 1 deste texto, que é o fato de que os manuais didáticos são redigidos na busca por síntese e propagação de uma ideia de ciência objetiva, racional e cumulativa. Por essas razões, muitas vezes os manuais científicos deturpam a história da física e a própria compreensão dos seus desenvolvimentos.

---

<sup>219</sup> M. A. B. Whitaker, **op. cit.**, nota 21, p. 108-109.

## 5.2 Alguns problemas sobre as principais abordagens do PRCN em manuais didáticos

Uma análise das principais abordagens sobre o PRCN em textos universitários de Física Moderna<sup>220</sup> nos mostra que as abordagens utilizadas não estão sendo realmente úteis para o propósito em que são utilizadas: introduzir a noção de quantização de energia.

Ao utilizarem o PRCN para introduzir a quantização de energia, os livros em geral falham ao enfatizá-la como a principal contribuição de Planck, pois, muito embora ele tenha realmente realizado uma quantização, esta se mostrou, na época, confusa, não compreendida e não completamente fundamentada. Também o principal detalhe esquecido por esses textos: a quantização de Planck é bastante diversa daquela que compreendemos hoje com a física quântica.

O PRCN normalmente é trabalhado de maneira rápida e superficial como introdução ao estudo da física quântica em livros sobre física moderna. Essa abordagem superficial é muito complicada, esconde exaustivas reflexões e desenvolvimentos matemáticos e conceituais. A síntese, também, pode provocar no leitor uma sensação de inferioridade frente à não compreensão de fatos apresentados como óbvios. Ainda, essas abordagens superficiais nos mostram o quanto frases mal formuladas induzem a generalizações indesejáveis tanto em relação aos desenvolvimentos históricos como físicos.

Essa maneira superficial e equivocada de analisar o PRCN é o que ocasiona os principais problemas encontrados nas abordagens que analisamos, que dizem respeito às distorções na própria compreensão da física, do fazer científico e da história da física. Discutimos brevemente, essas principais distorções:

a) **Distorções na compreensão física**<sup>221</sup>. Notamos que a simplificação excessiva na abordagem do PRCN e a superficialidade com que o tema é tratado levam muitos autores a cometerem distorções de natureza física. A omissão em fatos, detalhes ou mesmo

---

<sup>220</sup> Erika Regina Mozena. **A solução de Planck para o Problema da Radiação de Corpo Negro (PRCN) e o ensino da física quântica**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo. 2003. Nesse trabalho, de onde os capítulos de 2 a 4 foram adaptados, é analisada em detalhe a abordagem do PRCN de dois livros bastante utilizados. Essas duas abordagens não se distinguem muito de muitas outras que encontramos à disposição na biblioteca do IFUSP.

<sup>221</sup> É importante que fique claro que não estamos afirmando que os autores cometeram erros de natureza física. Estamos apontando que a simplificação exagerada levou os autores a distorcerem a física.

desenvolvimentos matemáticos, levam os autores a distorcer explicitamente alguns conceitos físicos. Exemplos:

- **Simplificação da noção de corpo negro e da equivalência de sua emissão com a radiação no interior de uma cavidade.** Essas noções físicas são bastante sofisticadas e possuem uma estrutura conceitual e teórica bastante complexa e intimamente ligada com a experimentação. Ao apresentá-las de maneira demasiadamente simplificada, sem muitas vezes especificarem a natureza ideal do corpo negro<sup>222</sup>, os textos não fornecem ao leitor uma verdadeira compreensão da radiação térmica, do PRCN e sua história.

- **Quantizações equivalentes mal explicadas.** Os textos analisados não diferenciam o conceito de quantização de Planck daquele que tomamos hoje na física quântica. Além disso, os textos não são claros sobre qual ente físico eles estão quantizando: a energia dos modos de radiação no interior da cavidade ou a energia dos osciladores harmônicos em suas paredes. Também não é explicado de maneira convincente por que essas situações físicas são equivalentes, e o que é pior: essa equivalência só é possível de ser entendida a partir da compreensão atual da física quântica. Em outras palavras: os textos estão tentando ensinar o que é quantização, mas a compreensão adequada dos desenvolvimentos delineados só é possível para alguém já inteirado com a física quântica. Por isso é que afirmamos que esses manuais não estão atingindo adequadamente o objetivo de introduzir a noção de quantização de energia com o estudo do PRCN.

**b) Distorções no fazer científico.** Também devido à superficialidade de abordagem e ao fato de que os desenvolvimentos teóricos parecem ter mais importância no meio científico moderno, os textos se mostraram omissos demais em relação aos desenvolvimentos experimentais. Essas omissões distorcem o processo de trabalho científico, dificultando até a própria compreensão do tema em estudo e banalizando a construção do saber científico. Apontamos os principais problemas encontrados:

- **Ausência de discussão sobre as medidas de radiação térmica.** Quando algum dos textos analisados apresenta alguma explicação relacionada aos desenvolvimentos experimentais, este o faz de maneira muito simplista e não fornece uma noção exata do

---

<sup>222</sup> O único texto em que encontramos explicitamente a noção ideal de um corpo negro foi o de Tipler. Mesmo assim sua apresentação deixou muito a desejar em relação a toda complexidade do assunto.

procedimento experimental e análise do fenômeno, conjunto extremamente necessário para a compreensão da radiação térmica e para a formação de físicos e professores.

- Também ao tratar demasiadamente com a noção de densidade de energia da radiação na cavidade, os textos evidenciam seu enfoque teórico. Não é discutido em nenhum deles que a grandeza experimental medida não é a densidade de energia da radiação, e sim a intensidade de radiação emitida.

- **Banalização ou excessiva genialidade para o trabalho de Planck.** Notamos também nos textos consultados que o processo científico do trabalho de Planck está completamente adulterado. Estes muitas vezes induzem (de maneira explícita ou não) o leitor a entender o procedimento de Planck de forma diversa do seu trabalho original, ou ainda mesmo omitem muitos desenvolvimentos importantes. Com essas distorções, Planck ora é supervalorizado por uma genialidade incomum, pois “sozinho e de maneira breve ele foi o único a pensar em quantização”, ora tem seu trabalho e esforço banalizado, pois não é mostrado todo o seu grande programa de pesquisa.

**c) Distorções para a história da física.** Na tentativa de ensinar física quântica a partir de uma abordagem que leve em consideração os marcos históricos, mas sem abrir mão dos conceitos e desenvolvimentos modernos, os textos cometeram erros, por vezes grosseiros, com relação à história da física. Apontamos abaixo os principais problemas:

- **Ênfase no uso da equipartição de energia.** Os textos apresentam a lei de Rayleigh-Jeans como o único desenvolvimento teórico que a física clássica podia produzir para explicar o PRCN. Com esse procedimento os textos comentados usam o conceito de equipartição de energia, que não era ainda totalmente fundamentado em 1900 e muito menos foi utilizado por Planck.

- **Alterações na cronologia dos fatos.** Os textos, além de atribuírem uma importância exagerada ao trabalho de Rayleigh e Jeans, não especificam que o trabalho de ambos não foi conjunto. Essa falta de informação induz os leitores a pensarem que estes desenvolveram a lei em parceria, ou ainda que Rayleigh-Jeans é o nome de um cientista apenas. Talvez para se esquivar de cometer erros, ou criar dúvidas nos leitores, todos os textos omitem a data da lei Rayleigh-Jeans.

- **Ausência da termodinâmica no trabalho de Planck de solução do PRCN.** Como já discutido no capítulo 1, todo o trabalho de Planck e seu programa de pesquisa tinham

a intenção em encontrar uma expressão apropriada para a entropia do corpo negro. Nenhum dos autores ao menos citou esse fato, quanto mais mostrou os reais desenvolvimentos de Planck.

### 5.3 Ampliando o uso pedagógico do PRCN

O PRCN e sua solução por Planck são tratados nos cursos universitários de Física apenas nas disciplinas introdutórias de física quântica e conforme já dissemos acima não estão atingindo seus objetivos principais: conceituar e apresentar a quantização de energia. Afirmamos isso principalmente por que a discretização de energia no PRCN tinha um significado completamente diverso daquele que entendemos hoje. Os manuais didáticos não observam esse aspecto e atribuem como principal contribuição de Planck uma quantização com significação moderna. Também é importante observar que a principal contribuição de Planck não foi a quantização de energia, mas sim a constante  $h$ .

Concluimos assim, pelos problemas expostos com relação a esses manuais didáticos, que o PRCN simplificado da forma que aparece não é útil. Acreditamos que seria mais proveitoso, nesse tipo de abordagem sintética, apresentar apenas uma discussão sobre a quantização de energia (com possível histórico da evolução do conceito), ou então, resolver o PRCN usando a quantização sob a ótica da física moderna, por exemplo, com estatística de fótons. Julgamos que, se forem feitas escolhas justificadas por abordagens superficiais, estas deveriam apenas se preocupar em ensinar os conceitos da física, sem mesmo mencionar a história da ciência, pois, sem contextualização adequada e preocupação com o funcionamento da ciência, estes relatos têm apresentado muitos erros, além de permitirem ao leitor generalizações indesejáveis.

Almejamos um ensino da ciência que forme profissionais autônomos, críticos, reflexivos e que também os prepare para vislumbrar eventuais futuras crises e revoluções científicas. Consequentemente, a educação científica não deveria se preocupar em pretensamente trabalhar toda a física de maneira breve, mas sim atuar com uma melhor seleção, flexibilização, problematização e aprofundamento dos seus conteúdos.

Julgamos também que uma maneira de se atingir esses objetivos seria a inserção da história e filosofia da ciência no ensino da física, tanto para propiciar a compreensão do papel das grandes teorias que se sucederam quanto para a aprendizagem significativa dos conteúdos físicos específicos. Nesse caso a educação científica deveria buscar por estratégias e leituras que

valorizem a cultura científica, como textos originais, e não apenas se basear nos manuais didáticos, diminuindo assim seus efeitos limitadores e/ou nocivos.

Um exemplo de tema bastante profundo, importante e cuja fundamentação é essencial para a formação de profissionais em ciência seria a gravitação universal. Além de ser extremamente rico no que tange aos aspectos históricos e filosóficos, esse assunto possibilita o tratamento de praticamente toda a mecânica, além da relatividade.

Outro exemplo poderia ser o estudo da radiação térmica, do PRCN e sua solução por Planck. Através deste texto, procuramos mostrar a riqueza e a profundidade do tema. Para compreender a física do PRCN é necessário o conhecimento de praticamente todos os ramos da física clássica: termodinâmica, eletromagnetismo e física estatística, além de noções da mecânica.

Dessa maneira, o PRCN poderia ser utilizado com um propósito muito maior do que apenas introduzir a mecânica quântica. Esse assunto poderia ser usado em muitas outras disciplinas para se estudar a física clássica e exemplificar um funcionamento mais real da ciência, no qual os modelos científicos fundem os vários ramos da física.

## Capítulo 6

### A física como instituição social – uma história externalista

*“Possivelmente por ser tão facilmente aparente, o impacto da ciência sobre a estrutura social, especialmente por intermédio dos seus subprodutos tecnológicos, tem sido durante muito tempo objeto de interesse, senão de estudo sistemático. É fácil constatar que a ciência é uma força dinâmica de mudança social, embora nem sempre de mudanças previstas ou desejadas. De vez em quando até os físicos saíram dos seus laboratórios para reconhecer, com orgulho e surpresa, ou para repudiar, com horror e vergonha, as conseqüências sociais de seu trabalho. A explosão da primeira bomba atômica sobre Hiroshima nada mais fez que comprovar o que todo o mundo sabia. A ciência tem conseqüências sociais.”*

Robert K. Merton<sup>223</sup>

#### 6.1 Introdução

O filósofo Tales de Mileto, que viveu no século VI AC, é geralmente considerado o primeiro filósofo-cientista da história. Suas contribuições à ciência estão relacionadas com a previsão de eclipses, com trabalhos em geometria e, principalmente, com a atribuição à água da qualidade de ter sido o primeiro elemento fundamental da natureza a partir do qual teriam surgido todos os seres vivos, animais e plantas, bem como todos os corpos que constituem o universo terrestre.

Atribuir a Tales essa primazia de ter sido o primeiro cientista, ou de forma equivalente o primeiro filósofo, é um exagero da tradição ocidental. No oriente, à mesma época em que viveu esse filósofo grego, encontramos figuras destacadas como Sidarta Gautama, o Buda histórico, que viveu na Índia. Ainda durante o mesmo século VI AC floresceram as concepções de mundo de Confúcio e Lao Tsé na China, Zaratustra na Pérsia, entre outros. No ocidente, Pitágoras e Heráclito eram exemplos adicionais da nascente ciência grega.

---

<sup>223</sup> Robert K. Merton. **Sociologia, teoria e estrutura**. São Paulo: Ed. Mestre Jou, 1970, p. 631. Esta citação foi extraída da Parte IV desse livro do Merton, importante sociólogo contemporâneo norte-americano. Nessa parte do livro, que tem por título *Estudo sobre a sociologia das ciências*, Merton apresenta um estudo aprofundado das relações das ciências, particularmente da física, com a estrutura social.

Pelas mais variadas razões encontramos o que hoje chamamos de cientistas<sup>224</sup> ao longo de toda a história a partir de então. Impulsionados por motivos religiosos de diferentes orientações, inspirados nos mais instigantes fenômenos naturais, procurando descobrir os profundos segredos alquímicos, tentando desvendar o segredo elementar da constituição última do universo, esquadrinhando pacientemente os céus na perseguição dos astros preguiçosos com o intuito de explicar seu movimento e sua influência sobre a vida dos mortais, enfim, satisfazendo a insaciável curiosidade humana, encontramos sempre, trabalhando isoladamente ou constituindo escolas ou grupos de pesquisa, criadores responsáveis pelo desenvolvimento do conhecimento científico.

Ao lado dessas aparentemente genuínas motivações intelectuais, que constituiriam os elementos motivadores da assim chamada *pesquisa pura*, localizamos no desenvolvimento do conhecimento científico influências sociais mais explícitas que também motivam a investigação, como fica dramaticamente exemplificado no exemplo mencionado na epígrafe deste capítulo. No que se refere à parte desse conhecimento científico pertencente à física, desde a época de Newton poderíamos mencionar inúmeros exemplos dessas influências sociais. Citemos alguns: a construção de mapas celestes para auxiliar na localização de navios em alto mar, o estudo da balística, a termodinâmica das máquinas térmicas, a determinação de temperaturas em fornos siderúrgicos, a bomba atômica, etc. Daí viria a denominação *pesquisa aplicada*. Cabe aqui uma breve reflexão de Karl Marx (1818-1883):

“Mas, sem a indústria e sem o comércio, o que seria feito das ciências da natureza? Até mesmo estas ciências ‘puras’ da natureza começam por ir buscar as suas finalidades e os seus materiais ao comércio e à indústria, à atividade sensível dos homens”.<sup>225</sup>

O conhecimento científico, portanto, assim como qualquer outro, nasce da curiosidade inata da espécie humana, deslumbrada desde sempre com o enfrentamento do desconhecido. Estabelecer um **diálogo inteligente com o mundo** é uma das razões básicas da evolução do

---

<sup>224</sup> Segundo John D. Bernal, o termo **cientista** teria sido inventado, em 1840, por W. Whewell, clérigo e filósofo de Cambridge, quando, no seu livro **Philosophy of the Inductive Sciences**, de 1857, escreveu: “*Nós precisamos muito de um nome para descrever um cultivador da ciência em geral. Eu estaria inclinado a denominá-lo um Cientista.*”

<sup>225</sup> Karl Marx. **Textos filosóficos**. Lisboa: Editorial Estampa, 1975, p. 106-107. Original alemão.

conhecimento. A busca pelo conhecimento é alimentada também por interesses sociais e econômicos das classes que dominam a organização social reinante. A ciência, portanto, tem que ser entendida como um produto da vida social, e como tal, seu estudo não pode ser realizado à parte da história. É claro que podemos discursar sobre a lógica da descoberta científica, a epistemologia ou desenvolvimento de conhecimentos científicos, a evolução da investigação experimental, a estética das teorias científicas e o imaginário criador do cientista, etc. Mas para entender, criticar e planejar a pesquisa que realizamos hoje, é necessário também conhecer o desenvolvimento da ciência vinculado à organização social das diferentes etapas históricas.

É preciso deixar de lado uma visão ingênua sobre o papel da ciência que a considera como um empreendimento neutro, objetivo e que nos conduz em direção ao progresso e à felicidade. É necessário tratá-la como uma atividade cultural como quaisquer outras atividades culturais. A ciência, e a física aí incluída, é uma instituição social que sofre todas as pressões econômicas, ideológicas, políticas, etc., como todas as demais instituições sociais que constituem nossa sociedade contemporânea. Cabe aqui ponderar sobre estas palavras de Pierre Thuillier:

“Ainda que haja exceções, nossa cultura, nos dias que correm, nos ensina essencialmente a venerar “a ciência”, a admirar seus representantes. Já é tempo de aprender também a encarar com menos complacência uma instituição que cada vez mais está presente em todos os setores de nossa vida e manifesta certas tendências imperialistas ... Em resumo, como em relação a todas as potências deste mundo, vale mais certa falta de respeito que uma cega idolatria.”<sup>226</sup>

## 6.2 O início da ciência como instituição

O Renascimento marcou uma grande transformação em todas as áreas do conhecimento. Os séculos XV e XVI, que testemunharam essa revolução criativa, são os mesmos séculos das grandes navegações, que levaram os europeus à descoberta (ou invasão) da América e ao caminho das Índias, favorecendo a intensificação do comércio dessa época. A bússola e a pólvora, invenções chinesas, assim como a orientação marítima pelos astros através dos mapas

---

<sup>226</sup> Pierre Thuillier. **El saber ventrílocuo. Cómo habla la cultura a través de la ciencia**. México: Fondo de Cultura Económica, 1990, p. 14-15. Original francês de 1983.

celestes, que tinha em Copérnico, por exemplo, um exímio artífice, enfim, a investigação científica começava a encontrar um emprego que também podia dar lucro. Até na antiga Grécia isso já ocorria, a julgar pelo depoimento de Aristóteles que chegou a atribuir a Tales de Mileto a façanha de ter aplicado seus conhecimentos filosóficos e científicos para ganhar muito dinheiro com o primeiro monopólio conhecido, no caso o do azeite de oliva, da história!

O físico John D. Bernal escreveu, no início da década de 1950, um amplo relato sobre as ciências em geral, do qual extraímos a seguinte citação:

“A instituição da ciência como um corpo coletivo e organizado é algo novo, mas ela mantém um caráter econômico especial que já estava presente no período em que a ciência progredia devido a esforços isolados de indivíduos. A ciência difere de todas as outras assim chamadas profissões liberais; sua prática não possui valor econômico imediato. Um advogado pode solicitar ou dar um julgamento, um médico pode curar, um padre pode celebrar um casamento ou dar consolo espiritual, um engenheiro pode projetar uma ponte ou uma máquina de lavar roupa, tudo coisas ou serviços para os quais as pessoas estão prontas a pagar imediatamente. (...) As produções da ciência, à parte de certas aplicações imediatas, não são vendáveis, embora num período relativamente curto de tempo elas possam, por incorporação na técnica e na produção, produzir mais novas riquezas do que todas as outras profissões combinadas.

Antigamente fazer ciência era uma ocupação de tempo parcial ou de tempo livre para as pessoas ricas e que não tinham o que fazer, ou então de elementos endinheirados das profissões mais velhas. O astrólogo profissional da corte era também freqüentemente o médico da corte. Isto inevitavelmente fez da ciência um monopólio virtual das classes média e superior. Basicamente tanto as tarefas como as recompensas da ciência derivam das instituições e tradições sociais, incluindo, à medida que o tempo avança, a própria instituição da ciência. Isto não é necessariamente uma depreciação da ciência. (...)

A depreciação real da ciência é a frustração e a perversão que aparecem numa sociedade na qual a ciência é valorizada pelo que ela pode acrescentar ao lucro privado e aos meios de destruição. Os cientistas que vêm em tais fins a única razão pela qual a sociedade em que vivem apoia a ciência, e que não podem imaginar nenhuma outra sociedade, sentem forte e sinceramente que todo direcionamento social da ciência é nefasto. Eles sonham com um retorno a um estado ideal, que de fato nunca existiu, onde a ciência fosse produzida como um fim em si mesma. Mesmo a definição da matemática pura, de G. H. Hardy: “Esta

matéria não tem uso prático; isto quer dizer que ela não pode ser usada para promover diretamente a destruição da vida humana ou para acentuar as atuais desigualdades na distribuição da riqueza”, foi desmentida pelos eventos; estes dois resultados, durante e desde a última guerra mundial, fluíram de seu estudo. De fato, em todos os tempos o cientista necessitou trabalhar em estreita conexão com outros três grupos de pessoas: seus padrões, seus colegas e seu público.”<sup>227</sup>

Apesar de já se terem passado mais de sessenta anos, essas palavras de Bernal são bastante atuais e me fazem lembrar que o teatrólogo e poeta alemão Bertolt Brecht dizia que a ciência devia aliviar a canseira da existência humana de toda a humanidade, e não apenas de uma pequena parcela dela, como ainda ocorre nos dias atuais.

### 6.3 As sociedades científicas

Como afirma Bernal, a ciência como instituição social organizada é um fenômeno relativamente recente. Se até à época de Galileu, Kepler e Descartes, ela era ainda caracterizada como fruto do trabalho isolado de cientistas que raramente trocavam informações entre si, essa situação começou a se alterar a partir da segunda metade do século XVII. Datam dessa época mudanças significativas no modo de produção e divulgação do conhecimento científico. Em primeiro lugar, surgiram as associações de cientistas em pequenos grupos de estudo e discussão que aos poucos daria origem às primeiras sociedades científicas em diferentes países da Europa. Em segundo lugar, e talvez até uma novidade mais importante, começaram a surgir as primeiras revistas científicas.

Com relação às sociedades ou academias científicas convém destacar que em 1601 foi fundada, na Itália, a Academia dei Lincei; em 1662, surgia a British Royal Society, em Londres, enquanto em 1666 era fundada a Academia Francesa de Ciências e, em 1700, a Academia de Ciências de Berlin. Por volta de 1790 já existiam cerca de 220 sociedades científicas em todo o mundo.<sup>228</sup>

E o que ocorria no Brasil por essa época?

---

<sup>227</sup> John Desmond Bernal. **Science in History**. London: Penguin Books, v. 1, 1971, p. 32-33.

<sup>228</sup> Hilary Rose e Steven Rose. **Science and society**. London: Penguin Books, 1971, p. 11.

Fernando de Azevedo informa que por ocasião da invasão holandesa em Pernambuco, em 1637, o Conde de Nassau trouxera consigo um grupo de *cultivadores da ciência*, como eram então denominados os cientistas. Em particular registrava-se a presença do físico e astrônomo holandês J. Marcgrave, responsável pelas primeiras observações astronômicas na América do Sul. Com a expulsão dos holandeses, em 1644, terminou essa breve experiência científica na cidade de Olinda.<sup>229</sup>

O historiador brasileiro Nelson Werneck Sodré cita a fundação de uma Academia de Ciências, em 1771, na cidade do Rio de Janeiro, que funcionou apenas por alguns meses. Ele acrescenta que a vida efêmera dessa Academia indica que *não era suficiente o ato de vontade para estabelecer aquilo que a sociedade não solicitava*.<sup>230</sup>

#### 6.4 Crescimento da ciência e as publicações científicas

Com relação às publicações de periódicos, o surgimento da primeira revista científica, em 1665, a *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, revolucionou a comunicação científica.

O historiador da ciência norte-americano Derek de Solla Price escreveu um livro onde faz interessantes comentários sobre o rápido crescimento do número de cientistas e de publicações científicas. Desse trabalho de Solla Price, destaco as seguintes informações:

1. em 1750 havia cerca de 10 publicações científicas;
2. em 1830 esse número subia para perto de 300 publicações, forçando o aparecimento da primeira revista de resumos de artigos, que passou a ser conhecida por revista de resumos (*abstracts*);
3. em 1950 foi a vez das revistas de resumos atingirem o número de 300;
4. à época da publicação de seu livro, 1972, Solla Price informava a existência de cerca de cem mil publicações científicas;<sup>231</sup>

---

<sup>229</sup> Fernando de Azevedo. **A cultura brasileira. Introdução ao estudo da cultura no Brasil**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1963, p. 379.

<sup>230</sup> Nelson Werneck Sodré. **Síntese da história da cultura brasileira**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 4.ed., 1976, p. 43.

<sup>231</sup> Derek de Solla Price. **A ciência desde a Babilônia**. São Paulo: Itatiaia e EDUSP, 1976, p. 145-147.

5. em meados da década de 1980 já existiam revistas de títulos, ou seja, *abstracts-of-abstract journals*, isto é, resumos de jornais de resumos, além das revistas eletrônicas que hoje proliferam na internet.

Nos últimos anos a publicação de artigos científicos se transformou no elemento mais citado nas discussões sobre a avaliação do trabalho dos pesquisadores universitários. Um lema norte-americano, *publish or perish*, que poderia ser traduzido por publique ou desapareça, acabou virando uma *palavra de ordem* na avaliação do trabalho científico contemporâneo.

O título do capítulo do livro de Solla Price que citamos acima aparenta estar em contradição com os números mencionados: *Enfermidades da ciência*. Por quê? Vamos seguir este estudo do historiador que, após esses números, apresentava a seguinte observação:

“A mais notável conclusão a retirar dos dados até agora examinados é a de que o número de periódicos especializados cresceu exponencial e não linearmente. (...) ”

(...) A lei exponencial é a consequência matemática de haver uma quantidade que aumenta tanto mais rapidamente quanto maior se torna. O número de revistas especializadas comportou-se à semelhança de uma colônia de coelhos que se acasalam entre si e que se reproduzem freqüentemente. Por que se daria que as revistas especializadas parecem produzir mais revistas especializadas, em índice proporcional ao seu número, em qualquer tempo, em vez de observarem um particular índice constante? Deve-se concluir que existe algo concernente às descobertas científicas ou aos artigos através dos quais são dadas a público tais descobertas que as leva a se comportarem dessa maneira. É como se cada avanço gerasse uma série de avanços novos, segundo um índice razoavelmente constante de produção, de sorte que o número de novos produtos é estritamente proporcional ao tamanho da população das descobertas, em qualquer tempo dado.”<sup>232</sup>

Paralelamente a esse desenvolvimento é claro que vinha antes o enorme e rápido crescimento do número de cientistas. Face a esse tipo de crescimento, Solla Price fez os seguintes comentários:

“É transparente que o processo com que nos familiarizamos durante os últimos séculos não corresponde a traço permanente de nosso mundo. Um processo de crescimento tão mais

---

<sup>232</sup> Derek de Solla Price, *op. cit.*, nota 231, p. 147-149.

vigoroso do que qualquer explosão populacional ou inflação econômica não pode continuar indefinidamente, mas há de conduzir a uma catástrofe intrinsicamente mais violenta do que a prometida por qualquer daqueles outros perigos evidentes.

Transpondo as fronteiras do absurdo, novo par de séculos de crescimento normal da ciência nos daria dezenas de cientistas por homem, mulher, criança e cão da população mundial.”<sup>233</sup>

Ou seja, pelos números coletados Solla Price concluiria que, no ano de 2250, caso aquele crescimento prosseguisse naquele ritmo, haveria um físico para cada homem, mulher, criança e... cão nos Estados Unidos! Como os cães certamente não dariam bons físicos, tal crescimento não poderia se manter indefinidamente.

## 6.5 Funções sociais da ciência

Sabemos hoje que essas extrapolações sugeridas pelos dados de Solla Price estão longe de se concretizarem na prática no que diz respeito à quantidade de físicos formados nas últimas décadas. Isso é particularmente verdadeiro para países subdesenvolvidos, como o Brasil, onde o número de pesquisadores está longe ainda de atingir um padrão razoável. Mesmo nos países desenvolvidos essa saturação acabou não ocorrendo pois houve uma diminuição da taxa de aumento de novos cientistas.

Nos Estados Unidos, estudos da National Science Foundation têm mostrado preocupação na direção contrária, isto é, com a rápida diminuição de procura por cursos de física e também pela diminuição de doutoramentos concluídos. No que se refere às publicações dados mais recentes têm confirmado as previsões de Solla Price: há um contínuo aumento de publicações estimulado pela alta competitividade entre os pesquisadores na garantia de emprego e progressão na carreira.

A ciência, esfinge enigmática, foi colocada na berlinda. É estudada segundo diferentes referenciais teóricos que procuram decifrá-la. Ainda no final da década de 1960 chegou até a surgir o termo “ciência da ciência”, tema central do XI Congresso Internacional de História da Ciência, ocorrido em 1965 na cidade de Varsóvia. A preocupação básica desse tipo de evento

---

<sup>233</sup> Derek de Solla Price, **op. cit.**, nota 231, p. 157-158.

era procurar responder a uma série de questões culturais, econômicas e científicas provocadas pelo desenvolvimento e influência crescente da ciência:

1. quais são as funções sociais da ciência?
2. qual a responsabilidade do cientista junto à sociedade?
3. qual deve ser o volume da investigação científica básica necessária para assegurar um ritmo elevado de progresso das ciências aplicadas?
4. que influências as condições sociais e econômicas exercem sobre os ritmos e a tendência do desenvolvimento científico?<sup>234</sup>

A estas poderiam ainda ser acrescentadas as seguintes:

5. como aplicar este tipo de questionamento no Brasil?
6. qual a relação da ciência com o desenvolvimento do imaginário?
7. quem desenvolverá respostas para este tipo de questionamento?

Nesse elenco de perguntas que busca entender a função social da ciência constam explícita e implicitamente indagações que extrapolam o mero caráter utilitário que muitas vezes predomina nessas discussões.

Embora a ciência, e particularmente a física, nos últimos séculos, tenha desempenhado um papel importante como força produtiva, não se pode ignorar seu aspecto cognitivo, sua interligação com outras áreas do saber como a filosofia, a arte, a literatura, etc. Ignorar isso é distorcer o papel social da ciência.

Bárbara Freitag, socióloga brasileira, estabelece um conjunto de igualdades entre a ciência e diversas interpretações que, a meu ver, resumem adequadamente a intenção desta discussão, particularmente no contexto brasileiro contemporâneo<sup>235</sup>:

1. ciência = criatividade, inovação
2. ciência = fator de produção, força produtiva
3. ciência = instrumento de poder
4. ciência = ideologia (legitimação tecnocrática, falsa consciência).

Acredito que essas quatro igualdades servem de guia e motivação para discutir o papel da ciência no Brasil contemporâneo. Esse temário é fundamental para definir prioridades de

<sup>234</sup> S. R. Mikulinski e N. T. Rodnyi. **Ciencias y prevision científica**. México: Roca, 1973, p. 15-17.

<sup>235</sup> Bárbara Freitag. Prefácio. In: Regina L. de Moraes Morel. **Ciência e Estado: a política científica no Brasil**. São Paulo: Ed. T. A. Queiroz, 1979, p. xvi.

investigação, a política de investimentos em ciência e tecnologia, a política de capacitação de docentes e de pesquisadores, o papel da ciência na formação básica do cidadão contemporâneo, entre outros aspectos.

Nas duas próximas seções, vamos falar um pouco sobre Newton e sua época com a finalidade de introduzir, como exemplo extremado de uma história externalista, um estudo sobre as raízes sociais e econômicas do *Principia* de Newton, produzido na primeira metade do século passado pelo físico soviético Boris Hessen.

## 6.6 A ciência na Inglaterra à época de Newton

O sociólogo norte-americano Robert K. Merton, autor da epígrafe deste capítulo, dedicou grande parte de sua atividade de pesquisa à investigação do surgimento da ciência no século XVII na Inglaterra. Merton estudou, entre outros assuntos relevantes, o papel da estrutura socioeconômica da época na escolha de temas pesquisados pelos cientistas de então, por exemplo, a pesquisa da longitude e da balística à época de Newton. É particularmente interessante seu trabalho sobre a influência do puritanismo no desenvolvimento da ciência experimental. Para marcar a presença puritana no nascimento da ciência do século XVII, Merton afirma que:

“(...) da lista original de membros da Royal Society em 1663, 42 entre os 68 sobre os quais possuímos alguma informação acerca de sua orientação religiosa, eram manifestamente puritanos. Tendo-se em conta que os puritanos constituíam minoria relativamente pequena na população inglesa, o fato de constituírem 62% dos fundadores da Society torna-se mais notável.”<sup>236</sup>

Merton sugere que o próprio *ethos* puritano tinha muitos pontos de concordância com a nascente ciência. Segundo ele, Robert Boyle, um dos grandes cientistas daquela época, foi um dos que procuraram enlaçar ciência e religião. Assim o empirismo e o racionalismo seriam *canonizados e beatificados*, isto é, esses elementos estavam em estreita congruência com os

---

<sup>236</sup> Robert K. Merton, **op. cit.**, nota 223, p. 686.

valores implícitos no protestantismo da época, e como tal aceitos.<sup>237</sup> John D. Bernal, que enfatizava menos que Merton a importância dos puritanos, reconhecia o papel desempenhado pelo último bispo da Igreja da Morávia, John Amos Comenius (1592-1670) que, devido à Guerra dos Trinta Anos, viajava pelos países da Europa e foi convidado em 1641 a ir para a Inglaterra por sugestão do Parlamento. Comenius era conhecido devido a seus métodos educacionais bem sucedidos que compreendiam a prática e o ensino da nova filosofia experimental como parte da educação universal. Ele tencionava criar um Colégio Pansófico<sup>238</sup> onde pudesse pôr em prática essa filosofia e foi para a Inglaterra com a esperança de realizar esse objetivo; não conseguiu, porém, sua presença em Londres foi influente na criação da Royal Society.<sup>239</sup> Merton acrescenta que, como era praxe no pensamento puritano, Comenius fundamentava seu sistema educativo

“(...) nas normas do utilitarismo e do empirismo: valores que só podiam conduzir a uma ênfase sobre o estudo da ciência e da tecnologia (...)”<sup>240</sup>

deixando claro que o caminho da reforma na educação recebia os mesmos impulsos pela revalorização da ciência. Merton cita a seguinte passagem de Comenius extraída de sua obra *Didactica Magna*:

“A tarefa do aluno será facilitada se o professor, quando lhe ensina alguma coisa, mostrar ao mesmo tempo sua aplicação prática na vida diária. Esta regra deve ser cuidadosamente observada ao ensinar idiomas, dialética, aritmética, geometria, física, etc.  
(...) a verdade e a certeza da ciência dependem mais do testemunho dos sentidos que de qualquer outra coisa, pois as coisas se imprimem diretamente nos sentidos, e, no entendimento, somente mediatamente e através dos sentidos (...) A ciência, portanto, aumenta, com certeza, proporcionalmente ao que depende da percepção sensorial.”<sup>241</sup>

---

<sup>237</sup> Robert K. Merton, **op. cit.**, nota 223, p. 684.

<sup>238</sup> Colégio Pansófico vem de “pansofia” que se refere à ciência universal ou a todo o saber humano.

<sup>239</sup> John D. Bernal, **op. cit.**, nota 227, p. 451.

<sup>240</sup> Robert K. Merton, **op. cit.**, nota 223, p. 686.

<sup>241</sup> John Amos Comenius. Citado por: Robert K. Merton, *idem*.

Percebe-se uma mudança de ênfase cultural nessa proposta educacional. As academias puritanas foram denominadas “Academias Dissidentes” e representavam um ensino mais liberal em oposição a um ensino essencialmente clássico; favoreciam o estabelecimento de um contato mais íntimo com as coisas da vida.

A abordagem da relação entre o protestantismo e o nascimento da ciência do século XVII poderia prosseguir com mais detalhamento, porém, para o que nos interessa neste capítulo, isto é, o *estabelecimento da ciência como um fator cultural completamente reconhecido*<sup>242</sup>, o que foi aqui exposto é mais que suficiente.

Outro fato que Merton considera determinante para o nascimento da ciência no século XVII na Inglaterra é a relação entre esta e a economia. Menciona que alguns dos nomes mais ilustres da ciência desse século estavam interessados no *cultivo da teoria e da prática*, entendida esta última como a solução de problemas práticos que afetavam a vida social de então, que se traduzia nas *inovações que pudessem melhorar o comércio, a mineralogia e a técnica militar*.<sup>243</sup> Entre os nomes que ele cita destacavam-se os de Hooke, Newton, Boyle, Huygens e Halley. Merton destaca entre os problemas técnicos aqueles relacionados com os meios de transporte, vitais para a proliferação e o crescimento das empresas do capitalismo nascente. Por exemplo, com o aumento extraordinário das viagens por mar, a determinação precisa da latitude e longitude tornava-se de importância crucial. Muitos matemáticos, astrônomos e físicos colaboravam na solução desses problemas. Merton pontua também uma série de problemas científicos e técnicos abordados: construção de relógio com molas de equilíbrio em espiral, métodos de fabricação de lentes para telescópios, entre outros.<sup>244</sup>

## 6.7 A análise externalista de Hessen

Essa análise de Merton, que busca encontrar determinantes sociais e econômicos no nascimento da física, guarda forte semelhança com a investigação desenvolvida no final da década de 1920 pelo físico soviético Boris Hessen. O artigo **As raízes sociais e econômicas do “Principia” de Newton**, apresentado por Hessen no II Congresso Internacional de História da

<sup>242</sup> John D. Bernal, **op. cit.**, nota 227, p. 451.

<sup>243</sup> Robert K. Merton, **op. cit.**, nota 223, p. 712.

<sup>244</sup> Robert K. Merton, **op. cit.**, nota 223, p. 711-718.

Ciência e da Tecnologia, realizado em Londres em 1931, é um dos artigos que representam a tendência “externalista” da história da ciência de forma mais apropriada. Nele, o físico soviético desenvolve uma detalhada análise temática do *Principia* de Newton, que representava a síntese da mecânica e, portanto, da física do século XVII.

A análise de Hessen teve forte influência no desenvolvimento do pensamento histórico científico a partir de então. Um debate vivo e extremamente criativo teve lugar entre jovens cientistas britânicos que estavam na assistência daquele Congresso: John D. Bernal (físico cristalógrafo), G. H. Hardy (matemático), J. B. S. Haldane (geneticista) e Joseph Needham (embriologista químico). O objetivo central desse grupo de cientistas britânicos, que se autodenominavam “humanistas científicos”, era o de mostrar a forte dependência entre o desenvolvimento científico e as necessidades econômicas e sociais. Eles entendiam que essa dependência era importante tanto para o bem estar social quanto para a própria ciência. Um deles, John Desmond Bernal, publicou, em 1939, sob o título *Função social da ciência*, “um influentíssimo livro e manifesto da época”<sup>245</sup>

O estudo de Hessen serve de contraponto para todos aqueles estudos que procuram isolar Newton do contexto social em que desenvolveu suas pesquisas. É claro que é perfeitamente válido construir um estudo epistemológico sobre a física newtoniana, como fizemos com o estudo da radiação do corpo negro. Porém, a imagem e a compreensão da ciência e sua evolução ficam incompletas sem essa análise que busca situar a produção científica no âmbito social. É isso que se propunha fazer Hessen. Acreditamos que esse tipo de discussão não pode estar ausente, como tradicionalmente acontece, tanto na formação do pesquisador em física quanto da formação do professor de física, pois, devido ao seu papel na educação básica, acabam constituindo o elemento que serve de correia de transmissão entre a “cultura científica” e a educação da maioria da população.

Cabem aqui algumas palavras do filósofo francês Dominique Lecourt que vão na mesma direção do que acabamos de expor e que reflete um pensamento relativo ao ensino universitário de física de um país desenvolvido, mostrando que essa problemática aqui destacada não é exclusiva de um país subdesenvolvido como o Brasil contemporâneo.

---

<sup>245</sup> Eric Hobsbawn. **Era dos extremos – O breve século XX: 1914-1991**. São Paulo: Companhia das letras, 1995, p. 525. O capítulo 18 desse livro, *Feiticeiros e aprendizes: as ciências naturais*, apresenta um belo balanço do papel da ciência, principalmente da física, durante o século XX.

“Nem tudo é simples no ensino de ciências. Tiro essa lição de minha própria experiência, a de um professor de filosofia que ensina na universidade (Denis-Diderot, Paris-VII), exclusivamente para cientistas. A meu redor, o mal-estar sobre o qual testemunham meus alunos – franceses e estrangeiros – é relativo não às formas ou à qualidade reconhecida do ensino que recebem, mas sobre o conteúdo do que lhes é transmitido. Isso pode ser resumido assim: “Ensinam-nos muitas equações, fazem com que realizemos manipulações e acabamos adquirindo uma certa habilidade. Mas não podemos vislumbrar a razão de ser e as finalidades daquilo que aprendemos.” Traduzindo: eles sentem falta, nesse tipo de ensino, de um acesso ao pensamento científico que sustentou e que continua dando os resultados que eles devem aprender e dominar. Eles gostariam de saber em que sentido Schrödinger não é uma equação. Parece-me que essa constatação pode ser estendida ao conjunto das disciplinas científicas e a todos os ciclos do ensino, secundário e superior. Que eu saiba, ela não pode ser desmentida em parte alguma da Europa. Isso nos remete a uma certa idéia da ciência, cujas raízes filosóficas já é tempo de reconhecer.”<sup>246</sup>

Na sequência, sugerimos a leitura de dois textos. O primeiro é uma breve explicação sobre a origem do artigo de Hessen. O segundo é parte do artigo do próprio Hessen.<sup>247</sup>

Com esses dois textos, cremos que a finalidade desta parte final da disciplina e do texto foi cumprida. Acreditamos que, para apresentar a física com toda sua dinâmica passada e presente, ou qualquer outra área do conhecimento científico, faz-se necessária tanto a abordagem internalista, mais frequente, como a externalista. É necessário complementar a visão internalista, essencialmente epistemológica, oferecida pelos historiadores da ciência, com a visão externalista, que pode ser encontrada nos trabalhos de historiadores e sociólogos da ciência que exploram os condicionantes sociais, econômicos, religiosos e culturais que marcam o espaço e o tempo da ciência.

---

<sup>246</sup> Dominique Lecourt. A cientificidade. In: Edgar Morin. **A religação dos saberes. O desafio do século XXI**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2.ed., 2002, p. 521. Original francês de 1999.

<sup>247</sup> Esses dois textos são dois artigos publicados na **Revista de Ensino de Física**, v. 6, n. 1, p. 33 e 37, respectivamente. Disponíveis em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol06a05.pdf>> e <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol06a06.pdf>>. Acesso em: junho de 2020. Uma errata: na 2ª página do 2º artigo, na linha 7, onde está “o papa”, leia-se “Alexander Pope (1688-1744)”.

### Agradecimento

Esta revisão cuidadosa das *Notas de Aula* de “Evolução dos conceitos da física” foi realizada por André Ferrer Pinto Martins, docente da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Maria Beatriz Fagundes, docente da Universidade Federal do ABC, por outro lado, realizou uma detalhada atualização das notas de rodapé dos capítulos 2, 3, 4 e 5 desta 2ª parte. Agradeço profundamente ao André e à Bia esse dedicado trabalho de melhoramento dessas *Notas de Aula*.

João Zanetic

