TRÊS EPISÓDIOS DE DESCOBERTA CIENTÍFICA: DA CARICATURA EMPIRISTA A UMA OUTRA HISTÓRIA[+*]

Fernando Lang da Silveira
Instituto de Física – UFRGS
Porto Alegre – RS
Luiz O. Q. Peduzzi
Departamento de Física – UFSC
Florianópolis – SC

Resumo

Examina-se o papel da experimentação na gênese de conhecimentos relativos a três episódios da descoberta científica: a física de Galileu, a teoria da relatividade restrita e o modelo atômico de Bohr. A insuficiência da epistemologia empirista na abordagem desses conteúdos é evidenciada pelo contraste entre a história empirista e uma outra história, muito mais rica, dinâmica e complexa. Do ponto de vista didático, a filosofia da ciência contemporânea abre novas e ainda pouco exploradas vias para um melhor entendimento da ciência e dos processos de construção do conhecimento científico.

Palavras-chave: *História da Ciência, epistemologia empirista, física galileana, relatividade restrita, átomo de Bohr.*

Abstract

The hole of experimentation in the genesis of knowledge concerning three episodes of the scientific discovery is examined: Galileu's physics, special theory of relativity and Bohr's atomic model. The insufficiency of the empiricist epistemology in the approach of these contents is

[+] Three scientific discoveries episodes: from the empirical caricature to another history

[*] *Recebido: março de 2005.*
Aceito: março de 2006.

showed by doing a contrast between the empiricist history and another history much richer, dynamic and complex. In didactic terms , the contemporary philosophy of science opens new and still not explored roads for a better understanding of Science and the processes of construction of the scientific knowledge.

Keywords: *History of Science, empiricist epistemology, Galileu's Physics, special theory of relativity, the Bohr's atom.*

I. Introdução

Aristóteles (384-322 a.C.) já propugnara que "não há nada no intelecto que não estivesse antes nos órgãos dos sentidos" (LOSEE, 1993, p. 108). Esta afirmação é consistente com o empirismo: "concepção que fundamenta nosso conhecimento, ou o material com o qual ele é construído, na experiência através dos cinco sentidos" (HONDERICH, 1995, p. 226).

O *empirismo*, como concepção sobre o conhecimento científico, afirma que os cientistas obtêm as teorias científicas (leis, princípios, etc) a partir *da observação, da experimentação e de medidas*. Ao relatar um episódio de *descoberta científica*, a *história da ciência empirista* apresenta *os dados e os resultados observacionais/experimentais* a partir dos quais o cientista, aplicando as regras do *método científico*, produziu conhecimento.

Embora não se possa dizer que exista uma história da ciência nos livros-texto do ensino médio, e também universitários, de um modo geral, mas sim uma caricatura dessa história, ela é consistente com a *epistemologia empirista*. O objetivo deste trabalho é o de criticar o relato *empirista*, independentemente do seu grau de sofisticação, mostrando, em três conhecidos episódios de descoberta científica, que existe uma *outra história*, muito mais rica e complexa, sobre a produção do conhecimento científico.

Nessa perspectiva, discute-se o papel que a experimentação desempenhou ou não na gênese da física de Galileu (as experiências de Pisa e do plano inclinado), na gênese da teoria da relatividade restrita (as experiências de Michelson-Morley) e na gênese do modelo atômico de Bohr (os espectros de emissão atômica). Para cada um desses temas, apresenta-se uma síntese histórica *empirista* seguida de uma *outra história*.

II.1 Os experimentos de Pisa e do plano inclinado e a teoria da queda dos graves de Galileu: a história empirista

Galileu (1564-1642) é o fundador do *método científico* e produziu a *teoria da queda dos graves* a partir da *observação* e da *experimentação*. Somente depois de fazer experimentos, concluiu que a *teoria aristotélica* estava errada.

Ao experimentar deixando cair simultaneamente dois objetos do alto de uma torre Galileu constatou experimentalmente que, não importando quais eram os seus pesos, eles atingiam o pé da torre ao mesmo tempo. Quem melhor do que Viviane, seu primeiro biógrafo, para descrever a lendária experiência realizada na cidade de Pisa?

> *Naquele tempo (1589-1590), ele estava convencido de que a investigação dos efeitos da natureza exigia necessariamente um conhecimento verdadeiro da natureza dos movimentos, de acordo com o axioma ao mesmo tempo filosófico e vulgar 'ignorato motu ignoratur natura'. Foi então que, para grande indignação de todos os filósofos, ele demonstrou – com o auxílio de experiências, provas e raciocínios exatos – a falsidade de numerosíssimas conclusões de Aristóteles sobre a natureza do movimento, conclusões que, até então, eram tidas como perfeitamente claras e indubitáveis. Assim, entre outras, a de que as velocidades de móveis da mesma matéria, mas desigualmente pesados e movendo-se através do mesmo meio, não obedecem à proporção de seus pesos, como é declarado por Aristóteles, mas se movem, todos, com a mesma velocidade. O que demonstrou em repetidas experiências, feitas no alto do campanário de Pisa, na presença de todos os outros professores e filósofos de toda a Universidade.* (VIVIANE, apud KOYRÉ, 1988, p. 200. Grifo no original)

A única razão pela qual os doutores da Universidade de Pisa, que assistiram aos experimentos, não se convenceram da falsidade da *teoria aristotélica* é a de que eram dogmáticos. Com os *experimentos de Pisa*, Galileu assestou um golpe mortal na *velha teoria aristotélica*, lançando as bases de uma nova dinâmica.

Galileu continuou aplicando o *método científico*, realizando uma série de novos experimentos. Ao fazer medidas sobre o movimento dos corpos em planos inclinados, descobriu que:

a) o movimento é uniformemente variado;

b) quanto mais inclinado o plano, maior é a aceleração.

Em face desses resultados experimentais, concluiu que, no vácuo, independentemente do peso, todos os corpos caem com a mesma aceleração.

II.2 Os experimentos de Pisa e do plano inclinado e a teoria da queda dos graves de Galileu: outra história

Galileu é um personagem de múltiplas interpretações dentro da história da ciência.[1] Como um dos possíveis contrastes com a versão *empirista*, apresenta-se a influência *pitagórico-platônica* na física de Galileu.

A *física galileana* foi profundamente influenciada e motivada pelas convicções copernicanas de Galileu. Desde o início, a *teoria copernicana* sofria importantes *objeções astronômicas e mecânicas*[2], além das religiosas, por parte de seus opositores. O compromisso de Galileu com as idéias copernicanas levou-o a enfrentar tais objeções e a sua *teoria dos movimentos* desempenhou um importante papel na confutação de alguns argumentos mecânicos contra o movimento da Terra. Mas o que teria levado Copérnico, e mais tarde Galileu e Kepler, a considerar o Sol e não a Terra o centro do mundo?

No início do "Commentariolus", obra na qual Copérnico divulgou em 1510, "sem provas e sem demonstrações matemáticas", a essência de seu sistema, ele manifestou a sua insatisfação com a *astronomia ptolomaica*, repudiando o *equante*[3]. A introdução de círculos *equantes* determinava que um planeta "não parecia mover-se numa velocidade uniforme nem em seu orbe deferente e nem ao redor do centro de seu epiciclo. Assim tal especulação não parecia nem bastante absoluta, nem bastante racional" (COPÉRNICO, 1990, p. 113). "Aquele famoso equante que introduzira nos céus um movimento não uniforme, parecia-lhe verdadeiramente inadmissível" (KOYRÉ, 1988, p. 82). Ou seja, os círculos *equantes* rompiam com o antigo pressuposto de que o movimento dos planetas devesse ser uniforme em relação ao centro de suas trajetórias e tal pressuposto era caro a Copérnico[4].

---

[1] Zylbersztajn (1988) discute quatro diferentes perspectivas da obra galileana: "Galileu – o empirista", "O herdeiro da física medieval", "O platonista" e "O manipulador de idéias".

[2] Para uma discussão detalhada, pode-se consultar Medeiros e Monteiro (2002).

[3] Neste arranjo geométrico da astronomia *ptolomaica*, o centro do *epiciclo* de um planeta (C) não se desloca com velocidade angular constante nem em relação ao centro de seu *deferente* (D), que não coincide com o centro da Terra (T), nem em relação à Terra. O movimento uniforme ocorre apenas para um ponto próximo a estes dois últimos, denominado *equante* (Q). Isto é, à medida que o planeta se movimenta, o segmento CQ descreve ângulos iguais em intervalos de tempo iguais.

[4] A "Narratio prima", escrita por seu discípulo Jorge Joaquim Rético a pedido de Copérnico, também expunha a insatisfação da nova astronomia com o *equante*.

As objeções ao *equante* (estéticas e físicas) demonstravam a insatisfação de Copérnico com a *astronomia ptolomaica*, mas não justificam a origem da *hipótese heliostática*. A nova ordem para o universo, instituída por Copérnico, reservou a posição central ao seu astro mais importante, a fonte da luz e da vida, o Sol. Ou seja, o Sol está no centro por uma razão *transempírica* que denota, juntamente com o pressuposto de que a matemática é imprescindível para a compreensão do mundo, a herança da *metafísica pitagórica*, *platônica* e *neoplatônica* na obra de Copérnico[5]. O "De revolutionibus", derradeiro livro de Copérnico, publicado em 1543, foi um fantástico produto inspirado nessa *metafísica*. Segundo Copérnico:

> *No meio de todos os assentos, o Sol está no trono. Neste belíssimo templo poderíamos nós colocar esta luminária noutra posição melhor de onde ela iluminasse tudo ao mesmo tempo? Chamaram-lhe corretamente a Lâmpada, a Mente, o Governador do Universo; Hermes Trimegisto chama-lhe o Deus Visível, a Electra de Sófocles chama-lhe O que vê tudo. Assim, o Sol senta-se como num trono real governando os seus filhos, os planetas que giram à volta dele* (COPÉRNICO, apud KUHN, 1990, p. 155).

Ou seja, contrariamente ao ditame da epistemologia *empirista*[6], há uma indubitável inspiração *metafísica* na gênese do heliocentrismo.

Kepler (1571-1630) também manifestou razões *metafísicas* para situar no Sol as causas do movimento dos planetas. A influência *neoplatônica* é bem ilustrada pela seguinte passagem de um de seus textos:

> *Em primeiro lugar, a menos que talvez um cego possa negá-lo perante ti, dentre todos os corpos do universo o mais notável é o Sol, cuja essência integral nada mais é que a mais pura das luzes* [...]*, a fonte da visão, pintor de todas as cores* [...]*, denominado rei dos planetas* [...]*, coração do mundo* [...]*, olho do mundo; por sua beleza, único que podemos considerar merecedor do Deus Altíssimo* [...] *Pois se os germânicos elegem como César o que tem o poder*

---

[5] Para os *platônicos* e *neoplatônicos* o Sol "tem a mesma função no universo das coisas visíveis do que a idéia do bem no universo das idéias" (POPPER, 1982, p. 214). O Sol, por conferir luz, vitalidade, crescimento e progresso às coisas visíveis, deve ocupar o status mais elevado na ordem das coisas da natureza. "Certamente nenhuma posição inferior no espaço ou no tempo podia ser compatível com a dignidade do Sol e com sua função criativa. (...) As suas fontes (fontes de Copérnico) imediatas são neoplatônicas" (KUHN, 1990, p. 155).

[6] Um dos dogmas do *empirismo*, exacerbado na versão do *positivismo lógico* do Círculo de Viena, é que *ciência se faz sem metafísica*. Como a *metafísica* não tem fundamentação *empírica*, os *positivistas lógicos* consideraram *as idéias metafísicas carentes de significado cognitivo*.

> *máximo em todo o império, quem hesitaria em conferir votos dos movimentos celestes àquele que já vem administrando todos os demais movimentos e mudanças por graça da luz, que é a sua posse exclusiva?* [...] *Nenhuma parte do mundo e nenhuma estrela é merecedora de tão grande honra; então, pelas razões mais elevadas, voltamos ao Sol, o único que parece, em virtude de sua dignidade e poder, adequado a essa missão motora e digno de tornar-se a morada do próprio Deus* (KEPLER, apud BURTT, 1991, p. 45-46).

Como se viu anteriormente, desde a sua formulação, a *teoria copernicana* esteve envolta em importantes *objeções astronômicas* e *mecânicas,* além de religiosas, por parte de seus opositores. No âmbito da astronomia, encontravam-se as previsões *não corroboradas empiricamente* de que:

a) Marte e Vênus deveriam sofrer grandes modificações no seu tamanho aparente quando observados da Terra;

b) Vênus deveria exibir fases, como a Lua;

c) as estrelas deveriam apresentar paralaxe.

Ao apontar o telescópio para o céu por volta de 1610, Galileu, *copernicano* convicto, contestou a propalada perfeição do *cosmo aristotélico* no domínio *supralunar*, observando estrelas nunca antes vistas, irregularidades na superfície lunar, manchas no Sol, *'orelhas'* em Saturno, bem como variações nos tamanhos aparentes de Marte (1:60) e Vênus (1:40), e fases em Vênus[7].

Ainda que não corroborassem apenas o *sistema de Copérnico* (as fases de Vênus, por exemplo, eram igualmente previstas pelo *sistema de Tycho Brahe*), e em que pese a ausência de uma teoria óptica para o telescópio, as evidências propiciadas por aquele "novo" instrumento eram tão espetaculares que Kepler, mesmo sem olhar através de suas lentes, referendou as observações de Galileu. O *copernicanismo* de ambos ensejava isso.

O significado das novas observações enaltece, ainda mais, o respeito de Galileu para com os *heliocentristas* que o precederam:

> *Estas são as dificuldades que me fazem admirar como é que Aristarco e Copérnico* [...] *tenham confiado tanto no que a razão lhes ditava, a ponto de confiadamente terem afirmado não poder a estrutura do universo ter outra forma que a por eles apontada.* (GALILEU, apud BANFI, 1983, p. 158. Grifo nosso)

[7] A paralaxe das estrelas somente veio a ser observada em 1837 por Bessel.

> *Como já afirmei antes, ter ele* (Copérnico) *continuado a afirmar, guiado pelas razões aquilo que as experiências sensíveis mostravam o contrário: porque eu não posso deixar de surpeender-me que ele tenha constantemente persistido em dizer que Vênus gire em torno do Sol, e que está afastado de nós mais de seis vezes num caso do que no outro, embora se mostre sempre igual a si mesmo, quando deveria mostrar-se quarenta vezes maior* (GALILEI, 2001, p. 424. Grifo nosso).

Galileu sabia das restrições (de toda a ordem) ao *heliocentrismo*, mas exercitava uma concepção epistemológica que privilegia a *razão*[8] em detrimento da *empiria*. Essa postura era consistente com a sua inspiração *platônica:* Platão (428/7- 348/7 a.C.) argumentava que o *Mundo Sensível* (o mundo percebido pelos cinco sentidos) encontrava-se em contínua alteração e mudança. Como o verdadeiro saber tem as características da necessidade lógica e da validade universal, não se pode procurá-lo no *Mundo Sensível*. Para Platão existe um segundo mundo − *Mundo das Idéias* −; este tem realidade independente do homem, existe objetivamente, fora de nós, apesar de ser imaterial. Os objetos do *Mundo Sensível* são cópias distorcidas das *Idéias*; por exemplo, um corpo pode ter a forma aproximada de um triângulo retângulo, mas nunca será verdadeiramente um *Triângulo Retângulo*. Entretanto, nós conhecemos o *Triângulo Retângulo* e também sabemos, por exemplo, que a soma dos quadrados dos catetos é igual ao quadrado da hipotenusa[9].

Dentre as *objeções mecânicas* ao movimento de rotação da Terra, confutadas por Galileu nos "Diálogos sobre os dois máximos sistemas do mundo" (GALILEI, 2001), destacam-se as seguintes:

a) *argumento da torre*: um objeto abandonado no topo de uma torre não pode cair verticalmente se a Terra estiver em movimento.

b) *argumento do canhão*: o alcance de um projétil de canhão não pode ser o mesmo para o leste e para o oeste caso a Terra esteja em movimento.

---

[8] A supremacia da *razão* sobre a *empiria* é a característica do *racionalismo*. O *racionalismo* é a "posição epistemológica que vê no pensamento, na razão, a fonte principal do conhecimento" (Hessen, 1987, p. 60); a *experiência externa* ou *sensível* é secundária, podendo até ser prejudicial ao conhecimento. "Em sentido estrito, [o racionalismo é o] conjunto das filosofias que sustentam que basta o pensamento puro, tanto para a ciência formal, como para a ciência fática" (BUNGE, 1986, p. 165).

[9] O conhecimento matemático, especialmente a geometria, serviu como modelo para Platão e os demais *racionalistas*; nessa concepção o pensamento impera absolutamente independente de toda a experiência, constituindo um conhecimento conceptual e dedutivo. Com base em alguns conceitos e axiomas, todo o resto é deduzido. Portanto, não é de se admirar que diversos *racionalistas*, como Descartes (1596-1650) e Leibniz (1646-1716), tenham sido também matemáticos.

c) *argumento da extrusão*: caso a Terra esteja em movimento, os corpos deveriam ser extrudidos, expulsos da sua superfície.

A retirada da Terra do centro do universo agregava novos questionamentos:

a) de acordo com os *aristotélicos*, os graves caiam devido à tendência natural que têm em se dirigirem para o centro do universo. Para onde, então, iriam, se a Terra não estivesse mais nesse centro?

b) o *cosmo aristotélico* era organizado sob o pressuposto da dicotomia existente entre os mundos *sublunar* e *supralunar*. Se a Terra se movimenta como os demais planetas, não se poderia mais falar de diferenças na composição da matéria terrestre e celeste; quem desejaria ou era capaz de subverter tudo isso?

Mesmo tendo Copérnico lidado com alguns desses problemas a partir do conceito de *impetus*, introduzido por Jean Buridan (PEDUZZI, 1998), Galileu considerava que apenas uma *nova física* poderia superar todas essas dificuldades. Assim a *física de Galileu*, em especial a *teoria do movimento*, foi fortemente motivada na necessidade de dar suporte à *teoria de Copérnico*, isto é, de superar as *objeções mecânicas* ao movimento da Terra. A única alternativa para colocar a Terra em movimento era criar uma nova teoria dos movimentos.

Mas como, enfim, Galileu chegou à sua *teoria do movimento de queda dos graves*? Certamente, rompendo primeiro com a tradição da análise do movimento pelas suas causas. Em sua obra "Duas Novas Ciências", ele afirma:

> *Não me parece ser este o momento oportuno para empreender a investigação da causa da aceleração do movimento natural, a respeito da qual vários filósofos apresentaram diferentes opiniões... Estas fantasias, e muitas outras, conviriam ser examinadas e resolvidas com pouco proveito* (GALILEI, 1988, p.164).

Mais adiante, destaca que:

> *Antes de tudo convém investigar e explicar a definição que corresponde convenientemente a esse movimento, tal como a natureza o utiliza.* [...] *O que acreditamos ter finalmente descoberto depois de longas reflexões* [...] *Finalmente, no estudo do movimento naturalmente acelerado, fomos, por assim dizer, conduzidos pela mão graças à observação das regras seguidas habitualmente pela própria natureza em todas as suas outras manifestações nas quais faz uso de meios mais imediatos, mais simples e mais fáceis.* [...] *Quando, portanto, observo uma pedra que cai de uma certa altura a partir do repouso e que adquire pouco a pouco novos acréscimos de velocidade, porque não posso pensar que tais acréscimos de velocidade*

> *não ocorrem segundo a proporção mais simples e óbvia? Se considerarmos atentamente o problema, não encontraremos nenhum acréscimo mais simples que aquele que sempre se repete da mesma maneira.* [...] *concebemos no espírito que um movimento é naturalmente acelerado, quando em tempos iguais quaisquer, adquire aumentos iguais da velocidade* (Idem, 1988, p. 156-160).

Conforme se pode notar, nessa passagem não há referência a qualquer *experimento* que o *induza* a propor que o *movimento de queda dos graves* seja um movimento com aceleração constante. Ao contrário, novamente a *razão* é invocada, por Galileu.

E quanto aos famosos experimentos no plano inclinado que, segundo a história empirista, teriam propiciado a base indutiva para a teoria de queda dos graves de Galileu? Efetivamente, eles parecem ter sido realizados. Entretanto, na forma como são apresentados por Galileu em "Duas Novas Ciências", não constituem experimentos dos quais se obtém indutivamente como conclusão que o movimento é uniformemente acelerado.

Depois de discorrer, em "Duas Novas Ciências", sobre o *movimento de queda dos graves*, Salviati, o expositor das idéias *galileanas*, é admoestado por Simplício, o representante do *aristotelismo* (é bom lembrar que o *empirismo* é a *epistemologia de Aristóteles*):

> *Simplício - ... Mas, se é essa a aceleração da qual se serve a natureza no movimento de queda dos graves, tenho no momento minhas dúvidas. Parece-me, pelo que diz respeito a mim e a outros que pensam como eu, que teria sido oportuno neste lugar apresentar uma das muitas experiências que, em diversos casos, concordam com as conclusões demonstradas* (Idem, 1988, p. 175).

Ao que Salviati responde:

> *Como verdadeiro homem de ciência, sua exigência é muito razoável; pois é assim que convém proceder nas ciências, que aplicam demonstrações matemáticas aos fenômenos naturais,* [...]*, as quais confirmam com experiências sensatas seus princípios* (Idem, 1988, p. 175. Grifo nosso).

Para *assegurar-se* (ou, em terminologia atual, *testar a hipótese*) de que a aceleração dos graves em queda se dá de modo a que os espaços *d* percorridos em qualquer tempo *t* estão entre si na razão dupla desses tempos, isto é, para *certificar-se* da validade da relação matemática $d \propto t^2$, Galileu desenvolveu experimentos com o plano inclinado. Com esse dispositivo ele diluiu a rapidez da queda, tornando possível

medidas de distância e de tempo. Naturalmente ele tem claro o pressuposto incorreto de que a aceleração de uma esfera que rola sobre o plano é a componente da aceleração de queda na direção paralela ao plano, e que, portanto, o movimento da esfera tem aceleração constante[10]. Conforme Galileu:

> *O que foi demonstrado no referente às quedas verticais, também acontece do mesmo modo para os movimentos que se realizam em planos inclinados quaisquer; supusemos, com efeito, que em tais planos os graus de velocidade aumentam sempre na mesma proporção, ou seja, proporcionalmente ao tempo, ou ainda, segundo a simples série dos números inteiros* (Idem, 1988, p. 177).

O plano inclinado constituiu-se de uma canaleta com cerca de 12 braças (aproximadamente 7 m), escavada em uma viga de madeira e forrada com pergaminho. "Fazíamos descer por ele uma bola de bronze duríssima perfeitamente redonda e lisa" (Idem, 1988, p. 175). Tendo medido, com um relógio d'água, o tempo necessário para que a bola percorresse toda a canaleta, "fizemos descer a mesma bola por uma quarta parte do comprimento total da canaleta; e, medido o tempo de queda, resultava ser sempre rigorosamente igual à metade do outro" (Idem, 1988, p. 175-176). Segue relatando que, para outras experiências, "sempre se encontrava que os espaços percorridos estavam entre si como os quadrados dos tempos e isso em todas as inclinações do plano" (Idem, 1988, p. 176).

Simplício parece plenamente satisfeito:

> *Teria tido grande satisfação em presenciar tais experiências; contudo, estando certo de seu zelo em efetuá-las e de sua fidelidade em relatá-las, não tenho escrúpulo em aceitá-las como verdadeiras e certas* (Idem, 1988, p. 176).

Dessa forma, contrariamente à *história empirista*, o experimento serviu como um teste para a teoria e não como o ponto de partida para a teoria.

Alexandre Koyré, físico e historiador da ciência, demonstrou em 1937 que os famosos experimentos da torre de Pisa nunca foram feitos por Galileu, são um mito (KOYRÉ, 1988). Koyré relata experimentos realizados por outros cientistas que, tendo deixado cair do topo de uma torre objetos de pesos diferentes, constataram que o corpo

---

[10] De acordo com a *mecânica newtoniana* sabe-se que o pressuposto de que a aceleração de uma esfera que rola é uma componente da aceleração gravitacional está errado. Na verdade, essa aceleração é menor do que a componente da aceleração gravitacional na direção paralela ao plano, pois a esfera que rola sofre também uma força de atrito. Apenas no deslizamento sem atrito é que a aceleração do corpo é a componente da aceleração gravitacional na direção paralela ao plano.

mais pesado atingia o solo antes do corpo mais leve. Em especial, apresenta uma carta de Vincenzo Renieri, professor da Universidade de Pisa, onde este relata a seu mestre Galileu ter feito um experimento na Torre de Pisa com uma bala de canhão e com uma bala de mosquete, ambas de chumbo, e verificado que "quando a mais pesada e a mais leve caem deste campanário, a maior precede a menor de muito" (RENIERI, apud KOYRÉ, 1988, p. 203). Em sua resposta, Galileu limita-se a remeter Renieri ao seu livro ("Duas Novas Ciências") onde demonstrou que não podia acontecer de outro modo. Ou seja, Galileu tinha uma teoria qualitativa para a queda em meios resistivos que previa que se duas esferas de mesma densidade fossem deixadas cair simultaneamente do topo de uma torre, a esfera maior se adiantaria em relação à menor. Por isto Galileu nunca realizaria um experimento, deixando cair juntos de uma torre dois objetos, com o objetivo de demonstrar empiricamente que o objeto mais pesado chegaria simultaneamente com o mais leve ao solo, pois sabia que o objeto mais pesado se adiantaria em relação ao outro.

Quanto ao relato de Viviane, não se sabe, ao certo, qual o seu propósito. Koyré (1988) demonstra a sua completa improcedência, analisando as condições de hierarquia da universidade à época e o papel que nela poderia desempenhar um jovem e desconhecido professor de matemática recém contratado.

Galileu nunca soube qual era o valor da aceleração de queda livre de um único corpo[11]. Entretanto, afirmou que todos os corpos caem com a mesma aceleração no vácuo. Na época de Galileu, discutia-se se realmente era possível existir vácuo!

Conforme se procurou mostrar, a *teoria dos movimentos* de Galileu foi fortemente motivada por um *problema teórico*, qual seja o de dar suporte mecânico à *teoria copernicana;* os alegados experimentos, quando ocorreram, tiveram uma função diversa daquela propugnada pela história *empirista.*

III. 1 Os experimentos de Michelson-Morley e a teoria da relatividade restrita de Einstein: a história empirista

A idéia da luz como um *fenômeno ondulatório* que demanda um meio para a sua propagação, defendida no século XVII por René Descartes (1596-1650), Christiaan Huygens (1629-1695), Robert Hooke (1635-1703), entre outros, é retomada no início do século XIX, a partir dos trabalhos de Thomas Young (1773-1829) e Agustín Fresnel (1788-1827), após um longo período de predomínio da *concepção corpuscular*.

[11] Em uma passagem dos *"*Diálogos sobre os dois máximos sistemas do mundo", Galileu estimou que um corpo em queda a partir do repouso descesse nos primeiros cinco segundos cerca de cem braças − aproximadamente 58 m − (GALILEI, 2001, p. 305), o que resultaria em uma aceleração de cerca de 4,6 m/s^2 (portanto, menos da metade do valor correto). A primeira medida precisa da aceleração gravitacional foi realizada 17 anos após a morte de Galileu, em 1659 por Huygens, que encontrou cerca de 9,5 m/s^2 (SILVEIRA, 1995).

Uma substância de propriedades (ainda) desconhecidas e bastante contraditórias, o *éter*, era o (suposto) meio de propagação da luz, permeando todo o universo[12]. Era em relação a ele que a luz (e as demais ondas eletromagnéticas) possuía a velocidade, prevista pelas *equações de Maxwell* e determinada experimentalmente, de cerca de 300.000 km/s. Para muitos o *éter* representava, inclusive, a possibilidade concreta do *referencial absoluto* em relação ao qual vigiam as *leis da mecânica newtonina*.

Em 1881 o cientista alemão Albert Abraham Michelson (1852-1931) realizou experimentos em Berlim e Potsdam para detectar o *vento de éter*. Ou seja, como a Terra se movimenta através do *éter*, previa-se teoricamente que a velocidade de propagação da luz em relação à Terra fosse diferente em diferentes direções.

Esses primeiros experimentos apresentaram resultados negativos. Em 1887, Michelson e o norte-americano Edward Williams Morley (1838-1923) refizeram os experimentos em Cleveland, com um equipamento muito mais sensível que o anterior, não conseguindo mais uma vez observar o *vento de éter*.

Segundo a *história empirista*, esses experimentos mostraram que a *hipótese da existência do éter* era falsa e que, portanto, não existia um *sistema de referência absoluto*. Os *experimentos de Michelson-Morley* derrubaram a *física clássica* que pressupunha um *sistema de referência absoluto* (o *espaço absoluto de Newton*) e o *tempo absoluto*. Albert Einstein (1879-1955) aceitou o veredicto experimental da *constância da velocidade da luz*, estatuindo-o como um dos postulados fundamentais da sua teoria em 1905. *"*A teoria einsteiniana depende inteiramente do resultado da experiência de Michelson e pode ser derivada dele*"* (PETZOLD, apud THUILLIER, 1994, p. 237).

Robert Millikan (1868-1953), prêmio Nobel em 1923, sintetizou bem a suposta *gênese empírica* da *teoria da relatividade restrita*:

> *A teoria da relatividade restrita pode ser considerada... essencialmente uma generalização a partir do experimento de Michelson* [...] *Descartando todas as concepções a priori sobre a natureza da realidade* [...] *Einstein tomou como ponto de partida fatos experimentais cuidadosamente testados* [...] *independentemente deles parecerem no momento razoáveis ou não* [...] *Mas este experimento* [de Michelson-Morley]*, depois de ter sido realizado com extraordinária habilidade e refinamento pelos seus autores, deu a resposta definitiva* [...] *que não existe nenhuma velocidade observável da Terra em relação ao éter. Este incrível e aparentemente inexplicável fato experimental perturbou violentamente a Física do século XIX e por quase vinte anos os físicos* [...] *se esforçaram por torná-lo razoável. Mas Einstein nos chamou a atenção: vamos aceitá-lo como um fato*

[12] O *éter* devia ser um meio sutil, através do qual os planetas e os demais astros podiam se mover livremente e, de forma paradoxal, apresentar também características de um sólido elástico, para propagar ondas luminosas transversais.

> *experimental estabelecido e tirar as suas inevitáveis conseqüências* [...] *Assim nasceu a teoria da relatividade restrita.* (MILLIKAN, apud VILLANI, 1981, p. 36)

III.2 Os experimentos de Michelson-Morley e a teoria da relatividade restrita de Einstein: outra história

A concepção *empirista-indutivista* da ciência, que ainda hoje se encontra fortemente disseminada no meio acadêmico, concebe, fundamentalmente, a *teoria da relatividade restrita* como uma resposta objetiva e correta aos *experimentos de Michelson-Morley*.

De modo geral, a divulgação da produção do conhecimento científico (através de artigos em revistas de cunho mais popular, livros de divulgação, materiais didáticos etc) veicula um contexto de desenvolvimento linear e cumulativo, fortalecendo ainda mais a proliferação da concepção *empirista*.

Conforme argumenta o historiador da ciência Gerald Holton, o quadro eminentemente *positivista*[13] em que se situam as idéias de Einstein no começo do século passado acabou fomentando uma forte ligação entre a sua *teoria da relatividade restrita* e os *experimentos de Michelson-Morley*. Em tais circunstâncias,

> [...] *parece inevitável que, durante a década que se seguiu o trabalho de Einstein de 1905 – especialmente na literatura didática – se desse uma união simbiótica entre o enigmático experimento de Michelson e a incrível teoria da relatividade. O indubitável resultado dos experimentos de Michelson podia ser visto como fonte de uma base experimental para a compreensão da teoria da relatividade que, por outro lado, parecia contrária ao próprio senso comum; a teoria da relatividade, por sua vez, podia fornecer uma explicação do resultado experimental de Michelson de forma não artificial ou ad-hoc, como parecia ser baseada na suposta contração de Lorentz-FitzGerald. Isto provou ser um casamento de longa duração* (HOLTON, apud VILLANI, 1981, p. 37).

---

[13] *Positivismo* designa várias doutrinas filosóficas que se caracterizam "pela valorização de um método empirista e quantitativo, pela defesa da experiência sensível como fonte principal do conhecimento" (JAPIASSU; MARCONDES,1990, p. 198), "pela aceitação das partes descritivas da ciência, por certa desconfiança da teoria, e que recusa admitir ou negar a realidade do mundo físico" (BUNGE, 1986, p. 164) e "que nega valor cognitivo à investigação filosófica" (RAZINKOV, 1984, p. 342).

A 'vinculação didática' da *teoria da relatividade* ao *experimento de Michelson-Morley* parece ter desempenhado, à época, importante papel para a sua aceitação por parte de cientistas, estudantes e público em geral. O próprio Einstein "considerava que o experimento de Michelson-Morley era necessário para que a maioria dos físicos aceitasse a sua teoria; mas isso é bem diferente de considerar o experimento como gênese e base da relatividade" (VILLANI, 1981, p. 38).

Entretanto, em seu famoso artigo de 1905, intitulado "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento" (EINSTEIN, 1983), não há qualquer menção aos *experimentos de Michelson-Morley*. Na primeira frase daquele trabalho encontra-se o seguinte: "Como é sabido, a eletrodinâmica de Maxwell – tal como atualmente se concebe – conduz, na sua aplicação a corpos em movimento, a assimetrias que não parecem inerentes aos fenômenos" (Idem, p. 47). Abraham Pais, biógrafo de Einstein, embora acreditando que os *experimentos de Michelson-Morley* fossem de conhecimento do cientista, considera-os como secundários para a gênese da teoria; a frase inicial explica a motivação para o artigo de 1905: "Einstein foi levado à teoria da relatividade restrita principalmente por motivos estéticos, isto é, por argumentos de simplicidade" (PAIS, 1993, p. 160).

Segundo o próprio Einstein em suas "Notas Autobiográficas" (EINSTEIN, 1982), a gênese da *teoria da relatividade restrita* encontra-se em duas vertentes diferentes:

a) Einstein percebera, ainda estudante que, quando se aplica as *transformações de Galileu* aos fenômenos eletromagnéticos, surgem contradições. O *experimento mental da perseguição do raio de luz* é um exemplo disto: imagine-se viajando junto com uma onda eletromagnética. Vê-se então um campo elétrico e um campo magnético que variam no espaço senoidalmente, mas que são constantes no tempo. Entretanto, segundo as *equações de Maxwell* (*lei de Faraday* e *lei de Ampére-Maxwell* para o vácuo), não podem existir tais campos. "A teoria da relatividade restrita se originou das equações do campo eletromagnético de Maxwell" (Idem, 1982, p. 63). De fato, se o *princípio da relatividade de Galileu* for aplicado à *eletrodinâmica de Maxwell*, originam-se "assimetrias que não parecem ser inerentes aos fenômenos" (Idem, 1983, p. 47) pois as *equações de Maxwell* são invariantes frente às *transformações de Lorentz*.

b) Einstein aceitou as críticas que Ernst Mach (1838-1916) havia feito à *mecânica clássica*, em especial às idéias do *espaço e do tempo absolutos*. Ou seja, Einstein acreditava que a *mecânica clássica* estava com problemas insanáveis. Segundo suas próprias palavras, estava:

> *firmemente convencido da não-existência do movimento absoluto; meu problema residia em como conciliar isso com nosso conhecimento de eletrodinâmica. Talvez assim seja possível entender porque razão, na minha luta pessoal, não desempenhou qualquer papel, ou pelo menos um papel decisivo, a experiência de Michelson* (EINSTEIN, apud PAIS, 1995, p. 200-201).

Embora tenha sido inegável a influência da *filosofia positivista* de Mach – o *empiriocriticismo*[14] – sobre o jovem Einstein, como ele ressaltou em suas "Notas Autobiográficas", percebeu posteriormente as suas insuficiências: Mach não reconheceu devidamente "a natureza essencialmente construtiva e especulativa de todo o pensamento e principalmente do pensamento científico" (EINSTEIN,1982,p. 29). A rejeição da *hipótese atômica* por Mach é um exemplo, pois ao não aceitar a presença desses *não observáveis* (os átomos, as moléculas) ele "condenou a teoria precisamente nos pontos em que esse caráter construtivo-especulativo é claro e indiscutível, como na teoria cinética dos átomos" (Idem, p. 29). "Mach era tão bom em mecânica como deplorável em filosofia. Esta visão míope sobre a ciência o levou a rejeitar a existência dos átomos" (Idem, p. 334)

Para Einstein, as bases axiomáticas da física não podem ser obtidas a partir da experiência, pois nenhum caminho lógico pode conduzir das *percepções* aos *princípios* de uma teoria. Os fundamentos de uma teoria científica são livres criações do espírito humano.

> *Sabemos agora que a ciência não pode se desenvolver apenas a partir do empirismo; nas construções da ciência, precisamos da invenção livre, que só a posteriori pode ser confrontada com a experiência para se conhecer a sua utilidade. Este fato pode ter escapado às gerações anteriores, para as quais a criação teórica parecia desenvolver-se indutivamente a partir do empirismo, sem a criativa influência de uma livre construção de conceitos. Quanto mais primitivo for o estado da ciência, mais rapidamente pode o cientista viver na ilusão de que é um empirista puro. No século XIX, muitos ainda julgavam que a regra fundamental de Newton – 'hypotheses non fingo' – devia constituir a base de toda a ciência natural saudável* (EINSTEIN, apud PAIS, 1995, p. 14-15).

À luz dessa *concepção epistemológica*, pode-se então afirmar que a *teoria da relatividade restrita*, segundo o seu próprio idealizador, não foi uma resposta aos resultados negativos dos *experimentos de Michelson-Morley*.

O projeto inicial de Einstein, com a *teoria da relatividade restrita* (1905), era o de criar uma mecânica teoricamente consistente com o *eletromagnetismo*. Posteriormente, com a *relatividade geral* (1916), ele resolve o conflito da relatividade restrita com a *gravitação newtoniana* (pois nenhuma informação pode se propagar com velocidade superior a da luz).

---

[14] Concepção que "eliminava todas as noções científicas não verificáveis direta ou indiretamente através da experiência sensível" (HONDERICH, 1995, p. 229).

É verdade que a *teoria da relatividade restrita* teve como conseqüência não-intencionada a explicação dos resultados negativos dos experimentos que visavam detectar efeitos do movimento do sistema de referência sobre a velocidade de propagação da luz, como por exemplo, os resultados negativos dos *experimentos de Michelson-Morley*. Entretanto, historicamente é inverídico que os *experimentos de Michelson-Morley,* ou anteriormente as medidas de *aberração estelar*[15], tenham sido *cruciais* para a velha física. Diversos cientistas explicaram os resultados negativos em detectar o *vento de éter* sem descartar a *física clássica*.

Por exemplo, H. A. Lorentz (1853-1928), em 1904, no artigo intitulado "Fenômenos eletromagnéticos num sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz" (LORENTZ, 1983), supondo a existência do *éter*, explicava não somente os resultados negativos dos *experimentos de Michelson-Morley* em detectar o movimento da Terra em relação ao *éter*, como os resultados negativos ulteriores de Rayleigh-Brice (em 1902 sobre a dupla refração) e de Trouton-Noble (em 1904 sobre torque em um capacitor).

Quando em 1907 Michelson recebeu o Prêmio Nobel não houve referência alguma aos seus famosos experimentos, nem por parte da comissão que lhe concedeu o prêmio, nem por ele mesmo (PAIS, 1995). A justificativa da comissão que outorgou o Prêmio Nobel a Michelson foi a seguinte: pelos instrumentos ópticos de precisão e pelas investigações espectroscópicas e metrológicas realizadas com a sua intervenção.

"Michelson, que se aferrou ao éter até o amargo fim" (LAKATOS, 1989, p. 103), nunca crendo que seus experimentos o refutavam, acreditou em 1925 ter detectado experimentalmente o *vento de éter* (Michelson morreu em 1931).

Dessa forma, a *teoria da relatividade restrita* foi motivada por um *problema teórico*: resolver uma inconsistência entre a *mecânica* e o *eletromagnetismo*. Os resultados negativos dos *experimentos de Michelson-Morley*, apesar de justificados teoricamente pela *teoria de Einstein*, não foram cruciais para a física clássica e, particularmente para Michelson (bem como para outros cientistas), não se constituíram em uma refutação da hipótese do *éter*.

IV.1 Os espectros de emissão atômica e a teoria do átomo de Bohr: a história empirista

No final do século XIX e início do século XX, o espectro de emissão do hidrogênio foi objeto de extensos estudos. Em 1885 J. J. Balmer (1825-1898) mostrou que os quatro comprimentos de onda do espectro do hidrogênio, até então conhecidos,

[15] As medidas *anômalas* para a *aberração estelar* haviam sido explicadas primeiramente por G. G. Stokes (1819-1903), supondo o arrasto do *éter* pela Terra.

$H_\alpha, H_\beta, H_\gamma$ e H_δ, podiam ser encontrados através de uma relação matemática bastante simples.

Sem conhecer o trabalho de Balmer, J. R. Rydberg (1854-1919) sugeriu, em 1890, haver uma relação geral para a determinação das linhas espectrais do hidrogênio em qualquer segmento do espectro eletromagnético. Essa relação, que incluía a *série de Balmer* como um caso particular – prevendo também outras séries, que viriam a ser conhecidas experimentalmente mais tarde, com o aperfeiçoamento dos instrumentos e das técnicas de análise espectral – tem a forma

$$\frac{1}{\lambda_{n,m}} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \qquad (1)$$

sendo $\lambda_{n,m}$ o comprimento da radiação eletromagnética emitida pelo átomo de hidrogênio, n e m números inteiros (n > m) e R_H a *constante de Rydberg.* A *constante de Rydberg* possuía o valor de aproximadamente 109,7 cm^{-1} (*determinado experimentalmente*). Para m igual a 2 e a 3, respectivamente, a *fórmula de Rydberg* reproduzia os comprimentos de onda das *séries de Balmer e de Paschen,* esta última encontrada em1908, na região do infravermelho.

Em 1912, Niels H. D. Bohr (1885-1962), que trabalhava com Ernest Rutherford (1871-1937) em Manchester, investiu um grande esforço intelectual para explicar teoricamente porque o átomo de hidrogênio emitia radiação eletromagnética de acordo com a *fórmula empírica de Balmer*. Finalmente Bohr postulou que as órbitas eletrônicas obedeciam a um princípio da quantização do momento angular – isto é, somente são possíveis órbitas eletrônicas para as quais a quantidade de movimento angular seja um número inteiro que multiplica a constante de Planck – e que os elétrons somente emitiam radiação de forma quantizada quando decaiam de uma órbita estacionária para outra, obtendo teoricamente uma expressão para o comprimento de onda da radiação emitida. A partir da sua teoria, Bohr demonstrou a fórmula empírica de Balmer.

Niels Bohr conseguiu não apenas justificar teoricamente a *fórmula empírica de Balmer*, mas também obter teoricamente a *constante de Rydberg* nela presente como função de *constantes físicas fundamentais:* a carga do elétron (e), a massa do elétron (m), a constante de Planck (h), a velocidade de propagação da luz no vácuo (c) e a permissividade elétrica do vácuo (ε_0).

Constante de Rydberg: $$R_H = \frac{m.e^4}{8.\varepsilon_o.c.h^3} \qquad (2)$$

IV.2 Os espectros de emissão atômica e a teoria do átomo de Bohr: outra história

As origens da moderna *física atômica* encontram-se nos estudos desenvolvidos por Michael Faraday (1791-1867) sobre a eletrólise galvânica, no reconhecimento da natureza corpuscular da eletricidade, e na identificação do elétron a partir dos fenômenos de descargas elétricas em gases rarefeitos, feita no final do século XIX. A descoberta do núcleo atômico por Rutherford "completou nosso conhecimento das unidades estruturais da matéria" (BOHR, 1995, p.21), como disse Bohr em discurso no Congresso de Física e Biologia em memória de Luigi Galvani (1737-1798), em 1937.

Com o *átomo de Rutherford,* retoma-se a questão da instabilidade dos *sistemas saturnianos* (um corpúsculo central carregado positivamente circundado por anéis de elétrons em movimento uniforme) ainda sem solução, mas de muito interesse pelo seu potencial explicativo. Como se sabe, a estrutura núcleo-planetária de H. Nagaoka (1904), já antecipada por Jean B. Perrin (1870-1940) em 1901, representava uma tentativa, embora em termos bastante incipientes, de interpretar os espectros ópticos, atribuindo as linhas espectrais a oscilações desses anéis e a emissão radioativa de partículas β por núcleos pesados, vinculando o decaimento "à quebra do anel exterior de elétrons do átomo pesado" (ROSENFELD, 1989, p. 32).

De fato, desde o grande impulso que a espectroscopia teve a partir de 1859, em função dos trabalhos (alguns em conjunto) desenvolvidos por G. R. Kichhoff (1824-1887) e R. W. Bunsen (1811-1899), parecia não haver dúvidas de que a posição e o número das linhas espectrais exibidas por um elemento constituíam evidências inequívocas da existência de propriedades ainda desconhecidas, que jaziam no mais íntimo universo do átomo, e que, de alguma forma, estavam relacionadas a vibrações atômicas. E mais, que todo elemento químico possui um espectro que lhe é característico. Ao mostrarem que a análise espectral podia ampliar o quadro atômico (ao descobrirem o césio e o rubídio) esses dois cientistas abriram um novo e extraordinário campo de investigação no âmbito da Química, e da Física, por extensão.

Para Bohr, a análise espectral era uma evidência inconteste da estabilidade intrínseca das configurações eletrônicas dos átomos. Por isso, considerava que a estabilidade macroscópica da matéria é um reflexo de sua estabilidade em nível microscópico. Contudo, Bohr não via como compatibilizar a estrutura interna dos sistemas atômicos com a *física clássica*. A analogia com a dinâmica do sistema solar é insustentável, pois quando um corpo desse sistema é perturbado, não há retorno a seu estado original. Já o átomo de um elemento admite grandes transformações (por exemplo, mudanças de estado físico da matéria) permanecendo (em geral) o mesmo. Por outro lado, do ponto de vista da *teoria eletromagnética,* uma partícula carregada emite radiação. Assim, o átomo de Rutherford não poderia existir por mais do que 10^{-9} s. A chave para a solução de todo esse dilema está no quantum elementar de ação, de Planck:

> *A existência do quantum elementar de ação expressa, a rigor, uma nova faceta da individualidade dos processos físicos, a qual é desconhecida das leis clássicas da mecânica e do eletromagnetismo, e restringe a validade destas leis basicamente aos fenômenos que envolvem ações grandes em comparação com o valor de um único quantum, tal como fornecido pela nova constante atômica de Planck. Essa condição, embora amplamente satisfeita nos fenômenos da experiência física comum, não é de modo algum aplicável ao comportamento dos elétrons nos átomos e, a rigor, somente a existência do quantum de ação impede a fusão dos elétrons e do núcleo num corpúsculo neutro maciço, de extensão praticamente infinitesimal* (BOHR, 1995, p. 22-23).

É importante ressaltar que a intuição física de que a constituição do átomo é governada pelo *quantum de ação* (a *constante de Planck*) não foi uma idéia exclusiva de Bohr. Conforme Segrè (1987, p.125), o astrônomo britânico J. W. Nicholson já havia tentado introduzir a *constante de Planck h* em modelos atômicos e o químico dinamarquês N. Bjerrum em modelos moleculares. Mas é com Bohr que o *átomo de Rutherford* é sujeito a novas e nunca antes imaginadas condições, que o tornam estável. O conceito de *estado estacionário*, no qual o equilíbrio dinâmico era regido pelas *leis da mecânica clássica*, e o *postulado da quantização do momento angular*, para a determinação desses estados, ensejaram a construção revolucionária de Bohr. A conservação da energia determinava a relação entre a energia (emitida ou absorvida) e a freqüência da radiação, na passagem de um estado estacionário a outro.

> *O reconhecimento dessa situação sugeriu prontamente a descrição da ligação de cada elétron no campo ao redor do núcleo como uma sucessão de processos individuais, pelos quais o átomo passa de um de seus chamados estados estacionários para outro desses estados, com emissão de energia liberada sob a forma de um único quantum de radiação eletromagnética. Essa visão, intimamente aparentada com a exitosa interpretação einsteiniana do efeito fotoelétrico, e tão convincentemente corroborada pelas belas pesquisas de Franck e Hertz sobre a excitação das linhas espectrais pelos impactos dos elétrons nos átomos, de fato não apenas forneceu uma explicação imediata para as intrigantes leis gerais das linhas espectrais, destrinçadas por Balmer, Rydberg e Ritz, como também, com o auxílio de provas espectroscópicas, levou gradativamente a uma classificação sistemática dos tipos de ligação estacionária de qualquer elétron num átomo, fornecendo uma explicação completa das notáveis relações entre as propriedades físicas e químicas dos elementos, tal*

como expressas na famosa tabela periódica de Mendeleiev (BOHR, 1995, p. 22-23).

Como bem enfatizou Lakatos (1989, p. 75-92) no estudo "Bohr: um programa de pesquisa que progride sobre fundamentos inconsistentes", a história do programa de pesquisa de Bohr começa com um problema: o enigma da estabilidade do átomo de Rutherford. O problema de Bohr não era explicar as séries de Balmer e Paschen. Lakatos enfatiza isso porque, como as séries eram conhecidas antes de 1913, alguns historiadores (e, talvez, também os autores de livros-textos) contextualizam o átomo de Bohr na perspectiva de uma ascensão indutiva baconiana[16] constituída por: o caos dos espectros de emissão e absorção; uma lei empírica (Balmer) e a explicação teórica (Bohr).

O *modelo atômico de Bohr* encontra-se em seu célebre trabalho "Sobre a constituição de átomos e moléculas", publicado em 1913 no periódico *Philosophical Magazine*, em três partes: a primeira em julho, a segunda em setembro e a última em novembro. Nesses três artigos, Bohr mostrou que a sua teoria:

a) aplicava-se ao problema da radiação e da absorção da energia pela matéria, explicando os espectros de emissão, a fórmula empírica e a constante de Rydberg;

b) permitia um esboço de uma teoria para a constituição de átomos com poucos e muitos elétrons;

c) permitia um esboço de uma teoria para a constituição de compostos químicos (moléculas);

d) tinha conexão com os problemas do calor específico, da radiação do corpo *negro e das propriedades magnéticas da matéria*.

Cerca de um ano antes da publicação da primeira parte da trilogia, em junho de 1912, Bohr entregou a Rutherford o primeiro esboço das suas idéias. Nesse estudo já existia tudo o que iria constar na trilogia, exceto a discussão dos espectros de emissão atômica (ROSENFELD, 1989).

Em uma carta datada de 31 de janeiro de 1913, endereçada a Rutheford por Bohr, encontra-se a seguinte passagem: "Não trato, de modo nenhum, da questão do cálculo das freqüências correspondentes às linhas do espectro visível" (BOHR, apud ROSENFELD, 1989, p. 66).

Em 6 de março de 1913, Bohr envia outra carta a Rutherford, onde reproduzia na íntegra *a solução do problema dos espectros de emissão atômica para o áto-*

[16] O filósofo *empirista* Francis Bacon (1561-1626) propugnava um *método indutivo–experimental*, sustentando que o cientista deveria inicialmente estabelecer os fatos de uma ciência particular e depois "procurar as correlações entre estes fatos. E ele (Bacon) insistia sobre uma ascensão gradual indutiva, desde correlações de baixo grau de generalidade até as mais abrangentes" (LOSEE, 1993, p. 68).

mo de hidrogênio, calculando também a *constante de Rydberg*. Em um trecho desta carta encontra-se o seguinte:

> *Como verá (Professor Rutherford), o primeiro capítulo trata principalmente do problema da emissão dos espectros de linhas* [...] *parece possível dar uma interpretação simples da lei do espectro do hidrogênio (refere-se aqui à fórmula de Balmer), e que do cálculo resulta um acordo quantitativo íntimo com as experiências* (Idem, p. 67).

Leon Rosenfeld, amigo de Bohr, na interessantíssima *Introdução* ao livro que contém a trilogia de 1913, assim se pronuncia sobre a carta de 6 de março a Rutherford:

> *Sabendo quão longe ele* (Bohr) *estava ainda de todo o assunto dos espectros de linhas algumas semanas antes, não podemos deixar de ficar impressionados, ao lermos esta carta, pela maestria que adquiriu tão rapidamente na matéria. Para precipitar este desenvolvimento dramático bastara apenas Bohr ter tido conhecimento do trabalho de Rydberg sobre a classificação das séries espectrais* (ROSENFELD, 1989, p. 69).

Durante o mês de fevereiro de 1913 – portanto entre a data da carta na qual Bohr falava não tratar dos espectros de emissão e da carta que dizia já haver resolvido o problema –, o seu colega H. M. Hansen, físico de Copenhague, perguntou a Bohr como explicaria, à luz da sua teoria, os espectros de emissão (Idem, p. 69). Bohr disse-lhe que não se interessara, até então, por este problema, julgando que os espectros eram demasiado complexos para darem qualquer chave para o conhecimento da estrutura dos átomos. Hansen objetou-lhe, aconselhando-o a dar uma olhada na fórmula de Bohr. "Logo que vi a fórmula de Balmer, tudo se tornou claro para mim – declarou Bohr muitos anos mais tarde" (SEGRÈ, 1987, p. 125. Grifo nosso). Essa afirmação de Bohr, descontextualizada, pode suscitar um aporte *empirista* à sua teoria (BASSO; PEDUZZI, 2003). Contudo, nota-se que decorreu muito pouco tempo (cerca de um mês) entre o questionamento, a resposta de não conhecimento e a publicação do artigo incluindo a explicação teórica das séries espectrais.

As previsões teóricas do *modelo de Bohr* foram corroboradas com a descoberta de outras séries no espectro do hidrogênio: uma no ultravioleta, por T. Lyman (1914) (correspondente a m = 1, na equação (1)), e duas no infravermelho, por F. S. Brackett (1922) e A. H. Pfund (1924) (para m = 4 e para m = 5, respectivamente).

Assim, a *teoria do átomo de Bohr*, contrariamente à *história empirista*, não começou com um *problema empírico*, mas com um *problema teórico*, qual seja, *dar sustentação à hipótese de Rutherford do átomo com núcleo.* A *teoria de Bohr* teve

como *conseqüência não-intencionada*[17] a explicação dos espectros de emissão do hidrogênio! Além disso, adiantou-se em relação à *empiria*, prevendo novas séries espectrais.

V. Conclusão

Não há dúvida que *experimentos*, *observações*, *resultados de medidas* são importantes para o conhecimento científico. Entretanto, a relação da *empiria* com a *teoria* é muito mais complexa do que a *história empirista* julga.

Nos três episódios discutidos, vimos que os resultados observacionais/ experimentais desempenharam um papel diferente daquele propugnado pelos *empiristas* e nunca se constituíram na base *indutiva* da qual os cientistas ascenderam à teoria. A produção do conhecimento científico não pode ser entendida através da *epistemologia empirista* (apesar dos livros-texto e muitos cientistas assim acreditarem[18]) e não pode ser descrita como conseqüência da aplicação de um *método científico* que começa com resultados observacionais/experimentais.

Por não reconhecer que os cientistas inventam e especulam, a *história empirista* se cala sobre as idéias que não se mostraram bem sucedidas. Somente as *"idéias corretas"* merecem um lugar nesta história, pois como alguém que segue o *método científico* poderia incorrer em erro*?*

Em relação a Galileu, a *história empirista* não menciona que ele acreditava ser o movimento pendular *isócrono* para qualquer amplitude (além de considerar a circunferência como a *curva braquistócrona*[19]), que a sua *teoria das marés* não fazia qualquer referência a efeitos da Lua e se constituía na prova do movimento diário da

---

[17] Dizendo em outras palavras, a explicação dos espectros de emissão por Bohr não foi *ad-hoc*, isto é, a sua teoria não foi criada com o objetivo de explicá-los. A explicação, como relatada anteriormente, aconteceu de maneira não pretendida.

[18] De acordo com a tese favorita de Lakatos "A maioria dos cientistas tende a saber um pouco mais sobre a ciência do que os peixes sobre a hidrodinâmica" (LAKATOS, 1989, p. 84). O físico e filósofo da ciência Mario Bunge refere-se a esta epistemologia como o *Credo do Físico Inocente*, fazendo parte dele, entre outros dogmas os seguintes: "a observação é a fonte e a função do conhecimento físico [...] hipóteses e teorias físicas não passam de experiência condensada, i. e., sínteses indutivas de itens experimentais [...] as teorias físicas podem ser descobertas em conjuntos de dados empíricos. A especulação e invenção dificilmente desempenham qualquer papel na física" (BUNGE, 1973, p. 12).

[19] A *braquistócrona* é a curva que leva um corpo de um ponto a outro no menor intervalo de tempo.

Terra, que a sua teoria sobre o *movimento violento* ou dos projéteis valia-se de idéias análogas a da *força impressa* de Hiparco (170-125 a.C.).

Alguns filósofos da ciência do século XX, por exemplo Gaston Bachelard (1884-1962) e Karl Popper (1902-1994), destacaram o erro como um constituinte intrínseco ao processo de construção do conhecimento científico. É pela retificação dos erros que esse conhecimento evolui. Nessa perspectiva, deve-se notar também que Galileu, antes de chegar à proporcionalidade da velocidade com o tempo em um movimento retilíneo com aceleração constante, pensava existir uma proporcionalidade entre velocidade e distância para esse movimento.

No que se refere aos trabalhos de 1913 de Bohr, a ênfase *empirista* sobre a relação do modelo com as *séries de Balmer* e *Rydberg* desconsidera toda a riqueza de uma construção teórica que, ao postular a não emissão de radiação por um elétron em um estado estacionário, se colocava em contradição com uma teoria bem corroborada experimentalmente, como o eletromagnetismo de Maxwell.

As diferentes reações à teoria de Bohr – de apoio, como a de J. H. Jeans (1877-1946), quando diz que "o Dr. Bohr conseguiu uma explicação engenhosíssima e sugestiva, e penso que devemos acrescentar convincente, das leis das riscas espectrais" (ROSENFELD, 1989, p. 83) e destaca que o seu êxito era, no momento, a única (e de grande peso) justificativa a favor das hipóteses fundamentais utilizadas; de cautela, como a de J. W. S. Rayleigh (1842-1919), que "evitou comprometer-se com uma observação inteligente e espirituosa sobre a inconveniência de pessoas de mais de sessenta anos proferirem juízos sobre idéias modernas"; e de ceticismo, como a de H. A. Lorentz (1853-1928) (Ibidem, p. 83) – constituem-se em indicativos importantes do arrojo e da originalidade do novo modelo para o átomo, e da perplexidade que causou à comunidade científica. Uma história *empirista* não mostra, ou releva, isso. Cala-se também sobre as demais conseqüências do *modelo atômico de Bohr* (lembremos que as idéias de Bohr foram publicadas em três artigos em 1913, sendo que a explicação das *séries espectrais* já era dada na segunda seção do primeiro artigo), ultrapassadas pela *nova mecânica quântica* de Werner Heisenberg (1901-1976) e Erwin Schrödinger (1887-1961) em 1924-25.

Da mesma forma, desfigura-se o trabalho científico de Einstein quando se associa uma *epistemologia empirista* à sua ciência. "É a teoria que decide o que podemos observar", diz clara e convictamente Einstein a Werner Heisenberg, ao conversarem sobre a importância de fundamentar ou não uma teoria física apenas sobre grandezas observáveis (HEISENBERG, 1996, p. 73-85).

A *história* (ou caricatura) *empirista* não apenas empobrece a história da ciência, induz a visões distorcidas da natureza da ciência e do empreendimento científico. Os três exemplos considerados neste trabalho ilustram isso. *"A epistemologia sem contato com a ciência se torna um esquema vazio. A ciência sem epistemologia – até o ponto em que se pode pensar em tal possibilidade – é primitiva e paralisada"* (EINSTEIN, apud HOLTON, 1978, p. 36). Do ponto de vista didático, em particular, a filoso-

fia contemporânea da ciência abre imensas e ainda pouco exploradas vias para uma interpretação mais realista e humana da história do conhecimento científico.

Em termos educacionais, e na perspectiva do delineamento de estratégias que busquem uma mudança epistemológica da *concepção empirista* para uma outra, mais rica e compatível com o fazer científico, é fundamental a contextualização histórica do conhecimento. Assim, por exemplo, uma possível estratégia para o ensino do átomo de Bohr (PEDUZZI; BASSO, 2005) baseada na epistemologia de Lakatos, a *metodologia do programas de pesquisa científica* (LAKATOS, 1989; SILVEIRA, 1996) envolveria:

a) Estudar aspectos da Física do final do século XIX e começo do século XX pertinentes ao tema, de modo a contextualizá-lo historicamente (o eletromagnetismo de Maxwell, as séries espectrais, o quantum de Planck, a explicação de Einstein do efeito fotoelétrico, o átomo de Rutherford).

b) Destacar que, segundo o eletromagnetismo de Maxwell, as órbitas dos elétrons do átomo de Rutherford eram instáveis.

c) Introduzir as hipóteses revolucionárias de Bohr – o *núcleo duro* da sua teoria ou, de acordo com a terminologia de Lakatos, do seu *programa de pesquisa* –, enfatizando que a motivação precípua dessas hipóteses era a de explicar a estabilidade do átomo de Rutherford.

d) Discutir a importância da interação entre teoria e experiência no desenvolvimento dos primeiros modelos do *programa de pesquisa* de Bohr destacando o caráter *progressivo* dessas idéias (previsão de fatos novos, explicação – originalmente não intencionada e, portanto, não *ad-hoc* – dos espectros de emissão, corroboração experimental de algumas previsões).

e) Examinar as limitações da concepção *empirista-indutivista* quando confrontada com a história do *programa de pesquisa* de Bohr.

f) Destacar que com as 'novas' evidências experimentais, por exemplo os efeitos Stark e Zeeman, o *programa de pesquisa* de Bohr começou a dar indícios de *saturação* pois as incursões ao *cinturão protetor*, com o recurso à relatividade e a novas técnicas matemáticas (no caso das órbitas elípticas, usadas por Sommerfeld para explicar o desdobramento das linhas espectrais do hidrogênio em presença de um campo magnético), produziam explicações *ad-hoc* e, quando havia novas previsões, estas não eram corroboradas experimentalmente. Ou seja, o *programa de pesquisa* de Bohr entrou na fase *regressiva*, caracterizada pelo atraso do crescimento teórico em relação ao crescimento empírico.

Agradecimentos

Agradecemos à Profa Maria Cristina Varriale, do IM-UFRGS, e ao Prof. Rolando Axt, do DEFEM/UNIJUÍ, pela leitura crítica deste artigo e pelas sugestões apresentadas.

Bibliografia

BANFI, A. **Galileu**. Lisboa: Edições 70, 1983.

BASSO, A. C.; PEDUZZI, L. O. Q. O átomo de Bohr em livros didáticos de física: interagindo com autores. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, IV, 2003, Bauru. **Atas...**

BERNSTEIN, J. **As idéias de Einstein**. São Paulo: Cultrix, 1973.

BOHR, N. **Sobre a constituição de átomos e moléculas**. Lisboa: Calouste Gulbekian, 1989.

BOHR, N. **Física atômica e conhecimento humano:** ensaios 1932-1957. Rio de Janeiro: Contra-ponto, 1995.

BUNGE, M. **Filosofia da Física**. Lisboa: Edições 70, 1973.

_____ **Intuición y razón**. Madrid: Tecnos, 1986.

BURTT, E. A. **As bases metafísicas da ciência moderna**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1982.

COPÉRNICO, N. **Commentariolus: pequeno comentário de Nicolau Copérnico sobre suas próprias hipóteses acerca dos movimentos celestes**. São Paulo: Nova Stella, 1990.

EINSTEIN, A. **Notas autobiográficas**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982.

_____ **Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento**. In: LORENTZ, H. A., EINSTEIN, A. E MINKOWSKI, H. **O princípio da relatividade**. Lisboa: Calouste Gulbekian, 1983.

GALILEI, G. **Duas novas ciências**. São Paulo: Nova Stella, 1988.

_____ **Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano**. São Paulo: Discurso Editorial, 2001.

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

HOLTON, G. **La imaginación científica.** México: Fondo de Cultura Econômica, 1978.

HONDERICH, T. (ed.) **The Oxford companion to Philosophy**. Oxford: Oxford University Press, 1995.

JAPIASSU, H.; MARCONDES, D. **Dicionário básico de filosofia.** Rio de Janeiro, 1990.

KOYRÉ, A. **Estudios de historia del pensamiento científico**. México: Siglo Veintiuno, 1988.

KUHN, T. S. **A revolução copernicana**. Lisboa: Ed. 70, 1990.

LAKATOS, I. **La metodologia de los programas de investigación científica**. Madrid: Alianza, 1989.

LORENTZ, H. A. Fenômenos eletromagnéticos num sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz. In: LORENTZ, H. A.; EINSTEIN, A.; MINKOWSKI, H. **O princípio da relatividade**. Lisboa: Calouste Gulbekian, 1983.

LOSEE, J. **A historical introduction to the philosophy of science**. Oxford: Oxford University Press, 1993.

MEDEIROS, A.; MONTEIRO, M. A. A invisibilidade dos pressupostos e das limitações da teoria copernicana nos livros didáticos de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. 1: p. 29-52, abr. 2002.

PAIS, A. **"Subtil é o Senhor ..." A ciência e a vida de Albert Einstein**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

PEDUZZI, L. O. Q. As concepções espontâneas, a resolução de problemas e a história e filosofia da ciência em um curso de mecânica. 1998. 850 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PEDUZZI, L. O.Q.; BASSO, A. C. Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4, p. 545-557, 2005.

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

RAZINKOV, O. **Diccionario de filosofia.** Moscou: Editorial Progresso, 1984.

ROSENFELD, L. Introdução. In: BOHR, N. **Sobre a constituição de átomos e moléculas**. Lisboa: Calouste Gulbekian, 1989.

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

SILVEIRA, F. L. Determinando a aceleração gravitacional. **Revista de Ensenãnza de la Física**, Córdoba, v. 10, n. 2, p. 29-35, 1995.

_____ A metodologia dos programas de pesquisa: a epistemologia de Imre Lakatos. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 13, n. 3, p. 219-230, 1996.

THUILLIER, P. **De Arquimedes a Einstein**. Rio de Janeiro: Zahar, 1994.

VILLANI, A. O confronto Einstein-Lorentz e suas interpretações. Parte 1: A revolução einsteiniana. **Revista de Ensino de Física**, v. 3, n. 1, p. 31-45, 1981.

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