



Contribuições da Filosofia da Ciência ao Ensino, aspectos da visão epistemológica de Michel Paty: os momentos conceituais e momentos na prática

Contributions of the philosophy of science to teaching, aspects of epistemological vision according to Michel Paty: conceptual and in-practice moments in modern science

Neusa Teresinha Massoni¹; Marco Antonio Moreira¹

RESUMO

Este texto apresenta uma introdução a uma visão epistemológica contemporânea, a de Michel Paty. Frente à vasta produção de Paty na área da filosofia da ciência, são aqui destacadas apenas aquelas ideias sobre a Mecânica Quântica e sobre o papel da Matemática na construção das teorias científicas. Segundo ele, a Mecânica Quântica é uma teoria legitimada e constitui um núcleo teórico, por seus algoritmos, formulação e linguagem, de todas as teorias da Química, Física, Estrutura da Matéria e até de certos estados da matéria que aparecem na Astrofísica. Mas a Mecânica Quântica não se apresenta como uma teoria da matéria, não explica propriedades dinâmicas dos sistemas, pois se coloca como um quadro teórico, conceitual e formal no interior do qual são desenvolvidos modelos dinâmicos suscetíveis de se constituírem como teoria. A Matemática, por sua vez, na visão de Paty, é cada vez mais concebida como inerente aos conceitos científicos, constitutiva desses conceitos, isto é, serve para construí-los. Na Física, por exemplo, a Matemática impôs sua marca na construção das teorias físicas. Para abordar objetos que escapam à apreensão direta através dos sentidos humanos a Matemática provê à Física um aparato formal que marca o grau de abstração e complexidade envolvidos.

Palavras-chave: Construção de teorias científicas; Filosofia da ciência; Mecânica Quântica; Matemática.

ABSTRACT

This text presents an introduction to a contemporary epistemological view, that of Michel Paty. Faced with Paty's vast production in the philosophy of science area, we only emphasize those ideas related to Quantum Mechanics and the role of Mathematics in the construction of scientific theories. According to this author, Quantum Mechanics is an accredited theory and constitutes a theoretical nucleus—for its algorithms, formulation, and language—of all theories of Chemistry, Physics, Structure of Matter and even some states of the matter in Astrophysics. Quantum Mechanics, however, does not introduce itself as a theory of matter nor explains the dynamic properties of systems since it positions itself as a theoretical, conceptual and formal framework in which dynamic models are developed and susceptible of becoming a theory. Mathematics, according to Paty, is increasingly more inherent to scientific concepts and constitutive of such concepts, that is, it serves to build them. In Physics, for instance, Mathematics has imposed its strength in the construction of physical theories. Mathematics provides Physics with a formal apparatus, which marks its level of abstraction and complexity involved, to enable the approach of objects that escape direct apprehension/grasping through the human senses.

Keywords: Scientific theories construction; Philosophy of science; Quantum Mechanics; Mathematics.

¹ UFRGS - Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS - Brasil.

1. INTRODUÇÃO

O uso da História e Filosofia na Ciência (HFC) na educação científica vem sendo defendido há muito na literatura da área por apresentar potencial na transformação de concepções sobre a natureza da ciência, em geral bastante ingênuas, que professores e estudantes ainda hoje detêm, e que influenciam no ensino e na aprendizagem da Física; por contribuir na construção de visões mais contemporâneas, mais humanizadas e menos autoritárias da ciência; por propiciar momentos de reflexão crítica, preparando os estudantes para uma participação ativa no mundo (Matthews, 1995; Massoni & Moreira, 2014). Ao abrigo dessa abordagem, revisões recentes mostram que o número de trabalhos que defendem o uso da HFC tem crescido nos últimos anos (Teixeira, Greca & Freire, 2012; Silva, Teixeira & Penido, 2018), ainda que persistam inúmeras lacunas. Nessa linha, o presente texto visa oferecer uma síntese introdutória da visão de ciência de Michel Paty, particularmente centrada em sua obra mais expressiva, intitulada *A Matéria Roubada*, como forma de incrementar o debate em curso. O pensamento de Paty não comporta reduções excessivamente simplificadoras e exige esforço para ser entendido, de maneira que aqui se faz um recorte de sua vasta contribuição. Outras obras de cunho epistemológico de Paty como, por exemplo, *D'Alembert* (Paty, 2005), que faz uma análise da obra científica de um expoente do Iluminismo, Jean d'Alembert (1717-1783), enfocando o desenvolvimento desse cientista de novos métodos de cálculo matemático, e de uma concepção racional da física-matemática, que depois evoluiu para a Mecânica de Lagrange, o que permitiu a unificação dos princípios da mecânica dos sólidos e dos fluidos, e como filósofo, por examinar de maneira crítica questões como gênese, validade e aplicação do conhecimento científico, apenas indiretamente serão tratadas aqui na medida em que a discussão aborda a relação cada vez mais estreita da física e a matemática na moderna ciência.

Em estudos longitudinais que realizamos em escolas de diferentes tipos (Massoni, 2010; Massoni & Moreira, 2010; 2011) obtivemos que as visões epistemológicas contemporâneas não chegavam à sala de aula da educação básica, ou ocorria de forma implícita e pouco eficaz; nos últimos anos, esforço tem sido investido na formação de professores de física visando incentivar o uso de elementos de HFC na escola (estivemos norteados por uma questão de pesquisa de fundo, que é, na verdade, bastante ampla: que relação, qual a contribuição de visões epistemológicas na transformação das práticas didáticas de professores de Física?). Percebe-se que para além da formação epistemológica, o agravamento da crise educacional, das tensões sociais e os desafios da educação na modernidade têm levado com lentidão, além do esperado, aspectos de HFC para dentro das salas de aula. Ainda assim, cremos que é importante oferecer aos professores e estudantes novas visões epistemológicas como opção à reflexão. É o que buscamos fazer aqui, ainda que se trate de um recorte da vasta obra de Paty na Filosofia e História da Ciência, pois, como já dito, centramos na discussão de sua obra mais expressiva, traduzida para a língua portuguesa.

Michel Paty é físico e filósofo da ciência francês. Tendo obtido PhD em Física pela Universidade de Orsay, trabalhou muitos anos com física de partículas elementares (1961 a 1983); obteve também PhD em Filosofia pela Universidade de Estrasburgo, com estudos sobre o enciclopedista Jean d'Alambert, sobre este cientista publicou dois livros, um deles traduzido para a língua portuguesa (Paty, 2005); também pesquisou sobre a gênese da Relatividade e escreveu dois livros sobre Albert Einstein, além e inúmeros outros livros sobre Ciência, Filosofia e Filosofia da Ciência, Professor de História e Filosofia da Ciência na Universidade de Paris-Diderot, Paty é diretor emérito de pesquisa do *Centre National de la Recherche Scientifique*, na França, e tem uma longa história de colaboração com o Brasil, tendo sido professor visitante convidado na Universidade de São Paulo, experiência que

foi documentada em livro e em num documentário² (Pietrocola, 2005). Na Universidade de Paris, coordenou uma equipe de pesquisa em Epistemologia e História da Ciência, especialmente voltada às relações entre a filosofia do conhecimento e as ciências naturais, em particular a Física Moderna e Contemporânea: evolução dos conceitos, matematização e interpretação da Física Quântica. Ao lançar luz sobre a inteligibilidade³ e a criação científica, retomou velhas questões (*Do que tratam as ciências? Como experimentam as teorias? Qual é o resultado? Como se movimentam e se modificam?*) abordando-as com um novo ponto de vista. Em suas próprias palavras, *a marca do conhecimento científico convida, na verdade, a recolocar permanentemente as mais antigas questões como se suas respostas devessem ser reinventadas* (Paty, 1995, p. 20). Argumenta que na moderna ciência os momentos conceituais estão imbricados com os momentos práticos, isto é, atividade experimental e abstração lógico-matemática estão indissociavelmente articuladas na prática científica atual. Estas e outras ideias serão introduzidas ao longo deste texto.

Entende Paty que a interpretação científica e a interpretação filosófica (e.g., conceitos como o de átomo) exercem influência uma sobre a outra, estão ligadas ao universo das ideias e dos seres humanos, embora ele reconheça que essa relação (ciência *versus* filosofia) é conflituosa. Argumenta que nem a ciência é um “monstro frio”, nem a filosofia, um “ornamento inútil”. Nessa linha, critica, de um lado, o que ele chama de “*propensão da ciência a se impor numa nudez e numa novidade sem passado realmente insolentes*” (ibid., p. 21) e, de outro, a pretensão da filosofia clássica, que hoje não mais se sustenta, de abordar de uma só vez a partir de alguns princípios o lugar, o domínio de aplicação, os limites de validade das ciências. Há entre ciência e filosofia da ciência uma relação que tece a própria vida da ciência, pois os problemas filosóficos surgem a cada passo, à medida que tentamos compreender e avaliar o conhecimento já adquirido.

Sua tese principal é a de que os grandes conceitos da física (mas não só os da física!), e seu processo de evolução através dos séculos é um trabalho teórico, sugerido pela prática, e resultante da abstração de dados experimentais, impulsionado pela construção lógico-matemática. Paty não ignora que os jovens pesquisadores debruçam-se sobre problemas novos, inimagináveis há algumas décadas, que os saberes constantemente se reorganizam de uma maneira não coincidente com épocas anteriores, mas defende que não é possível compreender a ciência atual sem um recuo, sem recolocá-la numa rede de reflexões indispensável à apropriação de seus saberes pelas inteligências e culturas. É sobre esse embate que este texto introdutório buscará refletir e, na medida do possível, sintetizar a visão epistemológica de Michel Paty.

2. A PRÁTICA DA CIÊNCIA

Para Paty, a ciência não é reduzível às camadas atemporais de um dado momento, mas tampouco pode ser reduzida à descrição de práticas sociais ou de acontecimentos históricos. Compreender a ciência na atualidade, propõe ele, exige que se mantenham fortes dois polos: de um lado, a

² Documentário da homenagem feita pela USP, em 2004, à colaboração de Michel Paty, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=A5FliSiQXhw>.

³ Inteligibilidade tem a ver com *apropriação pela razão, nos pensamentos subjetivos singulares, de tal elemento de conhecimento* (Paty, 2005, p. 371). Para ele, sem inteligibilidade não existe ciência; ciência é uma produção humana; também não existe história da ciência, pois as recepções, as transmissões, os remanejamentos e os novos cursos das ciências são fruto de experiências vividas por estas mesmas subjetividades (humanas), ainda que reunidas em “comunidades”, pois todas participam de uma vida social. Não há, para ele, comunidade nem sociedade sem sujeitos individuais, a não ser que se tratem de robôs.

concepção de uma evolução histórica pluralista, diversificada dos diversos domínios da ciência e, de outro, uma abordagem monista, lógica e estrutural. Mas adverte que é preciso alcançar um equilíbrio entre essas duas tendências.

Sua abordagem filosófica propõe encarar certos problemas importantes da física contemporânea a partir do “interior” da prática científica. A isto ele chama de *reflexividade crítica* da pesquisa, ou seja, propõe um olhar guiado pela lógica (em especial, a matemática) e pela história. Para ele, as crises que periodicamente acompanham o conhecimento científico são um convite e uma insistência à reflexão natural, à retomada de nossas interrogações sobre o que está em jogo no processo e nas proposições do saber.

Para evitar tomar a ciência atual como algo novo, que transcende outros sistemas de pensamento, e que rejeita o passado, lembra Paty, que é preciso avaliar como modificações e deslocamentos acontecem na maneira de colocar e compor os problemas, como é a dinâmica da ciência, suas relações frutíferas com a filosofia e com fatores ligados aos diversos aspectos da atividade científica, a organização social, as representações simbólicas, a linguagem específica, tendo presente que estas [representações e linguagem] são objetos de transmissão, de modificações, de aperfeiçoamentos. Para ele, as representações simbólicas e mentais assim como a integração cultural e social do saber científico dizem respeito àquilo que se pode designar de “apropriação” desses conhecimentos e é o próprio fundamento do conhecimento científico, é determinante na definição de suas condições de possibilidade.

Há duas questões fundamentais que precisam ser elucidadas, adverte Paty, embora considere esta a mais difícil das tarefas. A primeira é a questão do “real”, em função da pertinência da linguagem, da estabilidade das formas, da autonomia dos objetos que torna possível a distinção entre eles e suas estruturas, é o que permite o próprio conhecimento; a segunda diz respeito à origem do pensamento humano e sua propensão ao conhecimento científico.

Lembra ele que não é possível chamar de conhecimento a seja o que for. Ao contrário, propõe que conhecimento é a *tentativa efetuada pelo pensamento de abordar, por uma 'representação', a realidade tal como ela se propõe na percepção* (ibid., p. 26); conhecimento científico refere-se às *representações que se pretendem objetivas – ou tendentes à objetividade – ou seja, cujas características subjetivas são esvaziadas e que colocam seu objeto como exterioridade* (idem). Embora reconheça o caráter restritivo desta definição, adverte que todos os modos de conhecimento ligam-se às culturas nas quais se expressam. A diferença da visão de Paty em relação a outras abordagens filosóficas é que sua proposta visa encarar certos problemas importantes da física a partir do *lugar onde surgem, a partir dos desenvolvimentos precisos que os implicam* (ibid., p. 23), para alcançar um estudo dos processos conceituais, estudo este marcado por vários tipos de determinações ligadas a um universo real, prático e material (p. 26).

Paty explora alguns esquemas de raciocínio e categorias de pensamento da física contemporânea e suas ligações com formações intelectuais pertencentes à pré-história do pensamento conceitual. Destaca, contudo, que não é possível reduzir o conhecimento a um processo conceitual, pois assim fazendo correríamos o risco de eliminar todas as ações sobre a realidade, que são externas ao pensamento – a parte instrumental, por exemplo. Defende que um “momento prático” é tão constitutivo do conhecimento científico como um “momento conceitual e teórico”. Ambos, prática e teoria, estão imbricados. Dar mais ênfase a um ou outro polo não faz sentido porque a relação entre

o real e o pensamento não é direta nem transparente; ao contrário, é complexa e obscura, de forma que o conceitual está impregnado de prática instrumental, intelectual e cultural. Com isto justifica o título de seu livro (*A matéria roubada*) que faz referência ao mito de Prometeu⁴ expressando, com essa alegoria, a noção de que o pensamento se apodera da matéria que busca descrever e reproduzir visando sua representação (Prometeu seria o pensamento e aos deuses, longínquos e impenetráveis aos quais cabe a última palavra, caberia o real, a matéria). O pensamento rouba a matéria para conhecer esse real, sendo que nesse combate o real é vencido (ibid., p. 28). Concorda ele que o real (ou o referente das teorias) preexiste ao pensamento, mas que sem o pensamento ele seria, para nós, destituído de forma; por outro lado, o real assegura o caráter concreto, não ilusório desse *pensamento do real*. Há, então, uma dialética dessa formalização e dessa solidez. Mas tudo ocorre no espaço do pensamento, é através das representações simbólicas⁵ que cientistas homens e mulheres transformam a realidade material, externa, estranha, inquietante em uma realidade interior, domesticada – uma realidade pensada. É isto que a ciência faz, através de um processo que não tem fim, isto porque jamais haverá adequação completa do real à sua representação, seja qual for o nível de esforço e aperfeiçoamento que nele empreendamos.

3. O PRINCÍPIO DA ECONOMIA LÓGICA

Discute Paty sobre a questão da independência dos conceitos, do ponto de vista lógico, da experiência sensível, podendo ser o conceito “escolhido” livremente, desde que esta liberdade seja “de um tipo especial”, pois se restringe a resolver problemas ordenados na experiência real. Usando uma expressão de Einstein (1936) que diz que “(...) o objetivo da ciência é, por um lado, a compreensão tão completa quanto possível da conexão entre as experiências sensíveis, em sua totalidade, e por outro lado, a consecução desse objetivo, empregando o mínimo de conceitos primários e relações” (Einstein, 1936 *apud* Paty, 1995, p. 36), Paty argumenta que a ciência é legal e essa legalidade repousa na ideia de uma constância de ligação de termos, termos estes unidos por uma lei. Neste sentido, a ciência elabora, sob uma economia simbólica, proposições de alcance geral, das quais se pode deduzir um grande número de casos particulares. Isto é o que distingue a ciência de outros tipos de conhecimento, se nosso interesse for o de fazer essa demarcação entre ciência e não ciência.

Por exemplo, o espaço e o tempo, são objetos da física tanto na definição newtoniana quanto na da relatividade Einstein, mas na relatividade não correspondem mais à definição inicial, e nem são mais pensáveis na mecânica quântica como inerentes aos objetos. Isto mostra que os conceitos e princípios, que resumem o objeto de uma ciência e que substituem os fatos, podem ser modificados e reinventados; parecendo resultarem de uma “livre escolha” do pensamento. Correspondem ao mesmo tempo à estrutura profunda do mundo material (os fatos, aos quais o conhecimento científico impõe sua presença), e a pontos axiais de sua representação (ibid. p. 38).

Diante dessas instâncias tão diversas, questiona-se Paty se para explicar a ciência teríamos que perguntar se existiria um método que guiaria o pensamento científico e que assegurasse o alcance específico do raciocínio, seu processo teórico ou prático, suas proposições como leis, modelos, teorias? Sua postura é de que não é sua preocupação descrever programas metodológicos ou fazer

⁴ Prometeu era na mitologia o titã que roubou o fogo do Olimpo, proibido aos humanos por Zeus, entregando-o a eles.

⁵ Representação, para Paty, é o termo que designa o estado do conhecimento ou das concepções teóricas em um dado momento; relaciona o conhecimento a configurações mentais, conceituais que adquirem familiaridade no pensamento.

uma análise da linguagem científica, embora admita que o “código simbólico” no qual se inscreve o conhecimento científico seja, de fato, uma linguagem: *O que nos interessa nos conceitos, não é tanto seu lugar numa estrutura linguística como sua natureza e, veremos, sua natureza abstrata e matematizada* (ibid., p. 40).

Para Paty, os “programas de pesquisa” de Lakatos é a proposta epistemológica que mais leva em conta a complexidade do contexto no qual se inserem a teoria e toda a pesquisa científica. Mas acrescenta que é possível ampliar essa noção reconhecendo “regras de raciocínio e de cálculo unidas de teorias suplementares” – em torno do corpo de proposições, enunciados, hipóteses e modelos auxiliares – que decorrem de escolhas epistemológicas, de um lado, e dependem do domínio social (por exemplo, a ideologia) ou do imaginário, de outro lado. Argumenta que estas são as grandes noções que serviram para caracterizar certos conteúdos do mundo sensível: o espaço, o tempo, os corpúsculos. Se o nosso conhecimento não está ligado a categorias absolutas, então, propõe ele, *as categorias que presidem as nossas representações (...) são “escolhidas livremente”, com certeza, quanto a sua ligação lógica com os fenômenos considerados, mas nos vêm do halo obscuro do nosso imaginário* (pp. 41-42). Para ele, a ligação entre as raízes irracionais e o fundamento lógico do procedimento científico está na natureza de seus efeitos (a apreensão da realidade) e na economia de suas lógicas; há, assim, dois elementos nos quais se assenta o conhecimento científico: o *real* (que assegura que a ciência não se reduz ao imaginário, individual ou coletivo) e a *economia do pensamento lógico*. O *real* tem a ver com o objeto da ciência, a *economia do pensamento lógico* tem a ver com seu método de pensamento; é em torno desses polos que o pensamento científico escolhe suas convenções. Todas as categorias que invocamos, lembra Paty, dependem de um sistema simbólico.

Por exemplo, o nascimento da ciência moderna fez com que questões gerais (perguntas primárias) fossem substituídas por questões limitadas: questões sobre a origem do universo, sobre a natureza da matéria, a essência da vida foram substituídas por interrogações sobre a queda dos corpos, a hidrodinâmica, a circulação do sangue, por exemplo. Essa substituição teve resultados surpreendentes (Jacob, 1977 *apud* Paty, 1995, p. 43): enquanto as questões gerais tinham respostas limitadas, sua substituição por questões mais restritas conduziu a respostas cada vez mais amplas. Paty argumenta que “grandes perguntas” dependem de uma perspectiva filosófica, mas opô-las às perguntas específicas, que afinal também dependem dela [da perspectiva filosófica], considerando as últimas como sendo científicas, seria uma simplificação excessiva. O conhecimento científico se move no conjunto dessa trama.

O problema da demarcação entre o “que é” e “o que não é científico” não está esgotado, para Paty, nem é possível especificar um programa de pesquisa e um programa epistemológico capaz de presidir a escolha ou aceitação de uma dada proposição ou de uma representação teórica. Existem muitos programas, que variam de uma escola para outra, e a diversidade e suas contradições contribuem para a aquisição do conhecimento. Paty especifica o que ele chama de *cadeia de raciocínio*: um programa epistemológico, em física, constitui uma visão sobre a situação e o alcance de uma teoria e inclui as perguntas primárias – estas são sobre a natureza da realidade e sua representação se expressa em termos de realismo, objetividade, determinismo; em seguida vêm as categorias ou estruturas do *pensamento conceitual*; depois os *conceitos* e suas *simbologias*; estes se constituem em uma teoria física pela elaboração do *formalismo e enunciados*; a teoria é confrontada através de suas predições com dados experimentais; da confrontação decorrem *interpretações físicas* que resultam em modificações da cadeia. Tudo isso tem um caráter quase-orgânico, complexo, com

muitos elementos de naturezas diversas de forma que nada pode ser dito *a priori* ou em que etapa do raciocínio a modificação deve ser feita. *A própria lógica, que faz a ligação entre as proposições, pode não ficar ilesa* (ibid., p. 44).

Paty ilustra essa cadeia de raciocínio com a mecânica quântica: segundo a Escola de Copenhague, as propriedades de um sistema físico não podem ser pensadas independentemente de suas condições de observação (isto é, a teoria refere-se a conceitos subordinados à observação - no sentido da física clássica, macroscópica), esta é a primeira parte da cadeia, aquela relativa ao determinismo e à objetividade. Pela lógica, pensa Paty (ibid., p. 133), deveríamos ter protelado o estudo conceitual dos objetos elementares para elucidar primeiro as proposições da teoria quântica; mas estas duas fases não se seguiram cronologicamente. A elaboração da mecânica quântica como instrumento conceitual e teórico, entre 1924 e 1930, permitiu descrever, calcular, *falar* sobre átomos, núcleos e partículas *mediante um formalismo*, e é esta representação constituída por um pensamento teórico que instrui a abordagem experimental. A teoria quântica é considerada como um meio de investigação prática. Para ele, a interpretação epistemológica foi tardia (data de 1932, com Von Neumann, a primeira abordagem de uma teoria da medida) de maneira que à medida que progredia o debate no plano epistemológico, jamais concluído, afirma Paty, a física do átomo, das partículas e de outros campos, como a física da matéria condensada, por exemplo, evoluíram prodigiosamente pela aplicação desses instrumentos teóricos.

Essa decisão esteve vinculada a um programa epistemológico, um programa que declara quais elementos são menos suscetíveis de variação, e essa decisão não é a única decisão possível. O debate epistemológico que foi dominado por Bohr e Einstein não foi inútil, ao contrário, mostrou-se revelador (e continua a ser) do significado e alcance dessa teoria. Trata-se de um exemplo histórico da relação entre a física e a filosofia. Retomando a questão da decisão, ela se funda na ideia da minimização das modificações a serem feitas na cadeia de raciocínio, ou numa *economia do pensamento lógico*. Isto por que ela corresponde a uma *menor despesa lógica*, uma minimização metodológica dos riscos, segundo Paty.

Para ele, os desenvolvimentos da física contemporânea, do átomo às partículas elementares, fornecem excelente matéria para exame, esclarecem muito a respeito das implicações dos diversos elementos da cadeia de raciocínio e sua dinâmica de relações.

4. BREVE HISTÓRICO: O ÁTOMO, DO PENSAMENTO COMO INTUIÇÃO ATOMISTA AO ATOMISMO DEMOSTRA

Entende Paty que um exame histórico auxilia na compreensão dos objetos da física atual e de suas categorias de pensamento. Um campo particularmente decisivo – o atomismo – e o resgate de suas origens históricas, desde a origem da hipótese atômica até a passagem para a realidade dos átomos e depois das partículas elementares, ilustra o avanço das ideias rumo à abstração, à matematização. Neste sentido, seria possível dizer que Paty alinha-se em certa medida com visão de Bachelard, no sentido de que o avanço do pensamento científico dá-se em função de uma maior complexidade racional, um conceito torna-se científico quando rompe (“diz não”) às noções primitivas e adquire novos significados (Bachelard, 1991).

Argumenta Paty que houve no atomismo duas etapas com raízes distintas e com implicações conceituais que não se confundem: a primeira diz respeito à aceitação da realidade dos átomos; a

segunda tem a ver com o caráter corpuscular, descontínuo da energia (da radiação). A hipótese atomista, que inicialmente era uma intuição, consiste na ideia de que os corpos são constituídos por partículas, por grãos espacialmente distintos e que se combinam diversamente. A ideia era a de “explicar o visível complicado com o invisível simples”. A hipótese atomística pré-científica estava associada à ideia de unidade e conservação da matéria e foi enunciada por Leucipo, Demócrito, Epicuro, e possivelmente em culturas anteriores; foi retomada no séc. XVII por Gassendi, Boyle e Newton, e no séc. XIX passou por um desenvolvimento importante na Química até a revelação, no início do séc. XX, da realidade física dos átomos.

Para Paty, *o atomismo greco-latino originou-se da necessidade de conciliar a concepção parmenidiana da permanência e da unidade com a evidência da mudança e da diversidade* (Paty, 1995, p. 74), que por sua vez acompanham a ideia de autonomia da natureza (visão esta, ligada à filosofia materialista – se o átomo existe, então todo o fenômeno é concebido como resultante de acidentes da matéria e da extensão na qual as coisas se realizam (Lênin, 1948).

Associadas à concepção de mundo e à intuição sobre a natureza, as ideias de vácuo e de infinitude do universo acompanharam o atomismo. A noção de universo infinito foi uma marca da liberação do pensamento científico. O vácuo era uma condição de movimento dos corpos (a natureza é composta por corpos e pelo vazio, que é onde os corpos se movem), o que marcou a passagem da ideia de matéria plena para uma estrutura de átomo como essencialmente vazio foi o modelo de Rutherford. Para Paty (1995, p. 76), a passagem conceitual da matéria plena à noção de átomo quase vazio destituía-o de sua pretensão de ser a partícula última.

A modificação que a física moderna imprimiu à nossa concepção de vazio – não como o espaço puro da geometria, mas como lugar de influências e fenômenos físicos, uma representação em termos de campo – opõe-se à ideia de corpúsculo, na visão da Paty.

De qualquer modo, para ele, a hipótese atômica que consiste em explicar o visível complexo pelo “invisível simples” exigiu uma *inteligência intuitiva* que traz em si uma exigência intelectual que se mostrou, ao longo da história, cada vez mais importante: a abstração. Desde as primeiras formulações os átomos são abstrações fora do sensível. O conhecimento da própria estrutura do átomo conferiu uma particularidade ímpar: a da abordagem quântica, que é tão distinta de qualquer imagem familiar ou clássica e escapa a qualquer apreensão direta.

O atomismo, desde sua nascença, é uma história marcada pela abstração, Para Lucrécio os átomos não tinham cor, odor, som, gosto ou calor; eram tipicamente uma concepção que colocava em jogo a inteligência intuitiva (Perrin, 1913, apud Paty, p. 76), eram entes caracterizados pela duração infinita e pela propriedade de *clinamen*⁶. Nos antigos, a abstração não se fundava na ideia de que o universo possui uma estrutura matemática, era apenas um raciocínio lógico, uma visão de mundo, uma metafísica. Os gregos não se preocupavam em ver os átomos, no sentido de testar seus efeitos. Eram as propriedades macroscópicas deduzidas daquelas atribuídas aos corpos microscópicos que

⁶ *Clinamen*: trata-se de um conceito introduzido por Lucrécio no contexto da formulação da concepção dos átomos; desde sua primeira formulação, átomos são uma abstração, pois não podem ser testemunhados pelos sentidos; possuiriam duas características básicas: duração infinita e a *clinamen*, isto é, propriedade de declinação, desvio, afastamento desses entes (os átomos) e também dos choques elementares que dariam origem aos fenômenos, tornando-se invisíveis para nós no tempo e no espaço, sem que isto exigisse uma causa determinada; de forma aleatória; por sua própria natureza.

interessavam. De qualquer modo, essa ideia de elementaridade chegou à física atual, através dos séculos, a partir das raízes atomistas.

A diferença entre o atomismo dos antigos (até Newton) e o da química e da física clássica, de Dalton e Boltzmann, é a que existe entre uma imagem intuitiva e um conceito de vocação objetiva. Os físicos raciocinam (ou raciocinavam), quase sempre, segundo o esquema implícito de uma categorização dos “objetos físicos”, em termos de individualidades definidas no espaço e no tempo (Paty, idem, p. 79). Seja como for, a física atual se estabeleceu sobre essas ideias atomistas - que permaneceram através dos séculos: do elementar, de elementos justapostos uns aos outros – e foi percebendo que essas partículas elementares não são “coisas”, como eram até início do séc. XX.

Os desenvolvimentos que alcançamos mostram como os “átomos” modernos estão distantes das imagens que os antigos faziam; que sua representação não se confunde com o que sugere a intuição sensível fundada nos corpos de nossa escala, os quais obedecem ao determinismo clássico – os modernos átomos obedecem às leis quânticas, *tornaram-se mais precisos e determinados através de teorias matematizadas*, às quais a imagem parece estranha. E parece estranha, no formalismo, porque ainda permanece em algum lugar, em nossos processos de pensamento, um resíduo dessa imagem.

A ligação com a matemática afirmou-se e foi sendo aprofundada, pouco a pouco, na história atomista recente,

A teoria, certamente, eliminou a imagem intuitiva e vaga, substituindo-a por uma rede de relações matemáticas; mas o que permanece da intuição atomista – e, em primeiro lugar, a ideia geral de átomo – mantém-se no estabelecimento dos conceitos físicos e, talvez, na forma de sua matematização (ibid., p. 80).

Os conceitos de massa, energia, carga elétrica e de volume ocupado no espaço, cuja determinação quantitativa pela medida pode designar a existência e a natureza dos átomos de matéria e de radiação (quantificação granular da radiação), são impensáveis fora da rede teórica que os constitui. Isto mostra os caminhos indiretos e complexos empreendidos pelo pensamento científico e indica o quanto nos afastamos das origens da primeira intuição, das imagens de bolas ou tijolos justapostos como “constituintes últimos” da matéria. Evocar essas imagens (de corpúsculo no sentido clássico) é uma ilusão enganosa⁷ e sem nenhum valor cognitivo, adverte Paty, pois mascara a determinação real dos fenômenos.

A demonstração da realidade física dos átomos começou quando o conceito de átomo foi empregado em uma *representação teórica* capaz de reunir fenômenos que ela podia expor quantitativamente, dotada de valor preditivo.

É, pois, essencialmente com a química posterior a Dalton, depois com a teoria cinética dos gases, enfim, com as diversas manifestações elétricas e radiativas da estrutura íntima da matéria que o átomo se torna um conceito físico. (Paty, op. cit., p. 81).

⁷ Bachelard (1951) já advertia sobre os danos do excesso de imagens: “só se pode conhecer o elétron, conhecendo as leis da eletrônica” (ibid., p. 101).

A contribuição de Dalton, em 1803, foi a de empregar o conceito de átomo para explicar as leis de combinação⁸; levou em consideração a “lei da conservação da massa”, de Lavoisier, e a “lei das proporções definidas”, de Proust, segundo a qual as massas dos elementos de um composto químico estão numa relação constante; assim como a lei de Gay-Lussac sobre a relação simples dos volumes de gás que entram numa reação. Tudo isso levou à hipótese de que haveria uma pequena variedade de átomos. A teoria geral dos gases tornou a ideia do átomo familiar e superou a *imagem* de entidade individual, *tornando-o um conceito definido em uma rede de relações teóricas*, e com a função de unificar fenômenos que até então eram pensados separadamente – química, termodinâmica, mecânica. Bernoulli (sec. XIX), Joule, Clausius e outros propuseram explicar relações entre pressão, temperatura e densidade dos gases, supondo que as partículas que os constituem são dotadas de movimento em linha reta e batem nas paredes do recipiente, de onde resulta a pressão; Joule propôs que o calor desprendido pelos corpos resulta de movimentos atômicos internos muito rápidos; Maxwell desenvolveu um tratamento estatístico para grandes conjuntos de moléculas, apoiando-se em fenômenos como atrito interno, condução de calor, difusão de um gás num outro; Boltzmann e Gibbs desenvolveram aparatos matemáticos de tratamento estatístico que permitiam trabalhar com dados experimentais cada vez mais finos. Este traço, ou seja, requerer um aparato matemático estatístico marca um grau de abstração e complexidade para abordar objetos microscópicos que escapam à nossa apreensão direta através dos sentidos.

Mesmo com o êxito dessas teorias a realidade dos átomos ainda não estava assegurada.

Um fenômeno, o movimento browniano, ia permitir a determinação precisa que faltava, fazendo ver os próprios movimentos e a distribuição das partículas. Mas, ao mesmo tempo, fatos de natureza diferente, relativos às propriedades elétricas e de radiação dos corpos, iam pouco a pouco revelar a existência de uma estrutura mais profunda dos objetos materiais. Antes mesmo da determinação da existência dos átomos como entidades suscetíveis de manifestações exteriores, certos fenômenos revelavam a complexidade de sua estrutura: a emissão de radiação eletromagnética, a desintegração radioativa, a presença de elétrons nos átomos, confirmavam também a granularidade da matéria, a ela se acrescentando. (ibid., pp. 84-85).

O conceito de átomo assumiu uma função unificadora dos campos da física envolvidos nas ideias de ligação entre os fenômenos da eletricidade e a concepção atômica, por exemplo, o estudo das descargas elétricas em gases rarefeitos, que levou à descoberta dos raios catódicos. A realidade dos elétrons era bem aceita desde J. J. Thomson, que determinou a relação m/e , e foi ratificada por Millikan, em 1909, que determinou sua carga elétrica. Os elétrons eram unidades que entravam na composição de todos os átomos, fundando-se na teoria eletromagnética de Maxwell; a partir disso Lorenz desenvolveu matematicamente uma hipótese sugerida por Thomson de movimentos vibratórios dos elétrons nos átomos, esta permitia descrever a difusão⁹ e a dispersão da luz. A “descoberta” dessas relações mostrava uma coerência de fenômenos e erguia no pensamento científico à realidade molecular e, de forma subjacente, à realidade do átomo.

A teoria quântica surgiu em 1900, com a proposta, inicialmente modesta, do *atomismo da radiação*, ou seja, a proposta da natureza corpuscular da radiação de Max Planck (os ressoadores do corpo negro teriam valores discretos de energia, proporcionais às suas frequências), que se opunha à teoria

⁸ Se p e q são as proporções respectivas dos átomos de massas m_A e m_B , a relação de pm_A para qm_B é igual à relação das massas da combinação.

⁹ A cor azul do céu é explicada pela difusão (espalhamento) da luz do sol pelas moléculas da atmosfera, sendo mais difundida a luz com comprimento de onda curto (o azul).

eletromagnética de Maxwell, que não previa descontinuidade da energia emitida ou absorvida. Nascia, então, a *teoria dos quanta*, e apenas mais tarde foi reconhecida sua irreduzibilidade à teoria clássica do eletromagnetismo e da termodinâmica (ibid., p. 92).

A segunda etapa que culminou com a origem da mecânica quântica foi possível pela consideração da dualidade onda-córculo. Einstein, em 1905, propôs a dualidade para a luz e para a radiação; Niels Bohr, em 1913, incorporou ao modelo atômico de Rutherford a hipótese de Planck interpretando os estados estacionários do átomo e da passagem de um a outro pela emissão de radiação de frequência determinada (que presidiam, por exemplo, a fórmula de Balmer para o átomo de hidrogênio); Louis de Broglie, em 1923, generalizou para toda a partícula material. Para Paty, as precauções iniciais em anunciar ideias tão novas podem ser facilmente explicadas: *iniciada, por assim dizer, em água parada, na obscuridade, a revolução quântica era de uma natureza tal que não podia ser percebida de uma só vez em todo o seu alcance* (ibid., p. 93).

Esse retorno histórico mostra como a física construiu seu próprio objeto não arbitrariamente, mas guiada por uma ordem de fenômenos, balizada pelas teorias físicas então disponíveis (eletromagnetismo e termodinâmica) e impulsionada pelo tratamento matemático (estatístico) que se mostrou fundamental para o desenvolvimento das novas concepções da teoria quântica.

Pode-se, inclusive, falar em uma terceira etapa. Feynman (1989) em uma série de lições por ele preparadas para não físicos explica que a mecânica quântica tivera um extraordinário sucesso em explicar toda a química e as diversas propriedades das substâncias, mas havia problemas para explicar a interação da luz com a matéria, em particular em experimentos de laboratório que envolviam poucos elétrons. Para isso, em 1929 foi pensada por vários físicos uma nova teoria que foi chamada de "eletrodinâmica quântica"; Dirac, baseado na teoria da relatividade, propôs que o elétron se comportava como um pequeno ímã com momento magnético valendo 1 e que interagiria com a luz; esse valor foi corrigido em 1948 por Julian Schwinger para 1,00116 e posteriormente por Dirac (1,00115965221), o que forneceu uma refinada precisão e concordância com os experimentos.

Afirmava Feynman:

Devo dizer que (...) é uma "história da física vista por um físico", ou seja, uma história que não é nunca inteiramente verdadeira, uma espécie de história-mito convencional que os físicos contam aos seus estudantes, que a recontam a seus estudantes, e que não está necessariamente ligada ao desenvolvimento histórico real (também desconhecido para mim!). (Feynman, 1989, p. 20).

Feynman, assim como nos mostra Paty, chama-nos a atenção para aspectos histórico-metodológicos no sentido de que ao contar a história das etapas do desenvolvimento de uma teoria importante, e de como cada etapa serve de protótipo para as etapas posteriores – como é a da Mecânica Quântica – fazemos sempre uma interpretação da própria história da ciência e, muitas vezes, contamos uma história que não revela os troços das teorias, daí a importância de debatê-la na formação científica, buscando humanizar esse empreendimento humano chamado ciência.

5. FORMALISMO ESTÁVEL

Por seu êxito e pelo caráter racional, entende Paty que a mecânica quântica é uma teoria legitimada e constitui um núcleo teórico, por seus algoritmos, formulação e linguagem, de todas as teorias da

química e da física atômica, da estrutura dos sólidos e da matéria condensada e até de certos estados da matéria que aparecem em astrofísica. Trata-se da abordagem de que dispomos dos fenômenos e sistemas quânticos. A falha surgida na mecânica clássica que reclamou uma nova abordagem teórica - a mecânica quântica - foi a evidência do caráter fundamental do quantum de ação h . O *fato quântico* atual é irreduzível às representações teóricas anteriores (ibid., p. 136), e revela uma ruptura da relação direta ou natural entre o objeto (que escapa mais que qualquer outro aos sentidos) e o pensamento teórico que pode apreendê-lo.

Essa ruptura entre as abordagens da mecânica quântica e as outras revela, propõe Paty, um caráter geral do conhecimento e de todo o pensamento teórico. Ela se coloca como um formalismo, adaptado para tratar problemas do domínio quântico.

Os estados dos sistemas físicos não mais são representados, como na própria mecânica clássica considerada sob suas mais abstratas representações, pelo conjunto das posições e das velocidades ou momentos de seus pontos materiais, mas por vetores num espaço (matemático) de Hilbert¹⁰. Toda combinação linear desses vetores representa ainda um estado: é o princípio da superposição¹¹. As variáveis dinâmicas que exprimem as propriedades dos sistemas são representadas por operadores hermitianos (autoadjuntos) que agem sobre esses vetores. Essa formulação simbólica é ligada, por regras precisas de correspondência, às quantidades acessíveis à observação, isto é, aos resultados das medidas¹².

O algoritmo quântico assim construído resulta de um compromisso de conciliação, que é ao mesmo tempo uma prescrição epistemológica, para combinar uma descrição puramente clássica da função hamiltoniana (H) com uma explicação apropriada das características quânticas de seu comportamento. As equações da mecânica quântica se reduzem às da mecânica clássica no limite em que a constante de Planck (h) pode ser desprezada. A diferença entre a nova mecânica e a antiga residia, na introdução (por Heisenberg) de uma álgebra não-comutativa de operadores, e esta nova ideia forneceu a base real da nova teoria. Mas os operadores são claramente construídos.

Para Paty, esta concepção mostra *o quanto um avanço teórico pode construir um novo pensamento* (p. 138), e não apenas o acréscimo de novos conceitos ou novos formalismos, mas dedica um *novo olhar à representação e às explicações físicas*. Entretanto, assevera ele, toda a abstração da física matemática (formulação de Hamilton, princípios de invariância) habituara-se a tratar os sistemas clássicos sem invocação a imagens (desde Lagrange e da mecânica analítica), onde eram banidos recursos à geometria e às figuras (e isto, na verdade, tem ocorrido desde Galileu e seus trabalhos com a queda dos corpos); os conceitos físicos eram (passaram a ser ou sempre foram) entidades

¹⁰ Os espaços de Hilbert são os das funções de quadrado somável; o produto escalar é definido, e a norma é positiva definida (ibid., p. 137).

¹¹ O princípio da superposição funciona igualmente no eletromagnetismo clássico, mas com coeficientes reais para a adição dos campos elétrico e magnético. No caso dos sistemas quânticos, os coeficientes que intervêm na soma vetorial podem ser complexos.

¹² Essas regras são as seguintes: os valores possíveis do resultado da medida de uma grandeza (observável) representada por um observador A são o conjunto de valores próprios desses operador; a medida da grandeza (observável) A relativa ao estado do sistema representado pelo vetor Ψ fornece o valor próprio de a com uma probabilidade $P\Psi(a) = [(\Psi, \varphi_a)]^2$. (o valor próprio a_a é definido por $A\varphi_a = a_a \varphi_a$. Mostra-se que dois operadores A e B têm o mesmo conjunto de valores próprios apenas no caso em que comutam, isto é, se $[A, B] \equiv AB - BA = 0$. Operadores que comutam correspondem a variáveis incompatíveis.

abstratas e matematizadas, inventadas e não simplesmente traduzidas, manejadas e remanejadas por transformações teóricas.

Para Paty, a irreducibilidade do quantum pode ser (ou foi) percebida como uma ruptura do próprio processo do conhecimento, que escaparia de qualquer abordagem natural, manifestando um hiato entre os fenômenos da natureza e sua abordagem pelo pensamento – tal diferença se exprime por uma irreducibilidade lógica.

Assevera Paty:

Construídos, criticados, reconstruídos, providos de uma formulação abstrata, os conceitos da física clássica possuíam a faculdade de ser, em seguida, rapidamente reinvestidos, com todas as aparências do "natural", em uma física adaptada à experiência familiar [...] podemos ver como dois sinais, simultâneos num trem em movimento, não o são, vistos da estação, ou ainda um raio luminoso, passando pelo Sol, segue um caminho curvo. A física quântica aparece, ao contrário, relativa a um domínio completamente diferente. É impossível observar diretamente, isto é, pelos sentidos ou seus prolongamentos clássicos – um fenômeno atômico como a desintegração de uma partícula. (Ibid., p. 139-140).

Por outro lado, lembra ele, para que se possa conhecer esses fenômenos é necessário estabelecer uma proposição (que é filosófica) *realista* de que "existe um mundo dos fenômenos quânticos", poderíamos falar em realismo ontológico. Do ponto de vista lógico é preciso admitir a existência autônoma desse mundo quântico (dos "objetos" e suas propriedades) como condição mínima para que possamos conceber que esse conhecimento pode ser obtido, poderíamos falar em realismo epistemológico.

A mecânica quântica, que governa o mundo atômico e subatômico, fornece informações desse âmbito apenas em valores estatísticos, não se atém ao comportamento singular de partículas. Este caráter emerge com grande clareza do exemplo do decaimento radioativo, que é um dos processos que ocorrem a nível atômico e que para compreendê-lo a mecânica quântica oferece leis úteis, sendo que para este a mecânica newtoniana não pode mais fazer afirmações (Staguhrn, 2011, p. 151-152). Sabe-se, por exemplo, que para uma determinada quantidade de rádio, após 1600 anos a metade dos átomos sofrerá decaimento e é possível, através de cálculos quânticos, prever, grosso modo, quantos átomos da amostra decairão na hora sucessiva; mas não é possível saber quais átomos decairão primeiro, nem por que um determinado átomo decaia e não o outro. Em outras palavras, nesse nível se podem formular leis estatísticas, aproximativas, que valem para uma grande quantidade de entes. Isto também vale também para a trajetória de um elétron. Para poder calculá-la com precisão seria preciso saber a velocidade e posição desse elétron em algum instante, mas não temos instrumentos de medida com essa precisão, além do que, cada processo é único e irrepitível, mesmo quando medidas são feitas diante das mesmas condições externas. É como se a natureza impusesse um limite ao conhecimento humano. Isto está em contraste com a mecânica clássica, campo onde cada evento requer uma ou mais causas. Mas o mundo ordenado das "coisas macroscópicas", argumenta Staguhrn, funda-se no mundo desordenado do infinitamente pequeno. Uma reflexão atenta do nosso cotidiano pode nos indicar isto. Nem mesmo com os instrumentos de medida mais precisos um físico poderia prever de que modo, em que ordem (qual a primeira e qual a última), quais as trajetórias de queda das folhas de uma árvore no outono. O que se pode fazer são cálculos estatísticos, tão somente. De alguma forma a queda das folhas assemelha-se ao decaimento radioativo, ou seja, no máximo se

poderá dizer que depois de dado tempo metade das folhas caíram. Ao final, não apenas o mundo quântico, mas muitos aspectos da nossa experiência ocorrem sob o manto da incerteza.

Para Paty, embora se deva evitar o reducionismo, não podemos desconsiderar que as leis que dependem do domínio quântico devem conter os princípios de explicação dos fatos físicos macroscópicos mais gerais: a impenetrabilidade dos corpos resulta no princípio de exclusão¹³; o princípio da correspondência¹⁴ permite expressar a continuidade, isto é, a passagem necessária das leis quânticas às leis clássicas. A este ponto, pergunta-se ele, que visão de conhecimento é possível alcançar? Se por um lado os conceitos clássicos são indispensáveis, por outro, *toda a objetividade na quântica é substituída por uma intersubjetividade* como descreve Pauli (1980), que nos chama a atenção de que é preciso abandonar as descrições espaço-temporais e causais clássicas da natureza, baseadas na nossa capacidade de separar de maneira única o observador e o observado, pois um sistema quântico só pode ser apreendido através de sua interação com um sistema macroscópico de observação de maneira que o par observador-observado é o próprio objeto da Física Quântica.

E, dado que os conceitos quânticos não são redutíveis aos conceitos clássicos, aparece, então, um contraste. Essa exclusão dos dois pontos de vista é compensada, na visão de Bohr, em 1928, pelo princípio da complementaridade, que assevera que a natureza da matéria e da radiação é dual; que os aspectos corpuscular e ondulatório não são contraditórios, mas complementares; Bohr vê a necessidade de colocar o observador em uma abordagem racionalista dos fenômenos quânticos. Léon Rosenfeld, em 1971, viu no princípio da complementaridade uma convergência para o materialismo, ou seja, propôs uma explicação "materialista" da necessidade irremediável do recurso às concepções clássicas em toda a elaboração teórica: a química do cérebro, os órgãos dos sentidos, a evolução biológica fazem com que o pensamento e a observação somente possam se manifestar em organismos macroscópicos, de maneira que os conceitos só são desenvolvidos nesse domínio.

Paty (idem, p. 145) discorda da visão de Rosenfeld por considerar que isto implicaria considerar o pensamento abstrato como sendo confinado ao domínio da experiência sensível, o que seria uma limitação. Para ele, a *representação teórica dos fenômenos atômicos e subatômicos, assim como das relações entre a matéria e a radiação, foi construindo um "domínio quântico" em que a teoria* (ainda que seja uma caracterização abstrata) *desenha os "objetos" de forma inédita e que alcançou tanto aplicações práticas, quanto coerência formal, embora inacabada* (ibid., p. 207). Para Staguhn (2011, p. 149), a grandiosidade da mecânica quântica está justamente no fato que a indeterminação que deriva da relação entre o observador e o objeto observado pode ser descrita em termos matemáticos.

Neste ponto, tanto a teoria quântica quanto a teoria da relatividade – pilares fundamentais da física contemporânea – apresentam um abismo epistemológico, dado que nem uma nem a outra teoria engendra naturalmente os objetos de que tratam, estes devem ser incorporados nos raciocínios e nos cálculos como dados primordiais (partícula ou campo), isto é, as teorias apenas indicam a maneira de tratar esses elementos. Em outras palavras, a mecânica quântica não se apresenta como uma teoria da matéria, não explica propriedades dinâmicas dos sistemas, mas se coloca como um *quadro*

¹³ Princípio da exclusão: formulado por Pauli, em 1925, afirma que dois férmions idênticos (ex.: elétrons) não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente (não podem ter o mesmo conjunto de números quânticos).

¹⁴ Princípio da correspondência: formulado por Bohr, afirma que para grandezas quantizadas, deixando a menor quanta de energia possível, $\hbar \rightarrow 0$, o comutador desaparece, o espectro de energia torna-se contínuo e recuperamos a mecânica clássica. Paty explica que utiliza o termo numa acepção intuitiva, para expressar a passagem das leis quânticas para as leis clássicas, o que não significa uma continuidade física (p. 141).

teórico, conceitual e formal no interior do qual devemos desenvolver modelos dinâmicos, suscetíveis de se constituírem como teoria geral (p. 208).

6. PROCEDIMENTOS DE CONSTRUÇÃO TEÓRICA

Quando um novo campo de pesquisa inicia, explica Paty, assistimos primeiro a coleta e armazenamento de dados novos, não só empíricos, pois a própria coleta se dá dentro do quadro teórico de que se dispõe. Este foi o caso das partículas elementares, cujo estudo iniciou por volta de 1950, com algumas unidades que logo saltaram a centenas, passando, assim, de uma fase de exploração para a de explicação. A construção de modelos sobre a dinâmica e suas interações e a definição de novos números quânticos permitiu descrever as partículas elementares em um processo que, no início, era conduzido por físicos experimentais. A teoria quântica em sua primeira formulação, depois, na segunda, não se aplicava às radiações, mas aos átomos e corpúsculos. Só em 1926, Born, Heisenberg e Jordan colocaram-se a questão da quantização do campo eletromagnético no vácuo e, utilizando o modelo do oscilador harmônico, mostraram que a energia de cada modo de oscilação do campo eletromagnético é quantificada. Dirac, depois, considerando o problema da emissão da radiação, exprimiu por operadores de campo, o processo de criação e de destruição de fótons. Jordan e Wigner, depois Heisenberg e Pauli, e Fermi estenderam esse procedimento a outras partículas, ao elétron e ao próton, por exemplo. Em 1934, Furry e Oppenheimer; Pauli e Weisskopf mostraram que as antipartículas são naturalmente descritas pela teoria quântica de campos (Paty, idem, pp. 214-215). Esta, por consequência, passou a se desenvolver por vários caminhos, chegando progressivamente, à “técnica da renormalização”, que anula as quantidades infinitas que aparecem no tratamento da partícula real, “vestida”, ou cercada, por seu campo, compensando-se por quantidades correspondentes – também elas infinitas – atribuídas à partícula “nua”. A técnica é uma ficção, argumenta Paty, dado que nenhuma partícula pode ser pensada na ausência de seu(s) campo(s), mas se mostrou muito eficaz para o estudo das raias espectrais do átomo de hidrogênio. Este e outros sucessos revelaram-se tão importantes que a teoria quântica de campos passou a se apresentar como o quadro privilegiado do tratamento da matéria elementar.

Para Paty, é relevante determo-nos nessas implicações, uma vez que as dimensões insuspeitadas e fascinantes de seu objeto de estudo levam a construções da física contemporânea, cujo caráter não poderia ser relacionado somente às suas condições de produção – intelectuais, sociais, psicológicas. Por “construção”, entende Paty, que podemos expressar muito mais que a preparação de um processo, e que a teoria física se pretende, mais que nunca, *representação em profundidade e explicação de uma realidade* (ibid., p. 217).

Devemos sublinhar, em primeiro lugar, o caráter físico-matemático em formação dessa construção teórica que se efetua num estado epistemologicamente instável, caracterizado por um intermovimento de problemas, de conceitos novos e de resultados experimentais e teóricos, incompletamente traduzidos ou inseridos no quadro teórico em vigor. As dificuldades formais e práticas, tais como o aparecimento de grandezas infinitas nos cálculos e na solução encontrada para remediá-las – a renormalização – são muito reveladoras nesse aspecto; reina ali, por exemplo, uma grande incerteza quanto ao significado físico desse cálculo matemático (...). Na verdade, essas dificuldades não são um simples acidente no percurso teórico, e dependem do problema de fundo que já assimilamos, o dos princípios e dos conceitos de base da teoria quântica de campos. (Paty, pp. 217-218).

Defende ele, contudo, que o processo atual da física pende cada vez mais para a axiomatização, mas uma axiomatização, como ele expressa, ainda incerta de seus princípios, isto é, coloca tijolo sobre tijolo, sondando a cada passo a solidez do terreno onde constrói.

A teoria se constrói entre o “apelo profundo à axiomatização” (referência ideal) e um procedimento empírico-teórico.

Em suma, defende Paty, *imaginar* o objeto físico, dado que a função da teoria é a de oferecer uma explicação, passa necessariamente pela *abstração matemática*. A teoria física tem um caráter abstrato-construído, assim como de seus elementos, conceitos, formalismo, modelos. Por exemplo, a introdução do número imaginário “*i*” na expressão de grandezas físicas manifesta e atesta essa abstração.

7. ESPECIFICIDADE QUÂNTICA

Destaca Paty que os fenômenos quânticos têm especificidades que nos forçam a um reexame de noções oriundas da física clássica, que ultrapassaram àquele contexto pela generalidade de sua função. Ele discorda da posição de Bohr, ao enunciar o princípio da complementaridade, por considerar que os fenômenos quânticos e sua representação são irreduzíveis ao quadro da descrição clássica; fenômenos quânticos exigem uma nova representação que modifica os antigos conceitos outorgando-lhe um conteúdo diferente. São exemplos: as probabilidades, a indistinguibilidade e a inseparabilidade. Estes conceitos, segundo Paty, rompem com as teorias precedentes.

Ao examinar a indistinguibilidade, afirma que na física corpuscular clássica toda a permutação de duas partículas idênticas de um mesmo sistema resulta na transformação do primeiro sistema num segundo, totalmente distinto, e sem relação da evolução física causal com o primeiro. Isto significa que duas partículas podem ser designadas individualmente, distinguidas uma da outra. Isto não ocorre na quântica. A noção de partícula se apaga diante de noção de estado: *se os estados são individualizados e distintos, as partículas não o são* (ibid., p. 164). A mecânica quântica modifica a concepção de individualidade de seus “objetos”; o formalismo das funções de estado explica essa propriedade, que pode ser considerada como uma forma de invariância ou simetria. A *ausência de individualidade resulta da indistinguibilidade*, tal como a ausência de trajetória precisa, e é impossível de traduzir isto em termos da representação intuitiva. Uma tradução dessa natureza exigiria que fosse possível, a todo instante, uma transição entre os dois sistemas transformados pela permutação, isto é, o salto de uma a outra partícula, se tomarmos o caso mais simples de um sistema de duas partículas. No formalismo de Dirac, na transição de estado não podemos “observar” diferenças entre as transições (um sistema *S* é imutável por permutação dos dois elementos *a* e *b*, e caracterizado por formas quadráticas das funções de onda, daí se segue que no intercâmbio das coordenadas, as partículas são ou totalmente simétricas ou totalmente antissimétricas e a solução requer estatísticas distintas: *estatística de Fermi-Dirac* para partículas de spin semi-inteiro – os férmions - e *estatística de Bose-Einstein* para sistemas de partículas de spin inteiro - os bósons). Isto não é apenas uma abordagem operacionalista, pois a indistinguibilidade é uma propriedade das partículas quânticas, não só a uma incapacidade de nosso conhecimento em virtude de limitações da observação.

Para Paty, o refinamento e ajuste progressivos de modelos tão “dessemelhantes” revelou, com o tempo, uma figura como a de colocação de peças de um quebra-cabeças – evoca uma atividade de construção em que o *primado da atividade racional, matematizada se impôs*.

Isto requer uma lógica e uma epistemologia novas, longe, no entanto, de considerar a quântica uma teoria definitiva. *Nenhuma teoria o é* (p. 189).

8. O PAPEL CONSTRUTIVO DA MATEMÁTICA

A relação entre física e matemática requer uma reavaliação constante, assevera Paty, em função das novas especificidades que surgem a cada etapa do conhecimento e da pesquisa científica. Esses ajustamentos perfilam-se na problemática relação entre as exterioridades do que chamamos de "realidade objetiva" e a caracterização conceitual e simbólica que dela se faz em sua abordagem, o pensamento. Para ele, as duas formulações não são superponíveis: *a física não poderia substituir o real, nem a matemática confundir-se com o pensamento desse real* (ibid., p. 233).

Detendo-nos aos modelos matemáticos (que a matemática pode oferecer), a aproximação entre a física e a matemática *surge como uma dramatização* (ibid., p.234). Dramatização, pois abre um abismo entre o "real" (o concreto, o relativo aos fenômenos) e um "abstrato-simbólico" que é construído. Para além da noção de um instrumento, ou um "alfabeto objetivo" que permitiria a leitura do livro do Universo, como era para Galileu, *a matemática é cada vez mais concebida como inerente aos conceitos físicos*. É constitutiva destes. Para Paty, Ampère deu um passo adiante em sua tentativa de escolher o modo mais radical de abordagem conceitual para encurtar a distância entre o discurso matemático e os dados concretos; a física passou, então, a substituir as determinações do "real dado na experiência" *por esses conceitos "abstratos-construídos" que se impunham explicitamente nas teorias da relatividade, na mecânica quântica e nas teorias atuais da matéria elementar* (ibid., p. 235).

A matemática impôs a sua marca na construção das teorias físicas. Sua utilização na física pode ser concebida como um instrumento que constrói, ou que isola estruturas; sua força é ser um pensamento propriamente dito; sua fecundidade resulta da função unificadora própria da matemática, que ilumina não apenas as múltiplas faces de um objeto, mas permite compreender igualmente um conceito matemático por outro, enquanto o simples pensamento intuitivo não poderia suspeitar. Um exemplo disto é o cálculo das probabilidades aplicado à mecânica estatística, que permite compreender a forma matemática da entropia, e desse modo, o significado dessa noção, até então obscura (Brunschvicg, 1822 *apud* Paty, p. 237).

Mas Paty chama a atenção para um aspecto fundamental sobre a ontologia da matemática: por si mesma, a matemática não nos informa nada sobre os fenômenos físicos. A matemática tem suas raízes na atividade humana, no sentido de que os conceitos de número e figura vieram do mundo real, das necessidades da agrimensura, por exemplo; depois de criada, esteve suscetível a um desenvolvimento autônomo; em seguida, pôde ela ser usada para a análise das estruturas desse mundo físico, fechando assim o circuito. Portanto, afirma, é fundamental considerar essa construção matemática da teoria física contemporânea.

Outros exemplos citados por Paty são a formulação teórica sobre partículas elementares (baseada em termos de operadores que se aplicam a vetores de estado que recorrem a entidades matemáticas apropriadas), sendo que as propriedades desses objetos ou conceitos físicos são determinadas, de um lado, pela coerência lógico-matemático do esquema e da formulação (como é o caso da "renormalização" em eletrodinâmica quântica ou na teoria das interações fracas); e de outro, pela

transcrição das observações sob forma de grandezas mensuráveis, expressas em termos de entidades matemáticas em função (seções eficazes, polarizações, etc.).

Nessa trama, o que entendemos por “realidade física” não são apenas as partículas, que imaginaríamos erroneamente ser mais reais por ser mais “tangíveis”, mas os campos, e, de modo geral, toda entidade, “objeto” ou “propriedade” é levada a nosso conhecimento primeiro matematicamente e, depois, graças ao emprego de um procedimento experimental: um dado factual, transcrito por vezes de maneira muito indireta. Além desses exemplos de “produção matemática do real físico”, a partir de modelos, existem outros desenvolvimentos da física em campos diferentes daqueles da mecânica quântica e da relatividade. Basta lembrarmos, por exemplo, da predição do planeta Netuno feita por Leverrier, que fez uso de um esquema análogo.

Outro exemplo emblemático é o caso do neutrino, que é hoje uma partícula tão “concreta” que dela se fazem feixes intensos, num fluxo de mais de um bilhão por segundo, e de energia variável, e que servem de sonda para estudar a estrutura do próton e do nêutron, buscando inventariar um dos quatro campos de força existentes na natureza – o das interações fracas. Essa partícula, tão importante para as concepções atuais sobre a estrutura da matéria que nos revelaram a presença e as propriedades dos quarks; essa radiação também de origem cósmica e que se espera sejam as sondas para explorar o Sol, as explosões estelares, os núcleos densos das galáxias, enfim, a organização do mundo. Essa partícula tão real era ignorada até 1930. Durante mais de vinte anos ela só assumiu a condição de uma simples hipótese matemática. Pauli em 1930, propôs a existência de uma partícula neutra de spin $1/2$, que obedecesse ao princípio de exclusão, de massa muito pequena e muito penetrante para “salvar” os princípios de conservação de energia e momento angular no estudo das desintegrações beta (radiações emitidas pelo núcleo) que mostrava uma perda de energia não compreendida à época. Isto mostra o papel construtivo da matemática na moderna física.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ideias de Michel Paty certamente não são uma solução às questões contemporâneas sobre o que seja a ciência, mas incitam importantes reflexões sobre os limites de validade das teorias, sobre as fronteiras entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica, lançam luz sobre o papel diferencial de cada uma dessas teorias e o tipo de evento e de objeto que buscam explicar.

Como expõe o próprio epistemólogo (Paty, 2011), em geral a Física Quântica dá ao público, aos filósofos e aos próprios físicos, a impressão de ser totalmente construída pelo pensamento, ou por dispositivos experimentais que mostram fatos cada vez mais de forma indireta; parece não ser dada pela natureza ou, pelo menos, aparenta tratar menos diretamente desta, noção que se contrapõe às teorias clássicas da Física. Em quântica fala-se de “preparação de estados”, de “teoria da medição”, de intervenção irreduzível do observador sobre o objeto observado etc.; na física das partículas e dos campos quânticos, insiste-se na construção (matemática) das partículas fundamentais, a partir de teorias de grupos de simetrias, de números quânticos ou do conceito calibre; fala-se em estranhas propriedades de cargas elétricas e bariônicas não-inteiras, seu “confinamento”, sua “liberdade assintótica”, de “sabores” e “cores”, dos *quarks*. Tudo isso parece ser uma elaboração teórica associada a um jogo formal de descrição dos fenômenos da natureza e das propriedades dos objetos. Contudo, é importante compreender que essas construções permitem analisar e caracterizar de maneira circunstanciada os fenômenos do mundo atômico e subatômico. Várias dessas partículas, os

quarks, por exemplo, eram de início elaborações puramente formais, ou “matemáticas” (que implicava a teoria dos grupos de simetria para grandezas quânticas que representavam “propriedades”); mas o resultado de experiências de difusão de partículas penetrantes (léptons, fótons) sobre outras (nêutrons, prótons) colocou em evidência propriedades quânticas que confirmaram os quarks “físicos”. Daí seu grande sucesso. É relevante perceber nessas práticas o quanto permitem constatar a dimensão social dos processos de elaboração na ciência; elas revelam o contexto social no qual foram produzidas, isto é, o meio onde se alimentou socialmente e culturalmente a atividade dos cientistas que as formularam (antes de tudo como atividade de seu pensamento).

Esse é um importante papel da educação científica: auxiliar os estudantes a perceberem que mesmo que as ideias científicas não nasçam diretamente do “meio social” (no sentido mais amplo, da sociedade), os pesquisadores científicos são agentes de pensamentos singulares que vivem nesse meio; que “negociações” e, muitas vezes, persuasões levam à aceitação mais ou menos rápida de um enunciado de conhecimento, que longe de abolir a exigência da inteligibilidade segundo a racionalidade (desses pensamentos singulares), devem levá-la em conta (ibid. p. 169).

Este texto introdutório e certamente incompleto pretendeu mostrar também como no processo histórico de construção da Mecânica Quântica, fenômenos (inexplicáveis pela física clássica) e ideias foram mudando com o desenvolvimento teórico, resultando em uma nova visão de mundo; e como a Matemática deixou de ter um papel instrumental passando a assumir um *status* construtivo das teorias da Mecânica Quântica. Paty adverte que desde que apreendemos a realidade pelo pensamento, isto é, desde que a representamos, tudo ocorre como se alguma coisa em sua totalidade e exterioridade material lhe fosse roubada para ser transplantada num espaço diferente – o do pensamento, isto é, opera-se uma substituição, do pensamento pelo real, do conceito pelo objeto. O pensamento, ao apropriar-se, transpõe o real, mas deve voltar a ele incessantemente.

Como dito, todos estes aspectos assumem um valor instrucional enorme para serem abordados em aulas de Física, em particular. Não esquecendo, como adverte Richard Feynman, que toda história que aprendemos (em nossa formação e nos livros) e recontamos aos nossos estudantes (em nossas aulas) não necessariamente representa o desenvolvimento histórico real, dado que este é complexo, imbricado em contextos sociais, recheado de construções e simplificações; porém simplificações e explicações (das propriedades da matéria, da interação da luz com a matéria e todos os fenômenos quânticos) *verdadeiramente muito belas* (Feynman, 1989, p. 100).

10. REFERÊNCIAS

Bachelard, G. (1965). *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*. 1951. Paris: PUF.

Bachelard, G. (1991). *A filosofia do não*. Lisboa: Editorial Presença. 5ª edição.

Brunschvicg, L. (1922). *L'Expérience humaine et la causalité physique*. Paris: PUF.

Feynman, R. P. (1989). *QED – La stranna teoria della luce e della materia*. Milano: Adelphi Edizioni. Lênin, V. I. (1948). *Matérialisme et empiriocriticisme* (Trad. do russo, 1909). Paris: Éd. Sociales.

- Massoni, N. T. (2010). A Epistemologia contemporânea e suas contribuições em diferentes níveis de Ensino de Física: a questão da mudança epistemológica. Tese de Doutorado, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, UFRGS.
- Massoni, N. T.; Moreira, M. A. (2010). Un enfoque epistemológico de la enseñanza de la física: una contribución para el aprendizaje significativo de la Física, con muchas cuestiones sin respuesta. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, vol. 9, nº 2, p. 283-309. Em: <http://www.saum.uvigo.es/reec>.
- Massoni, N. T.; Moreira, M.A. (2011). La enseñanza de Física en una escuela militar ¿Una herencia behaviorista? *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias- REIEC*, Vol. 6 (2), Em: <http://reiec.sites.exa.unicen.edu.ar/>.
- Massoni, N. T.; Moreira, M. A. (2014). Uma análise cruzada de três estudos de caso com professores de Física: a influência de concepções sobre a natureza da ciência nas práticas didáticas. *Ciência & Educação*, Vol. 20, n. 3, p. 595-616. DOI: 10.1590/1516-73132014000300006.
- Matthews, M. R. (1995). História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, vol. 12, n. 3, pp. 164-214.
- Paty, M. (1995). *A matéria roubada: a apropriação crítica do objeto da Física Contemporânea*. São Paulo: Editora da USP.
- Paty, M. *D'Alembert, a razão físico-matemática no século das luzes*, (2005). São Paulo: Estação Liberdade.
- Paty, M. (2005). Inteligibilidade racional e historicidade. *Estudos Avançados*, vol. 19 (54), 369-390.
- Paty, M. (2011). "Construção do objeto" e objetividade na Física Quântica. In: Freire JR., O.; Pessoa JR. O.; Bromberg, J. L. (orgs.). *Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais* [online]. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011. 456 p. Recuperado de <http://books.scielo.org>.
- Pauli, W. (1980). *General Principles of Quantum Mechanics*. Berlim: Springer-Verlang.
- Perrin, J. *Les Atomes*, (1913). Com uma apresentação e complementos de Francis Perrin, Paris: Gallimard, 1970.
- Pietrocola, M. (2005). (Org.); Freire Jr., O. (Org.). *Filosofia, Ciência e História - Michel Paty e o Brasil, uma homenagem aos 40 anos de colaboração*. São Paulo: Discurso editorial.
- Staguhn, G. (2011). *Breve Storia dell'atomo*. Milano: Salani Editore.
- Silva, E. S.; Teixeira, E. S.; Penido, M. C. M. (2018). Análise de propostas didáticas de física orientadas por abordagens históricas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 35, 766 n. 3, p. 766-804.
- Teixeira, E. S.; Greca, I.; Freire, (2012). O. The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: a research synthesis of didactic interventions. *Science and Education*, v. 21, n. 6, p. 771-796.