

Universidade Estadual de Campinas

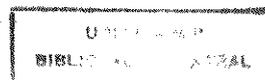
Faculdade de Educação

A SIGNIFICAÇÃO FILOSÓFICA DA FÍSICA MODERNA :

temas controversos, conflito de enfoques

Lídia Maria Ribeiro de Oliveira

96.066.46



UNIDADE	8C
N.º CHAMADA:	FE/UNICAMP
OL4s	
V	
TOMADA	27495
PROG	667/96
C	X
PHECO	R\$ 11,00
DATA	26/04/96
N.º CPU	

CM-00087222-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FE/UNICAMP

Oliveira, Lídia Maria Ribeiro de
OL4s A significação filosófica da física moderna : temas controversos,
conflito de enfoques / Lídia Maria Ribeiro de Oliveira. --
Campinas, SP : [s.n.], 1995.

Orientador : José Claudinei Lombardi
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Educação.

1. Física - Estudo e ensino. 2. Física - Revoluções - Séc. XX.
3. Epistemologia. I. Lombardi, José Claudinei. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Educação. III. Título.

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Educação

A SIGNIFICAÇÃO FILOSÓFICA DA FÍSICA MODERNA :

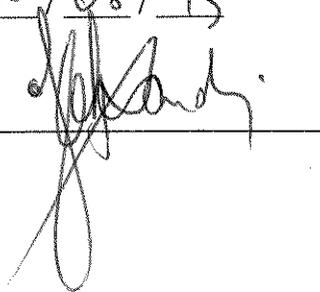
temas controversos, conflito de enfoques

Lídia Maria Ribeiro de Oliveira

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado, defendida por Lídia Maria Ribeiro de Oliveira e aprovada pela Comissão Julgadora

em 31 / 08 / 95

Assinatura - _____

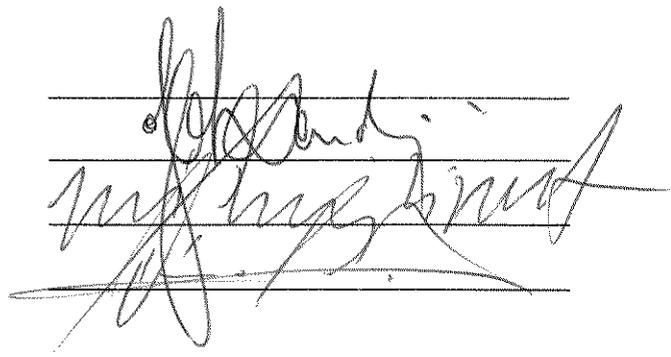


Campinas

1995

Dissertação apresentada como exigência parcial para obtenção do Título de MESTRE EM EDUCAÇÃO, na Área de Filosofia e História da Educação, à Comissão Julgadora da Faculdade de Educação da Universidade Estadual de Campinas, sob a orientação do Professor Doutor José Claudinei Lombardi.

COMISSÃO JULGADORA

A handwritten signature in black ink is written over four horizontal lines. The signature is highly stylized and cursive, with a large initial letter and a long, sweeping tail that extends to the right and then loops back down. The lines are evenly spaced and extend across the width of the signature.

Ao Hermas

Aos meus pais

Aos meus filhos

Agradecimentos

Agradeço, de modo muito especial, ao Hermas por todo o clima de harmonia, compreensão e confiança, bem como pelas valiosas contribuições que se tornaram momentos integrantes deste trabalho;

Ao Prof. Dr. José Claudinei Lombardi - Zezo - pela orientação, pela amizade e principalmente por perceber uma “totalidade maior” da qual este trabalho faz parte;

Ao Prof. Dr. Sérgio Antônio da S. Leite, pelo período em que me mostrou, com sabedoria, desprendimento e integridade acadêmica, o caminho mais adequado;

Ao Prof. Dr. Décio Pacheco, pela coorientação nas questões do ensino da física, bem como pela oportunidade a mim oferecida de acesso às teses e dissertações sobre o ensino de física no Brasil, por ocasião do meu trabalho como sua auxiliar de pesquisa;

À Prof^a Dr^a Beatriz Alvarenga, por todo o incentivo que me levou ao Mestrado da FE da UNICAMP;

Aos professores da Pós-Graduação da FE da UNICAMP e, de modo particular, ao Prof. Dr. José Luiz Sigrist e ao Prof. Dr. Sílvio Ancízar Sanchez Gamboa, pelas relevantes sugestões dadas no meu Exame de Qualificação;

Aos amigos que o tempo todo me ajudaram de diversas maneiras e influíram significativamente no contexto em que o texto foi produzido: Águeda, Ana, Bel, Berenice, Bruno, Cilmara, Ema Luíza, Guara, Jorge, Jorge Megid, José Alberto, Lourdes, Lucinha, Márcia, Marco, Marcos, Marina, Manoel, Nadir, Otto, Sylvia, Stela, Toninho e Walquíria. E aos meus filhos - André e Paola - que, apesar de pequenos, souberam valorizar e estimular do jeito deles o meu investimento acadêmico;

Finalmente - *last but not least* - agradeço aos meus pais - Antônio e Ilka - toda a ajuda e confiança, sem as quais não teria sido possível a realização deste processo.

SUMÁRIO

Introdução	p. 3
Capítulo Primeiro	p. 37
Concepções de Ciência na Física do Século XX	
Capítulo Segundo	p. 58
Temas Controversos	
- Realidade Objetiva	
- Espaço - Tempo	
- Determinismo	
Considerações Finais	p. 85
Referências Bibliográficas	p. 89

RESUMO

O texto inicialmente situa o leitor no que diz respeito à crise da física do século XX, mostrando através dos avanços desta ciência a importância da interpretação do formalismo suscitado por ela e, principalmente, seus fundamentos de ordem filosófica.

O primeiro capítulo identifica as concepções de ciência partilhadas por alguns físicos representativos da revolução da física do século XX, concepções estas que envolvem aspectos ontológicos e gnosiológicos. O segundo capítulo analisa alguns temas das novas teorias, na medida em que parecem ameaçar uma concepção materialista dialética da física, com a qual nos identificamos. Acreditamos ser a concepção materialista dialética a que mais dá conta das novas teorias e da realidade física que elas descrevem e explicam.

Acreditamos também que nosso trabalho possa trazer alguma contribuição, direta ou indireta, para o ensino da física moderna.

INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

Em que consiste a crise da física do século XX ?

A pesquisa deste assunto nos remete de imediato à física chamada clássica, ou tradicional (Galileu, Newton...), que, por sua vez, se contrapõe e, neste sentido, também nos remete, à física dos antigos, à física de Aristóteles.

"Contrapõe-se" dizemos porque, do ponto de vista da física atual, a crise do século XVI é muito mais profunda, mais radical que a do século XX : a história da física, no sentido atual da palavra, *inicia-se* no século XVI. Ou - para não desprezarmos algumas antecipações interessantes da idéia moderna da física entre os medievais, que não se limitam a reproduzir ou mesmo a aperfeiçoar a física dos antigos - digamos que Galileu, no século XV e XVI, representa a maturidade da concepção positiva da física, sendo a obra de Newton (século XVII, século XVIII) a primeira grande sistematização desta ciência, conforme o novo modelo.

Entretanto, é também profunda a diferença entre a física newtoniana e a física do século XX, momentos consagrados, ambos, da história da física no seu todo. A física do século XX (teoria da relatividade, teoria dos *quanta*, mecânica ondulatória) revoluciona os conceitos clássicos de espaço, tempo, matéria, movimento e causalidade. São estes principalmente os temas da nossa pesquisa, orientados no sentido de seu impacto filosófico.

Inicialmente, contudo, diremos uma palavra sobre a física de Aristóteles. É no confronto com a física de Aristóteles que nasce, no século XVI, a física de Galileu.

Para Aristóteles, toda ciência investiga os princípios, as causas e a natureza dos seres que são seu objeto de estudo. Investiga os princípios, os fundamentos, de que os seres dependem para existirem e para serem como são. Ciência é conhecimento pelos princípios, pelas causas. Isto as ciências têm em comum, o método. A diversificação vem justamente da natureza do objeto, do ser, que as ciências investigam, resultando haver princípios e causas diferentes de ciência para ciência.

Há três grandes modalidades de ciências para Aristóteles : as teóricas, que buscam o saber em si mesmo - o objeto delas é a verdade ; as práticas, que buscam o saber para, através dele, ser alcançado outro fim (a perfeição moral, o bem humano) - compreendem a ética e a política ; e as po(i)éticas, que buscam o saber em função do fazer, em função da produção ou fabricação - *poiesis* - de determinados objetos, que surgem da ação do homem sobre a matéria que lhe é externa : arte, artesanato...

As mais elevadas em dignidade e valor são as ciências teóricas. As ciências teóricas investigam os seres ou as coisas que existem e seguem seu curso na Natureza independentemente da vontade ou da ação humanas. O homem os conhece pela "contemplação" (teoricamente). Entram aqui a metafísica, a física e a matemática.

Aristóteles nos deixou mais de uma definição da *metafísica*. Neste momento destacaremos duas.

Primeira definição : ciência do ser enquanto ser ; do ser como tal e de tudo o que essencialmente lhe concerne¹ ; do ser sem nenhuma determinação particular, sem nenhuma referência a determinado tipo de ser. Todas as ciências particulares (a geometria, a física, a psicologia...) se referem ao ser, embora de maneira particular (o ser geométrico, o ser físico, o ser psíquico...) e pressupõem conceitos conexos ao conceito de ser : identidade, diferença, todo, parte, possibilidade, realidade...² Toda ciência se serve destes conceitos, mas nenhuma ciência particular os examina : todas os pressupõem, sem investigação prévia. Daí a necessidade de uma ciência que os tenha por objeto e elucide o seu sentido. Na obra de Aristóteles, esta ciência teórica é a metafísica. A metafísica estuda os primeiros princípios, as causas primeiras de todas as coisas e, assim, é a mais elevada, a mais universal das ciências teóricas, a que fornece os princípios

¹ . Aristóteles, *Metaphysica*, Γ, 1 ; 1003 a 21.

² . Aristóteles, *Metaphysica*, Δ

dos quais dependem os princípios das outras ciências teóricas : a física e a matemática ; ciência é, antes de tudo, ciência do ser ; em função da metafísica todas as outras ciências adquirem seu justo significado.

Segunda definição : estudo das realidades metaempíricas, realidades que estão acima das realidades sensíveis e são causa e razão das realidades sensíveis.

Neste contexto, a física se apresenta como o estudo das causas segundas, que operam na Natureza. Ora, a Natureza é um gênero determinado do ser ; assim, a física, conquanto não seja filosofia primeira (metafísica), é uma espécie de filosofia (filosofia segunda), é uma parte do que hoje chamamos ontologia da natureza e dos objetos naturais, ou ontologia do sensível.

Objeto da física : os seres naturais. Natural : o que é de acordo com a *phýsis*, o que existe por natureza. Isto abrange, portanto, a biologia (que, por sua vez, abrange, para Aristóteles, a botânica, a zoologia e a psicologia).

Ao passo que a metafísica trata daquilo que é absolutamente necessário e imóvel, a física tem por objeto a substância sensível, caracterizada pelo *movimento*.

Diferentemente dos eleatas que, na Antigüidade, negam o movimento (seria a passagem impossível do não ser ao ser, ou do ser ao não ser) e diferentemente também de Platão, que não nega propriamente o movimento, mas nega que seja objeto de ciência (só as idéias seriam dignas de serem objeto de ciência ; os fenômenos, afogados no devir, somente podiam ser objeto de opinião), Aristóteles entende que cabe à ciência analisar o movimento, em vez de negá-lo ou contorná-lo. Entende, aliás, que, em se tratando de Natureza, o fenômeno fundamental é justamente o movimento, a mudança, a *Kinesis*. O mundo é o lugar do movimento e a física aristotélica, do início ao fim, é uma física do movimento.

Ora, a teoria aristotélica do movimento prende-se à sua teoria do ser, que já não é indiferenciado, como para os eleatas, mas "tem múltiplos significados" ³. O ser como ato e potência é um desses significados possíveis do ser. Enquanto atual, o ser é idêntico a si ; na medida, porém, em que encerra em si o potencial, pode vir a ser outro, e está mesmo "disposto" ("disponibilidade") a ser outro. O movimento é

³. Aristóteles, *Metaphysica* Z, 2 ; 1003 a 33.

justamente a passagem gradual do ser em potência para o ser em ato ; a transição gradual, contínua, de um estado de potência, ou potencialidade, para um estado de ato, ou atualidade ; é a "enteléquia", a realização daquilo que existe em potência ⁴.

Ora, na Natureza nada está inteiramente "em ato" (inteiramente acabado, realizado) e nada inteiramente "em potência" (capacidade de realização). Tudo está sempre em movimento, e movimento aqui não é apenas mudança de lugar ("movimento local"- este, enquanto transferência, deslocamento de partículas de um ponto a outro, o único a ser considerado mais tarde pela ciência moderna), mas também mudança segundo a substância ("geração", "corrupção" ; assim, o nascimento e o perecimento das coisas e dos homens), segundo a qualidade ("alteração" ; por exemplo, a semente que se torna árvore, o branco que se amarela) e segundo a quantidade ("diminuição", "aumento" ; por exemplo, o corpo que cresce em volume, o corpo que se divide em outros menores). Movimento, portanto, aqui significa toda e qualquer alteração de uma realidade, seja ela qual for. Este mundo, o mundo do devir, das mudanças, é o único mundo existente para nós e é este mundo que é preciso explicar.

Para explicá-lo, formula-se a teoria das causas ⁵.

Ciência é conhecimento pelas causas ⁶. Perguntar pela causa é perguntar pelo *porquê* de uma coisa. Ora, assim como há quatro tipos de movimento, há quatro tipos de causas no que se refere ao mundo do devir : a causa material, a causa formal, a causa eficiente e a causa final.

As duas primeiras correspondem à forma e à matéria, que constituem todos os seres do mundo sensível, todos os seres existentes no tempo e no espaço ⁷. A *matéria* é aquilo de que a coisa é feita - o bronze de que é feita a estátua ; a madeira de

⁴. Aristóteles, *Metaphysica* θ, 3, 6 ; *Physica*, III, IV.

⁵. Aristóteles, *Metaphysica*, A, 3. 983 b - 993 a 10 ; Δ, 2. 1013 a 24 - 1014 a 25 ; *Physica*, II, 3. 194 b 29 ss.

⁶. Aristóteles, *Anal. Post.*, I, 2, 71 b 10-32 ; I, 27, 87 a 30-31.

⁷. Aristóteles, *Physica*, A, 7.

que é feita a mesa. A matéria é potencialidade, é capacidade de assumir ou receber forma - o bronze é a potência da estátua ; a madeira é a potência de tudo o que se pode fazer com a madeira. Dizer, portanto, que os seres físicos - os seres de que a física se ocupa - são dotados de matéria é dizer que são dotados de potência, ou possibilidade de transformação ; é dizer que têm em si mesmos a causa do movimento. O bronze é causa da estátua de bronze; a madeira é causa da mesa de madeira. Já a *forma* é aquilo que faz com que a coisa seja o que ela é ; a essência necessária da coisa. A forma concretiza, individualiza, determina a potencialidade indeterminada, que é a matéria. A forma determina do início ao fim o processo do devir. Todo devir é orientado pela forma, é um receber formas⁸. Tudo o que existe é enformado.

Em um terceiro sentido, é causa o que dá início ao movimento. O pai é causa do filho ; o autor de uma decisão é causa dela ; o martelo, o escopro, os gestos do marceneiro ou do escultor são causa da estátua. Em função desta causa, chamada eficiente ou motriz, a matéria passa a ter certa forma⁹.

Todavia, para que atue a causa instrumental e faça determinada matéria mudar de forma (ou, mais propriamente, passar de uma forma a outra, desenvolver a forma que possui) são necessárias algumas condições. Uma das condições prévias é justamente a tendência, a aspiração de todo ser no sentido da perfeição da sua essência, no sentido da forma pura, que é imutável, não sujeita à accidentalidade. O ser muda - move-se - , diz Aristóteles, porque, em última instância, aspira a não ter de mudar, aspira à identidade total consigo mesmo, à imobilidade que é própria da forma perfeita.

Em outras palavras, uma das precondições, um dos pré-requisitos para que a causa eficiente atue é justamente a causa final.

Causa final : o próprio fim, para o qual a coisa tende ; o *em vista de* que a coisa se produz. De certo modo, esta idéia diretriz a atrai...¹⁰ Assim, a saúde é a causa por que se passeia (causa final).

Neste sentido amplo do termo, causa é o que é responsável por toda a realidade da coisa : o que a coisa é, como é, porque é e para que é. Assim, dada a mesa

⁸. Aristóteles, *Physica*, A, 9.

⁹. Aristóteles, *Metaphysica*, Δ, 6 ; 1071 a 14.

¹⁰. Aristóteles, *De caelo*, B, 11 ; 291 b 13 ; *Physica*, B, 8 ; 199 b 15.

de madeira, temos que a causa material é a madeira da mesa, a causa formal é a forma da mesa, a causa eficiente é o carpinteiro, o marceneiro, e a causa final é o uso que a mesa terá.

Ora, o movimento local é causa dos outros, uma vez que todos eles supõem o contato. Assim, os seres aumentam ou diminuem conforme se aproximem ou afastem de determinada matéria ; nascem ou morrem conforme os elementos constituintes se reúnam em um só lugar ou se separem ; alteram-se conforme se aproximem ou afastem do lugar onde sua forma se realiza.

Que quer dizer isto : "lugar onde sua forma se realiza"?

A física aristotélica desenvolve uma teoria dos *lugares naturais*.¹¹

Lugar, para Aristóteles, não é forma, nem matéria, nem causa eficiente, nem finalidade. Nem substrato. É o campo, a região imediatamente ocupada pelo corpo. O lugar que contém a coisa "não é nada da coisa mesma que ele contém". Não é o corpo. É "o limite do corpo continente relativamente ao conteúdo" ¹². Também não é o recipiente (a "vasilha"). Os corpos não arrastam consigo os seus lugares. O recipiente é móvel ("transportável"), o lugar não. O lugar é "o primeiro limite imóvel do continente" ¹³ - célebre definição que os medievais fixarão na fórmula "*terminus continentis immobilis primus*".

Esta concepção de lugar - que rigorosamente precisaríamos distinguir da de espaço, na obra de Aristóteles, embora o termo empregado seja quase sempre o mesmo : τόπος ¹⁴ - envolve a negação do vácuo, entendido como os atomistas entendem

¹¹ . Aristóteles, *Physica* Δ, 7 e 8.

¹² . Aristóteles, *Physica* IV 4, 212 a 6.

¹³ . Idem, *ibidem*, 212 a 20.

¹⁴ . Aristóteles não se interessa propriamente pelo *espaço* ; interessa-se pela *posição* no espaço. Considera o espaço do ponto de vista do lugar. Note-se que nem sempre o que Aristóteles diz a respeito do *lugar* se aplica facilmente ao *espaço*. E ele afirma expressamente que nenhum dos filósofos anteriores se ocupa do *seu* problema.

: "lugar onde não há nada". Se lugar é o limite do corpo continente e o contorno do corpo conteúdo, o vácuo é impensável. O mundo é pleno de corpos, cada um dos quais envolvido por outros corpos. Não há espaços intermediários vazios ¹⁵.

Entretanto, há os "lugares naturais"..., que os corpos sensíveis, por sua própria natureza, tendem a buscar. No cosmos aristotélico, cada coisa, cada ser físico tem seu lugar próprio, ou natural. É o lugar em que cada corpo realiza perfeitamente sua forma e sua finalidade. Se algo não estiver em seu lugar natural, tenderá para este lugar em virtude de uma potencialidade que lhe é própria. Uma vez no seu lugar próprio, o corpo entra em repouso. Assim, o lugar natural dos corpos leves é o alto ; o lugar natural dos corpos "graves", pesados, é o centro da Terra. Alto e baixo são determinações naturais.

De acordo com o lugar natural, há três e somente três tipos de movimentos locais :

1. o movimento circular, em torno do centro do mundo ;
2. o movimento retilíneo ascendente, partindo do centro do mundo ;
3. o movimento retilíneo descendente, rumando para o centro do mundo.

(Para Aristóteles, o mundo é circular e seu centro é a Terra).

Os movimentos para o alto e para baixo têm que ver com os quatro elementos que compõem os corpos naturais : a terra, a água, o ar e o fogo. A terra e a água são elementos pesados. O ar e o fogo, elementos leves.

O lugar natural dos corpos em que predomina a terra é o baixo. Tomemos uma pedra. É feita de terra. Seu lugar natural é o centro do mundo. Larguemos a pedra. Não se encontrando em seu lugar natural, ela se põe em movimento,

¹⁵. A idéia de um espaço homogêneo e vazio, em que os corpos se deslocariam, só vai surgir no século XVI.

rumando para este lugar natural, ou seja, para baixo, para o centro do mundo. A tendência do movimento natural é levar a pedra ao seu lugar natural, ao seu lugar próprio. Se a pedra pudesse ir até lá, até o centro do mundo, pararia naquele ponto e permaneceria eternamente em repouso.

Consideremos a água. Seu movimento natural também é para baixo. Sendo, contudo, mais leve do que a terra, o lugar natural da água é acima da terra, ou seja, a superfície : os mares tendem a cobrir a esfera terrestre.

Assim, os corpos *graves*, constituídos de elementos *pesados*, tendem a cair em razão da sua *gravidade*, qualidade intrínseca desta matéria. Quanto maior a quantidade de matéria grave do corpo, maior a gravidade deste corpo e mais rápido é o seu movimento natural : a velocidade da queda do corpo é proporcional ao seu peso.

Quanto ao ar e ao fogo, elementos leves, o movimento natural é para cima. Uma bolha de ar sobe, na água, para a superfície e acima da superfície. O lugar natural do fogo, elemento ainda mais leve que o ar, também é para o alto.

Desse modo, o centro do mundo é a terra, depois vem a água, depois o ar e por último o fogo - ponto mais alto do mundo dos humanos.

Os três tipos de movimentos apontados acima são naturais, movimentos que os seres físicos realizam espontaneamente para atualizarem sua potência e sempre em conformidade com o lugar natural dos corpos (pedra que cai, fogo que sobe). Há também, entretanto, os movimentos que não são naturais, mas violentos (pedra lançada para cima, flecha arremessada pelo arco). Os movimentos violentos - contrários à natureza da coisa - são impostos de fora, ou seja, por agentes externos, por forças.

Cessada a força, cessa o movimento.

Como atua esta força? Sempre pelo contato. Não é possível a ação à distância : tem de haver contato entre o agente motor e aquilo que é movido.

No caso do projétil, uma vez arremessado por nós, uma vez perdido o contato com a nossa mão, que é que o continua movendo? O papel do agente motor é assegurado pelo meio em que o projétil se desloca. Ao arremessar a pedra, a mão comunica o seu poder ao ar (neste caso, o meio) próximo à pedra. Este poder se comunica às partes cada vez mais afastadas do ponto de partida, perdendo, a cada transmissão, um pouco da intensidade. Chega o momento em que o poder motor do meio se esgota : cessa o movimento violento e se inicia a fase do movimento natural, que reconduz a pedra ao seu lugar próprio.

Há menção, portanto, na física de Aristóteles, às forças de *resistência*. São exercidas, nos movimentos naturais, pelo meio (ar ou água) e, nos movimentos violentos, pela própria gravidade do corpo. Voltemos à pedra que cai no ar. Nos instantes sucessivos da queda, a pedra ocupa sucessivamente posições em que se encontrava o ar. O ar estava no seu lugar natural. Repugna ao ar ser desalojado do seu lugar natural. Assim, a gravidade da pedra tem de vencer a resistência do ar.

Tudo isso que estamos expondo não é, na cosmologia aristotélica, de aplicação geral, indiferenciada. O universo descrito pela cosmologia aristotélica é ordenado, mas, como parte dessa ordem, hierarquizado. Há hierarquia de seres e de substâncias.

Assim, a realidade sensível tem dois planos diferentes : o mundo sublunar e o mundo celeste.

O mundo sublunar é o mundo das coisas diretamente ligadas ao homem. Abrange a Terra (que, esférica e imóvel, está no centro do universo) e o espaço que vai da Terra à Lua. É deste mundo que estamos principalmente falando : mundo sensível da matéria e dos seres compostos de matéria e forma ; matéria que é potência dos contrários e sofre todas as formas de mudança ; mundo do acaso, das virtualidades, da imperfeição.

O mundo celeste abrange (nesta ordem) a esfera da Lua, de Mercúrio, de Vênus, do Sol, de Marte, de Júpiter, de Saturno - sete esferas, sete céus - e, finalmente, a esfera das estrelas, dentro da qual o universo está inteiramente contido. O mundo celeste é perfeito.

As esferas que o compõem são feitas de uma substância sutil, diáfana, imponderável, pura - e desconhecida no mundo sublunar : o éter. Diferentemente dos outros quatro elementos, que são imperfeitos, alteráveis, o éter é inalterável, imperecível. Os objetos celestes, condensações locais do éter das esferas, são imortais, pois a matéria de que são feitos não lhes inclui nenhuma contrariedade. Estão submetidos apenas ao movimento, que já não é busca de perfeição, mas tão-somente movimento local, deslocamento (o éter somente possui esta potência : a de passar de um ponto a outro ; portanto, só é suscetível do movimento local). Os astros repetem eternamente o mesmo deslocamento ; não sofrem alterações qualitativas ou quantitativas. Nas esferas celestes não há geração, corrupção, alteração, diminuição, aumento.

Também o movimento dos astros é perfeito, ou seja, é circular e uniforme. Só o movimento circular e uniforme é perfeito. Ele é o movimento *natural* daquilo que é perfeito e eterno. Assim, os movimentos retilíneos, para cima e para baixo, têm começo (nascimento) e fim (corrupção, morte). O movimento circular não tem começo, nem fim. O movimento ascendente tem o movimento descendente como seu contrário, e vice-versa. O movimento circular não tem contrário.

Em tudo isso podemos ver que a ciência de Aristóteles é uma ciência qualitativa : trabalha com a qualidade dos movimentos, com a qualidade dos lugares, com a qualidade dos corpos... e estabelece leis diferentes para os corpos, de acordo com sua matéria e forma, ou de acordo com sua substância. A realidade natural é concebida com um mundo hierarquizado, no qual os seres, dos menos perfeitos aos mais perfeitos, dos inferiores aos superiores, têm seu lugar natural.

Estas distinções e seus critérios serão profundamente questionados pela física do século XVII.

A superação do dualismo Céu e Terra, ou, mais precisamente, da física celeste e física terrestre, processa-se com Galileu (1564 - 1642). Há uma só física, não

duas. Com Galileu, a física unifica o universo : as leis que regulam os corpos celestes regulam também os eventos que ocorrem na Terra.

Isto aparece bem no *Diálogo sobre os dois Maiores Sistemas do Mundo : o Ptolomaico e o Copernicano* (1632) ¹⁶. O *Diálogo* são quatro jornadas. A primeira critica os princípios fundamentais da física aristotélica e os fundamentos teleológicos da teoria ptolomaica. Critica o uso valorativo dos conceitos (por exemplo, o de "perfeição do Universo") e a distinção que Aristóteles estabelece entre mundo celeste e mundo terrestre, mostrando a insuficiência teórica dos conceitos de "corruptibilidade" e "incorruptibilidade". Por fim, apresenta provas experimentais da variabilidade do céu (cometas, estrelas novas, manchas solares) ¹⁷.

A segunda jornada e a terceira fazem a defesa do sistema copernicano, apresentando no começo, por boca de Simplicio (que representa no *Dialogo* um filósofo aristotélico) os argumentos mais comumente aventados contra a teoria copernicana, ou seja, favoráveis à tese da imobilidade da Terra, e estabelecendo, por boca de Salviati e Sagredo, o princípio da relatividade dos movimentos (denominação que, entretanto, não é de Galileu), do qual a relatividade estrita de Einstein fará no século XX a célebre extensão. Com o princípio da relatividade dos movimentos, Galileu neutraliza, com um só golpe, todo um conjunto de experiências do senso comum, invocadas contra a tese copernicana do movimento da Terra. Galileu mostra, sobretudo com o exemplo do navio (primeiramente aduzido pelo próprio Simplicio) que, baseando-se em observações realizadas no interior de um dado sistema físico, não é possível determinar se o referido sistema está parado ou em movimento retilíneo uniforme ("movimento uniforme de

¹⁶. *Dialogo sopra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano*, in *Opere (Le opere di Galileo Galilei)*, Edizione Nazionale, Firenze, 1890-1909 ; reimp. 1929-1939, v. VII.

¹⁷. Já em 1610, no *Mensageiro das Estrelas (Sidereus Nuncius)*, Galileu, de posse do telescópio, divulga a topografia montanhosa da Lua, "de superfície escalavrada, desigual e, do mesmo modo que a Terra, coberta de grandes proeminências, profundos vales e sinuosidades", contra a tese da incorruptibilidade dos céus e contra a distinção "de natureza" entre o mundo celeste e o mundo terrestre, nos termos em que a defende Aristóteles ; aponta a existência de inúmeras estrelas, invisíveis a olho nu, e as enormes distâncias entre elas, contra a tese aristotélica e ptolomaica da esfera última das estrelas fixas ; e anuncia a descoberta dos quatro satélites de Júpiter, o que, por analogia, dá algum apoio observacional à tese copernicana da Terra que gira ao redor do Sol - tomados Júpiter e seus "planetas" como um modelo em escala reduzida do sistema solar copernicano. Especificamente sobre as manchas solares, Galileu já havia publicado em 1613, o *Istoria e Dimostrazione intorno alle Macchie Solari (Opere, v. V)*, combatendo a idéia da incorruptibilidade dos corpos celestes (o Sol também é sede de fenômenos de "geração" e "corrupção"), estabelecendo analogias entre os fenômenos solares e os fenômenos terrestres e aplicando o raciocínio matemático ao problema da localização das manchas.

translação"). Ou seja, o movimento da Terra não é, no fundo, incompatível com a experiência cotidiana. Além disso, o fato de todo movimento ser relativo implica, envolve que o movimento não é atribuível ao corpo em si mesmo. Não é necessário um *motor* que produza o movimento e conserve o movimento. Repouso e movimento são dois estados persistentes dos corpos. A força não produz o movimento, produz a aceleração. Se, para Aristóteles, o corpo, no seu lugar próprio, está "realizado" e permanece em repouso, não há por que explicar o repouso : a própria natureza do corpo o explica. Para Galileu, mesmo o estado de repouso do corpo necessita de explicação científica. Na ausência de resistências externas, é necessária uma força para deter o corpo em movimento. Com efeito, a estática e a dinâmica serão as "duas novas ciências" de Galileu (páginas seguintes).

A quarta jornada desenvolve a teoria das marés, como prova da mobilidade da Terra ¹⁸.

A outra grande obra de Galileu, de fato a última que escreveu antes de ficar cego, e a mais importante, segundo os intérpretes e segundo o próprio Galileu, chama-se *Discursos e Demonstrações Matemáticas sobre Duas Novas Ciências* ¹⁹ e é de 1638. Redigida também em forma de diálogo, encontramos nela os mesmos protagonistas da obra anterior (embora seus papéis estejam menos nitidamente demarcados do que lá). De novo, são quatro jornadas.

A primeira, dividida em duas partes, constitui uma introdução às "novas ciências", de que as três jornadas seguintes vão tratar. Discute os fundamentos filosóficos, as hipóteses mais gerais da aplicação do método matemático - ver o título da obra - aos problemas físicos. Temas específicos : resistência dos materiais, coesão dos sólidos, estrutura da matéria. Quais as diferenças entre a subdivisão matemática e a subdivisão física? O texto questiona a tese aristotélica de que seria impossível o movimento no vácuo e critica a idéia segundo a qual haveria proporcionalidade entre o peso dos graves e a velocidade da sua queda. Estas análises tencionam mostrar que uma ciência geometrizada do movimento está em conformidade com a natureza das coisas.

¹⁸. O problema das marés, todavia, só será resolvido cientificamente mais tarde, por Newton, com a teoria da gravitação.

¹⁹. *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze. Opere*, v. VIII.

Documentos epistolares indicam que as duas ciências, de que tratam os *Discorsi*, vinham sendo compostas e, mesmo, em grande medida, já haviam tomado corpo, desde 1602 (*Opere*, v. IV, p. 9 e 10).

Também são objeto de exame na primeira jornada as oscilações do pêndulo e suas leis : isocronismo, proporcionalidade entre o período de oscilação e a raiz quadrada do comprimento do pêndulo.

Na segunda jornada se esclarece qual é a primeira das duas novas ciência, a que o título geral se refere : é a estática, a mecânica do equilíbrio. Mais especificamente, tem-se o estudo geométrico da resistência dos sólidos. A jornada permite ver como, a partir do princípio arquimediano da alavanca, opera Galileu a matematização de um problema físico, segundo os padrões de um raciocínio geométrico; ou seja, permite ver a *virtú*, a eficácia, da geometria no estudo da natureza física.

A segunda nova ciência é a dinâmica, a ciência do movimento físico - assunto este, aliás, com o qual Galileu se ocupa desde a juventude (*De Motu*, 1590) e que, na sua obra, está indissolivelmente conjugado à justificação do sistema copernicano. Do movimento físico tratam a terceira jornada e a última. Na terceira, Galileu expõe e demonstra as leis do movimento uniforme e as leis do movimento uniformemente acelerado ou retardado ; analisa a aplicação destas leis ao fenômeno de queda dos corpos ; testa, por fim, empiricamente sua hipótese (de que o movimento da queda de um corpo é descrito pelas leis geométricas do movimento uniformemente acelerado), extraíndo dela conseqüências para o movimento de um corpo num plano inclinado e para o movimento do pêndulo. Ainda na terceira jornada merece atenção o aparecimento, embora em estado confuso, dos conceitos de "infinito", "infinitesimal" e "limite".

Finalmente, na quarta jornada, aplicam-se as leis do movimento à determinação da trajetória parabólica dos projéteis.

Estes textos, conquanto sumariamente apresentados, já nos permitem levantar alguns elementos de interesse filosófico na obra científica do grande Galileu.

1. Apontemos inicialmente a importância que tem na física de Galileu a opção pela linguagem matemática.

Inevitavelmente nos ocorre aqui aquela conhecida, repetida afirmação do *Ensaíador*, 1623 ²⁰, no contexto do novo projeto de ciência da natureza, que Galileu propõe:

"A filosofia está escrita neste grandíssimo livro que aí está aberto continuamente diante dos olhos (estou falando do universo), mas não se pode entendê-lo, se primeiro não se aprende a entender a língua e conhecer os caracteres em que está escrito. Ele está escrito em língua matemática e os caracteres são triângulos, círculos e outras figuras geométricas, meios sem os quais é humanamente impossível entender uma palavra ; sem os quais vagamos de maneira vã por um obscuro labirinto".

A física é em grande parte uma leitura matemática dos fenômenos. Não é simples compilação de dados sensíveis, mas certa ordenação dos mesmos pela razão matemática - nisto se fundam as relações legais dos fenômenos, relações funcionais entre grandezas mensuráveis. A ordenação do Cosmos tem um cunho matemático.

Curiosamente, esta ênfase na matemática, na geometria, lembra mais a filosofia de Platão que a de Aristóteles. Embora não possamos dizer que exista um física na obra de Platão (haveria no máximo algumas concepções relativas à estrutura da natureza e certos modos de ser dos objetos naturais), sabemos que é importante na obra "científica" de Platão o emprego de conceitos matemáticos, geométricos (recorde-se a divisa no frontispício da Academia). Assim, por exemplo, Platão considera os corpos elementais como correspondentes aos poliedros regulares ²¹.

Perto dos nossos dias, houve quem se esforçasse por expressar matematicamente algumas das teses aristotélicas sobre o mundo físico. Assim, a fórmula

²⁰ . *Il Saggiatore*, in *Opere* VI, § 6, 232. A frase se encontra quase nos mesmos termos em dois outros textos, menos conhecidos, de Galileu: a terceira carta sobre as manchas solares (*Opere*, V, 187, 8) e a carta a Fortunio Liceti (*Opere*, XVIII, 295).

²¹ . Mais freqüentemente encontramos quem defenda as bases *neoplatônicas* e *neopitagóricas* da "revolução astronômica": a mística do Sol, a harmonia das esferas, o grande tema do Deus que geometriza e imprime no mundo, que ele cria, uma ordem matemática... Entre os que defendem o platonismo de Galileu estão Koyré e Cassirer.

$F=mv$, em contraste com a fórmula newtoniana $F=ma$ (nas quais F =força, m =massa, v =velocidade e a =aceleração), poderia expressar a lei básica da mecânica aristotélica, que não admite a constância do movimento : tudo o que se move se move porque e enquanto o move algum "movedor". A velocidade da queda é proporcional ao peso P (força motriz do corpo) e inversamente proporcional à resistência (densidade d do meio): $v= P/d$. No caso do projétil, movimento violento, a resistência passa a ser o próprio peso do corpo : $v=F/P$.

São, entretanto, vãos estes intentos. *Primeiro*, porque tais fórmulas exigiriam muitas condições acessórias para serem aplicáveis. Assim, a força motriz teria sempre de ser maior que a resistência para haver movimento e, nos movimentos não naturais, teria sempre de ultrapassar certo limiar mínimo. *Segundo*, principalmente, porque este projeto não seria acolhido pela filosofia aristotélica. Para Aristóteles, os seres físicos diferem radicalmente dos seres matemáticos. São gêneros diferentes. Embora os seres matemáticos existam como que "impressos" na matéria, têm apenas forma e podem ser entendidos sem relação com a materialidade em movimento. Para Aristóteles, só uma explicação *física* nos propicia entender o mundo *físico*. A reconstrução dos fenômenos observados numa linguagem matemática seria rejeitada enquanto explicação do mundo físico. Partindo da matemática, o físico jamais encontrará a realidade e o movimento permanecerá inexplicado ²². "O autor [Galileu] sustenta ter discutido uma hipótese matemática, mas confere-lhe uma realidade física, coisa que os matemáticos nunca fazem" - diz a peça de acusação dos inquisidores, em 1633, ano em que Galileu é obrigado a abjurar.

2. Outro ponto a ser ressaltado é a importância da observação e da experimentação, realizadas de modo metódico, e suscetíveis de se encaixarem em teorias expressáveis matematicamente. Embora a física aristotélica não desdenhe a observação,

²². É verdade que Aristóteles conhece a astronomia, a óptica e a acústica, disciplinas que aplicam os princípios matemáticos ao estudo da realidade física. Contudo, o papel da matemática, no caso, é secundário. Assim, o modelo de Eudoxo descreve satisfatoriamente os fenômenos observados, mas a construção do modelo só é possível *depois* de se saber que a Terra ocupa o centro do universo, que os corpos celestes têm movimentos circulares uniformes... Os comentadores de Aristóteles desenvolveram largos esforços no sentido de resolver esta dificuldade. Exemplo : Tomás de Aquino, que estuda o que ele chama "ciências intermediárias" (*scientiae mediae*), nem puramente físicas, nem puramente matemáticas.



o conhecimento na física aristotélica se dá principalmente pela análise conceptual, que determina o horizonte inteligível das coisas.

A ciência que se afirma no século XVI procede tanto com base nas "demonstrações necessárias", quanto com base nas "experiências sensatas", ou seja, é feita de teorias sistematicamente controladas pela experiência. Esta experiência vai além da observação comum e envolve operações manuais e instrumentos (à época, o telescópio, o pêndulo, o termômetro a ar... ; logo depois, o barômetro, o microscópio, o termômetro a álcool...) ²³. No método, razão e experiência se implicam reciprocamente e se corrigem, sendo a linguagem matemática a linguagem que a interrogação metódica da natureza exige. Como exemplos, embora rudimentares, de aplicação deste método, em Galileu, citaríamos o *Discurso sobre os corpos flutuantes* ²⁴ (por que os corpos mais densos flutuam na superfície de um líquido menos denso?) e a descrição da experiência destinada a verificar a lei dos quadrados dos tempos, com o auxílio de planos inclinados (*Discursos*, terceira jornada ²⁵).

3. Isto nos remete ao que alguns autores chamam o sentido realista das teorias de Galileu, ou o *realismo* da ciência galileana. A ciência de Galileu, através do seu método, pretende dar uma descrição, uma representação verdadeira da realidade. Galileu não pensa como um "puro matemático", mas como *físico*. São inúmeras as afirmações expressas de Galileu sobre este ponto e o conflito de Galileu com as instituições religiosas passa por aí.

À concepção realista se opõe, no caso, a concepção instrumentalista da ciência que, entre outros, o teólogo protestante Osiander sustentara em relação ao *De revolutionibus* de Copérnico (1543) e o teólogo católico Bellarmino, entre outros, sustenta agora em relação à defesa galileana do copernicanismo.

²³. Os instrumentos servem para potencializar os sentidos humanos, eventualmente também para nos libertar do engano dos sentidos e ainda para correlacionar grandezas que a ciência antiga entende serem não homogêneas, não confrontáveis. A idéia do instrumento como elemento *perturbador* do objeto da pesquisa vai aparecer mais tarde na polêmica de Newton com Hooke sobre os experimentos com o prisma no estudo das cores - seria a luz branca resultado do movimento das partículas que compõem o prisma? - e, muito mais profundamente, na física do século XX - partes seguintes deste trabalho.

²⁴. *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua*. In *Opere*, v. IV.

²⁵. *Discorsi...*, in *Opere*, v. VIII, 129.

Assim Osiander, a quem coubera a impressão do manuscrito de Copérnico, prefacia-o anonimamente, sem o consentimento do autor (*Ao leitor, sobre a hipótese dessa obra*) e, diz :

"É função do astrônomo /.../ elaborar, através de observação diligente e hábil, a história dos movimentos celestes e, portanto, buscar suas causas, ou então, já que não é possível de modo algum captar as causas verdadeiras, imaginar e inventar hipóteses quaisquer, com base nas quais estes movimentos, tanto em relação ao futuro como em relação ao passado, possam ser calculados com exatidão, em conformidade com os princípios da geometria. E o autor desta obra cumpriu egregiamente estas duas funções. Com efeito, não é necessário que estas hipóteses sejam verdadeiras, nem mesmo verossímeis ; basta que ofereçam cálculos em conformidade com a observação" ²⁶.

Bellarmino, por sua vez, a Foscarini, que lhe faz uma consulta, diz :

"Parece-me que V.S^a e o senhor Galileu seriam prudentes em se contentarem com falar *ex suppositione* e não em absoluto, como sempre acreditei que Copérnico tenha feito. Dizer que a suposição de que a Terra se move e o Sol está firme salva as aparências melhor que os excêntricos e epiciclos está muito bem dito, não havendo perigo nenhum - e isto basta para o matemático. Mas afirmar que realmente o Sol está no centro do mundo e somente gira ao redor de si mesmo, sem correr do Oriente para o Ocidente, e que a Terra está no

²⁶ . Copérnico, N. *Des révolutions des orbes célestes*. Tradução de A. Koyré. Ed. Blanchard, Paris, 1970.

terceiro céu e gira com suma velocidade em torno do Sol é coisa perigosa, capaz de não apenas irritar a todos os filósofos e teólogos escolásticos, mas também de incomodar a Santa Sé por tornar falsas as Escrituras Sagradas".

A Bellarmino, através de Dini di Florença, Galileu responde, a 23/03/1615, que Copérnico falou da constituição mesma do universo e descreveu o que realmente existe *in rerum natura*. A Osiander havia respondido Bruno, em sua *Ceia das Cinzas* : Copérnico não é apenas um "matemático que supõe" ; é também um "físico que demonstra o movimento da Terra".

A questão da natureza instrumental das teorias científicas reaparecerá muitas vezes, em outros contextos, na filosofia da ciência. As novas teorias físicas do século XX trarão desafios interessantes neste sentido.

4. Ora, a idéia de verdade, na ciência galileana, está essencialmente atrelada à de objetividade. A ciência volta-se para as qualidades objetivas dos corpos, que são as mesmas para todos os homens, e não para as qualidades subjetivas, que variam de homem para homem.

A relação entre os dois temas é a seguinte : só os acidentes, os sintomas²⁷, em distinção da substância, da essência, são acessíveis ao conhecimento científico ²⁸. Entre os acidentes há os que Galileu chama de primários. São de ordem quantitativa (figura, grandeza, posição no espaço, posição no tempo, movimento ou repouso, contato ou não, número ²⁹). Os *acidentes primários* (que podem ser tratados geometricamente) *nos revelam o real* (que está estruturado geometricamente) ; ao passo que as qualidades sensíveis, as "afecções", que não residem nas coisas (é possível representar as coisas sem a presença destas qualidades), são destituídas de valor

²⁷. Terminologia dos *Discursos* (*Opere*, v. VIII, 197, 268...).

²⁸. *Cartas sobre as manchas solares*, terceira carta (*Opere*, v. V, 187, 188). *Diálogo*, segunda jornada (*Opere*, v. VII).

²⁹. *O ensaiador* (*Opere*, v. VI, § 48). São os *sensíveis comuns* da tradição aristotélica : *Sobre a alma*, , 6, 418 a 16 ; , 1, 425 a 15-17 ; *Sobre o sentido e o sensível*, 1, 437 a 4-16. A lista de Galileu acrescenta à de Aristóteles a posição espaço-temporal, a velocidade do movimento e o contato ou não do corpo com outro corpo. Mas Aristóteles afirma a possibilidade do engano dos sentidos justamente quando se trata dos sensíveis comuns e nega-a quando se trata dos sensíveis próprios (cor, som, gosto, cheiro, quente, frio, duro, mole) - qualidades subjetivas para Galileu.

ontológico, "não possuem verdadeiramente outra existência a não ser em nós ; são apenas nomes se fora de nós" ³⁰ .

Assim, nem a essência das coisas, nem as qualidades subjetivas, constituem o objeto da ciência. Só as "sensações", as qualidades quantificáveis, mensuráveis dos corpos, as qualidades mecânicas. A construção de modelos mecânicos pertence intrinsecamente à explicação científica dos fenômenos físicos.

Natureza : objetividade passível de dominação pelo conhecimento das suas leis.

Única realidade verdadeira : o que se mede.

Certo essencialismo faz parte, entretanto, da concepção galileana de ciência.

O homem não conhece todas as coisas, não conhece tudo completamente. Mas, se há verdade e objetividade no seu entendimento das coisas, entendimento fundado na natureza matemática das coisas, este entendimento é definitivo e não passível de revisão. Nisso o entendimento do homem se iguala ao de Deus.

"Convém recorrer a uma distinção filosófica, dizendo que o entender pode dar-se de dois modos, o intensivo e o extensivo : do ponto de vista extensivo, isto é, quanto à multidão dos inteligíveis, que são infinitos, o entender humano é como nada, por mais que entendesse mil proposições, porque mil em relação à infinidade é como zero ; mas, do ponto de vista intensivo, enquanto tal termo importa intensivamente, isto é, perfeitamente, alguma

³⁰ . *O ensaiador*, idem, ibidem. A distinção qualidades primárias - qualidades secundárias se tornará comum nas controvérsias filosóficas do racionalismo e do empirismo. Por exemplo, Locke, *Ensaio sobre o entendimento humano*, II, 8, nº 9 e 10 ; Descartes, *Princípios de Filosofia*, primeira parte, nº 69.

proposição, digo que o intelecto humano entende algumas tão *perfeitamente* que tem delas uma certeza tão *absoluta* quanto a tenha a própria natureza. E tais são as ciências matemáticas puras, isto é, a geometria e a aritmética, das quais o intelecto divino sabe infinitas proposições a mais, porque as sabe todas, mas, naquelas poucas entendidas pelo intelecto humano, creio que a sua cognição iguale a divina em *certeza objetiva*, já que consegue entender a sua necessidade, sobre a qual não pode haver segurança maior" ³¹.

No mesmo ano em que morre Galileu (1642) nasce na Inglaterra, Isaac Newton, o cientista que, com o seu sistema do mundo, unificará a obra de Kepler e Galileu, e estabelecerá, pelo método e pela doutrina, o que a partir daí ficará associado diretamente ao seu nome e até lhe tomará o nome : a física clássica, a física newtoniana, a física do século XVII, XVIII e XIX.

A física newtoniana está enfocada nos capítulos 1 e 2 do nosso texto, quando a estaremos contrastando com a física do século XX. Limitamo-nos nessa introdução a expor as contribuições mais importantes de Newton no campo da física. Em seguida faremos também uma breve exposição de algumas questões da física moderna - física do século XX -, que serão objeto da nossa pesquisa.

As contribuições mais importantes de Newton para a física estão na sua obra *Philosophiae naturalis : principia mathematica*, conhecida como *Principia* e publicada em 1687 ³².

"Este livro pode ser considerado o ponto culminante de milhares de anos de esforços para compreender a dinâmica do universo, os princípios de força e

³¹ . *O ensaiador*, idem, ibidem. Os grifos são nossos

³² . Há tradução para o português : *Principia - Princípios matemáticos de filosofia natural* . Trad. de Ricci, Trieste *et al.* São Paulo, Nova Stella/EDUSP, 1990.

movimento e a física dos corpos em movimento em meios diversos" (Cohen) ³³.

Nos *Princípios*, Newton faz a primeira grande síntese da física do seu tempo - sintetiza em um todo único a mecânica de Galileu e a astronomia de Kepler, e enuncia os princípios e a metodologia da pesquisa científica da natureza.

O ponto central dos *Princípios* são as três leis fundamentais da mecânica ("Axiomas ou Leis do Movimento") ³⁴. A primeira diz: "Na ausência de forças, um corpo em repouso continua em repouso e um corpo em movimento move-se em linha reta, com velocidade constante". É a lei da inércia, em que Galileu havia trabalhado e Descartes formulara com exatidão. A segunda diz: "A aceleração que um corpo adquire é diretamente proporcional à resultante das forças que atuam nele e tem a mesma direção e o mesmo sentido desta resultante". A terceira: "Quando um corpo A exerce uma força sobre um corpo B, o corpo B reage sobre A com uma força de mesmo módulo, mesma direção e de sentido contrário" (Lei da ação e reação).

Ora, os estados de repouso e de movimento retilíneo uniforme somente podem ser determinados com relação a outros corpos, por sua vez em repouso ou em movimento. Iriam *in infinitum* estes sistemas de referência? Aqui intervêm os conceitos de espaço e tempo absolutos, dos quais Newton fala no Escólio à Definição VIII dos *Princípios*:

"O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e da sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração; o tempo relativo, aparente e comum é alguma medida de duração perceptível e externa (seja ela exata ou não uniforme) que é obtida através do movimento e que é normalmente usada no lugar do tempo verdadeiro, tal como uma hora, um dia, um mês, um ano".

³³. Cohen, I. B., apud Reale, Giovanni & Antiseri, Dario. *História da filosofia*. São Paulo, Paulinas, 1990 - volume II, p. 291.

³⁴. Estamos adotando para as três leis de Newton a redação de Alvarenga, B. & Máximo, A. *Curso de Física*. São Paulo, Harbra, 1986 - primeiro.

"O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel. Espaço relativo é alguma dimensão ou medida móvel dos espaços absolutos, a qual nossos sentidos determinam por sua posição com relação ao corpos, e é comumente tomado por espaço imóvel ; assim é a dimensão de um espaço subterrâneo, aéreo ou celeste, determinado pela sua posição com relação à Terra" ³⁵ .

Os conceitos de tempo absoluto e espaço absoluto não são apenas do interesse do físico ; são também categorias de ordem filosófica, provocadoras, aliás, de enormes controvérsias.

A partir destas bases e de outras proposições gerais enunciadas no primeiro e segundo livros dos *Princípios*, Newton propõe-se demonstrar os demais fenômenos da natureza. Um exemplo disso temos no terceiro livro, em que o autor expõe seu sistema de mundo em torno da lei da gravitação universal ("matéria atrai matéria na razão direta das suas massas e na razão inversa do quadrado das suas distâncias") :

"pelas proposições matematicamente demonstradas nos livros anteriores, no terceiro derivo dos fenômenos celestes as forças de gravidade com as quais os corpos tendem para o Sol e para vários planetas. Então, dessas forças, por outras proposições que também são matemáticas, deduzo os movimentos dos planetas, dos cometas, da Lua e do mar" ³⁶ .

Newton vai além, expressando sua crença numa concepção mecânica de toda a natureza, ou seja, admite a possibilidade de derivar dos princípios mecânicos os

³⁵ . *Principia*, p. 7 da tradução portuguesa.

³⁶ . *Principia*, p. I e II (Prefácio de Newton à primeira edição).

outros fenômenos naturais. Esta concepção mecanicista da ciência permanecerá incontestada por muito e muito tempo. Nas palavras de Newton :

"Gostaria que pudéssemos derivar o resto dos fenômenos da Natureza dos princípios mecânicos pelo mesmo tipo de raciocínio, pois, por muitas razões, sou induzido a suspeitar de que todos eles possam depender de certas forças pelas quais as partículas dos corpos, por algumas causas até que desconhecidas, ou são mutuamente impelidas umas em direção às outras e se ligam em formas regulares, ou são repelidas e se afastam umas das outras. Sendo desconhecidas estas forças, os filósofos até agora têm tentado em vão a investigação da natureza ; mas espero que os princípios aqui expostos tragam alguma luz, seja a esse ou a algum outro método mais verdadeiro de filosofar" ³⁷.

Com efeito, a obra de Newton tem também uma contribuição teórica ao "método de filosofar", ou seja, no caso, ao modo de a ciência interrogar e desvendar os fenômenos físicos. A revolução científica, levada ao seu termo por Newton, é também, e já vinha sendo, metodológica.

Continua valendo, neste sentido, o que vimos com Galileu. A nova ciência não está em busca do *porquê*, mas do *como* ; não está em busca de "formas substanciais e qualidades ocultas" (primeira frase do Prefácio de Newton aos *Princípios*), não está em busca das "essências" aristotélicas, não está em busca de hipóteses "que não possam ser deduzidas dos fenômenos" (este, o sentido da famosa sentença metodológica de Newton : "Hypotheses non fingo" - não invento hipóteses). A nova ciência não é qualitativa : seu horizonte é determinado pelo mensurável. A base de todos os fenômenos físicos é a quantidade, a relação numérica e matemática.

Continua valendo, assim, a opção pela linguagem matemática (advirta-se o próprio título da obra máxima de Newton, ao qual o conteúdo da obra é fiel). Diz

³⁷. *Idem*, p. II.

Koyré que, tanto para Boyle como para Newton, "o livro da natureza está escrito em caracteres e termos corpusculares"; e "exatamente como para Galileu e Descartes, é uma sintaxe puramente matemática o elemento que liga estes corpúsculos, dando assim um significado ao texto do livro da natureza" ³⁸.

No livro III dos *Principios*, Newton estabelece quatro "regras do raciocínio filosófico" (*Regulae philosophandi*). Não são metafisicamente neutras : supõem, mesmo incompletamente, uma ontologia da natureza e da estrutura do universo³⁹.

Eis as regras:

1. "Não devemos admitir mais causas para as coisas naturais do que aquelas que são tanto verdadeiras como suficientes para explicar as suas aparências".
2. "Tanto quanto possível, aos mesmos efeitos devemos atribuir as mesmas causas".
3. "As qualidades dos corpos que não admitem aumento nem diminuição de grau e que se descobrem pertencerem a todos os corpos no interior do âmbito dos nossos experimentos devem ser consideradas qualidades universais de todos os corpos".
4. "Na filosofia experimental, as proposições inferidas por indução geral dos fenômenos devem ser consideradas como estritamente verdadeiras, ou como muito próximas da verdade, apesar das hipóteses contrárias que possam ser imaginadas, até quando se verificarem outros fenômenos, pelos quais se tornem mais exatas ou então sejam submetidas a exceções" ⁴⁰.

³⁸. Koyré, Alexandre. *Études Galiléennes*. Hermann, Paris, 1966.

³⁹. Reale, Giovanni & Antiseri, Dario, *op. cit.*, volume 2, página 296.

⁴⁰. *Principia*, livro III.

A primeira regra supõe o postulado ontológico da *simplicidade da natureza* - ademais afirmado expressamente por Newton - e lembra, com as devidas adaptações, a regra de parcimônia conhecida desde a escolástica tardia como "navalha de Ockham" : "não se multipliquem os entes se não for necessário" ⁴¹. As discussões recentes sobre a *simplicidade das teorias* e sobre o emprego das *hipóteses ad hoc* remetem a este princípio.

A segunda regra e a terceira supõem o postulado ontológico da *uniformidade da natureza*, que, por sua vez, fundamenta a tese do método indutivo (quarta regra), único procedimento admitido por Newton como válido para alcançar e fundamentar as proposições da ciência.

Sobre este último assunto, Newton voltará a se manifestar expressamente, em 1704, na *Óptica* ⁴² :

"Como na matemática, assim também como na filosofia natural, a investigação de coisas difíceis pelo método de análise deve sempre preceder o método de composição. Esta análise consiste em fazer experimentos e observações, e em traçar conclusões gerais deles por indução, não se admitindo nenhuma objeção às conclusões, senão aquelas que são tomadas dos experimentos, ou certas outras verdades".

Quanto à síntese,

"consiste em assumir as causas descobertas e estabelecidas como princípios, e por elas explicar os fenômenos que procedem delas, e provar as explicações"⁴³.

Einstein dirá sobre a obra de Newton :

⁴¹ . "Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem".

⁴² . *Opticks, or a Treatise on the Reflection and Colour of Light*. Citamos pela tradução brasileira de *Os Pensadores : Newton/Leibniz (I)*. Trad. de Pablo Rubén Mariconda. São Paulo, Abril Cultural, 1979.

⁴³ . *Idem*, p. 56, 57.

"Newton foi o primeiro que conseguiu encontrar uma base claramente formulada a partir da qual podia deduzir um grande número de fenômenos através do raciocínio matemático, lógico, quantitativo e em harmonia com a experiência. Na verdade ele podia justamente esperar que a base fundamental de sua mecânica, com o tempo, conseguiria fornecer a chave para a compreensão de todos os fenômenos. Assim pensaram os seus seguidores, com maior certeza que ele, e assim também pensaram os seus sucessores, até o fim do século XVIII".

O século XIX é o século do "declínio do conceito mecânico" ⁴⁴. É o século de Hertz, Oersted, Faraday, Maxwell, Michelson...

Até o século XIX, as teorias físicas pareciam adequar-se perfeitamente à realidade percebida pelo sentidos e, desta maneira, davam conta de uma infinidade de problemas físicos. A física newtoniana era considerada uma fotografia absolutamente fiel da natureza.

Juntamente com a física moderna, surgiram questões que levaram os físicos a reconsiderarem problemas filosóficos que pareciam estar definitivamente resolvidos no estreito quadro da física clássica. Dois grupos de problemas, em particular, foram novamente colocados em pauta. Um deles refere-se à essência da matéria, ou seja, a velha questão dos filósofos gregos de como é possível reduzir a princípios simples a variedade e a multiplicidade dos fenômenos que envolvem a matéria e, assim, torná-los inteligíveis. O outro diz respeito a um problema gnosiológico : até onde é possível

⁴⁴. Einstein, Albert & Infeld, Leopold. *A evolução da física*, 3. ed., Rio de Janeiro, Zahar, 1976. Capítulo II.

objetivar as nossas observações da natureza, ou seja, determinar, a partir dos fenômenos observados, um processo objetivo independente do observador.

A velha questão do materialismo e do idealismo - soluções possíveis para o chamado problema fundamental da filosofia - reapareceu de maneira bem definida, graças à física atômica moderna e, em particular, à teoria quântica. No século XIX, os átomos da química e seus constituintes, hoje denominados partículas elementares, eram considerados o substrato real de toda matéria. Entretanto, Planck descobriu, nos fenômenos da radiação, uma qualidade de descontinuidade que parecia relacionada com a existência de átomos, mas não poderia ser explicada com base na existência destes, isto é, parecia remeter-se a uma realidade mais complexa. Semelhante característica, revelada pelo "quantum" de ação conduziu à idéia de que a descontinuidade, assim como a existência do átomo, poderiam ser manifestações conjuntas de uma lei fundamental da natureza.

A idéia dos "quanta" de energia foi pela primeira vez apresentada por Planck no início deste século, com o propósito de explicar esta qualidade de descontinuidade nos fenômenos de radiação. O efeito fotoelétrico ⁴⁵ mostra, claramente e de maneira simples, a necessidade de alterarmos os nossos velhos conceitos. A teoria quântica da luz explica este fenômeno como uma chuva de fótons ⁴⁶ incidindo sobre uma placa de metal. A ação entre radiação e matéria consiste, aqui, em muitíssimos processos unitários, nos quais os fótons colidem com o átomo, arrancando um elétron. Estes processos unitários são todos iguais e o elétron extraído tem a mesma energia em todos os casos. Quando aumentamos a intensidade da luz, isto significa, em nossa nova linguagem, que estamos aumentando a quantidade de fóton incidentes. Neste caso, um número maior de elétrons seria lançado para fora da placa de metal, mas a energia de qualquer deles não se alteraria.

Esta teoria está em perfeita concordância com a observação. Podemos perceber, experimentalmente inclusive, que a energia de um quantum de luz pertencente a uma cor homogênea diminui proporcionalmente com o aumento do comprimento de onda, ou seja, isto significa que a energia dos quanta de luz é diferente para as diferentes

⁴⁵ . Efeito fotoelétrico : extração de elétrons por uma luz homogênea - de comprimento de onda definido - incidindo sobre um metal.

⁴⁶ . Fótons : pequenas porções de energia, viajando pelo espaço vazio com a velocidade da luz.

cores. Portanto, há fenômenos que não podem ser explicados pela teoria ondulatória e sim pela teoria quântica, como é o caso do efeito fotoelétrico. Também há fenômenos que só podem ser explicados pela teoria ondulatória, como é o caso da curvatura da luz em torno de obstáculos. E finalmente há fenômenos, tal como a propagação retilínea da luz, que podem ser igualmente bem explicados por ambas as teorias. Será a luz, enfim, onda ou chuva de fóton? Já havíamos levantado uma questão semelhante quando perguntamos : será a luz uma onda ou uma chuva de corpúsculos? Entretanto, havia toda a razão para se rejeitar a teoria corpuscular da luz e aceitar a teoria ondulatória, que abrangia todos o fenômenos. Agora, contudo, o problema é muito mais complexo:

"Defontramo-nos com um novo tipo de dificuldade. Temos dois quadros contraditórios da realidade : separadamente, nenhum dos dois explica os fenômenos da luz ; mas juntos explicam!" ⁴⁷

A lei da radiação, de Planck, difere de modo bem característico das leis da natureza previamente formuladas. Embora as anteriores leis da natureza (por exemplo, as de mecânica newtoniana) contivessem as chamadas constantes, tais constantes se referiam às propriedades dos objetos (por exemplo, massa, intensidade da força que atua entre dois corpos). Por outro lado, o quantum de ação, de Planck, que é a constante característica na sua lei de radiação, não representa propriedade dos objetos, mas propriedade da natureza. Enquanto as leis da física anterior (por exemplo, as leis da mecânica newtoniana) seriam, no fundamental, igualmente válidas para todas as ordens de grandeza, a lei da radiação, de Planck, prova pela primeira vez que há escalas na natureza e que fenômenos em diferentes graus de grandeza não são necessariamente do mesmo tipo.

Poucos anos após a descoberta de Planck, já se compreendera o significado da segunda "constante de medida". A teoria da relatividade restrita (1905), de Einstein, deixou claro aos físicos que a velocidade da luz não descrevia, como se supunha antes na eletrodinâmica, a propriedade de uma substância especial - o "éter" - , suporte da propagação da luz, mas que nela estava envolvida uma propriedade do espaço

⁴⁷ . Einstein, A. & Infeld, L. *op. cit.* . p. 212.

e do tempo, ou seja, uma propriedade geral da natureza. Assim, pode-se também considerar a velocidade da luz como uma constante de medida da natureza.

Nossos conceitos intuitivos de espaço e tempo somente podem ser aplicados àqueles fenômenos que envolvem velocidades pequenas em comparação com a da luz. Inversamente, os bem conhecidos paradoxos da teoria da relatividade se baseiam no fato de que os fenômenos que envolvem velocidades próximas da da luz não podem ser adequadamente interpretados de acordo com o conceito clássico de espaço e tempo.

Compreender as relações físicas ligadas à existência do quantum de ação, de Planck, era uma tarefa difícil para a época. Segundo Einstein, provavelmente as leis da teoria quântica implicam relações estatísticas. A primeira tentativa de estudar por inteiro a natureza estatística das leis da teoria quântica foi realizada em 1924, por Bohr, Kramers e Slater ⁴⁸. Muito embora a interpretação dada por estes físicos ao caráter estatístico das leis da teoria quântica não tenha sido de todo exata, ela contém o conceito decisivo de que as leis da natureza determinam, não a ocorrência de um evento, mas a probabilidade de um evento se verificar. A probabilidade deve, segundo o trabalho de Bohr, Kramers e Slater, estar ligada a um campo de onda que obedeça a uma equação de onda matematicamente formulável.

Na teoria quântica moderna, o conceito de *dynamis*, ou, na versão latina, *potentia* (filosofia aristotélica), assume nova forma : É formulado quantitativamente como probabilidade e sujeita-se a leis da natureza que são expressas matematicamente. Neste sentido, Heisenberg afirma :

"As leis da natureza, formuladas em termos matemáticos, não mais determinam os próprios fenômenos, mas a possibilidade de ocorrência, a probabilidade de que algo ocorrerá" ⁴⁹.

Esta interpretação estatística corresponde a uma situação muito próxima da encontrada nas experiências com fenômenos atômicos. A conclusão a que Heisenberg chega - e, com ele, nos parece, uma quantidade razoável de físicos - é que a

⁴⁸. Bohr, N., Kramers, H. A. & Slater, J. C. The quantum theory of radiation. *Phil. Mag.*, v. 47, p. 785-802 (1924).

⁴⁹. Heisenberg, W. A descoberta de Planck e os problemas filosóficos da física atômica. In Born, M. *et al. Problemas da física moderna* (trad.). São Paulo, Perspectiva, 1969 ; p. 16.

física moderna, a partir dessa nova interpretação, estabelece que a determinação dos fenômenos existe apenas na medida em que são descritos com os conceitos da física clássica ou newtoniana. Heisenberg manifesta-se :

"A aplicação destes conceitos é, por outro lado, limitada pelas chamadas relações de incerteza ; estas contêm dados quantitativos sobre os limites estabelecidos para a aplicação dos conceitos clássicos. Assim, a físico conhece os casos em que pode considerar os eventos como determinados e aqueles em que não pode ; conseqüentemente, pode utilizar um método isento de contradições intrínsecas para a observação e sua interpretação física" ⁵⁰

Desta maneira, a física moderna poderia ser considerada um marco definitivo para o fim do determinismo... De fato, nestes campos da física atômica, como diz Heisenberg, boa parte da antiga física intuitiva fica, por certo, perdida. E continua dizendo:

"Na física atômica, as observações não podem mais ser objetivadas de uma maneira tão simples ; isto é, não é possível referi-las a algo que se verifica objetivamente ou de modo descritível no espaço e tempo" ⁵¹

Poderíamos, no entanto, admitir, como ressalta Heisenberg, que as referidas partículas se compõem de outros corpos menores, por sua vez eternos e inalteráveis. Para eliminar tal possibilidade, é necessário tentar romper objetivamente as partículas elementares, o que demonstra o caráter não intuitivo da moderna física atômica, pois não há naturalmente instrumentos com que possamos atacá-las. Deve-se, portanto, fazer com que as partículas colidam entre si mesmas com grande energia para verificar se se rompem. Para isto existem aceleradores de partículas, que se acham em operação em muitas partes do mundo. Acelerando partículas elementares a velocidade

⁵⁰ . *Idem, ibidem*, p. 18.

⁵¹ . Heisenberg., *W. op. cit.* p. 19.

extremamente altas e fazendo-as colidir com partículas elementares de qualquer outro material usado como recipiente, podem-se estudar os resultados destes choques. Descobriu-se, a partir desse tipo de experimento, que a cisão pode ocorrer, sem dúvida.

"Às vezes, de um choque desse tipo origina-se um grande número de partículas e, de um modo surpreendente e paradoxal, as partículas oriundas da colisão não são menores do que as partículas elementares" ⁵²

A teoria da relatividade explica este paradoxo pelo fato de a energia ser conversível em massa. Portanto, os aceleradores fornecem grande quantidade de energia cinética às partículas elementares e com ajuda desta energia, conversível em massa, estas partículas podem gerar novas partículas elementares.

Pode-se, segundo Heisenberg, exprimir este fenômeno do seguinte modo :

"Todas as partículas elementares são compostas da mesma substância, isto é, energia" ⁵³

Podemos, assim, perceber, através dos avanços da física moderna, que a ciência do século XX não se restringe mais às idéias de Newton e Descartes, em que o tempo absoluto e a causalidade absoluta cercavam os cientistas em uma área relativamente estreita. Devemos, no entanto, considerar que a teoria quântica não pode ser entendida exclusivamente como o formalismo elaborado por Schrödinger, Heisenberg e Dirac:

"A própria interpretação do sentido físico da função de onda foi formulada, posteriormente, por Born. E mesmo o formalismo mais a interpretação da função de onda adotada por Born podem ser interpretados tanto no sentido de uma teoria estatística, cuja teoria de base ainda está por ser elaborada, como no

⁵² *Idem, ibidem*, p. 22.

⁵³ Heisenberg, W. *op. cit.*, p. 23.

sentido da teoria que descreve adequadamente as propriedades dos átomos e das moléculas. A teoria quântica supõe, portanto, além do formalismo e do significado da função da onda, uma interpretação deste formalismo. E Bohr, o principal elaborador desta interpretação, a faz em confronto permanente com Einstein (Debate Einstein-Bohr);”⁵⁴

Como podemos notar, os problemas de interpretação do formalismo, suscitados pela física moderna, têm uma dimensão filosófica:

“Os problemas da interação objeto-aparelho de medida / até que ponto é possível objetivar uma observação da natureza / ou a concepção de realidade física / problema da essência da matéria / remetem à relação entre o todo e as partes. O estatuto de uma descrição probabilística remete-nos às categorias da causalidade e da necessidade. Mesmo conceitos como continuidade e descontinuidade ou completude de uma teoria científica têm também implicações de ordem filosófica”⁵⁵

A existência de interpretações diferenciadas e a persistência, ao longo do tempo, destas interpretações evidenciam a importância dos estudos filosóficos para a compreensão da física moderna e para o seu ensino. Acreditamos que a concepção materialista dialética seja aquela que mais dá conta de uma interpretação das novas teorias e, portanto, do seu ensino.

Assim, em um primeiro capítulo identificamos as concepções de ciência de alguns físicos, autores de teorias, que participaram da interpretação da física moderna

⁵⁴ Freire Jr., O. *Estudo sobre Interpretações (1927-1949) da Teoria Quântica: Epistemologia e Física*. Dissertação de Mestrado Instituto de Física/Faculdade de Educação - USP, 1990.

⁵⁵ Freire Jr. , *op. cit.*, p.12

e assumiram certos compromissos filosóficos - implícita ou explicitamente - , objeto de nossa análise crítica. Tais físicos, cuja escolha será justificada neste primeiro capítulo, são Bohr, Einstein, Heisenberg e Langevin. No segundo capítulo analisaremos alguns pontos das novas teorias físicas, que parecem ameaçar a leitura materialista dialética, com a qual nos identificamos, da revolução da física do começo do século.

CAPÍTULO PRIMEIRO

Concepções de Ciência na Física do Século XX

CAPÍTULO PRIMEIRO

Concepções de Ciência na Física do Século XX

“Ainda quando realizo trabalho científico, atividade que raramente posso conduzir em associação direta com outros homens, efetuo um ato social, porque humano”.

Marx

Neste capítulo, buscamos identificar as concepções de ciência de alguns físicos que, participando da interpretação das teorias e manifestando-se, por discussões e obras escritas, sobre problemas filosóficos ligados à revolução da física moderna, contribuíram significativamente para o seu desenvolvimento.

Tendo isto em vista, trabalhamos com o pensamento filosófico de Bohr, Einstein, Heisenberg e Langevin. Nossa escolha está assentada em razões que serão expostas ao longo do capítulo, mas não excluimos a possibilidade de citarmos outros físicos, quando isto for necessário para o esclarecimento de algumas passagens do nosso trabalho.

Começaremos com Niels Bohr (1885 - 1962)⁵⁶ que, no final dos anos vinte, era o principal representante e porta-voz da nova “ortodoxia na filosofia natural”- Escola de Copenhague -, associada à mecânica quântica. Seu modelo para o átomo de hidrogênio (1913) e a explicação das linhas espectrais tinham-no feito conhecido e respeitado, tanto por sua intuição, como por sua ousadia, junto à comunidade dos físicos.

Já a importância de Albert Einstein (1879 - 1955) para a física do século XX é admitida até mesmo entre leigos, graças às teorias da relatividade: especial (1905) e geral (1916). Porém, é relevante notar que Einstein foi o primeiro físico a afirmar a natureza dual da radiação e o primeiro a aplicar significativamente a hipótese de de Broglie sobre as ondas de matéria. Em 1909, a dualidade fundamental da natureza da luz se tornou evidente para Einstein, quando obteve a expressão para as flutuações de energia na radiação do corpo negro, baseando-se na Lei de Planck.

Nesta dissertação damos ênfase ao pensamento de Einstein e Bohr não somente pela importância de suas contribuições para a física moderna, mas também pela importância do célebre debate que se travou entre os dois - texto clássico, publicado em

⁵⁶ Bohr nasceu e morreu em Copenhague.

1935 por Einstein, Podolski e Rosen ⁵⁷, sobre os fundamentos da mecânica quântica, e a resposta de Bohr ⁵⁸, no mesmo ano. Nestes trabalhos encontram-se duas posições radicalmente opostas no que diz respeito ao significado físico do formalismo quântico não-relativístico, ou seja, o formalismo quântico descrito pela física clássica.

Em artigo sobre o debate Einstein-Bohr, Brown afirma a importância do confronto, dizendo que este debate em torno da questão da dualidade onda-partícula talvez seja, nos domínios da física, o debate do século:

“Ambos, Einstein e Bohr, reconheceram no microfenômeno extraordinário da dualidade onda-partícula um desafio às formas tradicionais do raciocínio físico. O conflito entre os dois sobre esta questão talvez represente o debate do século na física. Seguramente assume uma posição ao lado do debate Leibniz-Clarke, por exemplo, como marco na história das idéias físicas”⁵⁹.

No referido debate, Einstein exigia o cotejamento da teoria quântica com uma teoria mais geral

“a teoria do campo total, que ainda não estava elaborada, mas cujas premissas, para Einstein, já estavam assentadas. Só este cotejamento poderia pôr um ponto final no debate Mas esta comparação estava fora do âmbito teórico e experimental da ciência da época. Bohr, contudo, situou-se no debate de forma mais concreta. Argumentou sempre mostrando que as propriedades dos átomos, elétrons, etc. estavam a exigir novos domínios, novos

⁵⁷ Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, v. 47, p.777-780. Trad. port. in *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v.2, p.90-92, 1981

⁵⁸ Bohr, N. Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, V. 48, p. 696-702, 1935. Trad. port. in *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Campinas, v.2, p.97-106, 1981.

⁵⁹ Brown, H.R. O debate Einstein-Bohr sobre a mecânica quântica. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Campinas, v.2, p.51-89, 1981.

conceitos, como os contidos na teoria quântica. Situando-se desta forma, Bohr ajudava a definir o objeto da teoria quântica e seus possíveis limites. Admitia que, em novos domínios, novos conceitos fossem necessários, mas considerava a teoria quântica completa para a descrição dos átomos e das partículas subatômica”⁶⁰ .

Einstein, ao longo do debate com Bohr, vai deixando clara sua busca de teorias universais, ou seja, possíveis de serem aplicadas tanto aos microobjetos como aos macroobjetos. Segundo Freire Jr., esta busca de leis físicas universais por Einstein o aproxima da metodologia científica adotada por Poincaré, que se voltava para uma “física dos princípios”,

“princípios que são o resultado de experiências sumamente generalizadas, mas que de sua própria generalidade parecem adquirir um elevado grau de certeza. Quanto mais gerais são, tanto mais freqüentemente se tem oportunidade de comprová-las, e multiplicando-se as verificações acabam por não deixar lugar à dúvida”⁶¹ .

Einstein concluiu, em seu artigo “A descrição da realidade física, fornecida pela mecânica quântica, pode ser completa? ”, escrito com a colaboração de Podolsky e Rosen, que a descrição da realidade fornecida pela função de onda não é completa. Admite, porém, acreditar “que uma descrição destas é possível”- e passa toda a sua vida procurando uma teoria que fosse, ao seu próprio ver, completa. A universalidade exigida por Einstein para as leis físicas não se restringia à teoria quântica; aplicava-se também à física clássica. Ele, por exemplo, refere-se à termodinâmica clássica como a “única teoria física de conteúdo universal” e diz que o conhecimento desta teoria lhe causou “profunda impressão”.

⁶⁰ Freire Jr., O. *op.cit.*, p. 41.

⁶¹ Poincaré, H. *The value of science*. In *The foundations of science*. 3 ed. Lancaster: The Science Press, 1946.

Segundo Freire Jr., a concepção einsteiniana de realidade física - em que o objeto tem uma independência do sujeito que o conhece - e o estatuto de uma descrição probabilística muito contribuíram no sentido de ele considerar como incompleta a teoria quântica ⁶². Einstein, sob esta óptica, não percebia a relação dialética sujeito-objeto, e assim não distinguia a descrição da realidade física pela teoria quântica - condicionada pelos meios adequados a esta descrição - de uma descrição subjetivista. E quanto à recusa de Einstein em conferir a uma descrição probabilística o estatuto de lei da natureza para fenômenos individuais, identifica Freire Jr. uma influência do tradicional determinismo laplaceano, na física. Lembremos aqui, pelas conhecidas palavras do próprio Laplace, o seu determinismo mecanicista:

“Uma inteligência que, em um momento determinado, conhecesse toda as forças que animam a natureza, assim como a situação respectiva dos seres que a compõem; se, ademais, fosse suficientemente ampla para submeter à análise tais dados, poderia abarcar numa só fórmula os movimentos dos corpos maiores do universo e os átomos mais rápidos; nada lhe seria incerto, e tanto o futuro como o passado estariam presentes diante dos seus olhos”⁶³.

Por outro lado, Bohr, como ressalta Freire Jr., parece superar a dicotomia sujeito-objeto, já que para ele o fenômeno é a totalidade do objeto a ser medido e dos meios adequados a esta medição, e “sua visão mais ampla de articulação das categorias de causalidade e da necessidade” justifica sua desenvoltura em conferir a uma descrição probabilística o estatuto de lei natural ⁶⁴.

Além disso, segundo Bohr, os átomos e as partículas subatômicas não podem ser tratados nem como partículas, nem como ondas, no sentido da física clássica. Dependendo das condições experimentais, a descrição destes objetos se baseia ou na concepção corpuscular, ou na concepção ondulatória. Para ele, tais descrições são

⁶² Freire Jr., *op. cit.*, cap. II.

⁶³ Laplace, P.S. *Théorie analytique des probabilités*, Paris, 1820, prefácio.

⁶⁴ Freire Jr., *op. cit.*, cap II

complementares, e esta relação assegura consistente aplicação no reino dos microfenômenos.

Assim, a descoberta das propriedades corpusculares da luz e das propriedades ondulatórias da matéria em fenômenos atômicos obrigou os físicos a combinarem as duas concepções, na medida em que aplicadas a processos atômicos. Para resolver os problemas teóricos que emergiam na física em relação a isto, sentiu-se a necessidade de reformular a interpretação da Escola de Copenhagem no que tocava à mecânica quântica.

A dificuldade teórica que mais parecia desafiar a interpretação de Copenhagem, neste sentido, era o fato de, segundo a física clássica, nenhum objeto poder existir simultaneamente naqueles processos como partícula e como onda. “Interpretação de Copenhagem e “Escola de Copenhagem” se tornaram termos comumente empregados para denotarem certo conjunto de visões físicas e filosóficas típicas da tendência representada principalmente por Bohr e Heisenberg na física moderna. Bohr não usava estes termos, mas Heisenberg empregava freqüentemente a expressão “interpretação de Copenhagem”.

Werner Heisenberg (1901 - 1976) ficou conhecido na comunidade física por sua mecânica das matrizes, ou mecânica quântica, apresentada em 1925, e principalmente pelo chamado “princípio da indeterminação”, ou “da incerteza”, enunciado em 1927, segundo o qual é impossível determinar simultânea e exatamente a posição e a velocidade de uma partícula. Já a mecânica ondulatória havia introduzido um conceito fundamental novo na física, pelo qual os movimentos das partículas eram descritos em termos de probabilidades. Assim, a mecânica ondulatória não se reconhecia em condições de prever a trajetória precisa de uma partícula individual. Heisenberg, dando um grande passo adiante, argumentou, no seu “princípio da incerteza”, não ser isto uma deficiência da teoria; ocorre que é “fundamentalmente impossível” descrever o movimento de uma partícula em todos os seus aspectos. Devemos considerar o “princípio da incerteza” como um dos marcos divisórios entre a física clássica e a física moderna.

Com relação à interpretação de Copenhagem, dois pontos podem ser destacados, um trabalhado por Heisenberg, outro por Bohr. De acordo com Heisenberg,

na física clássica é possível, em princípio, eliminar o efeito da observação, ou mensuração, do objeto, mas, na mecânica quântica é impossível, pois esta envolve uma relação de incerteza que gera imprecisões nas mensurações. Portanto, Heisenberg deixa escapar a idéia da incontroleabilidade em princípio. De acordo com Bohr, como já mencionamos, os microobjetos não podem ser tratados nem como partículas, nem como ondas, no sentido da física clássica.

“Consideremos o ensaio de Bohr *Quantum Physics and Philosophy*, onde ele apresenta a idéia da complementaridade sem a idéia da interação incontroleável. Nesta exposição, os conceitos complementares (partícula e onda, posição e momento...) são justapostos na forma de uma antinomia, que, então, se resolve. Tal justaposição sempre desempenhou um papel decisivo na concepção de Bohr”⁶⁵.

Omelyanovsky, introduzindo a expressão “antinomia de complementaridade”, resalta a similaridade que existe entre as antinomias de Kant e o conceito de complementaridade.

Uma antinomia afirma dois juízos mutuamente exclusivos, opostos, sobre o mesmo objeto, cada um deles (tese e antítese) sendo afirmados com a mesma necessidade. Como já observamos, o emprego dos conceitos de onda e partícula da física tradicional para descrever objetos atômicos criava contradições na teoria física, contradições que podiam ser entendidas como antinomias. Bohr, segundo Omelyanovsky, demonstra convincentemente esta tese, discutindo numerosos exemplos concretos em sua obra.

O estudo dos chamados fenômenos complementares exige condições experimentais mutuamente exclusivas, e somente a totalidade destes fenômenos pode ensejar seu conhecimento completo. Isto quer dizer que, do ponto de vista da complementaridade, nós podemos expressar duas opiniões mutuamente exclusivas, possíveis de serem igualmente corretas.

⁶⁵ Omelyanovsky, M.E. *Dialectics in modern physics*. (trad.) Progress Publishers, Moscow, 1979; p. 54.

Assim, quando a contradição entre os conceitos de partícula e de onda, na medida em que aplicados a objetos atômicos, é resolvida, o princípio da complementaridade ressalta a cognoscibilidade do mundo atômico. Por outro lado, Kant introduz a “coisa-em-si” incognoscível para “resolver” as antinomias.

Segundo Kant há somente quatro antinomias em que a mente se envolve, quando tenta conhecer o mundo como um todo. Segue-se do seu raciocínio que ele aceita a natureza dialética do pensamento humano, o que é o grande mérito da sua filosofia. A dialética do mundo objetivo, contudo, permanece fora da sua filosofia com a incognoscível coisa-em-si. A teoria kantiana das antinomias é corrigida, alargada e generalizada pelo subsequente desenvolvimento da dialética. Criticando Kant, Hegel rejeita seu agnosticismo e nota que não há apenas quatro antinomias, mas que todo conceito é uma unidade de elementos opostos a que pode ser dada a forma de uma antinomia”⁶⁶.

O princípio da complementaridade de Bohr não resolve o problema da dualidade onda-partícula. De acordo com Bohr a contradição entre as propriedades corpusculares e ondulatórias dos objetos atômicos como que se cristaliza na forma de uma oposição de dois tipos de situações experimentais mutuamente exclusivas, a que os fenômenos da complementaridade estariam associados. Entretanto, a verdadeira solução da antinomia da complementaridade, diz Omelyanovsky,

“consiste em considerar as propriedades corpusculares ondulatórias de um objeto atômico como uma unidade de opostos. Eis porque os conceitos da teoria quântica, refletindo a natureza

⁶⁶ Omelyanovsky, M.E. *op. cit.*, p. 56.

qualitativamente dos conceitos clássicos”⁶⁷.

Bohr, quando se pronuncia sobre o princípio da complementaridade, concentra-se mais nas limitações dos velhos conceitos do que na compreensão filosófica dos novos conceitos, introduzidos pela mecânica quântica, o que provavelmente originou o ponto fraco da sua exposição sobre este princípio.

Bohr, entretanto, hesita. Muitas vezes propende a admitir que a lógica da contradição dialética seja também a lógica do desenvolvimento da física. No seu ensaio *Quantum Physics and Philosophy* encontramos explícita expressão de uma posição que é basicamente materialista e dialética. Ligando o aparato matemático da mecânica quântica a noções de coisas visualizáveis e conceitos clássicos, ele revela o caráter antitético das concepções corpuscular e ondulatória. Em sua primeira obra sobre mecânica quântica, a antítese ainda vinha mascarada pela idéia da "interação não controlável" ; em *Quantum Physics and Philosophy*, contudo, este empecilho já não existe. Retomando a concepção da complementaridade, o conceito de "interação não controlável" simplesmente não ocorre neste ensaio⁶⁸. O termo "complementaridade", usado por Bohr, denota um novo tipo de relação entre dados experimentais diferentes sobre objetos atômicos, obtidos através de variados aparatos experimentais. Embora pareçam contraditórios estes dados, afirma Bohr, quando procuramos combiná-los em um quadro único, eles, de fato, esgotam o conhecimento concebível sobre o objeto em questão⁶⁹.

A descrição dos fenômenos atômicos, ressalta Bohr,

"tem sob estes aspectos um caráter perfeitamente objetivo, no sentido de nenhuma referência explícita ser feita a qualquer observador individual"⁷⁰.

Na mecânica quântica, portanto, segundo esta visão,

⁶⁷ Omelyanovsky, M.E. *op. cit.*, p. 56.

⁶⁸ Omelyanovsky, M. E., *op. cit.*, p. 47.

⁶⁹ *Idem, ibidem*, p. 46.

⁷⁰ Bohr, N., *Essay 1958 - 1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. N.Y. , London, Interscience Publ., 1963, p. 3.

"não estamos preocupados com a acuracidade das mensurações, mas com uma limitação da bem definida aplicação dos conceitos de espaço e tempo e das leis da conservação dinâmica" ⁷¹.

A significação filosófica da idéia da complementaridade é, portanto, considerável. A aplicação de conceitos opostos aos mesmos objetos em estudo não é apenas possível, mas, em certas condições, necessária. Como Bohr demonstrou - especialmente em suas discussões com Einstein -, isto não leva a inconsistências lógico-formais no interior da teoria física, mas enseja que o aparato matemático da mecânica quântica seja interpretado em concordância com dados experimentais e toda uma representação dos fenômenos atômicos, de que a teoria clássica não está à altura.

Assim, as questões levantadas neste capítulo nos ajudam a entender as subjacentes concepções de ciência dos físicos, na medida em que tais questões envolvem aspectos ontológicos e gnosiológicos.

As idéias e os conceitos desenvolvidos, refinados recentemente na mecânica quântica (assim, a proposição de que "a interação entre o objeto e o aparato instrumental faz parte inseparavelmente do fenômeno" ⁷² ; a idéia de que o conceito de partícula é relativo, em se tratando de fenômenos ao nível atômico ; ou a idéia de que os conceitos de partícula e de onda fazem sentido na física atômica, não tanto como conceito de uma partícula em si mesma, ou de uma onda em si mesma, mas em sua interconexão interna ; a idéia de possibilidade e de probabilidade na mecânica quântica) são evidências de quanto tem avançado o pensamento humano em virtude da abstração e capacidade de análise e síntese, desde os tempos em que a mecânica clássica foi formulada e surgiram outras teorias clássicas.

Ao mesmo tempo, as leis da cognição, que operam na física clássica e na física quântica, ou em qualquer outra disciplina e teoria científicas, são as mesmas ; caso contrário, não poderia haver ciência unificada e, em geral, nenhum conhecimento humano unificado, que refletisse o mundo objetivamente real. Por isso tem a ciência

⁷¹ . *Idem, ibidem*, p. 5.

⁷² . Bohr, N. *op. cit.*, p.4.

seguido o caminho do materialismo ; por isso não há lugar, em seu sistema de conceitos, para o idealismo ou para a religião.

Quanto à interpretação de Copenhagen, desenvolvida por Heisenberg, chama atenção não tanto o fato de as propriedades e o comportamento dos macroobjetos não deverem ser atribuídos a microobjetos, mas principalmente a idéia das imprecisões associadas à aplicação dos conceitos clássicos a microobjetos.

Quando Heisenberg se manifesta sobre a descrição dos experimentos atômicos através de conceitos clássicos, deixa claro que neste caso a descrição não corresponde de maneira precisa a estes objetos, porque "a observação desempenha papel decisivo no evento e a realidade varia, conforme esteja sendo observada ou não" ⁷³.

De acordo com este ponto de vista, se consistentemente sustentado, o momento, a energia não são tão objetivamente reais, na medida em que aparecem e desaparecem conforme se escolha um ou outro método de observação. O aparato matemático da mecânica quântica seria muito mais simbólico do que objetivo em sua natureza, necessário, tão-somente, para harmonizar as leituras dos instrumentos. A relação de incerteza torna-se, neste caso, o limite do conhecimento humano - nenhum novo conceito a tal ponto fundamental foi desenvolvido depois disso na mecânica quântica. A idéia da incontornabilidade em princípio "substituiu" o problema da natureza dual (partícula e onda) dos objetos atômicos pelo problema de saber se o experimentador podia decidir quais propriedades se manifestavam e quais eram eliminadas durante a observação, pela escolha de um ou de outro método de observação.

Deve ficar bem claro que a visão de Heisenberg, tal como formulada acima, e consistentemente mantida, sobre o princípio da incontornabilidade, leva a conclusões filosóficas não materialistas. De fato, entretanto, o próprio Heisenberg de maneira nenhuma a concretizou consistentemente. Quando ele considera questões filosóficas inseparavelmente do conteúdo teórico da física moderna, seu espírito materialista e dialético se revela. Quando se distancia da física e se circunscreve ao reino dos problemas filosóficos gerais, a linha metafísica e idealista se afirma em seu raciocínio.

⁷³ . Heisenberg, W. *Física e filosofia* (trad.), Brasília, Editora Universidade de Brasília, 1981 ; p. 24.

Heisenberg entende que o homem descreve e explica não a natureza mesma, e, sim, a natureza exposta, submissa ao nosso método de interrogá-la e às nossas técnicas de pesquisa. Heisenberg apreciava enormemente a idéia do físico alemão Carl von Weizäcker, de acordo com o qual "a natureza é anterior ao homem, mas o homem é anterior à ciência natural". Heisenberg defende que a primeira parte da sentença referenda a física clássica e seu ideal de completa objetividade ; a segunda nos diz "porque não podemos escapar ao paradoxo da teoria quântica, ou seja, à necessidade de usar dos conceitos clássicos" ⁷⁴. Segundo Heisenberg, experimentos com processos atômicos são tão reais quanto qualquer fenômeno da vida diária - o que justificaria o emprego de tais conceitos. Porém, continua Heisenberg, as partículas atômicas mesmas, as partículas elementares mesmas não são reais - são formas fundamentais que a energia deve assumir para converter-se em matéria.

"Tais formas básicas precisam de algum modo ser determinadas por uma lei fundamental, exprimível em linguagem matemática" ⁷⁵.

Para ele, estas partículas formam um mundo de possibilidades e somente de modo simbólico podem ser representadas, através de signos matemáticos. Em outras palavras, de acordo com ele, as partículas atômicas e outras micropartículas habitam uma espécie de reino de "coisas-em-si-mesmas". A coisa-em-si-mesma, seria finalmente, para o físico atômico, uma estrutura matemática, deduzida, contudo - diferentemente de Kant - de modo indireto, da própria experiência. Por outro lado, os conceitos clássicos (entre eles, segundo Heisenberg, os de espaço, tempo e causalidade) têm de ser interpretados, em certo sentido, como apriorísticos, quando se trata da teoria da relatividade e da mecânica quântica.

Como podemos notar, as visões filosóficas sobre a física moderna, de Bohr e Heisenberg, são essenciais para o nosso estudo, uma vez que representam, como já ressaltamos, a tendência da escola de Copenhague : essa escola aventou novas idéias fundamentais sobre a teoria quântica, a partir das descobertas das propriedades

⁷⁴ . Heisenberg, W. *op.cit.*, p. 26.

⁷⁵ . *Idem, ibidem.*

corpúsculares dos campos e das propriedades ondulatórias da matéria, descobertas estas que a Física clássica não dava conta de explicar.

As posições filosóficas da escola de Copenhagen, normalmente coincidem, no seu todo, com a linha do "positivismo", mas hoje seria errado caracterizá-las deste modo: a influência do positivismo dos adeptos de Copenhagen diminuiu muito nos últimos tempos. Bohr, Heisenberg e Born se manifestaram contra as tendências positivistas na ciência. Talvez entre os mais notáveis membros da escola de Copenhagen apenas Jordan permanecesse inclinado aos dogmas positivistas.

Os físicos ocidentais, que, em suas obras mais recentes, se opõem à filosofia positiva, sustentam pontos de vista ideológicos profundamente diversos, embora as diferenças não apareçam muito claramente em se tratando de determinados assuntos a até se possa deslumbrar alguma tendência. Bohr, por exemplo, toma um rumo claramente materialista no seu tratamento da mecânica quântica. Heisenberg, pelo contrário, propende, nas suas objeções ao positivismo, para posições próximas do idealismo de Platão.

"Para a ciência natural moderna, não há mais, no início, o objeto material, porém forma, simetria matemática" ⁷⁶.

Ora, continua Heisenberg, a estrutura matemática é, em última instância, um conteúdo intelectual...

Born, também da escola de Copenhagen e autor da interpretação probabilística da função de onda, pronunciou-se várias vezes, de maneira particularmente aguda, contra o positivismo.

Heisenberg afirma que a interpretação de Copenhagen da teoria quântica não é, de maneira nenhuma, positivista.

"O positivismo toma as percepções sensoriais do observador como elementos básicos da realidade ; a interpretação de Copenhagen considera as coisas e

⁷⁶ . Heisenberg, W. A descoberta de Planck e os problemas filosóficos da física atômica. In Born, M. et al. *Problemas da física moderna* (trad.), São Paulo, Perspectiva, 1969 ; p. 27.

processos (passíveis de uma descrição clássica), isto é, o real, como o fundamento de toda interpretação física."⁷⁷

Também não é materialista a interpretação de Copenhagen, como o próprio Heisenberg apontou mais de uma vez. Neste caso, ele contrapõe a interpretação de Copenhagen ao materialismo. Mas, como se trata de filosofia, o ponto não é o que Heisenberg pessoalmente pensa desta interpretação, mas como de fato lida com o problema fundamental da filosofia. Em suas próprias palavras,

"A ontologia do materialismo repousava sobre a ilusão de que o tipo de existência, a 'realidade' direta do Universo que nos cerca, pudesse ser extrapolada ao domínio atômico. Esta extrapolação mostrou-se, todavia, impossível"⁷⁸

É preciso admitir que Heisenberg, diferentemente de Bohr, se opõe de forma expressa aos princípios do materialismo. Quando, porém, fala de "ontologia materialista", ele tem em mente o materialismo metafísico e mecanicista. Não revela nos seus textos familiaridade com o materialismo dialético, o que, entretanto, não impede que faça ataques à filosofia marxista em passagens que dificilmente seriam consideradas de significação filosófica séria.

A necessidade de um enfoque dialético na física atômica é substituída por Heisenberg pela necessidade de revisão do conceito de 'realidade objetiva' na física. Não se pode, com certeza, discordar de Heisenberg quando diz que expressar as realizações da física moderna mediante os conceitos da velha filosofia dificilmente traria qualquer vantagem. Mas Heisenberg se perde quando interpreta a física quântica, baseando-se em sistemas filosóficos metafísicos e idealistas.

Na visão deste cientista, o mérito da interpretação de Copenhagen foi o de "afastar os físicos das visões materialistas simplistas que prevaleciam na ciência natural do século XIX"⁷⁹. Ele discorda daqueles que tentam.

⁷⁷. Heisenberg, W. *Física e filosofia*, p. 87.

⁷⁸. *Idem, ibidem*.

⁷⁹. Heisenberg, W. *Física de filosofia*, p. 77.

"voltar ao conceito de realidade da física clássica, ou, para usar de um termo filosófico mais geral, à ontologia do materialismo. Eles prefeririam recuar à idéia de um mundo real objetivo, cujas partes menores existem objetivamente, no mesmo sentido em que as pedras ou as árvores existem, independentemente de serem observadas ou não " 80.

Ora, Heisenberg identifica, assim, e injustificadamente, o conceito filosófico de matéria (*certo* conceito filosófico de matéria) com o conceito físico de matéria (*certo* conceito físico de matéria). Deixa também de notar, em sua essência, a diferença entre "realidade objetiva" e "atualidade". O materialismo dialético faz distinção ; por exemplo, a categoria da possibilidade, que desempenha importante papel nas questões filosóficas da mecânica quântica, tem, assim como a categoria de realidade, um caráter objetivo, do ponto de vista do materialismo dialético. Nisso o materialismo dialético difere fundamentalmente do materialismo mecanicista, mas Heisenberg não adverte nesta diferença fundamental. Quando Heisenberg critica a "ontologia materialista", ele está de fato atacando o materialismo mecanicista, não o materialismo dialético. Impossível levar a sério suas palavras, quando diz que, se o materialismo dialético foi criado no século XIX, seus

"conceitos de matéria e realidade não podem provavelmente adaptar-se aos resultados da técnica experimental dos nossos dias " 81 .

Esta afirmação de Heisenberg, diz Omelyanovsky, não é sustentada por nenhum argumento 82 . A verdadeira essência do materialismo dialético exclui dogmas de todos os tipos e inevitavelmente altera sua forma à medida em que vão surgindo novas descobertas fundamentais na ciência. Tanto Engels como Lenin tratam largamente deste importante aspecto da filosofia marxista.

80 . *Idem, ibidem.*

81 . *Idem, ibidem*, p. 83.

82 . Omelyanovsky, M. E., *op.cit.*, p. 60.

Heisenberg erroneamente fala sobre a dialética objetiva das propriedades corpusculares-ondulatórias dos objetos atômicos (já demonstrada em experimentos bem conhecidos) em termos de 'complementaridade' dos símbolos matemáticos referentes a estes objetos e em termos da descrição dos experimentos atômicos feita através dos conceitos clássicos. Eis porque a transição que a física empreende do conhecimento dos macrofenômenos ao conhecimento dos fenômenos microscópicos é tratada por Heisenberg não como um aprofundamento do conhecimento humano sobre a matéria e a realidade objetiva, mas como certa dissolução do mundo "objetivamente real" na "transparente clareza de uma matemática, cujas leis governam o possível e não o atual" ⁸³.

Quando Heisenberg discute as relações entre vários sistemas filosóficos, por um lado, e a teoria quântica, por outro, ele conclui que

"a análise epistemológica da teoria quântica, especialmente na forma que lhe deu Bohr, contém muitos aspectos que lembram os métodos da filosofia hegeliana" ⁸⁴.

De fato, toda a física moderna e seus fundamentos teóricos estão atravessados de contradições dialéticas. Heisenberg não teve como negá-lo.

Paul Langevin (1872 - 1946), físico de renome internacional, foi o primeiro a dar uma interpretação materialista dialética da física moderna, tendo participado do Congresso de Solvay, em 1927, quando pela primeira vez Einstein e Bohr polemizaram sobre o significado da recém-elaborada teoria. Três anos depois, Langevin apresentou

⁸³ . Omelyanovsky, M. E., *op.cit.*, p. 60.

⁸⁴ . *Idem, ibidem.*

suas linhas de pensamento em torno da polêmica, principalmente no que dizia respeito à interpretação do "princípio da indeterminação", de Heisenberg.

Langevin foi, além de destacado cientista, um líder político. Sucedeu a Lorentz na Presidência do Congresso de Solvay a partir de 1928 - principal fórum dos físicos na metade inicial deste século. Sua participação política foi mais intensa durante a Segunda Guerra, quando militou na Resistência Francesa contra a ocupação nazista. Foi preso e confinado, tendo conseguido fugir com a ajuda da Resistência. No período imediatamente posterior à guerra, filiou-se ao PCF. Elaborou, juntamente com H. Wallon, o plano Langevin-Wallon para a reorganização do sistema educacional francês, destruído pela guerra. Este plano não foi colocado em prática devido às alterações políticas ocorridas na França ; entretanto, segundo Freire Jr., continua despertando a atenção dos educadores em todo o mundo ⁸⁵.

Os principais trabalhos científicos de Langevin foram dedicados à ionização dos gases, ao magnetismo e à acústica, além de ter participado ativamente na interpretação da teoria quântica, concentrando sua atenção, durante as primeiras décadas do nosso século, nas questões ligadas à teoria da relatividade. Einstein fez o seguinte registro a seu respeito :

"Parece-me certo que ele teria desenvolvido a teoria da relatividade especial, se isto não tivesse sido feito em outra parte, porque ele tinha claramente reconhecido seus pontos essenciais" ⁸⁶.

Langevin considerava a noção da descontinuidade como a mudança mais profunda na física do início do século, uma vez que a física, até então, estava toda assentada em representações contínuas. Em 1913, numa palestra denominada "A física do descontínuo", afirmou :

"A mudança profunda que se tem produzido recentemente na física é caracterizada sobretudo pela penetração, em todos os domínios da nossa ciência, da noção fundamental da descontinuidade. Devemos

⁸⁵. Freire Jr., O. *op.cit.*, p. 73.

⁸⁶. Einstein, A. Paul Langevin. *La Pensée*, v. 12, p. 14.

hoje fundar nossa concepção do mundo e nossa previsão dos fenômenos apoiados na existência das moléculas, dos átomos e dos elétrons. Parece também necessário admitir que os momentos magnéticos são todos múltiplos inteiros de um elemento comum, o magnéton, e que a matéria somente pode emitir radiação eletromagnética de maneira descontínua, por quanta de energia de grandeza proporcional à frequência" ⁸⁷.

A identidade entre o pensamento de Langevin e o de alguns físicos, como V. A. Fock (1898 - 1974), sobre os problemas filosóficos suscitados pela mecânica quântica é significativa, como ressalta Freire Jr. :

"Eles identificam na teoria quântica a lei natural que dá conta dos fenômenos em escala atômica, consideram a descrição probabilística introduzida por esta teoria uma necessidade que deriva da especificidade dos fenômenos físicos nesta escala e não uma insuficiência do nosso conhecimento, não consideram a teoria quântica uma teoria 'estatística', cuja base ainda esteja por ser elaborada. Também consideram que a inevitável e não anulável interação entre os objetos e os meios de observação é uma característica da descrição dos fenômenos físicos que não pode ser eliminada em escala atômica. Mas consideram também que esta interação não anula a objetividade que deve caracterizar a descrição dos fenômenos naturais" ⁸⁸.

Na verdade, a crítica materialista da interpretação de Copenhague se dirigia principalmente contra a idéia da incontroleabilidade em princípio, que se contrapunha à

⁸⁷. Apud Freire Jr., O., *op.cit.*, p. 73.

⁸⁸. Freire Jr., O., *op.cit.*, p. 80.

idéia da unidade das propriedades opostas onda-corpúsculo da matéria e dos campos. Entre os textos dedicados a este problema, Omelyanovsky cita o de V. A. Fock : *A Critique of Bohr's Views on Quantum Mechanics*, em que

"o autor justamente chama a atenção para o fato de que não pode haver em geral nenhuma interação fundamentalmente incontrolável. Quando falava da incontrolabilidade em princípio, Bohr considerava essencialmente a questão não da impossibilidade de toda análise da interação entre objeto e instrumento de medida, mas desta interação sendo expressa na reconhecidamente incompleta linguagem da mecânica clássica. Desde o início ele formulava um problema insolúvel : seguir as mudanças simultâneas da posição e do momento de um objeto atômico, permanecendo fiel à mecânica clássica. Quanto porém, se provou ser isto impossível, o resultado foi atribuído não às propriedades ondulatórias da matéria, mas à presença da interação supostamente incontrolável entre o objeto e o instrumento. Fock diz que esta abordagem dos problemas da teoria quântica era um eco, talvez, da idéia já há muito abordada, segundo a qual a posição e o momento eram sempre 'realidade' supostamente caracterizados por certos valores, mas em virtude de algum capricho da natureza não podiam ser observados simultaneamente" ⁸⁹.

Bohr necessitava do conceito da incontrolabilidade em princípio a fim de encobrir a inconsistência lógica resultante de os conceitos da mecânica clássica estarem sendo usados fora do seu campo de aplicabilidade. A introdução desta idéia na teoria quântica um vez mais confirmava o profundo acerto das palavras de Lenin :

⁸⁹ . Omelyanovsky, M. E., *op. cit.*, p. 52.

"A nova física desviou-se para o idealismo sobretudo e precisamente porque os físicos não conheciam a dialética" ⁹⁰.

O desenvolvimento da física do micromundo e a descoberta dos aspectos contraditórios e unidos dos microobjetos coincidiram com uma grande oscilação de alguns cientistas entre o idealismo e o materialismo dialético. A descoberta das propriedades ondulatórias da matéria e das propriedades corpusculares de um campo, ou seja, a descoberta do fato de que matéria e campo têm uma natureza dual onda-partícula, estimulou por parte de muitos cientistas o reconhecimento das contradições dialéticas nos fenômenos naturais. Muitos físicos, entre eles alguns cujas posições filosóficas divergiam do marxismo, começaram a falar de dialética. Por ignorarem, contudo, a dialética materialista, não eram capazes de explicar a natureza contraditória das micropartículas, nem de entender o caráter objetivo das contradições. Nisso reside a fonte dos seus erros idealistas.

Conhecer os fenômenos de toda a natureza como eles são, sem adições subjetivistas e idealistas, quer dizer conhecê-los como uma unidade de opostos. Isso também se aplica ao problema da realidade na teoria quântica. Os físicos enfocam este problema exatamente de um modo dialético, embora muitos deles, às apalpadelas, ingenuamente, se inclinem para visões idealistas e metafísicas. Isto é óbvio, particularmente, nos fatos da evolução da interpretação de Copenhagen.

Assim, as concepções de ciência que têm os físicos nos remetem ao objeto da física, mostrando, desse modo mesmo, a relação dialética existente entre sujeito e objeto. No próximo capítulo daremos uma ênfase maior ao objeto. Especificaremos alguns temas, da maior importância, em torno dos quais a controvérsia principalmente se desenvolveu : realidade física, espaço-tempo e determinismo.

⁹⁰. Lenin, V. I., *Materialismo e empiriocriticismo* (trad.), Ed. Progresso/Avante!, Moscou/Lisboa, 1982; p. 198.

CAPÍTULO SEGUNDO

Temas Controversos

CAPÍTULO SEGUNDO

Temas Controversos

“Com cada descoberta que faz época, mesmo no domínio da natureza, o materialismo tem, inevitavelmente, de modificar a sua forma”.

Engels

“Exatamente como na história, a natureza está submetida à lei da dialética do movimento”.

Engels

Neste capítulo nos deteremos em uma análise crítica de alguns temas que consideramos controversos, seja de maneira geral, seja relativamente ao referencial teórico que adotamos.

a) *Realidade Física*

Nos sistemas filosóficos historicamente reconhecidos como tais, o conceito de realidade não se separa do conceito mais geral de ser, trazendo sempre o sinete das pressuposições básicas do sistema em que se inscreve.

A idéia de “grau de realidade” encontramos formulada com muita clareza pelos escolásticos, que atribuíam o grau mais alto da realidade a Deus. No século XIV a disputa entre os chamados realistas e nominalistas sobre o conceito de realidade dominou o cenário filosófico. Os realistas (Anselmo...) diziam *universalia sunt realia*, ou seja, a existência é inerente ao universal como ser independente e acima do individual. Os nominalistas (Ockham...) afirmavam que as espécies, os gêneros, enfim os universais não são realidades anteriores às coisas, nem realidades nas coisas, mas apenas nomes (*nomina*), ou vocábulos (*voces*), por meio dos quais se designam conjuntos de indivíduos. Só existem entidades individuais. Os universais são apenas termos na linguagem; não refletem as propriedades reais das coisas. Marx chamava o nominalismo “a primeira forma do materialismo”.

O realismo e o nominalismo renascem de muitos modos no subsequente desenvolvimento histórico do pensamento filosófico, na moderna filosofia burguesa. Sem aprofundar aqui esta análise, diremos apenas que estas idéias também se manifestam na física moderna, nas obras de certos cientistas.

Em todo sistema filosófico notável dos tempos modernos, seja materialista, seja idealista, a idéia de grau de realidade se apresenta e se desenvolve, de uma forma ou de outra. Encontramo-la, por exemplo, nos sistemas de Descartes e de Spinoza, segundo os quais a substância possui o mais alto grau de realidade. Locke entendia que as chamadas qualidades primárias das coisas sensíveis (extensão, impenetrabilidade, movimento) têm um maior grau de realidade que as secundárias (cor, som, gosto). Para Leibniz as mônadas ocupam o grau mais elevado de realidade. Em Kant encontramos a distinção “realidade dos fenômenos” e “realidade categorial” (abstrata). Hegel, na *Ciência da Lógica*, distingue realidade (*Realität*) e atualidade (*Wirklichkeit*) como uma unidade de essência e existência. A filosofia burguesa contemporânea - por exemplo, o

positivismo lógico, o “realismo crítico” - não traz, portanto, nada de absolutamente novo, comparada com a filosofia clássica, sobre a questão da realidade.

O termo “realidade” é usado com vários sentidos. Um deles é o de existência:

“A bola perceptível existe e a percepção da bola existe; uma partícula existe e um ponto material existe; uma bola de bilhar existe e uma bola ideal existe; um padrão de difração de elétron existe e a difração do elétron existe; a matéria existe e o espírito existe; a verdade existe e existe o erro; são todos reais, neste sentido do termo”⁹¹.

Há, todavia, uma diferença entre “real”, no sentido de existente, e “objetivamente real”. O “objetivamente real”, o “objetivo”, é o que existe independentemente da mente humana e é por ela refletido sob certas condições. O “subjetivo”, ou o “espiritual” (sensações, percepções, conceitos, juízos...) é o que existe na consciência. O “subjetivo” pode refletir e, em certas condições, reflete mesmo, o objetivamente real. Contudo, o subjetivo pode também não refletir o objetivamente real: são as ilusões, que têm que ver com o mundo subjetivo do homem. As ciências naturais não estão preocupadas com este mundo. A física não está preocupada com as realidades espirituais; está preocupada com as materiais. Eis porque, quando falamos da “realidade física de alguma coisa”, queremos dar a entender que algo, ou o conceito desse algo, corresponde, deve corresponder, ao objetivamente real.

Ora, “real” não tem o mesmo sentido de “atual”. Aquele deriva do latim *res* (coisa), ao passo que este vem de “act” (latim: *actus*; no alemão: *wirklich*, de *wirken*; no russo: *deistvitel'nyi*, de *deistvovat...*). O conceito de “realidade física” é o que mais se aproxima do conceito de “atualidade”, tanto em conteúdo, como em significado. O “existente” e o “atual” não são, de modo nenhum, idênticos, e esta diferença é literalmente tangível na física moderna. Com uma câmara de Wilson, por exemplo, projetada para observar traços de partículas eletricamente carregadas em rápido movimento, pode-se inferir sobre a natureza e as propriedades destas partículas, considerando os traços visíveis de sua trajetória. Temos o direito, porém, de inferir, dos

⁹¹ Omelyanovsky, M.E., *op. cit.*, p. 69.

dados obtidos, que um elétron se move “atualmente” do modo como uma macropartícula? A teoria quântica, ao nosso ver, deu uma resposta a esta questão.

“Todo ‘objetivamente real’ na física não é ‘atual’ em determinada teoria, mas todo ‘atual’ em uma teoria física é ‘objetivamente real’”⁹².

A física quântica surge e desenvolve-se afirmando, sem dúvida, a realidade objetiva do mundo físico, inclusive os átomos e as partículas elementares; mas precisa também levar em conta as condições da observação - registrada por instrumentos - , em que são encontrados os objetos das suas pesquisas, dada justamente a natureza dual destes objetos.

Ora, a descrição dos fenômenos físicos segundo a idéia da relatividade às condições, aos meios da observação, significa que a teoria quântica faz um novo avanço no conhecimento da realidade objetiva da natureza, e não que esta realidade esteja limitada pelas fronteiras da física clássica, do modo como Heisenberg entende.

Também não podemos concordar com Heisenberg quando diz que a teoria clássica idealizava a natureza, ao passo que o surgimento da teoria quântica vem acompanhado do estabelecimento de outro ponto de vista, segundo o qual a ciência descreve a natureza não como é em si mesma e, sim, sujeita, referida aos métodos humanos de investigação. Na física clássica, a representação da natureza também não é completamente adequada à natureza; é aproximação, é simplificação, como ficou provado pela teoria da relatividade e pela teoria quântica. Mas, neste caso, a afirmativa de que a física clássica descreve e explica a natureza sem levar em consideração o sujeito conhecedor é falsa. Em grande medida, este mesmo pensamento se encontra nas observações de Heisenberg sobre o caráter limitado dos conceitos clássicos. Contudo, Heisenberg não desenvolve suas observações, não aperfeiçoa o conceito filosófico de realidade objetiva nas análises que faz da teoria clássica.

Se tivermos em mente que a reflexão da natureza (através da observação e dos conceitos) idealiza, simplifica o objeto refletido, só toscamente se aproxima dele, e que, ao mesmo tempo, o progresso do conhecimento, da teoria e da ciência corrige no

⁹² Omelyanovsky, M.E., *op. cit.*, p. 70.

seu todo esta simplificação, inevitável em cada ato cognitivo individual, tornar-se-á claro que o desenvolvimento da teoria clássica rumo às teorias relativística e quântica reflete a natureza mais completamente, mais profundamente, no plano dos conceitos, sem esgotá-la. O avanço do conhecimento físico é, assim, acompanhado pela introdução de novos métodos de descrição dos fenômenos naturais, novos conceitos, novos princípios, novas teorias, novas representações do mundo. Tal desenvolvimento, que implica sempre mudanças e alterações da natureza pela pessoa que conhece, de maneira nenhuma se assemelha a um aumento unilateral de elementos subjetivos na ciência, na cognição do seu conteúdo objetivo.

Assim, no processo do conhecimento da natureza (objetivamente real), o objetivo e o subjetivo nunca estão separados um do outro, como parece supor Heisenberg, em cuja visão a diferença entre o subjetivo e o objetivo na física clássica é absoluta, ao passo que relativa na física quântica. Nas palavras de Lenin:

“Os conceitos lógicos são subjetivos na medida em que permanecem ‘abstratos’, em sua forma abstrata; contudo, ao mesmo tempo, eles expressam também as coisas-em-si-mesmas. A natureza é tanto concreta como abstrata, tanto fenômeno como essência, tanto momento como relação. Os conceitos humanos são subjetivos enquanto abstratos, separados, mas objetivos como um todo, no processo, na soma total, na tendência, na origem”⁹³.

Podemos até conceder que as afirmações de Heisenberg, transcritas atrás, sejam menos uma revisão do conceito de realidade objetiva na física moderna e mais a tese de que agora o sujeito desempenha um papel ativo na cognição. Segundo ele, o papel passivo do sujeito na física clássica, e sua atitude contemplativa diante da natureza conhecida, são bastante naturais: a física clássica estuda o mundo objetivo sem violar seu estado no curso da investigação. Na física moderna, na teoria quântica, diferentemente, falaríamos do observador e do objeto como correlacionados.

Entretanto, entendemos que a relação sujeito-objeto na física clássica é a mesma, em princípio, que na ciência atual. O homem conhece a natureza somente quando a modifica, ou seja, quando isola alguns fenômenos da natureza - o que já

⁹³ Lenin, *Cahiers philosophiques*.

ocorre no ato da observação - , quando conduz experimentos, em que altera e controla as condições nas quais estes eventos ocorrem, quando reconstrói o objeto conceitualmente. A alteração da natureza pelo homem conhecedor é não só inevitável como necessária, desde que somente ela enseja oportunidades para o homem conhecer a natureza como a natureza é, e entendê-la como uma unidade do diverso.

Isto, entretanto, se vê muito claramente do nosso lugar atual. Assim, há um sentido em que a questão da realidade física somente surge e se desenvolve na física moderna.

“Nenhum físico jamais viu um elétron como vê, digamos, uma pedra rolando montanha abaixo, ou uma onda do mar. Contudo, a luz ultravioleta é também invisível ao homem, e há sons que não podem ser ouvidos, mas, nesses casos, nenhuma questão especial apareceu!”⁹⁴.

Os fenômenos a partir dos quais o físico formula juízos sobre o elétron e seu movimento no átomo, sobre o núcleo atômico, sobre coisas que se movem a velocidades comparáveis à da luz... criam situações paradoxais na física, se interpretados nos moldes das teorias clássicas.

Não é verdade que a física moderna generaliza a experiência cotidiana. A física moderna lida com fenômenos altamente refinados, que simplesmente não se encaixam nos quadros da física clássica. Exemplificando, mencionariamos a descoberta de partículas elementares extremamente instáveis, como as ressonâncias, que têm uma vida média de 10^{-23} segundos e, mesmo quando se movem a velocidades próximas da da luz, podem percorrer tão-somente uma distância de 10^{-12} centímetros durante toda a sua vida. Não podem, conseqüentemente, ser descobertas pelos métodos convencionais da física nuclear (ou seja, a partir de traços visíveis das trajetórias de partículas altamente carregadas de energia, em uma câmara de Wilson). A existência, portanto, dessas partículas foi detectada por métodos indiretos, pela observação dos seus produtos decompostos. Em tais experimentos, que utilizam instrumentos de alta precisão, os fatos físicos são captados pela mente conhecedora de uma forma sobremodo complexa, mediante conceitos de níveis de abstração muito diferentes dos exigidos pela física

⁹⁴ Omelyanovsky, M.E., *op. cit.*, p. 63.

clássica. Assim, o físico, que não concebe a realidade senão como na física clássica, encontra-se na seguinte situação: a realidade objetiva parece escapar à cognição, enquanto os conceitos, que ajudaram até ali a conhecer o mundo físico, se recusam a servir. Na teoria da relatividade, de Einstein, por exemplo, o espaço e o tempo são relativos, ao passo que os conceitos correspondentes da física newtoniana são absolutos. Na mecânica quântica, de acordo com a idéia da complementaridade, de Bohr, algo semelhante acontece com os termos “partícula” e “onda”: eles perdem sua significação de absolutos e adquirem o sentido, estranho à física clássica, de “relatividade aos meios de observação”. O traço mais comum da teoria quântica relativística das partículas elementares é a ausência nela do princípio da constância do número de partículas e o reconhecimento do fato de que as partículas aparecem e desaparecem durante a interação.

Em *The Evolution of Physics*, de Einstein e Infeld, lemos: “Vimos novas realidades criadas pelo avanço da física”; “A física realmente começou com a invenção dos conceitos de massa, força e sistema inercial. Todos estes conceitos são invenções livres”; “Para o físico do início do século XIX, a realidade do nosso mundo exterior consistia em partículas com forças simples atuando entre elas e dependendo apenas da distância”; “As dificuldades ligadas à deflexão da agulha magnética, as dificuldades ligadas à estrutura do éter, induziram-nos a criar uma realidade mais sutil. A importante invenção do campo eletromagnético acontece”; “Os desenvolvimentos posteriores tanto destruíram os velhos conceitos como criaram novos. O tempo absoluto e o sistema coordenado inercial foram abandonados pela teoria da relatividade”; “A realidade criada pela física moderna está, na verdade, muito afastada dos tempos idos”⁹⁵

Isto não quer dizer que Einstein negava a realidade objetiva do mundo físico e sugeria que a única realidade do físico fossem suas livres invenções. As observações de Einstein acerca do assunto são, sem dúvida, ambíguas. Em seu texto *Mecânica Quântica e Realidade* encontramos o seguinte:

“Se se pergunta quais são os aspectos típicos do mundo das idéias físicas, independentemente da teoria quântica, o seguinte aspecto se destaca sobre todos: os conceitos físicos remetem a um mundo

⁹⁵ Einstein, A. & Infeld, L. *A evolução da física* (trad.), Rio de Janeiro, Zahar, 1976, p.235-237.

externo real, ou seja, implicam idéias sobre coisas que exigem uma ‘existência real’ (de um corpo, de um campo, etc) e são independentes dos sujeitos percebedores; por outro lado, estas idéias sofrem mudanças para corresponderem tão exatamente quanto possível às nossas impressões sensoriais”⁹⁶.

Einstein pensava ser a mecânica quântica - tal como entendida por Bohr e Heisenberg - incompatível com os fundamentos da física afirmados por ele. Opunha-se, como vimos, à interpretação de Copenhague da mecânica. Tendo em mente os aspectos filosóficos das discussões que aconteciam em seu tempo, considerava-a como positivista e sugeria que uma descrição completa e direta da realidade seria encontrada. Ao seu ver, a mecânica quântica, entendida do modo como a entendia Bohr, não seria ainda esta descrição. Parece que Einstein enfocava o sentido da mecânica quântica a partir das idéias básicas da física clássica, muito semelhantemente a como sua própria teoria da relatividade era enfocada por oponentes do relativismo físico.

Sobre a afirmação de Einstein de que os conceitos físicos são livres invenções do espírito humano, Bohr entendia que Einstein descambava para posições convencionalistas sobre os conceitos físicos. Todavia, o próprio Einstein deixa claro em que sentido fazia aquela afirmação: os conceitos “não são logicamente deriváveis do que é dado empiricamente”⁹⁷. A transição dos resultados percebidos da observação para os juízos teóricos acerca dos fenômenos observados não se faz por inferências lógicas, de natureza formal.

A questão da realidade física nos remete, portanto, à “lição epistemológica” dada por Bohr aos cientistas: os fenômenos quânticos dizem respeito a propriedades da “situação experimental como um todo”, não apenas a propriedades do objeto “em si mesmo”. Parece-nos, contudo, que o conteúdo desta “lição epistemológica” é mais amplo. A ciência clássica entendia ser sua tarefa encontrar leis universais constantes da natureza. A nova física vai além: quer encontrar também as leis que regem a transição

⁹⁶ Einstein, A. *Quanten-Mechanik und Wirklichkeit. Dialectica*, 1948; v.2, p.321.

⁹⁷ Ver Schilpp, P.A. (ed.) *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Evanston, The Library of Living Philosophers Inc., 1949 ; p. 684.

das leis de determinada esfera de fenômenos para as leis mais gerais, mais profundas, de esferas mais amplas de fenômenos⁹⁸. A mecânica clássica é um caso limite da teoria especial da relatividade; a teoria especial da relatividade, um caso limite da teoria geral da relatividade.

Deste modo, a física moderna abala o preconceito do velho materialismo, para o qual o conhecimento (a cognição, a reflexão da natureza pelo cérebro humano) deve ser entendido apenas “abstratamente”, “sem movimento”, “sem contradições”. O reconhecimento de que o espaço e o tempo dependem do sistema de referência escolhido pelo observador, o reconhecimento de que toda observação dos fenômenos atômicos envolve certa interação não negligenciável com o agente da observação, significam que o conhecimento físico se aprofundou e que os novos conceitos e princípios refletem melhor, mais completamente os padrões da natureza.

. . . refletem o objetivamente real. Estas considerações sobre a mecânica quântica e sobre a teoria de Einstein têm, portanto, um peso direto sobre o problema da realidade física. A construção de uma teoria sobre determinada esfera de fenômenos resolve o problema da reprodução (no pensamento) do objeto desta teoria como ele existe na atualidade, ou seja, como uma integridade concreta fenômeno e substância, externo e interno - unidade do diverso. O contínuo espaço-tempo (nosso próximo assunto) é “mais real” que o espaço tomado separadamente e o tempo tomado separadamente.

Por outro lado, a hipertrofia de qualquer aspecto da cognição de alguma coisa, o esquecimento do fato de que a unidade existe na multilateralidade, conduzem, em última instância, ao subjetivismo e a resultados de cunho idealista e metafísico. Situação semelhante temos na própria teoria da relatividade, se o termo “relatividade” for absolutizado. Ou na teoria quântica, se a idéia da interação dos objetos atômicos e dos instrumentos de medida - interação esta que gera a “incontrolabilidade em princípio”, tratada no capítulo anterior - for superestimada, e se desconsiderar que os experimentos da complementaridade só em combinação uns com os outros revelam tudo o que pode ser apreendido sobre o objeto.

⁹⁸ Omelyanovsky, M. E., *op. cit.*, p. 71.

Resumindo, o conceito de realidade física chega à literatura da física moderna como uma espécie de sinônimo do conceito filosófico de atualidade, no sentido do materialismo dialético. Parece-nos legítimo empregar os termos “empiricamente real” (“realidade empírica”) e “abstratamente real” (“realidade abstrata”) como propõe Omelyanovsky:

“O primeiro denota aquilo que existe independentemente da mente humana (o objetivamente real) e é abrangido por aquele estágio da cognição que é chamado contemplação viva, e sem o qual não pode haver observação. O segundo denota a realidade objetiva que é refletida a um nível mais profundo da compreensão humana - o pensamento abstrato, que revela a essência dos fenômenos conhecidos, as leis da natureza. Mas a mais profunda e a mais completa cognição de um objeto que existe independentemente da mente humana é alcançada, combinando-se observação e pensamento abstrato (podemos, com propriedade, usar o termo “pensamento dialético”, aqui), quando uma teoria científica, refletindo seu objeto como realidade, isto é, como uma unidade global de múltiplos aspectos e suas relações, é construída logicamente com base na prática e adquire certa integridade e certa validade relativa”⁹⁹.

A realidade física é, desta maneira, a realidade objetiva conhecida em uma teoria física. O conteúdo deste conceito é definido conforme o nível, determinado historicamente, de definição da teoria mesma e dos estágios (elementos) da sua estrutura.

⁹⁹ Omelyanovsky, M. E., *op. cit.*, p. 74.

b) Espaço - Tempo

A teoria da relatividade, ao nível das suas concepções quânticas, não introduziu mudanças significativas quanto à física clássica: preservou o conceito clássico de trajetória da partícula em movimento e, neste sentido, pode até ser vista como uma teoria clássica; ao passo que a mecânica quântica transformou radicalmente as leis newtonianas do movimento justo neste ponto. Contudo, a revisão radical operada pela teoria relativística das noções newtonianas de espaço e tempo despertou os físicos do seu “sono metafísico”. A idéia da variabilidade dos princípios básicos da física, hoje usual entre os cientistas, foi pela primeira vez empregada pela teoria da relatividade¹⁰⁰.

O espaço clássico de Euclides e Newton era uma entidade imutável e estático. A única relação que tinham os pontos de espaço, para Euclides e Newton, era a relação de justaposição, que é intemporal, a menos que consideremos como temporal a justaposição simultânea. De qualquer modo, a imutabilidade do espaço foi explicitamente afirmada por Newton. Um século mais tarde, Kant expressava a mesma idéia de forma diferente, insistindo na relação exclusiva entre espaço e tempo. Ainda mais recentemente, Bertrand Russell afirmava que a independência do espaço em relação ao tempo não podia ser negada “sem incorrer nos mais graves absurdos”¹⁰¹.

A teoria da relatividade recusa com ousadia esta “crença” de tantos anos: como o espaço clássico não é nada mais que a totalidade dos acontecimentos simultâneos, sua existência objetiva desaparece necessariamente, assim como também se perde a existência objetiva da simultaneidade absoluta. Simplesmente não existe o espaço clássico, concebido como justaposição simultânea de pontos-homogêneo-; admitir o contrário significaria admitir a simultaneidade absoluta dos acontecimentos distantes, que seria a negação da teoria especial da relatividade.

Na física clássica não se admitia nenhuma ação recíproca causal entre o espaço e o seu conteúdo físico: o espaço era considerado como causalmente inerte e indiferente a qualquer ação física; sua única função era a de recipiente imutável, passivo.

¹⁰⁰. “No domínio da física moderna, a teoria da relatividade sempre desempenhou um papel assaz importante. Foi nesta teoria que se reconheceu, pela primeira vez, a necessidade de uma mudança nos princípios fundamentais da física” - Heisenberg, W. *Física e filosofia*, p. 65.

¹⁰¹. Russell, B., “Les axiomes propres à Euclide sont-ils empiriques?” *Revue de Metaphysique et de Morale*, vol. VI (1898), p. 773.

É verdade que o caráter temporal da ocupação do espaço explicava a realidade do movimento; entretanto, a homogeneidade e a imutabilidade fundamentais do espaço clássico continuavam imunes à variável distribuição de matéria contida nele.

Esta distinção entre a matéria e o espaço desaparece na teoria geral da relatividade; isto quando adequadamente interpretada, ou seja, quando não interpretada à luz da teoria newtoniana. Assim, já não há distinção entre, por um lado, o recipiente indiferente, passivo, e, por outro, o conteúdo físico variável; a matéria e o espaço, tão claramente separados anteriormente, se fundem em uma realidade dinâmica, individual: o continuum não-euclidiano, com curvatura que varia de um lugar para outro. Os fenômenos gravitacionais e de movimentos acelerados, que eram interpretados pela física clássica como manifestações de forças localizadas no espaço, se deduzem agora naturalmente da curvatura do continuum não-euclidiano de quatro dimensões. Na teoria geral da relatividade, todo movimento, acelerado ou não, resulta naturalmente da estrutura local do espaço-tempo. Em outras palavras, a lei da inércia é um caso especial da lei da gravitação.

A física clássica mantém, portanto, a distinção entre a matéria e sua ação no espaço - massa de inércia e massa gravitatória - , ao passo que a teoria geral da relatividade, com o princípio einsteiniano de equivalência, une as manifestações da inércia e da gravitação em uma realidade única. Assim, a igualdade numérica da massa de inércia e da gravitação, que era uma coincidência enigmática dentro da estrutura clássica, hoje é considerada simples consequência da teoria geral da relatividade. É um erro dizer que a matéria “causa” uma correspondente curvatura no espaço; a matéria e a curvatura local do espaço são uma única realidade. Esta separação entre a matéria e o espaço é recusada não só pela teoria geral da relatividade, mas também, embora menos explicitamente, pela teoria especial.

Como veremos a seguir, a necessidade de relacionar fenômenos que ocorrem em vários sistemas de referência inerciais, e de buscar conceitos e leis comuns a todos estes sistemas, aumenta o grau de abstração dos conceitos físicos. Os conceitos clássicos são, portanto, generalizados e transformados em novos conceitos, mais significativos, mais abrangentes. Perceberemos também que o surgimento da teoria da

relatividade não pode ser compreendido independentemente da idéia da contradição dialética.

De acordo com a mecânica clássica, o repouso absoluto e o movimento retilíneo uniforme absoluto não existem. Sendo relativos, são correlatos; isto se expressa no princípio galileano de relatividade, que afirma a impossibilidade de identificar um sistema separado dentro de uma classe de sistemas de referência inerciais na base das leis da mecânica clássica.

O princípio galileano da relatividade, contudo, era incompatível com as leis da eletrodinâmica clássica, em particular com a corroboração experimental da independência da velocidade da luz em relação ao movimento da fonte. Ou seja, a eletrodinâmica clássica admitia o “éter” como meio transportador das ondas eletromagnéticas (tal como o ar, meio transportador das ondas sonoras) que explicava a independência da velocidade da luz; entretanto, introduzia os conceitos de repouso absoluto e de movimento absoluto na física, em contradição com o princípio galileano da relatividade.

O conflito lógico surgido na junção da mecânica clássica e da termodinâmica clássica não podia ser resolvido diretamente através de experimentos. Na conhecida experiência de Michelson-Morley, foi construído um instrumento (interferômetro) para a medida do “vento de éter”, isto é, a velocidade com que o laboratório, em que a velocidade da luz é medida, se move no éter. A experiência, conduzida várias vezes por dia e em todas as estações do ano, no laboratório e no topo da montanha, deu um resultado negativo, ou seja, o “vento de éter”, que parecia ser um conceito do qual não se poderia fugir, quando a luz é comparada com o som, na realidade não existe. Este resultado negativo levou à conclusão de que não existe um sistema especial de referência fixo no espaço, em relação ao qual as ondas luminosas teriam uma velocidade universalmente definida. Portanto, se a mecânica clássica fosse aplicada a uma fonte de luz em movimento, a velocidade da luz seria relativa; mas se a hipótese de Lorentz fosse considerada para o mesmo fenômeno, a velocidade da luz seria absoluta (diante do resultado negativo da experiência de Michelson). Segundo a hipótese de Lorentz, a velocidade absoluta da Terra não pode ser medida experimentalmente.

O conflito entre a mecânica clássica e a eletrodinâmica tomou a forma de uma contradição entre o princípio da relatividade newtoniana, ou galileana, e a proposição de que a luz se propaga no vácuo com uma velocidade que não depende da velocidade da fonte irradiadora. Esta contradição foi resolvida por Einstein - e isto se converteu na base lógica sobre a qual se edificou a teoria da relatividade. A primeira premissa da teoria einsteiniana da relatividade foi a idéia da equivalência de todos os sistemas de referência inerciais, generalizada para fenômenos eletromagnéticos - sistemas estes cujas leis da conservação do movimento e da energia, bem como as leis newtonianas do movimento são aplicáveis. Como segunda e última premissa da sua teoria, Einstein afirmou a independência da velocidade da luz quanto ao movimento da fonte (princípio da velocidade constante da luz). Ou seja, como a primeira premissa nega a existência de um sistema absolutamente preferencial, a velocidade da luz, que em qualquer sistema é sempre medida como tendo o mesmo valor numérico, deve ter o mesmo valor em qualquer sistema.

Einstein combinou ambos os princípios, alterando os conceitos físicos de espaço e de tempo. A simultaneidade de dois eventos diferentemente localizados perdia sua natureza absoluta, bem como provavam ser relativos os intervalos espaciais entre corpos e os intervalos temporais entre eventos, ou seja, provavam ser dependentes do movimento relativo dos observadores. Assim, a cinemática relativística que emergiu levou à transformação da física clássica. Na teoria da relatividade uma lei do movimento foi formulada para partículas que se movem em alta velocidade; descobriu-se a lei da interconexão entre a massa e a energia dos sistemas materiais; e a lei da conservação da massa provou estar proximamente associada à da conservação da energia.

Einstein não se livrou da contradição entre o princípio da relatividade e o da constância da velocidade da luz, mesmo quando introduziu hipóteses adicionais para que fossem preservados estes princípios juntamente com os fundamentos da física clássica. Os referidos princípios provaram ser isolados, existindo paralelamente dentro de certo esquema clássico. Ele combinou os princípios da relatividade e da constância da velocidade da luz, mutuamente contraditórios, mas não no sentido da conjunção lógico-formal. Einstein abandonou certos conceitos básicos da física, que pareciam estabelecidos para sempre e formulou novos conceitos físicos fundamentais, construindo

conseqüentemente uma teoria, em que o princípio da relatividade e o da constância da velocidade da luz figuram como necessariamente relacionados um com o outro. Desse ponto de vista podemos dizer que Einstein resolveu o paradoxo de maneira verdadeiramente dialética.

A física abandonou, portanto, o espaço e o tempo absolutos e introduziu o espaço e o tempo relativos na teoria da relatividade. Isto expressa adequadamente as transformações de Lorentz¹⁰², pelas quais se faz a transição na teoria da relatividade de um sistema de referência inercial para outro. Ao mesmo tempo, Einstein não descarta completamente os conceitos de espaço e tempo absolutos, mas os preserva quando as condições do problema permitem que sejam ignoradas determinadas circunstâncias. Se, por exemplo, é possível negligenciar a duração do tempo que a luz leva para passar entre os pontos onde ocorre o evento, o conceito da simultaneidade absoluta é empregado. Em outras palavras, a teoria da relatividade revela a natureza aproximada dos conceitos de espaço e tempo da física clássica e indica os limites da sua aplicação.

Desta maneira, a teoria da relatividade reflete a realidade objetiva mais acurada e mais profundamente que a física clássica; ou seja, inclui, abrange fenômenos e processos que, por uma razão ou outra, pareciam muito “refinados” para a física clássica. Esta generalizou diretamente noções da experiência cotidiana, ligadas ao espaço e ao tempo. A teoria da relatividade, que se baseia no estudo experimental dos fenômenos eletromagnéticos, desenvolve suas concepções e noções indiretamente, através das idéias e conceitos da física clássica. A necessidade de relacionar fenômenos que ocorrem em vários sistemas inerciais, contudo, e de achar conceitos e leis comuns a todos estes sistemas, aumenta o grau de abstração dos conceitos físicos: os conceitos clássicos são generalizados e transformados em novos conceitos, aparecendo os conceitos clássicos como aspectos de conceitos relativísticos mais significativos e mais amplos.

Na mecânica clássica o espaço e o tempo são unificados pelas leis newtonianas do movimento e, de acordo com estas mesmas leis, eles não dependem um do outro no contexto desta unificação: existem separadamente. As transformações galileanas usadas na mecânica newtoniana para passar de um sistema de referência

¹⁰². Lorentz postulou, dez anos antes da descoberta de Einstein, a transformação (correlação de x, y, z, t com x', y', z', t'), que fornecia uma descrição formal do resultado negativo de Michelson.

inercial para outro são justamente aquelas que deixam as expressões para distâncias espaciais e intervalos de tempo invariantes para todos os sistemas inerciais. Na teoria clássica estas expressões refletem as principais propriedades do espaço e do tempo. A situação é bem diferente na teoria da relatividade. Aqui o espaço e o tempo são unificados por leis do movimento que diferem das de Newton e, em concordância com estas novas leis, prova-se que eles são interrelacionados por sua própria natureza. Na teoria da relatividade o espaço e o tempo formam um sistema integral.

Se tomarmos como ponto para discussão a natureza quadridimensional de um evento - evento caracterizado por três coordenadas espaciais e uma temporal (x,y,z,t) -, não deveria haver diferença entre a física clássica e a teoria da relatividade. Minkowski já apontava que

“os objetos da nossa observação são, sempre, e apenas, posições e o tempo associado. Ninguém jamais observou uma posição senão em algum tempo, ou um tempo senão em certa localização”¹⁰³.

Embora os conceitos de espaço e tempo na física clássica fossem mais “abstratos” do que os desenvolvidos pela percepção normal, a física clássica também se baseia na aceitação da idéia do espaço quadridimensional. Nas palavras de Einstein,

“também a mecânica clássica se baseia no contínuo quadridimensional do espaço e do tempo”¹⁰⁴

A diferença entre a mecânica clássica e a teoria da relatividade quanto à quadridimensionalidade começa com a solução do problema de passar de um sistema inercial para outro. Na mecânica clássica, as quantidades espaciais variam separadamente durante esta transição da quantidade temporal, que permanece constante - transformações de Galileu. Na teoria da relatividade, quando há uma transição de um sistema inercial para outro - transformações de Lorentz -, o tempo não permanece invariante, mas varia juntamente com as quantidades espaciais.

De acordo com a teoria da relatividade o espaço e o tempo não têm, portanto, uma existência independente; constituem uma única formação, algo, por assim

¹⁰³ Minkowski, H. Raum und Zeit. *Physikalische Zeitschrift*, 1909,10,3:104.

¹⁰⁴ Schilpp, P.A. (ed.), *op. cit.*, p.57.

dizer, maior que o espaço e o tempo separadamente, que são simplesmente postos juntos na física clássica. A impossibilidade de separar o espaço do tempo foi pela primeira vez formulada por Minkowski, em 1908, embora de modo implícito esta compreensão do espaço e do tempo já estivesse nas transformações de Lorentz. De fato, segundo a teoria da relatividade, a expressão mais completa, concentrada da compreensão, encontra-se no conceito de *intervalo*, formulado por Minkowski. O intervalo, que combina a distância espacial e o intervalo de tempo, é um invariante, ou seja, é o mesmo seja qual for o sistema de referência inercial. Em virtude disso, a distância espacial e o intervalo de tempo serão diferentes em diferentes sistemas de referência.

Minkowsky, todavia, chegou perto do equívoco da assimilação do tempo à quarta dimensão (a absorção do componente temporal pelo espacial, enfim, a espacialização do tempo). Entre os que apreciam esta idéia encontramos quem acredite ter sido antecipada a teoria da relatividade por H. G. Wells, em sua famosa novela *The Time Machine*, onde um viajante fictício se move ao longo da “quarta dimensão” com a mesma liberdade com que se move ao longo das três dimensões do espaço.

Langevin chamou a atenção para o engano da espacialização do tempo. Protestou contra a “quarta dimensão do espaço” como denominação para o tempo. O próprio Einstein admitiu que a assimetria do tempo se mantém incluída em sua fusão relativista com o espaço: “não podemos enviar mensagens telegráficas ao passado”.

Desde, portanto, que interpretemos corretamente a fusão do espaço e do tempo, e a correlata mudança de sentido de *espaço* e de *tempo* comparativamente com a física clássica, podemos concluir que o mais essencial na teoria da relatividade não é tanto a introdução na física da idéia da relatividade das distâncias espaciais e temporais, mas, sim, o fato de ela refletir o espaço e o tempo unidos, necessariamente conectados.

Esta revolução representa a ameaça mais grave para o esquema universal laplaciano clássico - o que nos remete ao próximo item do nosso texto.

c) *Determinismo*

Começaremos a exposição deste tema discutindo a relação existente entre o determinismo e o princípio da causalidade na física.

Na filosofia antiga o conceito de causa era mais geral do que em nossos dias. Aristóteles, como vimos na introdução deste texto, distinguia quatro tipos de causa: a formal (*causa formalis*), a material (*causa materialis*), a eficiente (*causa efficiens*) e a final (*causa finalis*). Ainda encontramos estes termos na moderna literatura filosófica, mas os sentidos deles estão referidos a outras categorias. Só o termo *causa eficiente* conservou até certo ponto o sentido original, e corresponde com alguma aproximação ao que modernamente e cientificamente se entende pela palavra *causa*.

Causalidade denota um tipo de conexão necessária no tempo, para processos que ocorrem no tempo. Se, em certas condições constantes, o fenômeno A gera ou determina o fenômeno B, então a conexão entre os dois fenômenos é do tipo causal: o fenômeno A é causa, o fenômeno B é efeito.

Uma conexão causal é uma conexão necessária entre diferentes fenômenos, precisamente no tempo. Há variadas conexões entre os fenômenos da natureza, inclusive uma conexão necessária no espaço, em que vários fenômenos ocorrem a um tempo só.

As categorias de causa e efeito têm um sentido inerente apenas quando aplicadas a fenômenos que, em certas condições, são considerados independentemente dos fenômenos ao seu redor e, neste sentido, representam um sistema isolado. Tão logo, porém, estes fenômenos sejam considerados em conexão com os fenômenos ao seu redor, causa e efeito se integram na noção de interação universal, em que jamais permanecem o mesmo: o que é causa em certas condições torna-se efeito em outras, e vice-versa.

Dialeticamente, toda mudança de qualquer objeto ou fenômeno, e sua transformação em “seu outro”, é como uma cisão do todo em partes contraditórias, e a unidade destas partes opostas é, algumas vezes, chamada a causa da mudança e do desenvolvimento. O termo causa não estaria sendo usado aqui em seu sentido próprio,

pois a categoria da contradição dialética dá suporte às demais categorias da lógica dialética, sendo errado, assim, explicar a categoria da contradição pela categoria da causalidade. Ao mesmo tempo, não devemos ignorar o fato de que um fenômeno pode mudar e, entretanto, permanecer basicamente o mesmo. Neste caso, recorreremos ao conceito de *estado*, que desempenha papel importante na física, sobretudo em assuntos ligados à causalidade.

Muitos físicos, independentemente das suas posições filosóficas, entendem pelo princípio ou lei da causalidade, na física, uma proposição referente a uma conexão necessária entre determinado estado de sistema (um sistema isolado pode ser uma única partícula), em um momento inicial do tempo, e seu estado em qualquer outro momento sucessivo de tempo.

Do ponto de vista de que é possível deduzir o estado futuro de um sistema a partir do seu estado em um tempo dado e sob certas influências, o princípio da causalidade é válido também na mecânica quântica. Nela o valor, tanto inicial como em qualquer outro momento do tempo, do estado de um sistema é caracterizado por uma função de onda Ψ a partir da equação (de onda) de Schrödinger $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$, onde \hat{H} é o operador hamiltoniano.

Portanto, o físico entende a causalidade com uma relação entre estados diversos do mesmo objeto ou de um sistema de objetos, em diferentes instantes do tempo, enquanto o leigo tende a pensar na causalidade simplesmente como uma relação entre objetos, também em diferentes instantes do tempo. Northrop exemplifica: no caso de “a pedra bateu na janela e quebrou (*causou* a quebra de) a vidraça”, *causa* aparece como “uma relação entre objetos, isto é, entre a pedra e a vidraça”. Ele continua: o cientista exprime o mesmo fato, de maneira diferente. “Ele descreve estes acontecimentos em termos do estado da pedra e da vidraça, no instante 1, quando pedra e vidraça estavam separadas uma da outra, e do estado deste sistema de dois objetos, em um instante ulterior 2, quando os dois acabam por colidir”¹⁰⁵.

¹⁰⁵ Northrop, F.S. Introdução aos problemas da filosofia natural. IN Heisenberg, W. *Física e filosofia*, p.136.

De fato, para compreendermos o que diz a mecânica quântica sobre o conceito de causalidade, devemos considerar a função de estado (que define o estado do sistema físico em um instante 1) e a equação temporal de Schrödinger, transcrita acima (que relaciona o estado de um sistema físico, no instante t_1 , ao seu outro estado em um tempo ulterior 2).

Não podemos concordar com aquela interpretação da causalidade que cumpre a função de outras categorias referentes a aspectos da conexão universal. O princípio da causalidade consiste apenas no seguinte: sob determinadas condições, um fenômeno (causa) gera outro fenômeno (efeito). No caso da relação causal entre dois fenômenos nós ignoramos sua conexão com a totalidade do mundo e os consideramos independentemente dela. Em consequência, a infinita diversidade das conexões necessárias não pode ser reduzida à conexão causal, à conexão entre causa e efeito.

Na mecânica clássica, tanto no caso do movimento retilíneo uniforme como no caso do movimento não uniforme, o estado inicial permite se calcule a posição e a velocidade da partícula em qualquer outro momento do tempo. No movimento retilíneo uniforme a mudança de posição de uma partícula em certo momento do tempo não é resultado da ação de uma força, e, neste caso, a primeira lei de Newton expressa diretamente a conexão entre os fenômenos, tornando possível, uma vez conhecidas a posição e a velocidade iniciais de uma partícula, calcular sua posição em qualquer outro momento. Já no movimento não uniforme, a mudança na velocidade de uma partícula em movimento resulta da ação de uma força que funciona aqui como a causa; ou seja, a segunda lei de Newton expressa esta conexão causal. Todavia, o estado de movimento de uma partícula em certo momento do tempo não é uma causa do seu estado em outro momento, subsequente, do tempo. Se o estado inicial permite que se calcule a posição e a velocidade da partícula em qualquer outro momento do tempo, esta circunstância evidencia apenas que o estado de movimento da partícula em um dado momento e seu estado em qualquer outro momento estão necessariamente conectados um com o outro, conexão que é um padrão regular dos fenômenos de movimento, estudados pela mecânica clássica, e enunciada na leis de Newton.

O problema da causalidade e do determinismo é resolvido de maneira similar na mecânica quântica. Se o valor da função de onda em certo momento do tempo pode

ser calculado a partir do seu valor no momento inicial, isto quer dizer apenas que a conexão estabelecida pela mecânica quântica entre os valores da função de onda em diferentes momentos do tempo é uma regularidade da mecânica quântica, e esta regularidade se expressa pela equação de onda - equação de Schrödinger.

A mecânica quântica se parece, assim, com a clássica no sentido de ambas determinarem de maneira não ambígua a conexão entre um estado no tempo t_0 e um estado no tempo t . Contudo, a natureza, o tipo da conexão entre os dois estados difere fundamentalmente na mecânica clássica e na mecânica quântica.

As conexões entre os estados de uma partícula em dois diferentes momentos do tempo, consideradas pela mecânica clássica, guardam semelhanças com as conexões dos estados, digamos, de um campo magnético, ao qual a teoria de Maxwell se aplica. Neste caso, o valor das quantidades que descrevem o estado de um objeto em qualquer momento do tempo pode ser calculado a partir dos valores das quantidades que descrevem seu estado em um momento inicial. Este aspecto comum entre as conexões mencionadas existe independentemente da diferença entre as leis de Newton e as equações de Maxwell e a despeito de os estados de um campo eletromagnético serem caracterizados por quantidades outras que não posição e momento. Tais conexões têm alguma relação com regularidade dinâmica e muitos autores acreditam que a regularidade dinâmica seja a única representativa do determinismo e da causalidade na física.

Ao nível da física newtoniana, desde que se conheça a força que age sobre o corpo, as coordenadas e a velocidade do seu movimento em um dado instante, pode-se determinar suas coordenadas e sua velocidade em qualquer outro momento do futuro.

“Mas se esta concepção de laço de causa e efeito é aceitável, em certa medida, para explicar os fenômenos do movimento mecânico simples em que a mudança do estado de um sistema isolado não está ligada à mudança da sua qualidade, ela é absolutamente inaceitável para explicar os fenômenos de outras formas, mais complexas, de movimento, cujo aparecimento está ligado a certas mudanças qualitativas condicionadas não tanto pela ação de

forças exteriores, como pela interação no interior do objeto”¹⁰⁶.

Hegel foi o primeiro a recusar a concepção metafísica de causalidade, mostrando que este tipo de aproximação da relação causa/efeito conduz necessariamente a um “infinito errôneo”: cada fenômeno que desempenha o papel de causa e efeito tem, por sua vez, sua causa em outros fenômenos. Hegel propôs uma solução dialética ao problema e graças a esta solução - da interação dialética entre causa e efeito -, quando se dá o conhecimento do fenômeno, não há a necessidade de considerar um número infinito de outros problemas que se unem a ele; é suficiente estudar sua interação. Conhecendo-a, conhecemos a causa e, ao mesmo tempo, a natureza dos dois fenômenos.

Assim como na concepção hegeliana da causalidade, na concepção materialista dialética não são negadas as ações exteriores e suas possibilidades de acarretar mudanças correspondentes nos fenômenos submetidos a estas ações. Entretanto, estas concepções não reduzem a causa do aparecimento e da existência de fenômenos às ações exteriores que eles sofrem.

“Se partimos da definição da causa como um fenômeno que engendra um outro fenômeno, engendrado pelo primeiro, chegamos inevitavelmente à negação da existência das causas internas e do laço de causa e efeito entre os aspectos internos e externos de uma coisa, entre a essência e o fenômeno”¹⁰⁷.

Na mecânica quântica, o tipo de conexão entre os valores do estado de uma partícula no tempo difere em princípio daquele da física clássica. A função de onda, que descreve o estado de uma partícula, descreve não a partícula “em si mesma” e, sim, as possibilidades potenciais da sua interação com instrumentos, isto é, a definição da função de onda no seu momento inicial do tempo torna possível obter probabilidades de

¹⁰⁶ Cheptulin, A. *A dialética materialista*. Categorias e leis da dialética. São Paulo, Alfa-Omega, 1982; p.228

¹⁰⁷ Cheptulin, A. *op. cit.*, p. 230.

resultados de mensurações de cada quantidade, mensurações que podem ser feitas de uma partícula em um dado estado.

Segundo Omelyanovsky, podemos concluir que

“a função de onda determina as probabilidades e, ao mesmo tempo, satisfaz à equação de Schrödinger; isto quer dizer que existe uma conexão interna necessária na mecânica quântica entre sua probabilidade (estatística) e as regularidades dinâmicas”¹⁰⁸.

As conexões entre as quantidades da mecânica quântica relacionadas à variação de tempo de um estado não têm, portanto, somente uma regularidade dinâmica.

“Este é o novo feitio das leis estatísticas (probabilidade) da mecânica quântica. Suas leis combinam inseparavelmente os aspectos estatísticos e dinâmicos do mecanismo dos fenômenos atômicos”¹⁰⁹.

Como toda teoria científica, a mecânica quântica, de acordo com o que acabamos de expor, é determinista.

Langevin criticou a suposta “falência do determinismo” e sua crítica encontrou eco, segundo Freire Jr., entre elaboradores da teoria quântica, como Bohr, que sempre se referia à quebra da “causalidade clássica”. Após a exposição de Langevin no Encontro Internacional sobre Filosofia da Ciência, realizado em Varsóvia no ano de 1938, Bohr pronunciou a seguinte palavra:

“Quero, para evitar todo mal-entendido sobre o significado da palavra ‘indeterminismo’, lembrar que nos efeitos quânticos nós não tratamos com um comportamento independente dos objetos, mas que fenômenos observáveis dependem essencialmente da

¹⁰⁸ Omelyanovsky, M.E. *op. cit.*, p. 153.

¹⁰⁹ *Idem, ibidem.*

interação desses objetos com os instrumentos de medida que fixam as condições da experiência. Por esta razão, nós nos encontramos atualmente numa situação completamente nova na física, em que as concepções tradicionais de determinismo ou indeterminismo não são aplicáveis univocamente. É realmente maravilhoso que apesar dessa situação possamos, com auxílio de abstrações matemáticas, pôr ordem em um domínio tão vasto e tão rico de experiências, de uma maneira inteiramente racional, excluindo todo misticismo”¹¹⁰

Bohr ficou, com certeza, impressionado pelas palavras de Langevin. Na sua crítica à pretensa “falência do determinismo”, Langevin não buscava recuperar o mecanicismo clássico, mas superar a interpretação da nova física nos moldes do mecanicismo clássico. Ele já havia apresentado, três anos depois do Congresso Solvay, de 1927, seu pensamento a esse respeito: *não é o determinismo que está em crise, mas o mecanicismo*¹¹¹.

Langevin, portanto, rejeita a tese de que a teoria quântica elimina o determinismo. Para ele o “princípio da indeterminação” de Heisenberg é determinado pela própria constante de Planck. Langevin

“faz a defesa da descrição probabilística como uma forma mais desenvolvida de determinismo”¹¹².

Um aspecto típico do estado quântico - sua diferença radical do estado clássico - expressa-se, assim, no “princípio da indeterminação”, que estabelece uma relação entre o momento quântico e a posição quântica. Esta relação é uma lei fundamental da mecânica quântica e, como toda proposição física fundamental, tem

¹¹⁰ Bohr, 1938, IN Langevin, 1939, p.246; apud Freire Jr., O., *op. cit.*, p.77.

¹¹¹ Langevin, Paul. La physique moderne et le déterminisme. *La Pensée*, n.1, 1939.

¹¹² Freire Jr., O., *op. cit.*, p. 75.

grande valor heurístico. Assim, por exemplo, foi possível estabelecer, graças a ela, que não há elétrons no núcleo atômico, e que as partículas não estão em estado de repouso a uma temperatura de zero absoluto. Certos físicos e filósofos, identificando o princípio da causalidade com o determinismo mecanicista (dito laplaceano, que permite, a partir do conhecimento da velocidade e da posição de um objeto, em um momento dado, calcular sua posição e sua velocidade em um outro momento), deduziram, da relação de indeterminismo, a impossibilidade de se aplicar o princípio da causalidade ao micromundo.

Ora, a impossibilidade de se aplicar o determinismo mecanicista aos microfenômenos decorre das relações de incerteza e não significa que o princípio da causalidade tenha falhado:

“Nada há de espantoso nisso, porque os microcorpos, suas propriedades, suas relações, seu movimento, são diferentes dos corpos que a mecânica clássica estuda, suas propriedades, suas relações e seu movimento. Não há razão alguma para pensar que as relações causais dos microfenômenos poderiam ter sido expressas em termos do determinismo mecanicista /.../ A mecânica quântica descobriu a natureza particular qualitativamente diferente dos laços de causalidade dos microfenômenos”¹¹³.

A própria relação entre o momento e a posição quânticos, ou seja, “o princípio da incerteza”, confirma, como defende Langevin, o determinismo. A mecânica quântica, sob esta óptica, é uma teoria determinista, porém este determinismo não é idêntico ao laplaceano, ou, em geral, ao determinismo da física clássica.

O “princípio da incerteza”, portanto, por trazer à luz o conteúdo do conceito de estado quântico, coloca a questão da natureza estatística das leis físicas e a natureza da probabilidade, na física, em um nível muito mais profundo do que estavam colocadas

¹¹³ Fataliev, K. *O materialismo dialético e as ciências da natureza* (trad.). Rio, Zahar, 1966, p.111,112.

e resolvidas na física clássica. Na mecânica quântica, possibilidade, probabilidade e acaso estão incluídos na categoria de lei fundamental, e se tornam integralmente entrelaçados, como vimos, com outros conceitos, como o de necessidade, regularidade e realidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação é bastante introdutória. É um primeiro esforço nosso de circunscrever e relacionar determinados tópicos, considerados filosoficamente sugestivos ou polêmicos, da teoria física moderna, no cruzar das leituras, às vezes profundamente diferenciadas, que se fazem a seu respeito, não menos hoje do que nas décadas iniciais do século em que vivemos.

Não é possível compreender verdadeiramente a física do século XX e suas ressonâncias filosóficas sem antes apreciar, mesmo que em largo vôo, até que ponto e em que sentido diferem seus conceitos básicos (espaço, tempo, matéria, movimento, causalidade) dos conceitos homônimos da física precedente. Daí as primeiras páginas do trabalho.

Os dois capítulos centrais entram mais diretamente na polêmica. Aproximam-se do cenário. Gostaríamos que fossem entendidos como uma unidade. A ênfase do primeiro capítulo é sobre alguns enfoques conflitantes, alguns modos descontraídos de conceituar, de conhecer os novos avanços da física atual e suas tendências., A ênfase do segundo é sobre os problemas mesmos a que os enfoques se aplicam, a contraparte objetiva dos conceitos, das análises, das interpretações.

No capítulo primeiro aludimos a como Bohr, Einstein, Heisenberg e Langevin vêem a teoria quântica (ou a física do descontínuo), seus limites, seu formalismo, a questão da dualidade onda-partícula, a questão da incerteza e da incontrollabilidade em princípio. Tomamos como fio condutor e ponto de referência a “interpretação de Copenhague”, na medida em que com ela se identificam ou dela se afastam pouco a pouco, em direções diferentes, os mais importantes expositores da nova teoria.

O capítulo segundo detém-se um pouco mais na questão da realidade física, na questão do espaço-tempo, na questão do determinismo. São temas que se entrelaçam e mesmo se implicam.

O aparecimento, na física, dos *campos* eletromagnéticos abalou a concepção mecânica, newtoniana, de *corpo*. Agora, o microobjeto não é um ponto material, dotado de localização em um espaço vazio: a quantidade de movimento pertence ao conjunto do corpúsculo e do campo de onda do qual é inseparável, assim como o oceano e as vagas que se formam, se agitam e se resolvem no seu seio.

Matéria e campo são noções relativas. O campo tem propriedades físicas objetivas a mesmo título que as partículas (termo este, aliás, que, por evocar a imagem mecânica da bola de bilhar compacta se deslocando no vazio - a imagem do átomo epicurista - não é mais adequado).

Semelhantemente, provado que a velocidade da propagação das oscilações eletromagnéticas é idêntica à velocidade da luz, sobrevém a revolução dos conceitos tradicionais do *espaço* e do *tempo*, que deixam de ser sistemas de coordenadas

imutáveis, deixam de ser continentes absolutos dos corpos, da matéria, para serem formas da existência da matéria.

Por fim, a descoberta do caráter finito da ação complica a aplicação dos conceitos newtonianos ao *movimento*. A mecânica clássica trata de posições e velocidades que podem tomar, independentemente, valores quaisquer, variar de matéria contínua; ao passo que a mecânica quântica trata de posições e velocidades cujos valores não podem ser quais quer, mas variam de maneira descontínua, em relação com a constante de Planck. São relativizados, contextualizados os conceitos mecânicos de ponto material e de trajetória contínua: a quantidade de movimento, a energia, se comunica de maneira descontínua, através de *quanta*.

Para os conjuntos microscópicos não existem estados que comportem simultaneamente um valor determinado de coordenadas e um valor determinado da impulsão. É esta propriedade física dos conjuntos quânticos, em oposição aos conjuntos mecânicos, que exprime a relação da *indeterminação*, de Heisenberg. Esta relação é uma lei física: expressa uma qualidade objetiva da matéria.

Destas propriedades objetivas da matéria resulta que nossos procedimentos de medida se tornam mais complexos. Entretanto, a relação de indeterminação não introduz nenhuma “indeterminação” do conhecimento. Ela nos dá um conhecimento perfeitamente determinado de certas propriedades da matéria. Não é a natureza que se revela caprichosa em suas respostas: as questões é que não estavam tão bem colocadas.

A Escola de Copenhagen pretende assimilar a relação de indeterminação a uma doutrina filosófica agnóstica, fundada sobre o “princípio da complementaridade”. Quando, em razão da ação do instrumento sobre o objeto observado, a utilização de uma noção clássica exclui a outra, Bohr diz que estas noções são complementares. Para ele, o fundamental não são as propriedades físicas, objetivas, do microobjeto - que trazem a consequência de não poderem ser estudadas pelos métodos da física clássica -, mas as possibilidades do observador que opera com conceitos mais adequados ao estudo do mundo macroscópico.

Esta posição filosófica não é imposta pelos resultados da mecânica quântica. Deriva de um *a priori* idealista, em função do qual as leis quânticas perdem seu caráter objetivo e se tornam decorrências do modo como o homem percebe os fenômenos do mundo microscópico.

Em presença dos aspectos contraditórios dos fenômenos, o princípio da complementaridade afirma que ambos os aspectos são legítimos, um e outro, pois igualmente determinados pelo tipo de aparelho de medida. Como já não se fala em objeto, mas em objeto exercendo certa ação sobre o aparelho de medida, conclui-se que o estado do microobjeto não existe externamente ao aparelho, mas é criado por ele. O objeto da física deixa de ser a realidade objetiva mesma para ser o conjunto dos resultados das medidas.

Nosso texto denuncia esta lógica grosseira. Se é verdade que os meios de medir, atualmente empregados, exercem certa influência sobre o comportamento do microobjeto, isto não implica evidentemente que o objeto seja engendrado pelo aparelho de medir, ou não exista independentemente de nós; seria confundir a questão da existência objetiva da realidade com a questão da expressão desta realidade nos dados macroscópicos da experiência.

A raiz gnosiológica desta interpretação é a recusa em admitir que a contradição existe na realidade mesma, que os objetos microscópicos podem possuir propriedades contraditórias

Assim, a física do século XX revê profundamente e substitui as representações físicas estabelecidas até o século XIX, mas, de modo nenhum exige uma revisão da tese fundamental do materialismo dialético, a saber, que existe, independentemente da física e das imagens sucessivas que ela nos oferece do mundo, uma realidade objetiva, refletida mais, ou menos, exatamente pelas representações que se fazem dela. Tais representações são etapas historicamente determinadas do conhecimento do mundo objetivo.

Entendemos que o conhecimento histórico da física, em particular dos seus momentos mais dinâmicos, de reorientação e crise, ajuda o estudante do assunto e o professor a terem um pensamento mais crítico, mais profundo, mais completo das possibilidades desta ciência: seus limites, seus compromissos, sua natureza, sua objetividade dialética.

SUMMARY

At first the text informs the reader about the crisis Physics has been facing in the 20th century, showing him that due to today's knowledge it is quite important to interpret the formalism roused by this science and mainly the fundamental characteristics in the philosophical field.

The first chapter gives the conceptions of science shared by physicists who played important roles in the revolution of physics in the 20th century and which approach ontological and gnosiological features. The second chapter analyses some topics of the new theories seeing that they seem to threaten a dialectical materialistic conception of Physics with which we identify. We believe the dialectical materialistic conception offers a better understanding of the new theories and the physical reality they describe and explain.

We also believe our study may bring some contribution to the teaching of modern Physics.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, B. & MÁXIMO, A. *Curso de física*. São Paulo: Harbra, 1986. 3v.
- ARISTÓTELES. *Aristotelis opera*. Berlim, Academia de Berlim, 1831-1870. v. I. e II.
- BOHR, N. A descrição da realidade física fornecida pela Mecânica Quântica pode ser considerada completa? *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, trad. portuguesa de Cláudio Weber Abramo, Campinas, v. 2, p. 97-106, 1981.
- _____. *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and human knowledge*. N.Y./ London, Interscience, 1963.
- BOHR, N., KRAMERS, H. A. & SLATER, J. C. The quantum theory of radiation. *Phil. Mag.*, v. 47, p. 785-802, 1924.
- BORN, M. *et al. Problemas da física moderna*. Tradução portuguesa de Geraldo Gerson de Souza. São Paulo, Perspectiva, 1969.
- BROWN, H. R. O debate Einstein-Bohr sobre a mecânica quântica. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*. Tradução portuguesa: Cláudio Weber Abramo. Campinas, v. 2, p. 51-89, 1981.
- ČAPEK, M. *El impacto filosófico de la física contemporánea*. Tradução espanhola de Eduardo Gallardo Ruiz. Madrid, Tecnos, 1965.
- CHEPTULIN, A. *A dialética materialista : categorias e leis da dialética*. Tradução portuguesa de Leda Rita Cintra Ferraz. São Paulo: Alfa-Ômega, 1982.
- COPÉRNICO, N. *Des révolutions des orbés célestes*. Tradução francesa de A. Koyré. Paris: Blanchard, 1970.
- DESCARTES, R. *Princípios de filosofia. Oeuvres philosophiques*. Paris, Garnier Fieres, 1973.
- EINSTEIN, A. Paul Langevin. *La Pensée*, v. 12, p. 13, 14, juin/1947.
- _____. *Quanten-Mechanik und Wirklichkeit*. *Dialectica*, v. 2, 1948.
- EINSTEIN, A. & INFELD, L. *A revolução da física*. Tradução portuguesa de Giasone Rebuá. 3. ed., Rio de Janeiro: Zahar, 1976.
- EINSTEIN, A., PODOLSKY, B. & ROSEN, N. A descrição da realidade física fornecida pela Mecânica Quântica pode ser considerada completa? *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*. Tradução portuguesa de Cláudio Weber Abramo. Campinas, v. 2, p. 90-92, 1981.

- ENGELS, F. *A dialética da natureza*. 3. ed., Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1979. 228p. (Coleção Pensamento Crítico, v. 8)
- FATALIEV, K. *O materialismo dialético e as ciências da natureza*. Tradução portuguesa de Constantino Paleologo. Rio de Janeiro: Zahar, 1966. 164p.
- FREIRE JR., O. *Estudo sobre interpretações (1927-1949) da teoria quântica: epistemologia e física*. Dissertação de Mestrado - Instituto de Física/Faculdade de Educação, Universidade Estadual de São Paulo (USP), 1990.
- GALILEI, G. *Le opere di Galileo Galilei*. Firenze, Edizione Nazionale, 1890-1909 ; reimpr. 1929-1939. v. IV, V, VI, VII, VIII e XVIII.
- HEISENBERG, W. *Física e filosofia*. Tradução portuguesa de Jorge Leal Ferreira. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 1981.
- KOPNIN, P. V. *A dialética como lógica e teoria do conhecimento*. Tradução portuguesa de Paulo Bezerra. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1978, 354p (Coleção Perspectivas do Homem, v. 12).
- KOYRÉ, A. *Études galiléennes*. Paris: Hermann, 1966.
- LANGEVIN, P. La physique moderne et le déterminisme. *La Pensée*, n.1, 1939.
- LAPLACE, P. S. *Théorie analytique des probabilités*. Paris, 1820.
- LENIN, V. I. *Obras completas*. Moscou/Lisboa: Ed. Progresso/ Ed. Avante! 1983 v. 18.
- LOCKE. *Ensaio acerca do entendimento humano*. IN Os Pensadores. Locke, Tradução de Anwar Aiex. 2. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1978
- MINKOWSKI, H. Raum und Zeit. *Physikalische Zeitschrift*, 10, 3, 1909.
- NEWTON. *Principia. Principios matemáticos de filosofia natural*. Tradução de Trieste Ricci et al. São Paulo: Nova Stella/EDUSP, 1990.
- _____ *Óptica. Tratado sobre a reflexão e a cor da luz*. IN Os Pensadores: Newton \ Leibniz (I). Tradução de Pablo Rubén Mariconda. São Paulo: Abril Cultural, 1979.
- OMELYANOSKY, M. E. *Dialectics in modern physics*. Moscou: Progress Publisher, 1979.
- POINCARÉ, H. *The foundations of science*. e. ed. Lancaster: Tje Science Press, 1946.
- REALE, G. & ANTISERI, D. *História da filosofia*. São Paulo: Paulinas, 1990. 3v.
- RUSSEL, B. Les axiomes propres à Euclide sont-ils empiriques? *Revue de metaphysique et de morale*. v. VI, 1898.

SCHILPP, P. A. (org.) *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. 3. ed. La Salle, Open Court and Cambridgr Univ., 1970.



SCHILPP, P. A. (org.) *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. 3. ed. La Salle, Open Court and Cambridge Univ., 1970.