

TÍTULO DO TRABALHO			
LUTAS E RESISTÊNCIAS NA TEORIA DOS QUANTA: A BARREIRA REALISTA CONTRA A MARÉ IDEALISTA			
AUTOR	INSTITUIÇÃO (POR EXTENSO)	Sigla	Vínculo
Natan Luis da S. Oliveira	Universidade Federal Fluminense	UFF	Graduando
RESUMO (ATÉ 150 PALAVRAS)			
<p>Ao contrário do que se possa imaginar, a ciência – e em particular, a física – não se desenvolve isenta de controvérsias. Mais do que isso, estas controvérsias podem ter um longo tempo de existência. Tudo indica que este foi o caso com a controvérsia dos quanta. Controvérsia que se revelou fecunda neste caso por atrair a atenção tanto de físicos quanto de filósofos justamente pelas implicações filosóficas que tal teoria possibilita. Estas implicações atravessam o debate de interpretações da teoria quântica. Ao analisá-lo, percebemos que as teorias científicas são marcadas por diversas correntes teóricas de cunho realista e idealista. Para compreendê-las, é preciso recuperar a centralidade da ontologia nos debates da filosofia da ciência. Portanto, ao discutir o significado teórico e tecnológico destas interpretações no marco da ciência e da ontologia, podemos tematizar a relevância da imagem científica de mundo no contexto de possibilidades emancipatórias.</p>			
PALAVRAS-CHAVE (ATÉ 3)			
Ontologia, Teoria Quântica, Realismo.			
ABSTRACT (ATÉ 150 PALAVRAS)			
<p>Unlike imaginable, science - and in particular, the physical - does not develop free of controversy. More than that, these controversies can have a long time of existence. All indications are that this was the case with the controversy of quanta. Controversy that has proved fruitful in this case to attract the attention of both physical and philosophers precisely by philosophical implications that such a theory allows. These implications go through the interpretations of discussion of quantum theory. To analyze it, we realize that scientific theories are marked by different theoretical currents of realistic and idealistic nature. To understand them, we must recover the centrality of ontology in discussions of philosophy of science. Therefore, when discussing the theoretical and technological significance of these interpretations within the framework of science and ontology, we can thematize the relevance of the scientific world picture in the context of emancipatory possibilities.</p>			
KEYWORDS (ATÉ 3)			
Ontology, Quantum Theory, Realism.			
EIXO TEMÁTICO			
Ciência, Filosofia e ideologia: estranhamento ou emancipação.			

LUTAS E RESISTÊNCIAS NA TEORIA DOS QUANTA: A BARREIRA REALISTA CONTRA A MARÉ IDEALISTA

Natan Oliveira¹

Posso dizer seguramente que ninguém entende a mecânica quântica
Richard Feynman

1. Introdução

No dia 05 de abril deste ano foi anunciada a volta do funcionamento do maior acelerador de partículas do mundo. O mais potente laboratório da física, o Grande Colisor de Hádrões (em inglês: Large Hadron Collider, LHC) teve sua operação retomada após dois anos desligado para manutenção. Localizado na fronteira entre a França e a Suíça, o LHC encontra-se em um túnel de aproximadamente 27 km de circunferência a 175 metros da superfície terrestre. O CERN, Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear, responsável pelas atividades do LHC tem como objetivo para os anos seguintes atingir a faixa de energia em torno de 14 teraelétrons-volt (TeV), superando a marca inicial de 8 TeV². Acredita-se que atingindo esse nível de energia seja possível simular as condições do Universo primitivo, testando as hipóteses atuais sobre a origem e constituição da matéria e energia do Universo. São diversas as teorias e hipóteses que se pretende comprovar com o auxílio do LHC, assim como aconteceu em 2012 na ocasião da verificação experimental do Bóson de Higgs³, corroborando o principal modelo teórico que abarca as propriedades e interação dos constituintes elementares da matéria, a saber, o modelo padrão de física de partículas.

Aqueles que acompanharam estes resultados sabem que muitas novidades no cenário atual da física podem surgir. A imprensa internacional e nacional suscitam curiosidades sobre alguns tópicos deste cenário, tratando inclusive de divulgar alguns destes resultados. Não são tão desconhecidas ideias sobre dimensões extras, matéria e energia escuras, anti-matéria, universos paralelos e outras ideias pouco convencionais que o desenvolvimento recente da especulação teórica em física nos revelou. Além disso, tais ideias são objetos de filmes de ficção científica, de documentários e mesmo de livros de divulgação científica. Igualmente relevantes são as inovações tecnológicas que foram tornadas possíveis a partir da pesquisa e trabalho de diversos cientistas e engenheiros na colaboração tanto para a montagem dos dispositivos do LHC quanto dos produtos que foram construídos após sua operação. Desenvolvimentos tecnológicos em equipamentos de

¹ Graduando em Física (bacharelado) pela Universidade Federal Fluminense. E-mail: oliveira.natan93@gmail.com

² O *elétron-volt* (eV) é uma unidade de medida de energia. Equivale aproximadamente $1,6 \times 10^{-19}$ J. $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$.

³ O bóson de Higgs é uma partícula prevista pelas teorias recentes da física, que tem papel importante no quadro de interações destas partículas, sobretudo, pelo mecanismo de geração de massa.

eletrônica e computação, novos tipos de materiais e outros aparelhos de alto nível são evidências atuais do grande potencial tecnológico proveniente, em grande parte, do acelerador de partículas. A maioria destes desenvolvimentos tecnológicos só foi possível graças ao avanço das teorias físicas ao longo do século passado. Muitas pessoas estão a par destas aplicações tecnológicas, inclusive ao fazerem uso delas, porém o que nem todas elas sabem é que mesmo com todas estas aplicações tecnológicas bem-sucedidas, há aspectos quanto ao campo de significação destas mesmas teorias físicas que não foram ainda decisivamente concluídos.

2. Física e filosofia – questão de fundamentos

Talvez seja surpreendente perceber, ao contrário do que se imagina, que a ciência – em particular, a física – não se desenvolve isenta de controvérsias. E mais ainda: estas controvérsias podem não ter um tempo curto de existência. Tudo indica que este é o caso com a controvérsia que teve sua origem com o próprio surgimento da *teoria dos quanta*⁴. As controvérsias científicas são particularmente interessantes não apenas porque promovem o debate conceitual próprio daquela ciência em questão, mas pela possibilidade de suscitar intrigantes questões de natureza filosófica. A *controvérsia dos quanta* é fecunda neste caso e atraiu atenção tanto de físicos e filósofos justamente por esta combinação.

De início, alguns críticos no interior da controvérsia dos *quanta* consideravam tal debate com um caráter mais filosófico do que propriamente científico. Contudo, em meados da década de 50 os protagonistas da controvérsia passaram a considerar relevante esclarecê-la e não mais a percebiam como uma “controvérsia filosófica”. Consideravam, portanto, que a controvérsia dos *quanta* era uma *controvérsia científica com implicações filosóficas*. A partir da década de 70 aos dias atuais, o debate acerca dos *fundamentos da teoria quântica* adquiriu legitimidade no interior da física e a comunidade científica o reconhece como uma controvérsia científica, de tal modo que este reconhecimento implicou na institucionalização da área de fundamentos da teoria quântica assim como houve a criação de revistas científicas a fim de reunir trabalhos e intervenções neste debate⁵.

Por ser rica e interdisciplinar a área de fundamentos da teoria quântica atrai a presença de físicos profissionais como também de historiadores e filósofos da ciência. Consideramos a pesquisa em fundamentos como aquela que se debruça sobre os princípios das teorias físicas gerais, sendo estes de natureza lógica, matemática, filosófica e/ou conceitual, cujos testes em experimentos são

⁴ Esclareceremos que é a *teoria dos quanta* na quarta seção.

⁵ Seguimos a indicação feita por Freire Jr (2003). A institucionalização da controvérsia se deu, em boa medida, pela possibilidade de realizar experimentos para testar as hipóteses em jogo.

possíveis em alguns casos. As teorias físicas podem ser vistas como tendo, ao menos, dois componentes distintos que estão frequentemente emaranhados na prática, mas conceitualmente podem ser distinguidos: o *formalismo* e a *interpretação*. Podemos assinalar:

[O] formalismo significa um conjunto de equações e um conjunto de regras de cálculo para fazer previsões que possam ser comparadas com experimentos. (...) A interpretação (física) refere-se ao que a teoria nos conta a respeito da estrutura subjacente a esses fenômenos (ou seja, a estória correspondente à “móbia” do mundo – uma ontologia). Assim *um* formalismo com *duas* interpretações conta como duas teorias diferentes. (Cushing, 2000, p.5)

A partir desta classificação, podemos notar que uma controvérsia científica significa uma disputa de significação a partir de interpretações diferentes. Como Cushing destaca, pode-se até mesmo dizer que são teorias distintas em disputa. Disputa pelo mobiliário do mundo e de seu significado. O problema em debate, portanto, não é apenas epistemológico, é *ontológico*.

Sem dúvidas, a física “não exclui o conceito de realidade, mas o restringe ao nível físico, deixando às outras ciências a tarefa de investigar outros níveis – em particular o da experiência humana” (Bunge, 2012, p. 15). As teorias físicas versam sobre sistemas físicos, isto é, o referente de qualquer ideia física é um *objeto real*. No entanto, após décadas de uma suposta neutralidade axiológica na ciência, considerou-se que esta “estaria livre de qualquer tematização do ser (do mundo), em total conformidade, portanto, com a interdição positivista da metafísica (ontologia)”. Equivalendo a dizer – sob este prisma - que a ciência “como simples instrumento da prática, não integra o sistema de crenças por meio do qual os sujeitos significam o mundo – e necessariamente tem de fazê-lo” (Duayer, 2010, p.4). Assim, a ciência torna-se *mero instrumento da prática* e o significado diz respeito a outras esferas. Nesta mesma concepção, que ainda desfruta de uma hegemonia em alguns campos, os conceitos que não são provenientes da observação são vistos como meros auxiliares desprovidos de referências ou como construtos que não se refeririam a objetos reais, quando imperceptíveis – como os do elétron, quarks e campo.

Se esta filosofia da ciência pragmática (convencionalismo, instrumentalismo e operacionalismo)⁶ for adotada, a “maioria dos referentes da teoria física são postos de lado e ficamos apenas com cálculos vazios. Pois, o que caracteriza uma teoria física por contraste a uma teoria puramente matemática, é que a primeira diz respeito – certa ou erradamente – a sistemas físicos. Se uma teoria não versa sobre uma classe de sistemas físicos, então ela não se qualifica como uma teoria física” (Bunge, 2012, p.19).

⁶ Estas filosofias têm em comum a associação a uma *prática imediata*, da qual uma ontologia empirista é o quadro de significação. Para acompanhar o argumento, ver Duayer (2010) e Bhaskar (1997).

Como tais doutrinas podem prevalecer nas concepções subjacentes dos físicos se ela mesma não se enquadra com a prática destes? Pois, de fato, os teóricos pretendem que suas teorias sejam verdadeiras, e para isto, é preciso o referente – o mundo objetivo - para que se possa atestar a veracidade das hipóteses e teoremas. A circularidade social destas concepções requer, portanto, uma análise e uma explicação tal que não dispomos de espaço para fazê-la aqui.

Atualmente, ainda é possível notar uma desqualificação apressada da filosofia e de sua relevância por parte de alguns físicos, uma vez que a consideram irrelevantes em sua prática científica⁷. Apesar de um notável progresso, o *empirismo* subjacente a determinadas concepções que estes físicos sustentam ainda não foi integralmente superado. Inúmeras análises filosóficas da física são insatisfatórias em determinados pontos e a análise das teorias físicas é um campo adequado à cooperação entre físicos e filósofos, porém muitos ainda insistem que é desnecessária esta aproximação e, por vezes, julgam quase impossível visto o grau de sofisticação matemático no qual se encontram as teorias físicas contemporâneas. Porém, aqui pensamos ser a interação entre estas disciplinas uma tarefa posta pela controvérsia da teoria quântica. Uma das tarefas da filosofia é examinar a natureza das teorias científicas e a teoria dos *quanta* é uma das mais bem sucedidas. É preciso, portanto, alguma consideração sobre filosofia da ciência contemporânea que ilumine a atual situação e possibilite a superação dos obstáculos ao progresso científico. Esta tarefa requer por um lado, um conhecimento substantivo da física; e de outro, uma clara consciência ontológica.

3. Em defesa da ontologia

Ao contrário daqueles que pensam que a filosofia nada mais tem a dizer de significativo às ciências, pensamos que a reflexão crítica e sistemática sobre o corpo teórico das teorias científicas é não só importante, como indispensável a uma prática científica mais ampla e coerente. A visão *instrumentalista* da ciência nos parece insustentável e incoerente, portanto, defenderemos outra concepção de ciência e de natureza para ser possível explicitar as linhas gerais no tocante aos fundamentos da teoria quântica.

Para tanto, é preciso *recuperar a centralidade da ontologia nos debates da filosofia da ciência*. Pretendemos, por conseguinte, apresentar brevemente a corrente teórica conhecida como *realismo crítico*, surgida na Inglaterra e desenvolvida principalmente por Bhaskar. O realismo crítico ou realismo transcendental é uma proposta de crítica de diversas concepções da filosofia da

⁷ Curioso notar, neste caso, que todos os proeminentes físicos, fundadores da teoria dos *quanta*, reconheceram a importância e relevância da filosofia em seus trabalhos científicos. Mas, ainda há hoje, aqueles que insistem em desprezá-la.

ciência contemporânea e seu arcabouço teórico oferece um interessante resgate da ontologia ao interior da cientificidade, sem debandar no relativismo ou pragmatismo.

Bhaskar começa sua argumentação constatando a existência da ciência. Dado que a ciência existe e é bastante razoável admitir sua existência, ele se interroga pelas condições indispensáveis no qual o mundo deve ser constituído de modo que a ciência seja possível. A esta interrogação, que ele denomina *questão transcendental*⁸, segue-se a construção de seu aparato conceitual. Antes disso, contudo, precisamos esclarecer duas características da atividade científica.

Em primeiro lugar, a ciência é uma *atividade social*, e que produz um conhecimento, que é ele mesmo um produto social como qualquer outro. Mas, por outro lado, os objetos a que se referem os conhecimentos produzidos pelos sujeitos não dependem – e nem poderiam – da atividade humana. Os conhecimentos da ciência sempre têm como material de partida o próprio conhecimento científico anterior - ou até mesmo pré-científico. O conhecimento, portanto, depende de antecedentes de tipo cognitivo.

A ciência não pode existir sem este material prévio que Bhaskar classifica como objetos *transitivos* do conhecimento. O conhecimento é conhecimento de coisas, objetos, processos que são essencialmente independentes da atividade humana e invariante ao nosso conhecimento deles. Os processos, eventos, estruturas reais, mecanismos e possibilidades do mundo; em sua maioria, completamente independentes de nós, Bhaskar denomina objetos *intransitivos* do conhecimento. É fácil imaginar “um mundo semelhante ao nosso, que contenha os mesmos objetos intransitivos do conhecimento científico, mas sem qualquer ciência para produzir conhecimento de tais objetos” (Bhaskar, 1997, p.22). Neste mundo, os processos e as legalidades hoje efetivamente descobertas possivelmente prevaleceriam e continuariam a existir⁹. Note que a maçã continuará caindo - desde que exista macieira fértil – caso exista um Newton para vê-la ou não, isto é, mesmo na ausência de sujeitos para conhecerem as razões de sua queda, é presumível aceitar que ela continua a cair pela lei da gravidade – que de fato, conhecemos.

Bhaskar conclui que uma ciência sem objetos transitivos não é possível de se imaginar, e em seguida, ele se questiona sobre a possibilidade de ciência sem objetos intransitivos. Seria possível imaginar uma ciência sem objetos intransitivos? Segue o comentário feito por Bhaskar:

⁸ É oportuno observar que transcendental aqui nada tem do sentido místico-religioso, trata-se apenas do procedimento crítico que se interroga pelas condições pressupostas para a existência efetiva de algo.

⁹ Pelos conhecimentos científicos atuais, foi justamente este o caso: até há mais de 4,5 bilhões de anos atrás nem sequer formas de vida existiram em nosso planeta, portanto, nenhuma forma de consciência científica. E é razoável acreditar que durante milhares de anos foram assim no Universo, mesmo se admitirmos a existência de vida (inteligente) fora de nosso planeta.

Caso a resposta seja “não”, um estudo filosófico dos objetos intransitivos da ciência torna-se possível. A resposta à questão transcendental “como deveria ser o mundo para que a ciência seja possível?” merece o nome de ontologia. E ao mostrar que os objetos da ciência são intransitivos (sob essa ótica) e de certo tipo – a saber, estruturas e não eventos – a minha intenção é prover a nova filosofia da ciência de uma ontologia. (Bhaskar, 1997, p. 23)

A filosofia da ciência adequada, portanto, tem que ser capaz de sustentar e reconciliar este duplo aspecto da ciência: seu *caráter social* e a *independência de seus objetos*. Para o realismo crítico, se “não houvesse nenhuma ciência, ainda assim haveria uma natureza, e é esta natureza que é investigada pela ciência. O que quer que seja descoberto na natureza tem de ser expresso em pensamento, mas as estruturas e constituições e leis causais descobertas na natureza não dependem do pensamento” (Bhaskar, 1997, p. 27). A posição filosófica de Bhaskar aqui apresentada não consiste em uma crença metafísica dogmática, ao contrário, é uma posição pressuposta por aspectos essenciais da atividade social da ciência. Ou seja, o realista crítico argumenta que, para a inteligibilidade da ciência, *é necessário admitir que a ordem descoberta na natureza seja independente da própria atividade humana*. Diferentemente da atitude realista, a postura idealista ao dizer “que a luz se propaga em linha reta deixa de ser então uma proposição sobre o mundo; em lugar disso, expressa uma proposição sobre o modo como os seres humanos entendem o mundo. A estrutura torna-se uma função das necessidades humanas; é-lhe negado um lugar no mundo das coisas” (Bhaskar, 1997, p.28).

Se a prática científica é informada por alguma concepção de mundo, a presença da ontologia¹⁰ nas teorias científicas torna-se um aspecto incontornável. A atividade teórica da ciência, por sua própria natureza, *expressa conteúdos ontológicos*. Toda explicação da ciência ou toda filosofia interessada em ciência, pressupõe uma *ontologia*, uma *interpretação do mundo*, dos objetos do mundo; isto significa dizer que em matéria de ciência, *não existe vácuo ontológico*. Aqueles que imaginam existir um vácuo, acabam por preenchê-lo com alguma ontologia implícita.

Segundo Bhaskar (1997) esta *ontologia implícita* é uma ontologia empirista baseada na categoria da *experiência sensível*, nos dados empíricos. É preciso reforçar que a ontologia não tem como objeto um mundo à parte da ciência, nem mesmo um mundo paralelo e místico-transcendental, mas ao contrário, trata-se exatamente do mundo possível de investigação pela ciência, apenas considerado por meio do argumento filosófico, isto é, indagando como o mundo tem

¹⁰ O termo ontologia carrega uma duplicidade semântica que parece ser interessante de se destacar. Simplificadamente, podemos dizer que, por vezes, refere-se ao quadro teórico-conceitual do sujeito cognoscente (a imagem de mundo pressuposta por práticas ou teorias), e em outros momentos, refere-se às propriedades gerais e objetivas do próprio mundo.

de ser para a ciência ser possível. Neste ponto, podemos perceber novamente como se estreitam a cooperação entre a filosofia (ontologia) e a ciência:

O estatuto de proposições na ontologia pode ser descrito então pela seguinte fórmula: não é necessário que a ciência ocorra. No entanto, dado que ocorre, é necessário que o mundo seja de certa forma. É contingente que o mundo é tal que a ciência é possível. E, dado que a ciência é possível, sua existência efetiva depende da satisfação de certas condições sociais. Porém, dado que a ciência ocorra ou pode ocorrer, o mundo *tem de* ser de certa forma. Desse modo, afirma o realista transcendental, o fato que o mundo é estruturado e diferenciado pode ser demonstrado por meio de um argumento filosófico; embora as estruturas particulares que contém e os modos pelos quais é diferenciado sejam assuntos para a investigação científica substantiva. (Bhaskar, 1997, p. 29)

A ontologia revela, por intermédio do argumento transcendental, as condições pressupostas para a existência da ciência, isto é, os *contornos gerais* próprios do mundo para que a ciência seja possível, e cabe às próprias ciências particulares - dentre elas, a física - descobrir quais são as estruturas e mecanismos constitutivos deste mundo - esboçado abstratamente pela ontologia. Enfatizamos, portanto, que não é “o fato de que a ciência ocorre que dá ao mundo uma estrutura tal que pode ser conhecido pelos homens. Ao contrário, é o fato de o mundo possuir tal estrutura que torna a ciência possível, independente desta ocorrer efetivamente ou não” (Bhaskar, 1997, p.30).

4. Luz, Quanta e Ação: desenvolvimentos teóricos

Podemos agora tratar dos principais aspectos que contribuíram para o surgimento, consolidação e desenvolvimento da teoria dos *quanta*. Será preciso apresentar¹¹ os eventos mais significativos que marcaram estes desenvolvimentos, portanto, será necessário regressarmos ao início do século XX, quando a teoria dos *quanta* tem seu início na história do pensamento físico. Naquele contexto, os físicos da época encontravam-se plenamente confiantes com o poder das teorias clássicas¹². É conhecido na história da física, o otimismo do físico William Thomson, o Lorde Kelvin, levando-o a considerar que a física teórica tinha apenas “duas nuvens” a se preocupar: os resultados negativos dos experimentos de Michelson-Morley na tentativa de detecção do éter eletromagnético e os problemas de radiação térmica, envolvendo corpo negro. Quanto à primeira nuvem, resultou no trabalho do físico Albert Einstein nas teorias da relatividade. A segunda nuvem será assunto de nosso trabalho agora e viria ser conhecida como teoria dos *quanta*.

Em 14 de dezembro de 1900, o físico alemão Max Planck apresenta um artigo à Academia de Ciências de Berlim, com a proposta de solucionar o problema da emissão e absorção da radiação

¹¹ Seguimos aqui, fundamentalmente, a exposição de Leite (2008), com as contribuições de Paty (1995), Bohm (2015) e Freire Jr (1999).

¹² Quando usarmos o termo “clássico” será em oposição a “quântico”.

térmica. Pois, no final do século XIX, a transmissão de calor passava a ser entendida como um processo de radiação, tal como a luz. Leis sobre o fenômeno da radiação que estavam sendo estabelecidas nesta época expressavam a seguinte relação: a natureza da radiação mudava conforme o corpo era aquecido a determinadas temperaturas. Por exemplo, um metal quando aquecido pode emitir radiação visível, sob a forma de luz vermelha, ou radiação invisível aos nossos olhos, como o infravermelho. A partir destes conhecimentos, o físico alemão Gustav Kirchhoff cunhou a expressão *corpo negro* para os corpos ideais com a propriedade de absorção total da radiação incidida sobre ele, de modo tal que nenhuma radiação fosse refletida. Um corpo negro, em equilíbrio termodinâmico, irradia energia na mesma taxa que a absorve, consistindo em um perfeito emissor e receptor de calor, a depender apenas da temperatura e não de sua composição.

Na prática, a construção aproximada de um corpo negro é possível através de cavidades com abertura muito pequenas, como as que se observa em fornos de indústria siderúrgica. Estes se tornaram assim a principal fonte de dados experimentais de radiação térmica, especialmente na análise do espectro da radiação. Contudo, os resultados experimentais disponíveis em 1890 revelavam inconsistência com as teorias clássicas desenvolvidas na época. As leis que descreviam a função entre a intensidade da radiação emitida por um corpo negro e a frequência para diferentes temperaturas mostraram-se em desacordo com os dados experimentais. Vejamos. A chamada lei de Wien concordava com os dados, apenas para altas frequências e a lei de Raleygh-Jeans concordava para baixas frequências, porém ambas não davam conta de todo o espectro. Na faixa das frequências mais altas, as previsões esperadas chocavam-se frontalmente com os resultados experimentais, pois, segundo estas previsões, uma quantidade infinita de energia deveria ser emitida. Fenômeno que ficou conhecido como *catástrofe ultravioleta*¹³.

Planck visando solucionar tais problemas elaborou uma expressão para melhorar a versão da lei de Wien, entretanto, apesar de adequada aos dados experimentais, era, para ele, insatisfatória do ponto de vista teórico. Foi quando ele expôs seu trabalho denominado “Sobre a lei da distribuição de energia do espectro normal” em dezembro de 1900, como mencionado anteriormente. Nele, Planck apresentou uma hipótese – contrária a toda a física da época – onde estabelecia que para as observações do espectro de frequências serem bem reproduzidas seria necessário admitir que a radiação fosse emitida em números inteiros de “pacotes” de energia, os quais foram batizados de *quanta*.

¹³ Termo introduzido por Paul Ehrenfest em 1911.

A energia deste quantum era expressa por uma nova constante física, conhecida atualmente como *constante de Planck*, simbolizada por h cujo valor é igual a $6,63 \times 10^{-34}$ J.s (Joule vezes segundo, unidade de energia multiplicada por tempo, que expressa a grandeza física conhecida como *ação*). Com a quantização da ação, o princípio da hipótese quântica teve uma extrema precisão diante dos dados experimentais, embora fosse contrária às teorias clássicas da mecânica, eletrodinâmica e da termodinâmica, que caracterizava os fenômenos de radiação e energia como processos contínuos. O próprio Planck relutou em aceitar integralmente sua hipótese e a considerava como “um ato de desespero”, tendo ficado na espera de explicações mais adequadas¹⁴.

Naquela ocasião, o que Planck não esperava era que em 1905, com apenas 26 anos, o físico alemão Albert Einstein proporia artigos revolucionários no âmbito da física, dentre eles, um que tratava sobre a teoria da relatividade especial¹⁵, e outro, que generalizaria o conceito de *quantum*, ao utilizá-lo na descrição do chamado efeito fotoelétrico¹⁶. Tais artigos renderam ao ano de 1905 o título de *annus mirabilis*, isto é, os anos milagrosos de Einstein.

Com Einstein e Bohr, a teoria dos quanta alcançou um nível de validade em outros domínios, revelando um alcance geral das proposições de Planck. As contribuições destes físicos foram de extrema relevância para a descrição da estrutura dos átomos e seus constituintes, inclusive sendo decisivas para a passagem de uma hipótese matemática de aplicação restrita a uma teoria física. Pelo trabalho de Einstein, tornou-se possível a compreensão do *efeito fotoelétrico*, fenômeno descoberto por Hertz em 1887 que consiste na emissão de elétrons a partir de superfícies metálicas quando estas são irradiadas por luz ou raios ultravioletas. Na previsão das equações da eletrodinâmica clássica, a energia de movimento dos elétrons emitidos pelo metal era proporcional à intensidade da radiação, portanto, conforme com a descrição do modelo ondulatório da luz. Todavia, a característica do efeito fotoelétrico destoava destas previsões, dado que a energia cinética dos elétrons era proporcional à frequência da luz irradiada. A solução encontrada por Einstein era adotar a hipótese quântica de Planck para a luz, isto é, propor que energia da luz incidente também se propagava em pacotes discretos, ou *quanta* – posteriormente batizados de fótons (quantum de luz).

¹⁴ Planck só veio a se convencer que o *quantum elementar de ação* era um fenômeno que conduzia a compreensão para além da física clássica no ano de 1908.

¹⁵ A Teoria da Relatividade de Einstein é composta por duas: a teoria da relatividade especial, de 1905 que trata dos corpos em movimento com velocidade constante (uniforme) e das relações de massa e energia; e a de 1915 – a relatividade geral, que generaliza a teoria anterior para movimentos acelerados e em presença de campos gravitacionais fortes.

¹⁶ A título de curiosidade, foi pelo seu trabalho com efeito fotoelétrico que Einstein foi laureado com prêmio Nobel, e não com seus trabalhos em Teoria da Relatividade.

Deste modo, Einstein quantizava a radiação eletromagnética e iniciava uma situação desconfortável na física da época, uma vez que os fenômenos da luz conhecidos eram bem explicados pela interpretação ondulatória da luz, cujo conceito de luz como onda eletromagnética contínua difere radicalmente da transmissão de partes descontínuas de energia como a proposta recentemente por Einstein. Era óbvio, portanto, que esta imagem ondulatória não se harmonizava com os princípios da hipótese quântica – fazendo o próprio Einstein o considerar como um conceito provisório até 1916. A maioria dos físicos se interrogava ainda sobre o caráter físico ou não da descontinuidade quântica, Einstein, contudo, se questionava sobre a natureza do quantum de luz e sentia dificuldades em concebê-la devido suas implicações quanto à teoria física, e sua incompatibilidade com a teoria eletromagnética e que os *quanta* colocava um problema teórico fundamental. Em 1911, a aceitação geral da hipótese do *quantum de ação* tornava-se quase irreversível, ainda que a complexidade da situação não fosse devidamente resolvida. Aliás, a presença da hipótese quântica iria se ampliar com os trabalhos do físico dinamarquês Niels Bohr.

Conhecia-se em 1911, através dos experimentos de Rutherford com seus colaboradores, que os átomos eram constituídos de estruturas internas. O modelo revelado por Rutherford propunha que o átomo consistia em um pequeno núcleo cuja maior parte da massa atômica era concentrada e onde se localizavam as cargas positivas. Ao redor do núcleo, em órbitas¹⁷ tais como as dos planetas ao redor do Sol, giravam os portadores de carga negativa – os elétrons. Este modelo conseguia explicar aparentemente a estabilidade dos átomos. Contudo, sabia-se, a partir da teoria clássica, que “uma partícula carregada em movimento, como o elétron, deveria perder energia, irradiando ondas eletromagnéticas, a uma taxa que, segundo as equações de Maxwell, deveria ser proporcional ao quadrado da aceleração do elétron” (Bohm, 2015, p.161). O elétron quando em movimento orbital está sempre acelerado na direção do centro do átomo, portanto, deveria perder energia continuamente, fazendo um movimento orbital espiral até o núcleo em frações de segundo, impossibilitando assim a própria estabilidade do átomo. Porém, na realidade, o elétron cessa de irradiar quando alcança o raio normal do átomo, em torno de 10^{-4} cm.

Com a intenção de resolver as contradições entre a teoria clássica – incluindo o modelo de Rutherford – e os experimentos, Bohr analisou cuidadosamente o problema, propondo uma hipótese nova. Ele precisou postular que o intervalo contínuo entre as órbitas permitidas pela teoria clássica não era possíveis, sendo antes necessário que o elétron ocupasse órbitas discretas (ou seja,

¹⁷ Este modelo atômico planetário foi o modelo atômico proposto por Rutherford, porém, a visão de átomo da física contemporânea desenvolvida após um século tem uma complexidade que se distancia bastante desta imagem simples, entretanto não será preciso tratar dela aqui.

quantizadas). Ao imaginar que existia a menor órbita possível com a menor energia possível, ele conseguiu explicar a estabilidade dos átomos, pois desta forma, uma vez atingida essa órbita o elétron não poderia mais perder energia, até porque órbitas de menor energia não estariam mais disponíveis. O salto do elétron de uma órbita de maior energia a uma de menor energia faria com que fosse irradiado um *quantum* de luz com frequência dada pela relação de Einstein. Em suma, somente frequências discretas de luz poderiam ser emitidas, correspondendo a saltos discretos entre os níveis de energia. Consequentemente, Bohr derivou uma regra quantitativa que o permitiu calcular níveis de energia e frequências para o átomo de hidrogênio e outros átomos simples.

A partir disto, Bohr apresentou evidências a favor da ideia que não somente a energia de luz era quantizada, mas também a dos elétrons. Ficou explicado, assim, “diversas propriedades dos átomos e da radiação que contradiziam a conclusão derivada da física clássica de que a energia pode variar de modo contínuo” (Bohm, 2015, p.164). Parecia naquela ocasião, portanto, que a teoria dos quanta havia chegado para ficar. No entanto, esta “teoria só se tornou uma mecânica, isto é, só substituiu realmente as teorias clássicas, à custa de uma renovação no quadro conceitual da física” (Paty, 1995, p.92).

A primeira etapa do desenvolvimento da teoria dos *quanta*, satisfaz-se, em parte, com o quadro conceitual das teorias clássicas, uma vez combinadas com as considerações de energias e de ações descontínuas. É hoje conhecida como *antiga teoria quântica*. A segunda etapa deu origem ao que chamamos de *mecânica quântica*¹⁸, podendo ser expressa fundamentalmente sob a formulação da *mecânica ondulatória* desenvolvida por Louis de Broglie e sob a formulação da *mecânica matricial* desenvolvida inicialmente, por Heisenberg e Jordan. Desde então, a teoria dos *quanta* foi reconhecida como irredutível às teorias clássicas.

As questões deixadas em aberto pela antiga teoria quântica - no início da década de 20 do século passado - deixavam perplexos os jovens físicos. A teoria quântica, após as contribuições de Einstein e Bohr, ampliando a ideia inicial de Planck, encontrava-se insatisfatória para resolver alguns problemas e seus fundamentos não eram ainda plenamente consistentes. Afinal, a natureza da luz era ondulatória podendo ser expressa em relações de difração e interferência ou era corpuscular obedecendo às mais recentes regras de quantização descobertas por Planck e Einstein?

Motivado por questões semelhantes a estas, o nobre francês Louis de Broglie apresenta à Academia Francesa de Ciências, em setembro de 1923, duas comunicações, frutos de seu longo

¹⁸ O termo surge pela primeira vez no título de um artigo escrito pelo físico Max Born no verão de 1924.

período de reflexão, onde anunciava que os elétrons – assim como os fótons – também estariam associados a uma onda, ou seja, a *dualidade onda-corpúsculo* considerada anteriormente para a luz estava sendo generalizada. Na sua tese de doutorado, denominada “Pesquisas sobre a Teoria dos Quanta”, defendida em novembro de 1924, De Broglie relaciona o *momentum* linear¹⁹ de uma partícula (corpúsculo) com o comprimento de onda, propondo a ideia de ondas de matéria²⁰. Com esta noção, toda a matéria teria um comportamento ondulatório. Posteriormente, De Broglie veria suas ideias confirmadas experimentalmente²¹, sendo consagrado com o Prêmio Nobel no ano de 1929. Segundo suas ideias, um elétron seria acompanhado por uma onda estacionária – espécie de onda piloto – que oscilaria por toda a trajetória. O físico francês procurava criar uma mecânica para estes objetos, e os resultados válidos para os elétrons se mostrariam válidos também para todos os corpúsculos. Associando as ondas ao movimento das partículas, as ondas de matéria, poderiam gerar, portanto, todos os efeitos relacionados aos fenômenos ondulatórios tão bem conhecidos – como a difração.

Paralelamente ao trabalho de De Broglie, durante os anos de 1924 e 1925, o físico alemão Heisenberg trabalhava – a partir das discussões com Bohr e Kramers – na tentativa de desenvolver suas ideias acerca de uma mecânica quântica consistente, cuja estrutura pudesse resolver as inconsistências relativas à estrutura atômica. As ideias de Heisenberg visavam “construir uma teoria que se utilizasse de propriedade diretamente observáveis do átomo, ou seja, características do sistema atômico – uma grandeza específica, como energia, frequência e intensidade, por exemplo – que pudessem ser mensuráveis. A consequência direta era abolir completamente qualquer imagem do átomo que recorresse à noção de órbita” (Leite, 2008, p.37). Naquele contexto, se tornava extremamente necessário resolver as tarefas que diziam respeito às dificuldades matemáticas da criação de uma mecânica quântica como a que pretendia Heisenberg.

Após muito esforço e debate com seus pares, Heisenberg chega, em torno de julho de 1925, à *mecânica quântica matricial*, considerada a primeira estrutura teórico-formal da mecânica quântica, que associa matrizes às propriedades da matéria. Em poucos meses, a mecânica de Heisenberg seria desenvolvida por Max Born e Pascual Jordan, fortes na tradição matemática, que acabariam por explicitá-la sob a forma da álgebra de matrizes, revestindo, portanto, as ideias de

¹⁹ O *momentum* linear é a grandeza física (vetorial) que expressa a quantidade de movimento do objeto, isto é, uma partícula de massa m a uma velocidade v , terá um momento linear p dado por $p=mv$. A conservação do *momentum* é uma lei importante na mecânica.

²⁰ Segundo a proposta de De Broglie, o comprimento λ da onda de matéria associada a uma partícula deveria ser tal, que ao multiplicá-lo pela massa m e pela velocidade v da partícula fosse um resultado igual à constante de Planck, h , isto é, $\lambda mv=h$.

²¹ A confirmação experimental da natureza ondulatória do elétron veio através dos experimentos de Clinton Davisson e Lester Germer e, independentemente, por George Thompson.

Heisenberg de maior propriedade. Em um artigo que os três escreveram juntos em 1926, foi possível uma maior consistência teórica à mecânica de matrizes, possibilitando na sequência, ao físico Wolfgang Pauli aplicá-la com sucesso ao átomo de hidrogênio.

Por outro lado, em 1925 o físico austríaco Erwin Schrödinger desenvolvia a partir do contato com a tese de Louis De Broglie sobre ondas de matéria, uma nova formulação da mecânica quântica. Schrödinger tomou as ideias ali indicadas como ponto de partida e inspirou-se a buscar equações de ondas capazes de descrever as ondas de matéria proposta por De Broglie. As equações de onda formulada pelo físico austríaco é uma maneira de determinar uma *função de onda* que possibilite a descrição do comportamento dinâmico de um sistema quântico ao longo do tempo. A função de onda é o termo que substitui a noção de movimento das partículas. Diferente da álgebra matricial, desconhecida por grande parte dos físicos da época, as equações associadas às ondas eram bem conhecidas e manipuladas posto que a descrição de ondas mecânicas e eletromagnéticas fazia parte do cenário da física, pelo menos, desde o século XVIII e constituía a bagagem mínima de qualquer físico da época. Interessante notar também, além disso, o fato de que os resultados obtidos mostraram que o formalismo de Schrödinger era equivalente ao formalismo da mecânica matricial, apesar de se valerem de instrumental matemático distintos. Cabe observar, contudo, que do ponto de vista físico, obviamente, as abordagens não eram equivalentes.

Aqueles físicos que simpatizaram com a formulação de Heisenberg da mecânica quântica, reagiram de forma negativa à mecânica ondulatória de Schrödinger e a interpretação proposta por ele. Heisenberg, por exemplo, mantinha a crença de que existiria um único esquema matemático capaz de responder aos problemas da teoria quântica. Vejamos o que ele dizia:

“Eu não tinha nenhuma confiança numa teoria que contrariava inteiramente nossa *interpretação de Copenhague*, e fiquei perturbado ao ver que inúmeros físicos saudavam precisamente essa parte da doutrina de Schrödinger, com um sentimento de liberdade (...) ainda estávamos longe de uma completa *interpretação física da mecânica quântica*, mas *tínhamos certeza de que era preciso nos afastar da representação objetiva de processos no tempo e no espaço*”. (Heisenberg *apud* Leite, 2008, p.45, grifos nossos)

É possível observar no trecho supracitado, que Heisenberg começava a ter como objetivo o estabelecimento de uma interpretação sobre a mecânica quântica, e que, portanto, seria preciso desbancar as interpretações rivais. Apesar das dificuldades notáveis expressas pelas interpretações existentes na época – que o espaço aqui não nos permite adentrar – e das discrepâncias internas, podemos observar que o aparato formal das teorias, de reconhecido poder preditivo, antecedeu à compreensão efetiva sobre o significado de seu conteúdo. A entrada de Schrödinger em cena,

portanto, nos possibilita compreender o movimento que se dirige da criação do formalismo à interpretação, posto que com uma interpretação concorrente e atraindo um número considerável de físicos, dentre eles, o apoio de Einstein, seria preciso fornecer uma interpretação nítida e coerente.

A nova interpretação da mecânica ondulatória obrigou a interpretação de Heisenberg a passar por uma série de ajustes e mudanças. Os anos de 1925 e 26 foram dominados pelo uso de sofisticadas técnicas matemáticas que fundamentaram e possibilitaram o manejo dos processos relacionados ao mundo físico da mecânica quântica. Contudo, em 1926, iniciou-se o processo de interpretação física dos resultados alcançados até então, pois numa situação aparentemente ímpar na história da física “tal formalismo não vinha acomodado em nenhum quadro ontológico claro” (Chibeni, 2005, p.181) e por mais que Heisenberg tivesse “deliberadamente evitado qualquer comprometimento ontológico – seguindo, pois, a onda filosófica anti-realista positivista da época -, era evidente que até ele se ressentia da secura formal da teoria” e a elucidação do conteúdo físico da nova teoria requeria “a introdução de elementos ontológicos mínimos” (Chibeni, 2005, p.181-2). A disputa entre a mecânica matricial do grupo de Copenhague-Göttingen (e.g., Bohr, Born, Heisenberg, Pauli e outros) e seus críticos (Einstein, De Broglie, Planck e Schrödinger) forneceu o panorama para a construção de uma interpretação física consistente, da qual retiraremos agora alguns elementos deste debate para análise.

A teoria quântica, na elaboração que recebeu entre os anos de 1925 e 1927 carecia de uma interpretação racional, dada sua distância conceitual em face das teorias clássicas. O núcleo de uma das principais interpretações foi desenvolvido por Heisenberg, Bohr e Pauli. Costuma-se referir a esta interpretação – que até hoje prevalece nas interpretações corrente dos físicos - como Interpretação de Copenhague (ou interpretação ortodoxa e usual). Naturalmente, uma posição desta não pode ser considerada monolítica, pois é conhecido pelos estudiosos²² do debate que pontualmente havia consideráveis diferenças, contudo, a efeito de economia em nosso trabalho, nos referiremos unicamente como *Interpretação de Copenhague*, deixando simplesmente assinalada esta ressalva.

Após a demonstração por Schrödinger da equivalência entre os formalismos da mecânica ondulatória e mecânica matricial, o físico Max Born propôs uma interpretação para elucidar o significado físico da função de onda – solução da equação de Schrödinger. Na verdade, interpretava-a como uma densidade de probabilidade da localização da partícula, ou seja, fornecia uma *interpretação probabilística* da função de onda. A localização da partícula não seria mais

²² Ver maiores detalhes em Pessoa Jr (2003, p. 96).

determinável por valores bem definidos em cada instante, como o era na mecânica clássica. A probabilidade de detectar uma partícula, portanto, seria proporcional ao quadrado da amplitude da onda associada a uma dada região do espaço. Não se tratava de uma onda *real*, tridimensional como as ondas de rádio, mas apenas de um espaço de configuração multidimensional, isto é, uma quantidade matemática abstrata – seriam representações de um espaço de configuração, que poderiam chegar a infinitas dimensões dificultando uma imagem nítida direta. Schrödinger que buscava desde o início uma interpretação *realista* para a função de onda, rejeitou a hipótese de trabalho de Born.

Na busca por uma interpretação adequada, Heisenberg e Bohr passaram por longas horas em discussão. Cada qual tem uma contribuição para a Interpretação de Copenhague, fruto deste esforço, que até hoje é considerado como os conceitos-chave da mecânica quântica, na sua versão ortodoxa: a complementaridade, formulada por Bohr; e o princípio da incerteza desenvolvido por Heisenberg. As *relações de incerteza de Heisenberg*²³, derivadas em 1927, expressam matematicamente o *princípio*²⁴ que estabelece um limite inferior para o produto de duas grandezas físicas conjugadas²⁵. Segundo ele, uma característica marcante do mundo dos *quanta* seria que quando tentássemos observar um objeto, o processo de observação teria uma perturbação mínima ineliminável que impossibilitaria o conhecimento de ambas as grandezas que caracterizariam o objeto – a saber, *momentum* e posição. Heisenberg, notadamente, procura a determinação das grandezas físicas em sua mensurabilidade, evitando se referir aos objetos quânticos por grandezas que não possam ser medidas.

Já a concepção de Bohr, afirma que os conceitos clássicos são necessários para a descrição da aparelhagem experimental e dos resultados das medições, ainda que sejam limitados. A tese de Bohr implica que os conceitos quânticos não podem ser aplicados aos aparelhos macroscópicos no momento em que são usados na medição. Contudo, entre o sujeito e o objeto é preciso um corte entre o domínio clássico e quântico. Tal corte, segundo Pessoa Jr (2003, p.92), entretanto, “pode ser imposto em qualquer ponto entre o sujeito e o objeto” e possibilita-nos notar na concepção de Bohr um elemento de *subjetivismo*, pois “o sujeito epistemológico (observador) nunca pode ser

²³ O princípio da incerteza exprime qualitativamente o fato de que uma maior previsibilidade nos resultados da medição de uma grandeza observável implica uma diminuição na previsibilidade do seu par. A relação de incerteza expressa quantitativamente este princípio e é da forma $\Delta x \Delta p \geq 1/(4\pi)$ onde Δx representa a incerteza na medida da posição e Δp representa a incerteza na medida do *momentum* da partícula (Pessoa Jr, 2003, pg. 73-77).

²⁴ Os estudiosos classificam as relações de incerteza de Heisenberg em dois níveis: epistemológico e ontológico. Para uma pequena aproximação em um pouco mais de detalhes sobre esta distinção ver Chibeni (2005). Para verificar brevemente um panorama das distintas interpretações das relações de incerteza (indeterminação) consultar Pessoa Jr (2003).

²⁵ São grandezas cuja medida não pode ser simultânea e com precisão arbitrária.

eliminado”. Bohr anuncia seu conceito de *complementaridade*²⁶ como a ideia de que um experimento só pode ser compreendido em um quadro corpuscular ou em um quadro ondulatório, mas nunca em ambos ao mesmo tempo. Porém, mesmo com a exclusão de abordagem, essas duas descrições esgotam a descrição do objeto, ou seja, os dois modos de apreensão são mutuamente excludentes, porém complementares uns aos outros. Podemos ver tal ideia expressa nas palavras de Bohr, citado por Leite (2008, p. 55):

Os dois pontos de vista sobre a natureza da luz [corpuscular e ondulatório] devem ser considerados, mais exatamente, como tentativas diferentes de se interpretar a evidência experimental, nas quais a limitação dos conceitos clássicos é expressa de maneiras complementares (...) Exatamente como no caso da luz, temos conseqüentemente, no caso da natureza da matéria, enquanto aderimos a conceitos clássicos, que enfrentar um dilema inevitável que tem que ser considerado como a própria expressão da evidência experimental. De fato, estamos aqui novamente tratando não de representações contraditórias dos fenômenos, mas representações complementares, que somente juntas oferecem uma generalização natural do modo clássico de descrição.

A tese probabilística, o princípio de incerteza e a complementaridade, somada a outros princípios²⁷ que não trataremos aqui, caracterizam – abstraindo-se as particularidades – a interpretação ortodoxa da mecânica quântica.

5. Controvérsias na interpretação da teoria quântica

Sabemos que o contexto no qual se ergueram grande parte das interpretações da teoria dos *quanta*, a atmosfera cultural era marcada pela influência do positivismo lógico e, em menor medida, pelo idealismo neokantiano. A mecânica quântica (MQ), portanto, “ilustra dramaticamente a asserção do filósofo segundo a qual a ciência não pode deixar de estar embebida na filosofia” (Bunge, 2012, p. 209). Ainda que a filosofia do positivismo lógico não seja hoje mais sustentada explicitamente pelos físicos, ela é em grande parte responsável pelas inconsistências e obscuridades na mecânica quântica. Por outro lado, “as aplicações bem-sucedidas da MQ básica têm sido tão numerosas, que a própria possibilidade de explorar caminhos radicalmente novos é hoje em dia considerada tão-somente por alguns poucos físicos” (Bunge, 2012, p. 210). O físico e filósofo da ciência argentino Mario Bunge chega a dizer que “os físicos teóricos tornaram-se, neste particular, ainda mais conservadores do que os teólogos” e assegura que a tarefa de crítica e reconstrução dos

²⁶ Segundo Pessoa Jr (2003, p. 93-96), poderíamos falar de três complementaridades em Bohr: (1) *complementaridade entre coordenação espaço-temporal e asserção da causalidade* – curiosamente abandonada por ele; (2) *complementaridade entre onda e partícula* e (3) *complementaridade entre observáveis incompatíveis, como posição e momentum*. Para efeito de simplificação, falaremos apenas de complementaridade e deixamos a indicação para consultas posteriores.

²⁷ Como por exemplo, o indeterminismo – em algum nível – para citarmos apenas um.

fundamentos da teoria, “não deve ser apenas de interesse filosófico, mas também útil ao avanço do conhecimento” (Bunge, 2012, p. 210).

No ano de 1927, no V Congresso de Solvay, os fundamentos da teoria quântica foram assunto de discussão entre os principais físicos da época, dentre eles, os próprios fundadores: Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, De Broglie e Dirac. O congresso ficou marcado pelos intensos debates entre Bohr e Einstein. As figuras mais excepcionais da física na época se confrontavam com opiniões divergentes acerca da interpretação correta da teoria dos *quanta*. Esta controvérsia não é ponto pacífico na literatura especializada e diversos trabalhos analisando este debate foram propostos. Inicialmente, Einstein considerava a forma a qual a mecânica quântica havia tomado como inconsistente – dado o caráter probabilístico da teoria²⁸. Após 1931, ele passou a considerá-la incompleta, carecendo de desenvolvimentos futuros, e que possivelmente, ela seria uma particularização de uma teoria física mais geral e coerente.

Tradicionalmente, se considera que após a Conferência de Solvay se estabelece a hegemonia do grupo de Copenhague como portador da interpretação correta da teoria dos *quanta*. Einstein, geralmente é apresentado como o físico derrotado, que permaneceu conservador em relação aos avanços da mecânica quântica, ainda que tenha sido revolucionário em outros aspectos do desenvolvimento da física do início daquele século. Julgamos serem demasiadamente apressadas tais conclusões, pois as razões que mantiveram a desconfiança de Einstein eram razoavelmente bem fundadas e revelavam um interessante senso de realidade.²⁹ Seguiu-se, contudo, aquilo que Jammer (1974, p. 247-251 *apud* Freire Jr 2003, p. 573) vai denominar a “monocracia de Copenhague” – dado que esta tornou-se a filosofia oficial³⁰ - e só passou a ser contestada vigorosamente a partir dos anos 50, embora ainda permaneça consideravelmente predominante – é oportuno ressaltar que ao longo do desenvolvimento da teoria sempre houveram dissidentes³¹.

Vemos a partir das considerações acima, que o surgimento, o desenvolvimento e a consolidação da teoria dos *quanta*, sobretudo na formulação da mecânica quântica, foi marcada por uma série de controvérsias envolvendo sua interpretação. A teoria dos *quanta* a distingue como corpo teórico das teorias precedentes na história da física. A controvérsia dos *quanta*, contudo, é reveladora de divergências do ponto de vista da *ontologia* como brevemente assinalamos. Tais

²⁸ Tomou-se famosa a expressão de Einstein, numa carta dirigida a Max Born, que parece ter sido dita em outras ocasiões, para demonstrar sua insatisfação com esta propriedade que surgia: *Deus não joga dados*.

²⁹ Para uma interessante discussão que, por vezes, tematiza o pensamento de Einstein, consultar Paty (1995) e Lehner (2011).

³⁰ As razões – em vários níveis: científicos, políticos e culturais - para este acontecimento escapa ao nosso objetivo.

³¹ Ver o trabalho de Freire Jr (2011) sobre os dissidentes quânticos.

interpretações, não se deram apenas no nível físico, são elas também divergências substantivas no campo ontológico, na disputa pela significação do mundo quântico.

Em grande parte da defesa que faz da interpretação ortodoxa, Heisenberg apresenta a ideia de que o materialismo subjacente às teorias físicas até o final do século XIX está ultrapassado e, com o desenvolvimento da teoria dos *quanta*, o idealismo se tornaria a corrente filosófica a ser sustentada a partir de então. Ou seja, para ele, a teoria dos *quanta* – sob a interpretação ortodoxa – provoca o afastamento entre a física e o materialismo (Heisenberg, 1987, p. 99). O idealismo que propõe Heisenberg o aproxima da filosofia platônica. Ele chega a conceber – *platonicamente* – as partículas elementares como estruturas matemáticas da natureza (Heisenberg, 2004, p. 26 *apud* Leite, 2008, p.101):

Tal como os corpos elementares regulares de Platão, as partículas elementares da física moderna são definidas por condições matemáticas de simetria; não são eternas nem invariáveis e, portanto, dificilmente podem ser chamadas “reais” na verdadeira acepção da palavra. São antes representações daquelas estruturas matemáticas fundamentais a que se chegam nas tentativas de continuar subdividindo a matéria; representam o conteúdo das leis fundamentais da natureza. Para a ciência natural moderna, não há mais, no início, o objeto material, porém a simetria matemática.

Heisenberg ao polemizar com os físicos que são críticos da interpretação de Copenhague alega que eles são herdeiros de uma “ontologia do materialismo”. Podemos ver nas palavras do próprio autor (Heisenberg, 1995, p.99-100 *apud* Leite, 2008, p. 81):

Todos os oponentes da Interpretação de Copenhague estão de acordo sobre um ponto. Segundo eles, seria desejável retornar-se ao conhecimento de realidade da física clássica ou, para fazermos uso de um termo filosófico mais geral, à ontologia do materialismo. Eles prefeririam voltar à ideia de um mundo real objetivo, em que mesmo as partes mais diminutas existissem objetivamente.

Para Heisenberg, uma das dificuldades de Einstein em “aceitar” a interpretação ortodoxa devia-se ao fato dele ser um *realista* – no dizer de Heisenberg: um realista dogmático.³² Einstein, em sua crítica a interpretação ortodoxa, em artigo escrito em 1935, na companhia de Boris Podolsky e Nathan Rosen, expressa na abertura, de fato, um forte teor realista:

Qualquer consideração séria a respeito de uma teoria física deve levar em conta a diferença entre a realidade objetiva, que independe de qualquer teoria, e os conceitos físicos com os quais a teoria opera. Pretende-se que tais conceitos tenham correspondência com a realidade objetiva, e por meio deles construímos

³² Para Heisenberg, existiriam três formas de realismo: prático, dogmático e metafísico, onde os três compartilham da ontologia do materialismo, tal como entendida por ele, o que impede a adesão à interpretação de Copenhague. Para esclarecimento quanto as diferentes posições, ver Leite (2008, p. 81). Julgamos, entretanto, serem dispensáveis tais diferenças em nossa apresentação.

uma *imagem dessa realidade* (Einstein, Podolsky & Rosen, 1981, p. 90, grifos nosso).

Bohr, por sua vez, acreditava que a “interação finita entre o objeto e agentes de medida, condicionada pela própria existência do quantum de ação, implica - devido à impossibilidade de controlar a reação provocada pelo objeto nos instrumentos de medida, se estes devem servir a seus objetivos – a necessidade de uma renúncia final às ideias clássicas de causalidade, e uma revisão radical de nossa atitude perante o problema da realidade física” (Bohr, 1981, p. 99).³³

Diante da *maré idealista* que se ergueu com as posturas filosóficas da Interpretação ortodoxa, os críticos a ela se configuraram como uma *barreira realista*. Na ocasião de surgimento da teoria dos *quanta*, esta barreira era representada fundamentalmente por Einstein. Contudo, após o período de guerras - como já mencionado - surgiram novas concepções críticas à interpretação de Copenhague, que também se posicionaram do ponto de vista realista.

O físico estadunidense David Bohm é um caso emblemático destes. Pois, embora adotando alguns pontos da interpretação ortodoxa, defendia uma *ontologia para a mecânica quântica*, que se distanciava da de Bohr e Heisenberg. Nas palavras de Freire Jr (1999, p. 48) Bohm “combinou, em uma interpretação própria, a interpretação da complementaridade, devida a Niels Bohr, com uma ontologia realista” nos permitindo, assim, afirmarmos que na interpretação de Bohm coexistiu “explicitamente, complementaridade com realismo” ao falar “de um mundo que tem existência independente das teorias físicas, e que pode ser conhecido por essas mesmas teorias”. Não entraremos aqui nos detalhes da concepção de Bohm³⁴, porém cabe mencionar que ele obteve um modelo físico “capaz de reproduzir todos os resultados obtidos com a teoria quântica, na sua interpretação usual” e esta concordância está restrita, em seu trabalho, “aos resultados da teoria quântica não-relativista” (Freire Jr, 1999, p. 49). As opções filosóficas de Bohm, portanto, desafiavam o *instrumentalismo* e o *subjetivismo* em voga da sua época.

Heisenberg, além de anunciar o limite da ontologia materialista (realista) com as contribuições da nova física, defende que ela estabelece uma nova noção para a causalidade – ou mesmo o abandono dela. Sua opinião era de que o “princípio de incerteza tinha desafiado a noção de causalidade nos processos atômicos, fazendo da causalidade, ou a ausência dela, seu maior tema público” (Cassidy, 1991, p.255-6 *apud* Leite, 2008, p. 83). Tentativas de contrariar a interpretação de Copenhague eram desqualificadas como “metafísica” ou declaradas simplesmente como uma

³³ A posição de Bohr divide os especialistas em sua obra, sendo ele considerado por uns como realista e por outros não.

³⁴ Bohm segue inicialmente algumas pistas deixadas por Einstein e De Broglie e cria sua interpretação de variáveis ocultas da teoria quântica. Para uma exposição detalhada da evolução da concepção de Bohm, ver Freire Jr (1999) e alguns elementos interessantes em Bohm (2015).

“impossibilidade”, uma vez que a interpretação ortodoxa se apresentava como intrínseca à própria teoria quântica. Toda tentativa, portanto, de colocar em dúvida a interpretação padrão da teoria dos *quanta* eram consideradas fúteis, pois as leis da mecânica quântica, para além de ser uma invenção da engenhosidade humana, eram consideradas como traços essenciais da natureza agora descobertos, marcadas por um ar de *hegemonia* que desautorizava o debate – em termos ontológicos e epistemológicos.

Apesar desta hegemonia, houve uma série de tentativas de interpretar distintamente os processos quânticos – sendo eles, de caráter realistas ou não. Contudo, a crítica à interpretação ortodoxa passou a crescer, sobretudo, após os anos 70. Podemos ilustrar esta atitude nas palavras de Bunge (2012, p.211-214), que também teve uma interpretação não-ortodoxa da mecânica quântica:

O que a maioria deles [os físicos] não parece perceber é que a doutrina de Copenhague é insustentável do ponto de vista científico e filosófico porque é inconsistente e não é cabalmente física.

(...) As inconsistências formais e semânticas que infestam as formulações correntes da MQ não podem ser evitadas com as medidas brandas, pois se originam em um apego dogmático a uma filosofia inconsistente com a própria meta da ciência física se ela precisa satisfazer exigências não-físicas, tais como o postulado de que não existem entidades físicas não autônomas (independentes do observador) e nem suas propriedades.

Em suma, a doutrina de Copenhague é inconsistente do ponto de vista lógico e esta jaça deriva do fato de ela adotar uma filosofia subjetivista (...) incorre-se em puro antropocentrismo.

Posto que nosso espaço é limitado, não poderemos entrar nos detalhes da argumentação de Bunge sobre a crítica da filosofia subjacente à interpretação ortodoxa da mecânica quântica, pretendemos apenas deixar indicado tais perspectivas. Podemos, ainda, a título de ponto de partida para um *programa crítico*, a ideia de Bunge (2012, p. 222) segundo a qual “a MQ contém conceitos teóricos que não conseguem ter uma interpretação empírica, isto é, que não podem ser introduzidos por meio de “definições operacionais”. Além disso, nenhum dos símbolos básicos da MQ é empiricamente interpretável, resultando daí que a teoria não apresenta qualquer conteúdo empírico em geral: não descreve item empírico. Isto não significa que a MQ não seja comprovável: significa apenas que a teoria diz respeito mais a fatos transempíricos do que a fenômenos. Na verdade, os microfatos referidos pela MQ básica, tais como os saltos quânticos, são imperceptíveis”. Convém reparar que Bunge, assim como Bhaskar, considera o papel da ciência obter acesso, por meios próprios, aos domínios além do empiricamente dado, do imediato.

6- Considerações finais

Como vimos desqualificar a filosofia (ontologia) não a evita, apenas a encobre e põe acriticamente uma ontologia implícita. A teoria dos *quanta* - uma das mais ricas e profundas teorias - tem admitido uma *ontologia empirista* e, por conseguinte, uma *epistemologia subjetivista* - que vela um *antropocentrismo*³⁵. Se a ciência faz afirmações ontológicas como procuramos demonstrar, é tão mais relevante para a prática científica que esta ontologia seja explicitada e o debate possa acontecer. Na medida, em que a ontologia se questiona pela estrutura do mundo que é necessária existir para tornar a ciência possível, esta própria ciência contribui para revelar a estrutura particular do mundo que os contornos gerais são traçados pela ontologia - articulando, assim, uma interação mútua de extrema fecundidade. Uma vez que *assegurada a existência do mundo objetivo* torna-se possível distintas interpretações sobre este mundo. Interpretações que, em alguma medida, disputarão o campo de significação da prática - no caso: a prática científica - de modo a conduzi-la.

Mostramos, por intermédio da história da controvérsia dos *quanta*, como esta disputa de significação acontece no âmbito das ciências naturais, em particular, a física - cuja noção de que tais interpretações e significados não são requeridos, reduzindo-a numa atividade que consiste na mera manipulação de fórmulas matemáticas, é ainda muito presente. Contudo, foi visto também, que a interpretação ortodoxa da mecânica quântica tendeu a expressar compromissos ontológicos de caráter *idealista*. Acreditamos que o debate da ontologia - dado que incontornável - deve ser posto na ordem do dia. É relevante não somente explicitar os compromissos ontológicos assumidos por teorias físicas como esta, mas, sobretudo, possibilitar a crítica e, por conseguinte, uma *nova imagem científica de mundo*, coerente com os resultados científicos e os projetos humanos. A crítica às noções idealistas dos processos quânticos foi apenas indicada, sendo preciso desenvolvê-la em outro momento.

Podemos dizer que a vida cotidiana atesta, em diversos graus, a realidade dos desenvolvimentos tecnológicos possibilitados pela teoria quântica, como por exemplo, o laser, os aparelhos de CD, microcomputadores, imagens de ressonância magnética. Costuma ser dito que cerca de 30% do produto interno bruto (PIB) dos Estados Unidos é direcionado para desenvolver tecnologias sofisticadas baseadas em princípios da mecânica quântica. Um investimento considerável é feito pelas empresas capitalistas para o desenvolvimento de equipamentos como computadores quânticos, processos de criptografia quântica, supercondutores, microscópios eletrônicos, transístores e outras tecnologias de ponta.

³⁵ A crítica ao antropocentrismo dissimulado na tradição positivista (empirista) da filosofia da ciência são encontradas em Bhaskar (1997) e Duayer (2010).

Sabemos que no marco do *modo de produção capitalista*, todo desenvolvimento, é potencialmente um desenvolvimento das capacidades humanas, contudo, sob o jugo das relações capitalistas, se converte em material tecnológico que aprisiona ainda mais os sujeitos humanos e os submetem ao poder incontrollável do capital. Não seria diferente com os produtos tecnológicos originados a partir da teoria quântica. Processo que já assistimos acontecer ao longo do século passado, e não deixou de acontecer no início deste. Podemos citar, como exemplos, os equipamentos bastante desenvolvidos usados pelos complexos militares e o caso dramático de bombas atômicas. Por outro lado, se o desenvolvimento das forças produtivas – incluindo-se aí o desenvolvimento tecnológico - possibilita as bases materiais para a emancipação humana, a teoria dos *quanta* é extremamente significativa do ponto de vista da sua riqueza e complexidade teórico-conceitual, tal como vasta aplicação tecnológica de uso satisfatoriamente humano – pensemos no caso das imagens de ressonância magnética no âmbito da medicina nuclear.

Portanto, podemos dizer que a ciência é elemento constitutivo e indispensável para a imagem de mundo que é pressuposta às práticas que se pretendem emancipatórias na efetivação de um mundo humano – sem as amarras do capital. Contudo, para a realização coerente de tal perspectiva, é preciso reafirmar, em plano teórico, a atualidade da ontologia e sua presença na cientificidade contemporânea, bem como revelar que a teoria dos *quanta* – uma das mais bem sucedidas teorias na história do pensamento científico – precisa de um espaço neste projeto. Projeto este, que para ser emancipatório não pode dispensar as lutas reais dos sujeitos sociais, nem pode, por outro lado, dispensar os desenvolvimentos científicos e tecnológicos até aqui alcançados.

Se de um lado, a posição ontológica realista precisa desenvolver forças para conquistar o campo de significação da física marcado pela considerável presença de concepções idealistas, por outro, a ciência jamais pode deixar de ser crítica, daí, a necessidade de sua reorientação por uma ontologia crítica – e, aqui se faz presente a tradição marxista – com a finalidade de mútua atualização e crítica fecundas, pois concordamos com a ideia de que a “crítica autêntica é a crítica ontológica” (Duayer, 2013).

Referências Bibliográficas

- BHASKAR, R. *A Realist Theory of Science*. Londres/Nova Iorque: Verso, 1997.
- BOHM, D. *Causalidade e acaso na física moderna*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2015.
- BOHR, N. A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa?. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 2, p. 97-106, 1981.
- BUNGE, M. *Física e filosofia*. São Paulo: Editora Perspectiva, 2012.

- CHIBENI, S. Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n.2, p.181-192, 2005.
- CUSHING, J. A visão de Mundo da Mecânica Quântica: Determinista ou Indeterminista?. Em: OSVALDO PESSOA JR. (org.) *Fundamentos da Física I: Simpósio David Bohm.*, p. 1-13. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2000.
- DUAYER, M. Relativismo, certeza e conformismo: para uma crítica das filosofias de perenidade do capital. *Revista da Sociedade Brasileira de Economia Política*, v. 27, p. 58-83, 2010.
- _____.; ESCURRA, M.F.; SIQUEIRA, A.V.. A ontologia de Lukács e a restauração da crítica ontológica em Marx. *Revista Katálysis* (impresso), v.16, p.17-25, 2013.
- 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* 2, p. 90-96, 1981.
- HEISENBERG, W. *Física e filosofia*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1987.
- FREIRE Jr., O. A Story without an Ending: The Quantum Physics Controversy 1950-1970. *Science & Education* 12: 573-586, 2003.
- _____. *David Bohm e a controvérsia dos quanta*. Campinas: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência – Coleção CLE, 1999.
- _____. Dissidentes quânticos: pesquisa em fundamentos da Teoria Quântica em torno de 1970. Em: FREIRE Jr.; PESSOA Jr., O.; BROMBERG, J.L. (org.) *Teoria Quântica: Estudos históricos e implicações culturais.*, p. 33-64. Campina Grande/São Paulo: Eduepb/Livraria da Física, 2011.
- _____.; PESSOA Jr., O.; BROMBERG, J.L. (org.) *Teoria Quântica: Estudos históricos e implicações culturais*. Campina Grande/São Paulo: Eduepb/Livraria da Física, 2011.
- LEITE, A.C.F. *Realismos e anti-realismo na física do século XX: Werner Heisenberg, o pensamento grego e os debates na construção da teoria quântica*. 2008. 128f. Dissertação (Mestrado em Filosofia). Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- LEHNER, C. O realismo de Einstein e sua crítica da Mecânica Quântica. Em: FREIRE Jr.; PESSOA Jr., O.; BROMBERG, J.L. (org.) *Teoria Quântica: Estudos históricos e implicações culturais.*, p.181-228. Campina Grande/São Paulo: Eduepb/Livraria da Física, 2011.
- PATY, M. *A matéria roubada: a apropriação crítica do objeto da física contemporânea*. São Paulo: Edusp, 1995.
- PESSOA Jr., O. (org.) *Fundamentos da Física I: Simpósio David Bohm*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2000.
- _____. *Conceitos de Física Quântica*. Volume 1. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.
- _____. O sujeito na física quântica. Em: OLIVEIRA, E.C. (org.) *Epistemologia, Lógica e Filosofia da Linguagem – Ensaio de Filosofia Contemporânea*. Feira de Santana: UEFS, 2001, p. 157-96.