

A REALIDADE QUÂNTICA

Notas Históricas e Apontamentos Epistemológicos

RODRIGO SIQUEIRA-BATISTA^{1,2}, ROMULO SIQUEIRA-BATISTA^{1,2}, JOSÉ ABDALLA HELAYËL-NETO^{1,3}

¹Grupo de Física Teórica José Leite Lopes, Petrópolis – RJ, Brasil, ²Núcleo de Estudos em Filosofia e Saúde (NEFISA), Fundação Educacional Serra dos Órgãos, Teresópolis – RJ, Brasil & ³Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – RJ, Brasil.
E-mail: anaximandro@hotmail.com

Resumo

A apresentação das principais idéias que permearam o nascimento da física quântica foi o mote do ensaio “Século XX: a teoria quântica, a física de partículas e o modelo atômico atual”, publicado nos *Ensaio sobre o Átomo*, em 2000. Nestes quatro anos, algumas colocações foram revistas, enquanto outras mereceram aprofundamento, mormente no que se refere à demarcação dos importantes problemas epistemológicos gerados com a “nova” ciência. Revisitar, assim, o manuscrito de outrora é o escopo do presente artigo.

1 Introdução

“Se as portas da percepção estivessem limpas, tudo se mostraria ao homem tal como é, infinito. Pois o homem encerrou-se em si mesmo, a ponto de ver tudo pelas estreitas fendas de sua caverna.”

William Blake

A teoria quântica foi concebida a partir do esforço conjunto de um grupo de cientistas, na busca pela compreensão da estrutura íntima da matéria. Ao contrário de outras teorias associáveis, em muitas circunstâncias, ao nome de apenas um investigador — veja-se o caso da teoria da relatividade de Einstein, por exemplo —, a mecânica quântica foi antes de tudo um trabalho em equipe. Sobre esse aspecto, enfatiza Niels Bohr:

“O progresso rápido foi possibilitado por uma ampla e intensa colaboração entre físicos de muitos países, cujas abordagens diversas ajudaram, de maneira extremamente fecunda, a enfocar o problema com nitidez cada vez maior.” [1]

Todo repertório conceitual elaborado durante esta evolução da mecânica quântica acabou por recolocar uma série de decisivas questões acerca da possibilidade — e do alcance — do conhecimento acerca da realidade, as quais permearam o debate científico e epistemológico no século XX [2]. Assim, pois, destacar elementos históricos e epistemológicos neste processo de “parturição teórica” é o principal objetivo do presente manuscrito.

2 Antecedentes

A distribuição dos elétrons no interior do átomo pelo modelo de Rutherford criou um problema insolúvel para a

física no início do século XX. De fato, já em 1904, H. Nagaoka, propunha que o átomo deveria ser constituído por elétrons girando em círculos ao redor do núcleo central. De acordo com a teoria eletromagnética clássica, os elétrons, ao descreverem essa trajetória, perderiam energia e se deslocariam em uma espiral, acabando por cair no núcleo (o átomo seria instável — vida média calculada de 10^{-14} segundos) [2]. Estas concepções estavam em total desacordo com a estabilidade da matéria. Entendeu-se, pois, que a estrutura atômica não poderia ser compreendida sob o prisma das leis da física clássica.

Estas dificuldades foram solucionadas, em parte, pelo físico Niels Bohr em 1913 (teoria orbital), que aplicou a teoria quântica proposta por Max Planck em 1900, à estrutura atômica [1].¹

3 O Quantum

Do ponto de vista físico, a luz pode ser definida como uma transmissão de energia entre corpos materiais à distância [1]. Os mecanismos envolvidos nessa transferência foram estabelecidos em 1900 por Max Planck — que introduziu na física, de maneira totalmente revolucionária, o conceito de *quantum* —, ao buscar uma compreensão para a emissão de radiação de um sistema designado **corpo negro**.² A idéia de porções mínimas de

¹ Como se verá adiante, Bohr adotou a nova idéia de grandezas físicas quantizadas e postulou a quantização do chamado momento angular orbital do elétron em torno do núcleo. Com isto, chegou a uma estrutura de níveis quantizados para a energia total do elétron no átomo de hidrogênio, com um estado fundamental (e estável) de energia mínima, e estados excitados (níveis de energia com valores bem definidos e acima da energia do estado fundamental) que podem decair para o estado fundamental estável.

² Distribuição particular do espectro eletromagnético emitida ao se aquecer até determinada temperatura um recipiente que apresente vácuo parcial em seu interior — a radiação no interior do recipiente apresenta

energia concentrada em estruturas fundamentais representou uma ruptura definitiva com a concepção de energia continuamente distribuída no espaço-tempo. Partindo dos achados de Lord Rayleigh e Sir James Jeans — os quais obtiveram uma fórmula, chamada Teorema de Rayleigh-Jeans, relacionando a densidade de energia à frequência e à temperatura — e, trabalhando com as leis da termodinâmica envolvendo energia e entropia — bem como com a abordagem teórica e experimental da chamada radiação de **corpo negro** —, Planck propôs uma equação matemática que justifica a existência do espectro (na verdade, esta equação foi derivada de uma expressão inicialmente obtida pelo físico Wilhelm Wien — lei de Wien). Para derivar sua fórmula — e demonstrar, assim, a lei de Wien —, Planck adotou o inovador ponto-de-vista de que a radiação emitida e absorvida, ao invés de seguir um processo contínuo, somente poderia alterar a energia segundo determinadas porções. A elas chamou *quantum*.

Estes resultados chamaram a atenção de Einstein que, empregando as ferramentas da mecânica estatística — da mesma forma como havia utilizado em sua teoria sobre o movimento browniano —, alcançou as mesmas conclusões de Planck (Einstein investigou se a descoberta tinha implicações sobre outros fenômenos nos quais houvesse interação entre matéria e energia chegando, entre outros, ao **efeito fotoelétrico**) [3, 4]³. Descobriu também que os *quanta* de energia luminosa — os fótons [5]⁴ — são proporcionais à sua frequência ($E = h\nu$, formulação matemática simples, na qual E é a energia, ν é a frequência e h é a chamada constante de Planck — $h = 6,62559 \cdot 10^{-27}$ erg.s).

Os achados relacionados ao estudo do **corpo negro**, orientavam no sentido da natureza corpuscular da luz — hipótese tão defendida anteriormente por Sir Isaac Newton —, atestando o comportamento da luz como partícula. Einstein, mantendo a idéia principal da teoria de Newton, admitiu que a luz era composta por *fótons*. Delineava-se, assim, o conceito de que a luz possui um nítido caráter corpuscular, permitindo uma percepção afim à teoria newtoniana [4]. Os *quanta*, contudo, não podem ser considerados como partículas materiais — às quais se possa atribuir uma trajetória bem definida —, à luz da mecânica clássica.

De outro modo, de acordo com resultados experimentais — como a curvatura da luz em campos gravitacionais e as figuras de interferência que surgem quando a luz, proveniente de uma fonte, se propaga até um anteparo por dois caminhos diferentes [1,3] — fica evidenciado o caráter

ondulatório, ou seja, de radiação eletromagnética. Sobre este aspecto escrevem Einstein e Bohr:

“A teoria ondulatória, operando com o auxílio de funções espaciais contínuas, mostrou-se correta no representar fenômenos puramente óticos e, provavelmente, não cederá lugar a qualquer outra teoria”. [3]

“[a imagem ondulatória da luz] não pode ser considerada uma hipótese, no sentido usual do termos, devendo, antes, ser encarada como a descrição adequada dos fenômenos observados”. [1]

O conjunto destes resultados acabou por caracterizar a natureza dual da luz — a qual ora se comporta como partícula, ora como onda. Surgem dois quadros contraditórios da realidade: isoladamente, nenhum deles explica os fenômenos da luz, mas juntos, são satisfatórios. A teoria “intermediária” para explicar os fenômenos luminosos foi igualmente discutida por Einstein [6], mas a questão da dualidade onda-partícula foi objetivamente proposta por Louis de Broglie, em 1923, com o seu conceito de “ondas de matéria”. Esta limitação propiciou o desenho das linhas gerais para o entendimento da estrutura atômica. Lançavam-se, assim, as bases para a evolução da teoria quântica.

4 O Modelo Atômico de Bohr

Os trabalhos de Niels Bohr foram desenvolvidos a partir das investigações com espectros de diferentes elementos — entendendo-se por espectro o conjunto de raias de distintos comprimentos de onda específicos que eles podem emitir —, sobretudo do hidrogênio. Admitia que as leis da mecânica clássica e da eletrodinâmica deviam ser apostas a duas novas idéias — o postulado dos *quanta* de Planck e dos fótons de Einstein. Deve-se enfatizar, neste ponto, um potencial conflito ao se aplicar leis da mecânica e da eletrodinâmica em conexão com órbitas eletrônicas estacionárias.

Utilizando as linhas espectrais dos elementos, até então parcialmente incompreensíveis — em vista da falta de uma descrição microscópica mais refinada —, Bohr encontrou um indício da importância definitiva do *quantum* para a explicação da estabilidade e da capacidade de rearranjo dos átomos. Neste âmbito, e sobretudo na estrutura de um núcleo positivamente carregado com elétrons em órbitas fechadas em torno do mesmo, o modelo de Bohr era semelhante ao de Rutherford, mas obedecia a outras leis, que explicavam as regularidades observadas no espectro do átomo de hidrogênio. Sua teoria baseava-se nos seguintes postulados [1]:

várias frequências que se distribuem segundo uma lei que os físicos denominam espectro do **corpo negro**.

³ O efeito fotoelétrico é caracterizado pela emissão de elétrons pelas superfícies livres de determinados metais, quando sujeitos à radiação de certos comprimentos de onda (luz, por exemplo); com esta descoberta, ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1921.

⁴ Cabe, aqui, ressaltar que o termo fóton, como *quantum* da radiação eletromagnética, foi introduzido apenas em 1926.

(1) Um sistema atômico possui um número preciso de estados de energia, chamados **estados estacionários** ou **níveis de energia**, nos quais o átomo não emite radiação mesmo quando os elétrons estão em movimento acelerado;

(2) A absorção ou emissão de radiação corresponde a uma transição entre dois estados estacionários (os níveis de energia, $n = 1, 2, 3, \dots$).

(3) Os possíveis estados estacionários consistem em um elétron a girar em torno do núcleo em órbitas circulares, cujos raios são tais que o movimento de rotação seja quantizado, isto é, só possa assumir valores múltiplos de uma unidade básica ou *quantum*, que é justamente a **constante de Planck**. Presumindo que as reações atômicas radiantes associam-se à emissão ou absorção de um único *quantum* de luz, os níveis quantizados de energia puderam ser deduzidos, permitindo, desta forma, uma compreensão sistemática dos espectros, reproduzindo as expressões quantitativas já propostas pelos espectroscopistas.

Bohr, com a sua concepção semi-clássica para o átomo de hidrogênio, não obteve êxito ao tentar explicar a organização de átomos mais complexos que o de hidrogênio mas, sustentou que, em sistemas polieletrônicos, os elétrons deveriam alocar-se em camadas, com o elétron mais externo sendo responsável pelas propriedades químicas do elemento — hipótese posteriormente confirmada por Wolfgang Pauli.

5 Contribuições Posteriores à Teoria Quântica

O estabelecimento definitivo da teoria quântica ocorreu entre 1924 e 1928, com os trabalhos de Arthur Compton, Louis De Broglie, Erwin Schrödinger, Max Born, Werner Karl Heisenberg, entre outros.

Arthur Compton descreveu o comportamento ondulatório da luz através de efeitos de difração, polarização e interferência. Por outro lado, observou também que, sob certas condições físicas, esta possui propriedades de partículas. O caráter corpuscular da luz, como visto por Compton, foi quantificado através da relação que fixa a energia do fóton à frequência da radiação associada ao mesmo. Esta dualidade onda-partícula (ver discussão na seção anterior) foi a base com a qual Louis De Broglie relacionou números inteiros para a quantificação do movimento dos elétrons e calculou sua trajetória por uma equação semelhante à obtida para explicação do movimento de uma onda do mar. Chegava-se assim a uma natureza também dual para o elétron, na qual esta *partícula* também comportava-se como uma *onda* estacionária constante, em torno do núcleo. A natureza dual do elétron (este pode se comportar tanto como partícula quanto como onda, dependendo das características dimensionais do sistema com o qual interage) levou Bohr, em 1927, a

enunciar o **princípio da complementaridade**, no qual um fenômeno pode ser encarado de duas formas que se excluem mutuamente, permanecendo válidos em seus próprios termos os dois modos de compreendê-las [1,2].

Erwin Schrödinger, após as descobertas de Compton e De Broglie, formulou uma equação diferencial da onda associada às partículas fundamentais e posteriormente descreveu a teoria quântica pela mecânica ondulatória.

Werner Heisenberg, percebendo as dificuldades do modelo atômico de Bohr em reproduzir os resultados experimentais associados a espectroscopia de átomos multieletrônicos, propôs que uma teoria só poderia introduzir variáveis e grandezas a partir de resultados experimentais fisicamente observados. A partir da definição por Bohr de dois estados estacionários da frequência de radiação emitida pelo átomo de hidrogênio, Heisenberg representou estas frequências em forma de matriz, o que o levou ao cálculo de novas grandezas físicas com a generalização das amplitudes das vibrações associadas às frequências; esta — a mecânica matricial — foi uma das principais contribuições de Heisenberg à teoria quântica. Schrödinger demonstrou, posteriormente, a equivalência entre a mecânica de matrizes e a mecânica ondulatória.

Para a mecânica quântica o conceito de órbita bem definida não é aplicável ao elétron. A localização espacial desta partícula é descrita por uma distribuição de probabilidades, que depende de grandezas físicas, tais como a energia e o momento angular da rotação em torno do núcleo, o que é dado pelos quatro números quânticos: o principal (n) correspondendo ao nível, o azimutal (l) correspondendo ao momento angular, o magnético (m) também associado ao momento angular e o de *spin* (s), propriedade intrínseca das partículas fundamentais (tal como a massa) que se revela através da interação com campos magnéticos externos. A introdução de uma função matemática para a distribuição de probabilidades deve-se a Max Born (1926), sendo esta referida como função de onda. Esta idéia lhe valeu o Prêmio Nobel de Física de 1954 [7,8].

Entretanto, não podemos especificar e determinar, simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula com precisão absoluta. Ambas podem, separadamente, ser fixadas precisamente; mas, quanto mais correta for uma delas, mas incerta será outra — tal é o **princípio da incerteza**, formulado por Heisenberg. Na verdade, o princípio da incerteza aplica-se a todo par de observáveis não comutantes.

6 Questões Epistemológicas

Alguns importantes problemas relativos à teoria do conhecimento foram colocados pela teoria quântica. Veja-se, em linhas gerais, algumas destes questionamentos.

O *primeiro* refere-se ao descenso da descrição determinista em prol de um modelo estatístico aplicável aos fenômenos atômicos, o que implicou na refutação da clássica afirmação de Laplace:

“[...] toda a história do Universo poderia ser conhecida se a posição e a velocidade de uma partícula fossem conhecidas em qualquer instante do tempo”. [2]

O aspecto probabilístico é extremamente importante nas formulações da teoria quântica. É precisamente neste horizonte que Heisenberg discute o problema da descrição — probabilística — em termos da impossibilidade de se determinar simultaneamente posição e *momentum* (quantidade de movimento, ou seja, um produto da velocidade pela massa) de uma partícula. Para este autor, há uma realidade potencial, alterada pelo observador — que se propõe a mensurar os fatos —, convertendo-a no real. Tal realidade potencial — dependente do sujeito (ou observador) — é igualmente discutida no princípio da incerteza:

“O conceito de que eventos não são determinados de uma maneira peremptória, mas que a possibilidade ou ‘tendência’ de um evento ocorrer tem uma espécie de realidade — uma certa camada intermediária de realidade, na metade do caminho entre a realidade concreta da matéria e a realidade intelectual das idéias ou das imagens —, este conceito desempenha um papel decisivo na filosofia de Aristóteles. Na moderna teoria quântica este conceito toma uma nova forma; ele é formulado como probabilidade e sujeito... às leis da Natureza.” [9]

Esta formulação probabilística tem nítidas conseqüências no âmbito do conceito de causalidade, algo manifesto desde as primeiras especulações filosóficas no Ocidente — na verdade, pode-se retroceder ainda mais chegando-se ao encontro de conexões causais na própria epopéia homérica [10]. Entendida inicialmente por Aristóteles como *ἀρχή* (*arkhé* = princípio) — ou seja, condição e fundamento ontológico das coisas [11] — constitutiva do “mundo”, a causalidade ganha novos contornos com Immanuel Kant, o qual passa a considerá-la como categoria — conceitos puros do entendimento — presente no sujeito cognoscente [12], demarcando relevante deslocamento do seu âmbito de ação.

Do ponto de vista físico, a causalidade perde boa parte de sua primazia na descrição do mundo quântico [13], uma vez que, no microcosmo, eventos isolados não possuem uma causa bem definida e, além de não ser possível determinar com precisão quando um certo fenômeno irá acontecer; pode-se saber, apenas, a probabilidade para que tal fenômeno ocorra. Exemplos incluem o “salto” de um elétron de um orbital para o outro e o decaimento espontâneo de uma partícula subatômica. Estes fatos, na maior parte das vezes, ocorrem não por causa de um evento local mas sim, por várias interações e forças que ocorrem no átomo.

Bohr critica a idéia de *causalidade* à luz de sua concepção de *complementaridade* (ver acima) por considerá-la insuficiente para explicação de vários aspectos explicitados nas experiências construídas no âmbito da teoria quântica:

“Quão radical foi a mudança promovida por esse avanço da física atômica em nossa atitude perante a descrição da natureza talvez possa ser mais claramente ilustrado pelo fato de que até o princípio de causalidade, antes considerado o fundamento incontestável de toda interpretação dos fenômenos naturais, revelou-se um referencial estreito demais para abarcar as regularidades singulares que regem os processos atômicos individuais. Sem dúvida, todos hão de compreender que os físicos precisam de razões muito convincentes para renunciar ao próprio ideal de causalidade; mas, no estudo dos fenômenos atômicos, foi-nos repetidamente ensinado que questões que se acreditava terem recebido suas respostas finais há muito tempo haviam reservado para nós as mais inesperadas surpresas.” [1].

De fato, também Heisenberg contesta a aplicabilidade da lei causal no domínio do microcosmo:

“Tomemos um simples átomo de Rádio B. É muito mais fácil, é claro, fazer experimentos com um grande número desses átomos, isto é, um pedacinho de Rádio B, do que com um único átomo, mas, em princípio, não há impedimento para que não devamos também estudar o comportamento deste. Sabemos que, mais cedo ou mais tarde, o átomo de Rádio B deve emitir um elétron em alguma direção, transformando-se em um átomo de rádio C. Em média, isso acontece após cerca de meia hora, mas o átomo pode transformar-se em segundos, ou somente dias depois. O

que queremos dizer com ‘média’ é simplesmente que, no caso de um grande número de átomos de rádio, metade deles se terá transformado após cerca de trinta minutos. Mas não podemos, e é aí que a lei causal falha, explicar por que um determinado átomo se desintegra num dado momento, e não no seguinte, ou o que o faz emitir um elétron exatamente numa certa direção e não na outra. Estamos convencidos, por muitas razões, de que essa causa não existe.” [13]

Esta indeterminação representou um genuíno “golpe” em toda uma tradição de pesquisa que se ancorava na pretensa investigação do *mundo objetivo* de processos físicos que têm lugar no espaço e no tempo — independentes de quem investiga —, de acordo com leis exatas. [13, 14] Pode-se dizer que disto restou, apenas, símbolos matemáticos referidos à possibilidades, não mais a fatos. [9]

O *segundo* foi o paradoxo da dualidade onda-partícula que propiciou, a *priori*, a concepção de um Universo “misterioso” e “impenetrável”, [2] com entidades físicas microscópicas que podem revelar padrões de comportamento excludentes em uma abordagem da física clássica. Este horizonte abre as perspectivas de compreensão da realidade, tornando pouco viável as tentativas de “encarceramento” teórico em modelos rígidos, inflexíveis e que se pretendam a instância acabada, como o apontado pelo físico e epistemólogo Paul Feyerabend, nos dois excertos a seguir:

“[o] mundo que desejamos explorar é uma entidade em grande parte desconhecida. Devemos, pois, conservar-nos abertos para as opções, sem restringi-las de antemão. [...] A tentativa de fazer crescer a liberdade, de atingir vida completa e gratificadora e a tentativa correspondente de descobrir os segredos da natureza e do homem implicam, portanto, rejeição de todos os padrões universais e de todas as tradições rígidas.” [15].

“A realidade última, se é que se pode postular tal entidade, é inefável. O que conhecemos são as diversas formas de *realidade manifesta*, quer dizer, as formas complexas em que a realidade última atua no domínio (o ‘nicho ontológico’) da vida humana. Muitos cientistas identificaram a realidade manifesta particular que desenvolveram com a realidade última. Este é simplesmente um equívoco.” [16]

O *terceiro* refere-se à própria objetividade do conhecimento neste âmbito do microcosmo. As tentativas de investigação desta *realidade quântica*, nos casos em que as energias envolvidas são próximas ao *quantum*, esbarram na ocorrência de uma troca de energia incontornável entre o átomo e os instrumentos de mensuração, o que acaba por perturbar completamente aquilo que é o “objeto” de estudo. Altera-se, assim, a relação observador-objeto pois, em um amplo sentido, o primeiro passa a compor com o segundo uma unidade indissociável, uma vez que o *quantum* de ação impõe restrições à descrição do estado dos sistemas por meio de coordenadas espaço-temporais e quantidades momento-energia [1,2]. Na medida que a descoberta do *quantum* trouxe questionamentos acerca da objetividade do observador científico, a explicação do funcionamento de qualquer aparato instrumental de mensuração torna-se fundamental para a compreensão dos fenômenos, em um horizonte no qual também se inscreve a teoria da relatividade:

“Assim como o conceito geral da relatividade expressa a dependência essencial de qualquer fenômeno em relação ao sistema de referência usado para a descrição no espaço e no tempo, a noção de complementaridade serve para simbolizar a limitação fundamental, encontrada na física atômica, da existência objetiva de fenômenos independentemente dos meios de sua observação”. [1]

Com base nestas premissas, não faz mais sentido se falar em uma separação cartesiana entre o que observa e o que está sendo observado — em relação ao mundo subatômico —, podendo-se considerar, inclusive, a incorporação da própria *mente* do observador na elaboração dos enunciados referentes às situações de teste. [17] Pode-se entender, deste modo, que se a física newtoniana legou uma *epistemologia realística* referente ao macronível, a teoria quântica tem como pressuposto uma concepção epistemológica *subjetivística* apropriada à compreensão do micronível. [14]

Estes questionamentos permitem chegar a uma idéia geral da teoria quântica, “conquista” da física contemporânea que mostrou, claramente, que a descrição clássica dos fenômenos constituía-se em uma idealização de aplicabilidade restrita [1, 13, 14]. Ela acabou por separar o universo do átomo do mundo habitual que nos rodeia, tornando-se impraticável a representação da estrutura atômica em termos do *senso comum*. Além disso, fez-se necessária a renúncia ao uso de modelos pictóricos, o que significa a base para a reformulação radical de toda a

descrição necessária aos eventos da nascente ciência quântica.

Por todas estas características ímpares, a física quântica representa uma das ousadas construções teóricas forjadas na busca pela compreensão da Natureza — talvez, uma das mais inquietantes de todos os tempos.

7 Considerações Finais

E assim se fez... Por mais de dois séculos, a mecânica newtoniana foi considerada absoluta — carregada de verdades, até certo ponto, incontestáveis — e capaz de explicar e descrever todo o cosmo, propiciando a possibilidade de atuação sobre este. Entretanto, como outras teorias formuladas, vem sendo reconsiderada, colocando em xeque a idéia de leis e modelos definitivos para a descrição da Natureza. Estas conjecturas vem evocando a reavaliação da própria possibilidade de conhecer, como manifestado na angustiada indagação da filósofa Grete Hermann dirigida aos físicos Heisenberg e Carl Friedrich:

“Os senhores acreditam, em última instância, que o conhecimento não tem nenhuma base sobre a qual possamos nos posicionar com segurança?” [13]

Eis, obviamente, uma pergunta que atravessou a tradição ocidental, merecendo os mais diferentes tipos de [precárias] respostas. Neste sentido, torna-se provável que um dos grandes ganhos da mecânica quântica, além da tentativa de representação da realidade, tenha sido a demonstração de que o homem não detém a absoluta supremacia — cognoscitiva, ao menos — que pensava possuir, sobre o mundo em que vive...

8 Agradecimento

Os autores são profundamente gratos aos pareceristas que avaliaram o presente artigo. As críticas e sugestões apresentadas foram cruciais para o aprimoramento do texto.

9 Referências

- [1] N. BOHR, *Física Atômica e Conhecimento Humano*, Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.
- [2] R. SIQUEIRA-BATISTA, R. SIQUEIRA-BATISTA, M.P. SFORZA-DE-ALMEIDA, A.D. CORRÊA, *Ensaio Sobre o Átomo*, Rio de Janeiro: Litteris, 2000.
- [3] J. BERNSTEIN, *As Idéias de Einstein*, São Paulo: Cultrix, 1973.
- [4] A. EINSTEIN, L. INFELD, *Evolução da Física*, Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1962.
- [5] G.N. LEWIS, *Nature*, 118, 874 (1926).
- [6] M. KLEIN, *The Natural Philosopher*, 3, 23 (1964).
- [7] M. BORN, *Z. Physik* 40, 167 (1926).
- [8] M. BORN, *The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics*, Nobel Lecture, December 11 (1954). Em: www.nobel.se/physics/laureates/1954/born-lecture.pdf.
- [9] W. HEISENBERG, *Physics and Philosophy*, New York: Harper Torchbooks, 1958.
- [10] R. SIQUEIRA-BATISTA, *Deuses e Homens. Mito, filosofia e medicina na Grécia antiga*, São Paulo: Landy, 2003.
- [11] ARISTÓTELES, *Metafísica*, Porto Alegre: Globo, 1969.
- [12] I. KANT, *Crítica da Razão Pura*, Rio de Janeiro: Edições de Ouro, 1966.
- [13] W. HEISENBERG, *A Parte e o Todo*, Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- [14] M. BRUNGE, *Física e Filosofia*, São Paulo: Perspectiva, 2000.
- [15] P. K. FEYERABEND, *Contra o Método*, Rio de Janeiro: Livraria Francisco Alves, 1977.
- [16] P. K. FEYERABEND, *La Conquista de la Abundancia.*, Barcelona: Paidós, 2001.
- [17] E. WINGER, *Remarks on the mind-body question*, In J. Good (ed.), *The Scientist Speculates*, Londres, Heinemann, 1962.