

**FILOSOFIA DA FÍSICA QUÂNTICA:
A TÍTULO DE PREFÁCIO**

DÉCIO KRAUSE & OTÁVIO BUENO

Este volume contém artigos tratando de tópicos variados acerca dos fundamentos e da filosofia da física, unidos pelo objetivo comum de apresentar ao leitor aspectos filosóficos da física presente, com especial ênfase na teoria quântica. Certamente não poderíamos esperar abranger a filosofia da física, e nem mesmo da física quântica, em um único volume, dada a amplitude de assuntos e as diferentes visões que há entre os diversos pesquisadores que atuam na área. Os autores deste volume têm dado contribuições significativas em vários temas referentes ao estudo da filosofia da física quântica. Assim, é com grata satisfação que apresentamos aos leitores de *Manuscrito* esta coletânea de artigos, idéia encampada de imediato pelo editor da revista, professor Marco Ruffino.

Tendo em vista a ainda pouca divulgação que o assunto tem em nossos cursos de filosofia (referimo-nos ao Brasil), preferimos escrever este prefácio apresentando alguma informação (sempre incompleta e informal) sobre a área em nossa língua, esperando despertar interesses e atingir (pelo menos com este texto) um público mais amplo. Sempre que possível, indicaremos em nossas referências textos introdutórios em português, em cujas referências, por sua vez, encontram-se indicações de trabalhos mais aprofundados. O especialista e o interessado em filosofia e em fundamentos da teoria quântica, no entanto, não encontrará neste prefácio maiores novidades, mas certamente se beneficiará dos artigos coligidos neste volume. Esperamos que esse seja, de fato, o caso.

Agradecemos não somente aos autores, que aceitaram nosso convite de submeter um trabalho ao volume, mas também aos colegas que serviram de árbitros para os artigos e ao editor de *Manuscrito*, acima mencionado, pela acolhida desta proposta. A Nilza Clarice Galindo, nossos especiais agradecimentos, pois sem sua assistência este volume nunca teria sido produzido.

O contexto e algumas questões

Como é amplamente difundido, as duas grandes teorias físicas do século XX, a teoria da relatividade (na verdade, *as* teorias da relatividade, a especial, ou restrita, de 1905, e a geral, de 1916) e a física quântica, constituem avanço sem precedentes em nossa imagem do mundo e das formas pelas quais o apreendemos (o artigo de P. Kauark neste volume introduz várias questões neste sentido).

Por física quântica entende-se hoje em dia um grupo de disciplinas, ou teorias, que têm sua origem no que se denomina de *antiga* teoria quântica, que se considera ter sido originada quando Max Planck introduziu a hipótese do *quantum* elementar de ação em 1900 na explicação de um dos fenômenos que a física clássica não dava conta, a radiação do corpo negro.¹ Decorrente disso, passou-se a entender que a radiação não se dava de forma contínua, mas em unidades discretas, múltiplas do quantum fundamental. Subsequentemente, Albert Einstein utilizou os *quanta* de Planck na explicação (em 1905) de outro dos fenômenos problemáticos para a física clássica, o efeito fotoelétrico. Finalmente, Niels Bohr também usou princípios quânticos em sua teoria do átomo de hidrogênio, em 1913. Bohr tornou-se mais tarde um dos principais artífices de uma das versões historicamente mais bem aceitas da mecânica quântica, apesar de controversa, a chamada *interpretação de Copenhague*, assentada em sua noção de *complementaridade*, introduzida em 1927, no *princípio de incerteza*, de Heisenberg, que apareceu no mesmo ano, e no fenômeno da *não-localidade*, do qual falaremos abaixo. Na década de 1920, a necessidade de se ter uma ‘teoria’ adequada aos ditames quânticos levou Werner Heisenberg à formulação de uma ‘mecânica de matrizes’ (em 1925), posteriormente desenvolvida por ele mesmo, por Max Born e por Pascual Jordan. Quase simultaneamente, Erwin Schrödinger (em 1926) desenvolveu uma mecânica ondulatória, combinando ideias próprias com as de Louis de Broglie (e de Einstein). Essas duas ‘mecânicas’, que contrastam dois conceitos fundamentais, o de partícula e o de onda, são hoje consideradas (em certa medida) equivalentes. As mecânicas quânticas obtidas até então são por vezes denominadas de *tradicionais* (ou *ortodoxas*), não envol-

¹O quantum elementar de ação é encapsulado pela ‘constante de Planck’, $h = 6.626 \times 10^{-34} J.s$. Outra constante importante no contexto quântico é $\hbar = h/2\pi$, denominada de ‘*h-cortado*’. A palavra ‘quantum’ (no plural, ‘quanta’) sedimentou-se como designando uma quantidade mínima na qual uma quantidade física pode ser encontrada na natureza, e cujos múltiplos determinam como ela aumenta ou diminui [13, p. 308].

vendo aspectos relativísticos. Por exemplo, as noções de espaço e tempo são ainda ‘newtonianas’, absolutas. Pouco depois (por volta de 1927), Paul Dirac mesclou a relatividade restrita (ou especial) com a física quântica, iniciando uma outra forma de ‘teoria quântica’, que resultou nas *teorias quânticas de campos* (‘QFT’ em inglês, para ‘quantum field theory’, sigla que se costuma utilizar mesmo em português).

Perplexidades filosóficas associadas a todo este desenvolvimento teórico não deixaram de surgir. Alguns exemplos podem ser apresentados a título de ilustração. A teoria do átomo de Bohr, e a interpretação de Copenhague em geral, aceitavam a existência de ‘saltos quânticos’. Falando informalmente, isso significa a passagem de um elétron de uma órbita para outra sem que seguisse uma trajetória de uma a outra órbita (ou seja, sem que ‘passasse’ pela região intermediária), algo jamais aceito por Schrödinger. Heisenberg introduziu, em 1927, a noção fundamental de incerteza, ou indeterminação, segundo a qual há observáveis físicos que não podem assumir valores exatos de medida simultaneamente — são ‘observáveis que não comutam’. Por exemplo, posição e momento, ou valor da energia e instante de medida, não podem ser medidos a não ser com certo ‘grau de incerteza’ ou de indeterminação: quanto mais se precisa o valor de um deles, mais se perde o valor do outro. Isso não acontece na física clássica, onde todos os observáveis físicos podem assumir valores (ser medidos) simultaneamente. Por diversas vezes, Einstein tentou derrubar o princípio de incerteza através de brilhantes *Gedankenexperimente*, ou experimentos de pensamento, tendo sido sempre rebatido por Bohr em um debate que se estendeu por anos e que segundo especialistas constituiu o maior debate científico do século XX. Mais tarde, Einstein deixou de lado os ataques ao princípio de incerteza, voltando-se em 1935 para a ‘completude’ da mecânica quântica — a tese segundo a qual esta teoria dá conta da descrição ‘completa’ dos fenômenos — em um trabalho célebre realizado com Boris Podolski e Nathan Rose (denominado ‘argumento EPR’). Nesse contexto, encontraremos (já nos anos 1960) John Bell, mencionado em alguns dos artigos deste volume, que obteve alguns dos resultados física e filosoficamente mais impressionantes na área.

Com efeito, a discussão entre Einstein e Bohr (ver [6]) era puramente teórica, mas Bell encontrou um modo de quantificar certos fatores de modo a que se pudesse, por assim dizer, decidir a questão no laboratório. Partindo da hipótese de Einstein, denominada de *realismo local*, obteve desigualdades que deveriam ser violadas pela mecânica quântica, as famosas *desigualdades de Bell* (o leitor pode consultar [10] para uma boa descrição das desigualdades

e seu contexto). Os experimentos no sentido de verificar se as desigualdades seriam obedecidas (o que daria razão a Einstein) ou violadas (o que favoreceria Bohr) começaram a ser realizadas no início dos anos 70, mas foi somente com os avanços experimentais, em particular com as experiências realizadas pelo grupo de Alan Aspect, na França, em 1982, que se constatou quase que sem nenhuma dúvida que as desigualdades são violadas.

Esta vitória da mecânica quântica possui importantes implicações filosóficas. Por exemplo, o realismo local deve ser questionado. Mas o que significa isso? Por *realismo*, aqui, deve-se entender uma forma de realismo devida a Einstein, calcada na sua noção de separabilidade. Como sugere Don Howard, um estudioso da obra de Einstein, por *realismo*, o físico alemão entendia um postulado físico, e não uma doutrina filosófica. Trata-se de uma tese acerca da separabilidade espacial dos sistemas físicos, uma condição que ele reputava como essencial para a inteligibilidade da física. Sistemas físicos ‘separados’ seriam realidades físicas distintas, independentes [5]. O que acontece em um desses sistemas é algo *local*, não afetando o outro simultaneamente. A mecânica quântica (no sentido da interpretação de Copenhague), pelo contrário, apregoava que objetos físicos que tenham tido uma origem comum, mesmo que estejam separados espacialmente, não necessitam ser independentes. Desse modo, devido a esta origem comum, a medida de um observável em um desses sistemas pode permitir que se conheça o valor do mesmo observável para o outro sistema, e isso ‘instantaneamente’. Ora, essa aparente ‘instantaneidade’ sugere que o segundo sistema ‘aprendeu’ o resultado do primeiro de forma instantânea, o que violaria a relatividade restrita (mais precisamente, a chamada *localidade*), segundo a qual uma informação não pode viajar de um local a outro com uma velocidade infinita (a velocidade da luz, por exemplo, é finita). Claro que essa descrição é bastante informal, mas oferece uma ideia da complexidade das questões envolvidas. Assim, a mecânica quântica (na visão de Copenhague) violaria a localidade ou o realismo einsteniano. Como a grande parte dos físicos não estaria disposta a questionar a relatividade especial, o realismo (na forma acima) foi posto em cheque.

Mais recentemente (em 2003), Anthony Leggett obteve outras desigualdades calcadas no conceito de realismo, mas relaxando a localidade. As desigualdades de Leggett igualmente deveriam ser violadas pela mecânica quântica, o que se comprovou com experimentos realizados em Viena e em Gdansk pela equipe de um dos principais físicos experimentais da atualidade, Anton

Zeilinger, juntamente com Markus Aspelmeyer.² Segundo muitos autores, a possibilidade de se obter um questionamento do realismo einsteniano perante uma hipótese mais fraca acerca da localidade indica que a visão do grande físico alemão deve mesmo ser posta em cheque. (Sobre o significado desse ‘relaxamento’, o leitor pode consultar o artigo de Zeilinger e de Aspelmeyer [15].)

O interessante é que, apesar de todos os desenvolvimentos subsequentes que conduziram à QFT e ao que se denomina de *modelo padrão* da física de partículas [2], o formalismo da mecânica quântica não relativista ainda permanece importante tanto para as questões experimentais quanto para as filosóficas. Nesse contexto, não se pode deixar de mencionar John von Neumann. Em um livro célebre sobre os fundamentos da mecânica quântica, publicado em 1932, ele apresentou uma descrição matemática do formalismo da mecânica quântica que é talvez a mais utilizada, denominada de abordagem via espaços de Hilbert (ver [13, §6.2.5]). Esse formalismo foi mais tarde estendido de forma a acolher também parte das teorias quânticas de campos que lidam com campos livres (sem interação), os chamados *espaços de Fock* (ver [12]). Von Neumann provou ainda um teorema que, segundo se interpretou na época, impedia a existência de *variáveis ocultas* (‘hidden variables’), algo que ‘completaria’ a mecânica quântica, como queria o argumento EPR.

Um dos maiores desafios nesse contexto foi apresentado por David Bohm em 1952. Contrariamente ao teorema de von Neumann, Bohm apresentou uma teoria quântica empiricamente equivalente às demais envolvendo variáveis ocultas. Como seria isso possível? Vários *no-go theorems* ao estilo von Neumann surgiram depois, mas a discussão sobre a possibilidade desse tipo de variáveis ainda continua, e a mecânica de Bohm e as teorias de variáveis ocultas em geral têm muitos defensores atualmente, uma vez que todos esses teoremas *no-go* (Gleason, Kochen-Specker) apresentam sempre alguma limitação (a teoria de Bohm é tratada no artigo de Huggett e Vistarini). Em suma, mesmo a violação das desigualdades de Bell e de Leggett, bem como esses teoremas *no-go*, não impedem a elaboração de *todas* as teorias de variáveis ocultas. O tema é ainda bastante atual e aparece em alguns artigos deste volume.

Uma das questões filosóficas mais interessantes e intrincadas diz respeito ao que se denomina de ‘interpretação’ do formalismo da física quântica. De

²A propósito, em 2005 a Editora Globo publicou uma tradução para o português de um excelente livro de divulgação de Zeilinger [14].

forma sucinta, eis o que ocorre. A descrição matemática da teoria pode ser feita de diversos modos: com ou sem espaços de Hilbert, algebricamente, etc. Ela é bem entendida pelos especialistas, mas seu *significado* permanece um enigma. Por exemplo, é célebre a frase de Bohr segundo a qual “[a]queles que não ficam chocados quando adentram pela primeira vez a teoria quântica possivelmente não a compreenderam” (citada em [6, p.1]). Feynman, outro dos grandes físicos da área, insistia que é simplesmente impossível entender essa disciplina.

Mas do que, de fato, estamos falando? De sistemas físicos ou de estados de sistemas físicos? A função de onda descreve algo ‘real’ (tem alguma ‘realidade objetiva’)? Como devemos ver o mundo se o olharmos por meio da teoria quântica? Como explicar os saltos quânticos? Há mesmo objetos duais, que ora se portam como ondas, ora como partículas?

Com efeito, uma das grandes questões que originaram toda essa discussão foi o comportamento dual da luz, amplamente verificado experimentalmente desde os primeiros experimentos de Young em 1803. Em certas circunstâncias (na linguagem do físico, ‘dependendo da maneira como se prepara o experimento’), a luz se comporta como se fosse composta de pequenas partículas, em outras, como se fosse uma onda. Em 1923, Louis de Broglie sugeriu que a própria matéria teria esse comportamento (as ‘ondas de matéria’), o que também foi comprovado experimentalmente. Esta hipótese constitui o alicerce da mecânica quântica ondulatória, desenvolvida por Schrödinger. Hoje em dia, físicos experimentais como Zeilinger têm relatado experimentos comprovando essa dualidade mesmo para ‘objetos’ considerados grandes para os padrões quânticos, como os fluorenos, moléculas contendo 60 ou 70 átomos de carbono. (Para informações sobre estas moléculas, veja o livro de Zeilinger [14].) De fato, a linha divisória entre o mundo quântico e nosso mundo macroscópico é tênue, e estabelecê-la sempre foi um ponto delicado nos estudos dos fundamentos dessa disciplina. Uma tese bem aceita nesse contexto é a de que sistemas físicos contendo milhares e milhares de *quanta*, ou seja, sistemas ‘grandes’ como os objetos macroscópicos que nos cercam, perdem suas características quânticas. Este fenômeno, que se conhece como *decoerência*, é tratado no artigo de Lombardi.

Outra questão central é a noção de probabilidade, que é discutida em alguns artigos deste volume (veja, por exemplo, os trabalhos de Bitbol, Lewis, e Barros & Suppes). Para Einstein e outros, a noção de probabilidade deveria entrar na física quântica da mesma forma que na física clássica, ou

seja, como medida de nossa ignorância. Mas, de acordo com certa versão da interpretação de Copenhague, a mecânica quântica possui uma natureza essencialmente probabilística, dificultando, assim, uma formulação determinista desta teoria. Para alguns, há aqui um choque direto com a noção clássica de causalidade. (Esta sugestão, todavia, apresenta certa confusão conceitual, já que determinismo e causalidade são conceitos distintos, sendo possível haver causas mesmo em contextos probabilísticos.)

Outro conceito fundamental na interpretação de Copenhague é o de *superposição*, sem correlato na física clássica, segundo o qual certos sistemas físicos podem estar em um estado de ‘superposição’ de outros estados. De difícil descrição informal, este conceito é vulgarmente exemplificado (erroneamente) dizendo-se, em referência ao famoso ‘experimento do gato de Schrödinger’ (de 1935), que o famoso gato estaria vivo e morto ao mesmo tempo.³ Na verdade, o gato estaria em *superposição* de estados, estado-vivo e estado-morto, mas isso não acarreta que esteja em ambos simultaneamente. Como não há equivalente ‘clássico’ para essa situação, as analogias são via de regra equivocadas. Somente após o ato de medição é que a função de onda gato-vivo—gato-morto *colapsa* em um dos estados, vivo ou morto. Segundo a interpretação de Copenhague, enquanto a medição não é realizada, nada se pode afirmar sobre o estado do sistema, o que levou Einstein a indagar a Abraham Pais se este acreditava que a lua só existia quando olhasse para ela [7, p. 3]. Essa brincadeira envolve uma das questões centrais relacionadas aos fundamentos da física quântica: explicar o colapso da função de onda. Esta função, que depende de parâmetros espaciais e temporais, descreve o sistema físico e evolui (deterministicamente) segundo a *equação de Schrödinger*. Discute-se ainda hoje o status da função de onda: descreve ela algo ‘real’ ou deve ser tomada como algo abstrato (que não necessariamente descreve o mundo físico)?

Esta questão foi colocada de forma brilhante em 1927 por Einstein em outro

³De forma breve, este *Gedankenexperiment* sugere um gato preso em uma sala totalmente fechada, na qual há um frasco de veneno que pode se quebrar quando uma substância radioativa emite radiação, matando o gato. Sabe-se que o material emitirá radiação, nas não quando. Assim, enquanto não observarmos o interior da sala, tudo o que podemos dizer (segundo a interpretação de Copenhague) é que o gato está em superposição de dois estados: um no qual ainda não houve emissão de radiação (gato-vivo) e outro no qual a emissão ocorreu (gato-morto). É somente depois da observação (que corresponderia à medição de certo observável para o sistema nesse estado superposto) que constataríamos o estado do gato, ou seja, a função de onda *colapsaria* em um dos dois estados possíveis.

Gedankenexperiment sobre a não-localidade do colapso. O físico alemão argumentou que (grosseiramente falando) se a função de onda fosse ‘real’, como uma onda surgida em uma lagoa calma quando nela se joga uma pedra, ela seria composta de círculos concêntricos de raios diferentes. (Veja a Figura 1 que descreve a situação em apreço.)

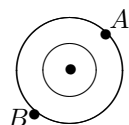


Figura 1

Assim, uma medida em A ocasionaria o colapso da função de onda, fazendo com que ela desaparecesse em B , produzindo um fenômeno não-local (a medida em A ocasionaria ‘instantaneamente’ uma ação em B).⁴ O tema da não-localidade é tratado por Pessoa Jr. neste volume, no contexto de uma abordagem ‘contrafactual’.

Retornando ao tema das interpretações da mecânica quântica, uma das que tem muitos adeptos atualmente, e que é mencionada em vários artigos deste volume, é devida a Hugh Everett III, apresentada em 1956, e conhecida como *interpretação dos muitos-mundos*. Segundo esta interpretação, todas as possibilidades de evolução de estado descritas pela teoria quântica ocorrem simultaneamente em universos paralelos distintos que não interagem. Por exemplo, antes da medição, o famoso gato está vivo em um dos mundos, e morto em outro. Um dos artigos deste volume (de Peter Lewis) discute o conceito de probabilidade nessa interpretação. Outras interpretações que aparecem nos artigos deste volume, e que têm recebido um número crescente de propostas e de discussões, pertencem ao grupo das *interpretações modais*, que originaram-se do problema da medição em mecânica quântica (ver o artigo de O. Lombardi, e, para uma discussão de caráter geral, [3]). O problema da medição e do colapso da função de onda trazem ainda outras tentativas de resposta, como a interpretação GRW, devida a Ghirardi, Rimini e Weber, tratada no artigo de G. Bacciagaluppi, que também menciona a interpretação de Everett.

Boa parte da discussão filosófica diz respeito à validade de princípios lógicos clássicos no contexto quântico. Em 1936, von Neumann e Garrett Birkhoff questionaram a validade da lei distributiva da conjunção em relação à disjunção, sugerindo que a ‘lógica’ subjacente à física quântica seria uma lógica não clássica, dando origem a um ramo da lógica conhecido como *lógica*

⁴Uma explicação mais precisa pode ser vista em [8, pp. 38-9].

quântica. Esta lógica encontra-se hoje bastante relacionada à computação quântica, área na qual alguns dos autores deste volume são reconhecidos especialistas. Em particular, veja a interessante discussão da lógica quântica oferecida por Dalla Chiara, Giuntini e Negri.

Outra questão de fundamentos é a seguinte. É patente que a física quântica faz uso da noção de indiscernibilidade; sem ela não se pode, por exemplo, explicar a tabela periódica. Entidades quânticas em um mesmo estado (e algumas delas podem partilhar estados, os chamados *bosons*) têm todas as mesmas características ou, como se diz usualmente, as mesmas propriedades. Mas há entidades que não são bosons: os *fermions*. (Conhecem-se apenas bosons e fermions, ainda que o formalismo seja compatível com a existência de ‘parapartículas’ de diversos tipos.) Ainda que fermions não possam estar em um mesmo estado, pois devem obedecer ao *princípio de exclusão de Pauli*, tais entidades não podem ser identificadas individualmente. Se tivermos duas delas, como dois elétrons (que são fermions) em um átomo de helio em seu estado de mais baixa energia (dito ‘estado fundamental’), não poderemos de forma alguma distinguir qual é qual, ainda que essas entidades difiram em uma questão importante, o *spin*. (Aliás, este é outro conceito que surgiu no contexto da física quântica, sem contraparte na física clássica.) No entanto, a matemática que utilizamos é a tradicional, calcada na lógica clássica, e nessa matemática (e nessa lógica), não existe distinção entre os conceitos de indistinguibilidade, ou indiscernibilidade, e identidade: se objetos são indiscerníveis, são *o mesmo* objeto, são idênticos (a recíproca vale igualmente). Com efeito, tanto a lógica como a matemática tradicionais encapsulam uma versão do que é denominado na literatura de Princípio da Identidade dos Indiscerníveis, que remonta a Leibniz. Segundo este princípio, entidades que possuem as mesmas propriedades, sendo portanto indiscerníveis, não podem ser distintas, isto é, são *a mesma* entidade. No entanto, em certas circunstâncias, como dito, essas entidades não podem ser discernidas *mesmo em princípio*, o que ocorre por exemplo em um *condensado de Bose-Einstein*, um BEC.⁵ Ainda assim, podem elas ser consideradas distintas? Como podem os objetos quânticos serem indiscerníveis (obedecerem à chamada ‘estatística de Bose-Einstein’) sem que colapsem em um único objeto? Estaremos violando a lógica clássica?

Isso dá margem a outra gama de questões acerca dos fundamentos lógicos das teorias quânticas, como se pode ver no artigo de Domenech e de Ronde neste

⁵O leitor interessado encontrará informações valiosas na *BEC Homepage* (<http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/>) da Universidade do Colorado.

volume. Krause e Bueno, na mesma linha, discutem aspectos ontológicos relacionados ao que significaria assumir uma interpretação segundo a qual os objetos quânticos seriam entidades sem individualidade. Por outro lado, esses autores juntam-se a N. da Costa para apresentar questões sobre o formalismo matemático (e lógico) utilizado na formulação de teorias físicas.

Até o momento, não se conseguiu juntar a QFT (ou, mais precisamente, *as* teorias quânticas de campos) com a relatividade geral (RG): essas teorias são incompatíveis. Uma delas (QFT) trata da natureza das entidades básicas da matéria e de suas interações — é a chamada *física de partículas*, ou *modelo padrão* — ao passo que a outra (RG) descreve o espaço-tempo e a gravidade. Não deixa de ser impressionante que, ao se descer à ‘escala de Planck’ (cerca de 10^{-23} cm), como no interior dos núcleos dos átomos, essas duas teorias tenham que ser mescladas. A busca por uma teoria da gravitação quântica é um tema central na física teórica contemporânea, sendo as teorias de cordas e supercordas (veja [4]) e a gravitação em *loop* (veja [11]) duas das mais conhecidas propostas. No entanto, há ainda questões filosóficas importantes, de natureza ontológica e conceitual, relacionadas à QFT (ver [1]).

O volume se encerra com um ensaio-resenha do livro de Shimon Malin, *A Natureza ama Esconder-se*, feita por Jonas R. B. Arenhart, estudante de doutorado do programa de pós-graduação em filosofia da Universidade Federal de Santa Catarina. O livro, como se pode ver na resenha, trata da filosofia da mecânica quântica, propondo uma interpretação que leva em conta ideias de Alfred North Whitehead e Plotino.

O tema dos fundamentos lógicos, epistemológicos, e ontológicos da física quântica constitui um grupo de assuntos de interesse aos filósofos da ciência, mas não cobre tudo. As preocupações digamos ‘clássicas’ juntam-se outras como as mencionadas acima: a não-localidade, a questão das interpretações do formalismo e da natureza das entidades em questão (entre outras). Esperamos que os trabalhos deste volume contribuam para um melhor entendimento das peculiaridades encontradas no universo quântico.

Referências

- [1] CAO, T. Y. (ed.), *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory*, Cambridge: Cambridge Un. Press, 1999.

- [2] COTTINGHAM, W. N. & GREENWOOD, D. A., *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*, Cambridge: Cambridge Un. Press, 2007.
- [3] DICKSON, M. & DIEKS, D., ‘Modal Interpretations of Quantum Mechanics’, The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2009 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <http://plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/qm-modal/>.
- [4] GREENE, B., *O Universo Elegante: Supercordas, Dimensões Ocultas e a Busca da Teoria Definitiva*, S. Paulo: Cia. das Letras, 2001.
- [5] HOWARD, D., ‘Einstein’s Philosophy of Science’, The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2010 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <http://plato.stanford.edu/archives/sum2010/entries/einstein-philsience/>.
- [6] KUMAR, M., *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality*, London: Icon Books, 2008.
- [7] PAIS, A., *Sutil é o Senhor ...: a Ciência e a Vida de Albert Einstein*, Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.
- [8] PESSOA Jr., O., *Conceitos de Física Quântica*, S. Paulo, Livraria da Física Editora, 2003.
- [9] PESSOA Jr., O., *Conceitos de Física Quântica*, Vol.2, S. Paulo, Livraria da Física Editora, 2006.
- [10] SHIBENI, S., *Aspectos da Descrição Física da Realidade*, Campinas: Coleção CLE n. 21, 1997.
- [11] SMOLIN, L., *Três Caminhos para a Gravidade Quântica*, Rio de Janeiro: Rocco, 2002.
- [12] TELLER, P. (1995), *An Interpretative Introduction to Quantum Field Theory*, Princeton: Princeton University Press.
- [13] TORRETTI, R., *The Philosophy of Physics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [14] ZEILINGER, A., *A Face Oculta da Natureza: o Novo Mundo da Física Quântica*, S. Paulo: Globo, 2005.

- [15] ZEILINGER, A. & ASPELMEYER, M., 'Des photons qui défient le réel', *La Recherche*, avril 2008, 36-39.