

Introdução Filosófica aos Fundamentos da Física Quântica

*Carlos Roberto Ferreira de Castro
Simone da Silva Fernandes
Cíntia Guimarães Ferreira*

1. Introdução

O que é realidade? A cultura do ser humano carrega consigo essa pergunta e muitas tentativas de explicação. Durante anos a filosofia assumiu a responsabilidade do conhecimento da realidade do mundo. Com o desenvolvimento do método científico, a filosofia passou a ser uma reflexão sobre o conhecimento do mundo, que passou a ser dado pela ciência. O método científico mudou a realidade filosófica subjetiva do ser humano, levando-o para o laboratório experimental, para uma realidade filosófica objetiva. A localização de um ente¹ no espaço e tempo se fez necessária para determinar a sua realidade. A independência do sistema de referência², na mecânica clássica, mostrou que a realidade temporal de um ente era absoluta; independente do observador (o tempo é o mesmo para todos os observadores). A teoria da relatividade restrita, ajustou o eletromagnetismo de Maxwell com a mecânica Newtoniana, usando a transformada de Lorentz, colocando o ente em um espaço quadrimensional (espaço-tempo). A sua realidade temporal passou a ser relativa, ou seja, dependente do sistema de referência (o tempo não é o mesmo para observadores parados e em MRU). Para essa realização, Einstein postulou o absolutismo da velocidade da luz no vácuo, criando uma realidade Universal independente do observador. Isto influenciará a sua filosofia objetiva da realidade e até a sua morte não aceitou o estado emaranhado³ de entes quânticos, que exigiam uma realidade física não-local⁴.

Classicamente o conceito de realidade estava estabelecido: Um objeto físico comporta-se como uma onda ou como corpúsculo, mas nunca como ambos, simultaneamente. Os fenômenos ondulatórios (noção de con-

tínuo) são descritos pelo eletromagnetismo de Maxwell e os fenômenos corpusculares (noção de discreto) são descritos pela mecânica Newtoniana. Assim, a realidade clássica atendia a nossa intuição de realidade do Universo, com os seus conceitos de trajetórias, causalidade, determinismo, localidade e energia (contínua).

A física quântica exige uma nova interpretação da realidade, contradiz a nossa intuição clássica e nos deixa sem uma filosofia objetiva do que é realidade. Todo o estudo filosófico da realidade quântica proposto, estará limitado ao seu início, a sua interpretação ortodoxa (interpretação de Copenhague), ou seja, estaremos falando de Bohr, da pedra no seu sapato (Einstein) e do princípio da incerteza de Heisenberg.

O que temos é um pragmatismo inevitável, pois ela representa uma teoria física bem estabelecida e é a responsável por toda a tecnologia do mundo moderno.⁵

2. Desenvolvimento

2.1 Primeiro momento

No ano de 1900 a ciência parecia não ter dúvidas do seu critério de realidade. Tudo indicava, que os laboratórios experimentais, estavam aguardando o avanço tecnológico para realizações mais precisas de suas medidas⁶. Estabelecida as condições iniciais de uma partícula (por exemplo: sua posição e velocidades iniciais) a função que descreve o movimento tinha o seu futuro e passado determinados. Ainda mais: Na realidade Newtoniana, podemos nascer velhos e morrer novos⁷. A segunda lei da

¹ - Aquilo que existe; coisa; objeto; matéria; substância; ser.

² - Um sistema de referência parado e outro em movimento retilíneo uniforme (MRU) em relação a ele.

^{3, 4} - Serão comentados mais adiante.

⁵ - Alberto Passos Guimarães em seu livro *A pedra com alma*, escreveu: Já foi estimado que cerca de 30% do Produto Interno Bruto (PIB) dos Estados Unidos depende de inovações que resultam do conhecimento da mecânica quântica.

⁶ - O princípio da incerteza mostrará uma realidade imprecisa na medida simultânea da posição e da velocidade de uma partícula e que será independente do avanço tecnológico.

⁷ - Frase atribuída ao cientista brasileiro José Leite Lopes (fundador do CBPF). Retirada do livro "Física Moderna para iniciados, interessados e aficionados". Volume 1 de Ivan S. Oliveira.

termodinâmica (entropia) restabelece o fluxo do tempo (nascemos novos e morremos velhos) e em 1905, Einstein limita a aceleração da segunda lei de Newton e tira a instantaneidade de interação da terceira lei. A interpretação filosófica da realidade clássica, parecia dar conta da coisa em si procurada pelos filósofos.

Retornando para 1900, encontramos um problema entre teoria e experiência que não se ajustavam, conhecido como catástrofe do ultravioleta. Planck⁸ em um ato de desespero (palavras suas) substituiu o símbolo de integral, por um de somatório, no cálculo do valor médio das energias. Isso levou-o a considerar a energia como uma variável discreta, em vez de uma variável contínua, como sempre foi considerada pela física clássica. Em 1905 Einstein, com base na discretização da energia, explica o efeito fotoelétrico e em 1923 Compton explica o efeito Compton. Estremeceu, mas a filosofia objetiva da realidade clássica gozava de boa saúde, quando em 1924 de Broglie em sua tese de doutorado anunciou que: Toda partícula tem a sua onda associada e fez a sua única previsão: A difração de elétrons, um fenômeno essencialmente ondulatório.

A concepção da onda (é uma extensão) para partícula (bem localizada), não trouxe problema para a interpretação da dupla fenda, pois o caráter ondulatório era acionado para explicar o fenômeno da interferência. Entretanto, a concepção de partícula para onda vai alterar toda a interpretação filosófica objetiva da realidade clássica, iniciando uma filosofia objetiva da realidade quântica.

A realidade quântica é tão estranha a nossa intuição clássica do que é real e dá margens a interpretações tão bizarras, que os místicos e os não místicos, cientes de sua fragilidade, empanurraram-se dessa filosofia, tornando-os obesos em suas contas bancárias.

2.2 Segundo momento

Aquilo que é próprio de um ser (ente) se chama ATRIBUTO e ENTE é aquilo que existe; coisa; objeto; matéria e ser. Cada ente possui

⁸ - A sorte ajuda a quem procura. Planck estava trabalhando com a ideia de um oscilador harmônico. Encontrou uma energia proporcional a sua frequência; dada por: $E = nhf$; $n = 0, 1, 2, \dots$. A energia de um oscilador harmônico quântico é dada por: $E = (n + \frac{1}{2}) hf$; $n = 0, 1, 2, \dots$. Essa energia atende o princípio da incerteza de Heisenberg, que exige uma flutuação mínima para $n = 0$. Planck trabalhava com a diferença de níveis de energias, portanto a constante era subtraída, não alterando os seus resultados.

dois tipos de atributos: Os estáticos e os dinâmicos. Os estáticos são: massa, carga e magnitude do spin. Os dinâmicos são: posição, quantidade de movimento, orientação do spin, energia, tempo etc. As grandezas conjugadas: posição e momento, energia e tempo etc., é que são responsáveis pela filosofia objetiva da realidade quântica.

Qualquer que seja a definição de realidade, o mito da caverna de Platão, o que é real é racional, o que é racional é real de Hegel ou a coisa em si de Kant, não podemos negar a existência do elétron. As suas oscilações produzem uma onda eletromagnética que se propaga no espaço e é transmitida para uma antena receptora, transformando-se em sons e imagens. Temos que assumir um critério de realidade: O que cria tecnologia. Os elétrons possuem propriedades reais, como massa e carga. O problema é quando queremos saber a sua posição e velocidade ao mesmo tempo.

O princípio da incerteza diz: Não podemos saber com precisão, em uma medida simultânea, a posição e o momento (velocidade) de um elétron. De outra forma: Em uma medida simultânea da posição e da velocidade do elétron, existirá sempre uma incerteza associada a essas medidas. E isso é inevitável, não depende de avanços tecnológicos, é a manifestação de uma realidade indeterminada de pares conjugados. Em uma linguagem popular: Podemos saber onde o elétron está, mais não sabemos o que ele está fazendo. Podemos saber o que ele está fazendo, mas não sabemos onde ele está. A realidade dessas grandezas conjugadas é indeterminada, contrariando o determinismo clássico.

O problema da dupla fenda para o elétron pode ser apresentado dessa forma: Um único elétron caminha de encontro a duas fendas, que têm a ordem de grandeza do comprimento de onda a ele associado. Um gerador de elétrons continua a enviar um elétron de cada vez ao encontro das fendas. Espera-se um determinado tempo. O padrão da interferência, característico de onda, é formado. Podemos saber por onde ele passou, mas este conhecimento destrói o efeito de interferência. É o princípio da incerteza atuando. A realidade exata de entes conjugados não é possível.

Na física clássica um ente físico pode ter a sua essência de onda ou de corpúsculo, enquanto que um ente da física quântica a sua essência é dual: onda-corpúsculo. A realidade quântica é complementar. O aspecto de onda e corpúsculo são necessários para explicar a realidade do mundo, porém em um experimento eles não se apresentam simultaneamente. É a experiência (observador) que determina a realidade que se quer observar.

Essa interpretação é que Bohr irá abraçar na sua visão idealista da realidade.

2.3 Terceiro momento

A equação ondulatória de Schrödinger⁹, não relativística, solucionava os postulados de Bohr e generalizava o postulado de Broglie para um potencial qualquer. Introduz o conceito de densidade de probabilidade e os valores médios esperados das grandezas dinâmicas podiam ser calculados. Podemos dizer, que a função de onda guarda em si, todas informações que se pode obter sobre um sistema físico, dentro dos limites estabelecidos pelo princípio da incerteza.

Matematicamente, tudo o que temos que fazer é achar a função de onda que satisfaça a equação. Toda sua complexidade está no potencial que a partícula está submetida, ao se resolver a equação de Schroedinger independente do tempo, que descreve um estado estacionário. A sua solução se formaliza, atendendo às condições de finita, unívoca e contínua.

Para o estudo da filosofia objetiva da realidade quântica, o nosso interesse é o significado da função de onda. Os cientistas a consideram uma função de onda vazia, sem sentido. Max Born deu uma interpretação para o quadrado do seu módulo, que ficou conhecido como densidade de probabilidade. A linearidade da equação de Schroedinger permite o princípio da superposição: Se uma autofunção é a sua solução e uma outra autofunção também é a sua solução, então a soma das duas também é uma solução.

Existe um conceito filosófico conhecido como reducionismo, muito criticado, que diz: A soma das partes forma o todo. Uma analogia um pouco forçada é a seguinte: Conhecendo-se o funcionamento dos pulmões, coração, cérebro etc. e depois juntando-os para formar o corpo surge a pergunta: As partes formam o corpo ou o corpo é maior do que as partes? De uma certa forma é o que fazem os cientistas de altas energias. Tentam compreender os constituintes elementares da matéria para explicar o universo.

⁹ - Schroedinger não gostou da interpretação dada a sua função de onda. Publicou uma experiência de pensamento conhecida como Gato de Schroedinger, onde a superposição de gato vivo e gato morto ao mesmo tempo, era questionada. Publicou o livro: O que é a vida? Que iria influenciar Grick e Watson a pesquisar a estrutura do DNA.

O problema filosófico da realidade encontra o seu maior desafio no processo de medição da função de onda. Antes do ato de medir os elétrons (entes quânticos) encontram-se em superposições de estados¹⁰. Ao se realizar a medida (colapso da função de onda), somente uma solução se apresenta e as demais somem instantaneamente, ou seja, os atributos dinâmicos (posição e velocidade) são criados na hora da medição. Ainda mais: Antes da realização de uma medida o elétron não possui qualquer atributo dinâmico, ou seja, é desprovido de realidade; não existe. O conceito de trajetória e causalidade da física clássica foi atacado. Sobre a trajetória é melhor deixar Feynman explicar: O mundo não medido funciona segundo duas regras: 1) Um ente quântico isolado percorre todas as trajetórias possíveis. 2) Nenhuma trajetória é melhor do que a outra. O ente quântico age como se seguisse, simultaneamente, todas as trajetórias, ou seja, o ente está fadado a tomar todos os caminhos simultaneamente.

Uma analogia clássica é a seguinte: Para forças conservativas o trabalho realizado por uma força sobre um corpo entre A e B é o mesmo, independente da trajetória seguida entre A e B. Existem infinitos caminhos (possibilidades) entre A e B e todos levam o mesmo resultado. É evidente que o significado não é o mesmo. O objetivo é mostrar que a física clássica não é filosoficamente inocente.

A analogia se completa dessa forma: Todos os caminhos chegam até a Roma. Classicamente, Roma será alcançada por um único caminho, dentre todos existentes. Quanticamente, Roma será alcançada por todos os caminhos existentes simultaneamente.

2.4 Quarto momento

PRAGMATISMO

Concepção filosófica que não se preocupa em perguntar: O que é realidade? Essa pergunta ela deixa para a filosofia. A sua preocupação é com os resultados. Algumas frases irão definir essa filosofia.

¹⁰- A. P. Guimarães, escreveu: ... o elétron pode estar em uma superposição de estados tal que o seu spin aponta ao mesmo tempo para cima e para baixo! Apenas quando se faz um experimento para determinar o seu estado – ou quando o elétron de algum modo interage com o meio – é que ele “escolhe” qual estado mostrar, para cima ou para baixo.

. É um erro pensar que a tarefa da física é descobrir como é a natureza. A física se preocupa com o que podemos dizer da natureza (Bohr. Ele não se encaixa nessa concepção).

. A mecânica quântica é aquela misteriosa, confusa disciplina, que nenhum de nós realmente compreende mas que sabemos como usar (Murray Gell Mann).

. Cale a boca. Faça o cálculo (Richard Feynman).

. A mecânica quântica é uma teoria tecnológica, concebida para desenvolver tecnologia e, graças à matemática, ela atingiu seu objetivo (Wladimir Guglinski).

Para o pragmatismo a questão de quem surgiu primeiro, o ovo ou galinha está resolvido. A galinha foi apenas um meio que o ovo arrumou de fazer outro ovo.

IDEALISMO

É uma atitude filosófica que NEGA a existência de uma realidade objetiva do mundo independente do sujeito. É a posição defendida por Bohr. O texto a seguir é uma organização de fragmentos de suas ideias.

Não existe realidade profunda. O mundo em torno de nós é real, mas flutua em um mundo não real. A realidade é criada pela observação, portanto na ausência de observação, não existe qualquer realidade. A observação (o sujeito) cria a realidade e a posição e quantidade de movimento de um ente quântico não existem antes de serem observados.

Para Bohr a realidade é uma realidade medida e um ente quântico (elétron) antes da realização de uma medida, encontra-se em todo estado possível (princípio da superposição). O ato de medir trás para o nosso mundo uma possibilidade (colapso da função de onda) e as demais somem instantaneamente.

Bohr fala do seu critério de realidade sobre os atributos dinâmicos dos entes quânticos, ou seja, de suas grandezas conjugadas e não dos seus atributos estáticos.

O filósofo grego Protágoras escreveu: “O homem é a medida de todas as coisas”. Bohr poderia ter escrito: “Todas as coisas são medidas pelo homem”.

REALISMO

É uma atitude filosófica que ACEITA a existência de uma realidade objetiva do mundo, independente do sujeito. É a posição defendida por Einstein.

O mundo é constituído de objetos comuns e um objeto comum é um ente que possui qualidades próprias, quer esteja ou não sendo observado.

Uma analogia macroscópica: Quando não estamos olhando para a Lua ela não existe (idealismo de Bohr). O realismo de Einstein diz que a Lua existe mesmo quando não está sendo observada.

Werner Heisenberg escreveu: “Alguns físicos prefeririam voltar à ideia de um mundo real objetivo cujas menores partes existissem objetivamente, assim como as pedras ou as árvores existem, independentes de as estarmos observando. Isso, contudo é impossível”.

Einstein discorda de Heisenberg e achava que a física quântica estava incompleta, devendo existir variáveis ocultas, para sua completa formulação. São suas essas palavras: “Ainda acredito na possibilidade de um modelo, isto é, de uma teoria, que represente as coisas em si e não meramente a probabilidade de sua ocorrência”. Ele não digeriu bem o colapso da função de onda, mas acredito que o seu mal-estar era ainda maior com o que ficou conhecido como emaranhamento quântico.

David Bohm escreveu: “Dois entes emaranhados quando se afastam não são representados por duas formas ondulatórias. São representados por uma única onda”. Quando um desses entes é medido, afeta o outro instantaneamente, independente da distância entre eles e isso é conhecido como realidade não-local¹¹. A realidade clássica é local, significando que uma medida realizada em uma partícula, só poderá afetar uma outra que esteja distante, com velocidade inferior ou igual à velocidade da luz. A não-localidade atingia uma das principais consequências da teoria da relatividade restrita de Einstein (a velocidade absoluta da luz). Einstein denominou o emaranhamento quântico de “Fantasmagórica ação à distância”.

Um exemplo imaginário: Qualquer acontecimento no Sol, a informação chegará a Terra depois de 8 minutos e vinte segundos aproximada-

¹¹ - Foi verificado experimentalmente pelo físico francês Alain Aspect na Universidade de Paris, em 1982.

mente. Essa informação se processou na velocidade da luz e isso representa um critério de realidade local. Dois entes quânticos A e B emaranhados no Sol, A permanece e B é lançado para o espaço. Esteja B na Terra ou em qualquer parte do Universo, se uma medição for realizada em A; B saberá instantaneamente sobre a medição de A. Essa ação a distância sem mediações é que se chama realidade não-local.

Tudo isso é muito estranho para a nossa intuição clássica da realidade, entretanto sistemas de estados emaranhados são essenciais para a computação quântica.

Talvez tenhamos errado ao admitir que a realidade do mundo é a realidade clássica e estamos forçando a realidade quântica a adaptar-se a essa concepção. Talvez devêssemos deixar a física quântica ajustar-se consigo mesma, para produzir a sua própria interpretação do mundo e ao mesmo tempo fossemos adquirindo uma intuição quântica da realidade do mundo.

2.5 *Quinto momento*

A construção de uma filosofia objetiva da realidade quântica, deverá atender as considerações de Bell.

- . Qualquer que seja a realidade, ela precisa ser não-local.
- . Nenhuma realidade local pode explicar o tipo de mundo em que vivemos.
- . Qualquer modelo de realidade compatível com os fatos quânticos, precisa assumir algum meio de permutar informações mais rapidamente que a luz.

Dividimos a filosofia atual em: Filosofia subjetiva da realidade (não depende da ciência) e filosofia objetivada realidade (depende da ciência). Alguns filósofos partiram de uma verdade para a construção lógica de sua filosofia. O penso, logo existo de Descartes teria que enfrentar os avanços da neurociência. O essencialismo (a essência precede a existência) de Kierkegaard e o existencialismo (a existência precede a essência) de Sartre teriam que enfrentar o avanço da genética.

Algum critério de verdade deverá ser estabelecido para a construção de uma filosofia objetiva da realidade. O filósofo Diógenes escreveu: “Não existe verdade. Se existe não podemos conhecer. Se a conhecemos não podemos transmitir”.

A concepção pragmática da ciência nos oferece um critério de verdade. O conhecimento da natureza é transformado em tecnologia. Mesmo que não tenhamos o conhecimento da coisa em si desta verdade, podemos transmiti-la através da tecnologia criada. Por que acreditamos que existem bilhões de galáxias? O método científico sozinho não nos transmite esta segurança. A maioria dos seres humanos não são convencidos pela lógica, eles são mais facilmente convencidos, se falarmos o que eles querem ouvir. A credibilidade na ciência se dá pela postura dos próprios cientistas, pois sabemos que diante de um erro cometido, todos terão o prazer salutar de provar a sua falsidade.

A física quântica bagunçou o nosso critério de realidade, mas ela não está sozinha destruindo nossas convicções. A singularidade¹² do Big Bang nos transmite uma sensibilidade metafísica inevitável e o Universo em expansão reforça essa sensibilidade. Ainda mais: Os cientistas estão nos informando que só conhecemos 4% do Universo e que todo ele é preenchido por uma energia e matéria escura, significando o nosso desconhecimento do Universo em que vivemos. Ainda mais ainda: O Universo não está só expandido; ele está acelerando.

A dificuldade de atender o teorema de Bell e de lidar com um Universo desconhecido, está deixando a filosofia objetiva da realidade enfraquecida. A filosofia subjetiva da realidade adaptou-se a esse ambiente e goza de boa saúde nas prateleiras das livrarias.

3. Comentários finais

A linearidade da equação de Schroedinger tem sido criticada por alguns cientistas e como alternativa estão propondo uma teoria não-linear¹³. Existem, também, outras interpretações filosóficas para seu critério de realidade. Entretanto, essas alternativas objetivam restabelecer a realidade clássica da natureza (trajetória, causalidade, determinismo e localidade). Forçar

¹² - Mário Novelo escreveu: No final da década de 1970 descobriu-se a primeira solução analítica das equações da teoria da relatividade geral de Einstein, representando uma cosmologia sem singularidades.

¹³ - CZACHOR e DOEBVER (2002) escreveram [...] a dinâmica de estados exatamente linear é uma raridade na física. Teorias lineares são em geral aproximações para aquelas não-lineares. A exceção é a mecânica quântica [...].

a mecânica quântica a se adaptar à realidade clássica é assumir a nossa intuição clássica da realidade como verdadeira.

Cientistas já sabem que os entes quânticos são muito sensíveis ao ambiente e que o Universo é preenchido de radiações. Portanto, os sistemas quânticos não têm como escapar dessa influência. O meio ambiente faz desaparecer as propriedades quânticas do sistema (descoerência), aproximando-o de um sistema clássico.

Temos um cérebro formado por entes quânticos coerentes, que formam uma massa macroscópica descoerente, um cérebro oscilante entre duas realidades (quântica e clássica). Qual a verdadeira?

Darwin percebeu que no processo evolutivo dos seres vivos, moldados pela seleção natural, a sua adaptação ao ambiente era necessária para a sua sobrevivência.

Qualquer que seja a nossa opção filosófica, não tem como nos retirar desse processo: Na compreensão das leis da natureza, na criação de tecnologia, na criação do instrumental de medida e da leitura dada pelo instrumento de medida.

Somos 7 bilhões de seres humanos e com a tecnologia atual, podemos afirmar que estaremos todos mortos daqui a 150 anos. A Terra deixará de existir? É um realismo duro e de indiferença do Universo com a nossa existência. Jacques Monod escreveu no final do seu livro *O acaso e a necessidade*: “Enfim, o homem sabe que está sozinho na imensidão indiferente do Universo de onde emergiu por acaso. Não mais do que o seu destino, o seu dever não está escrito em parte alguma. Cabe-lhe escolher entre o reino e as trevas”.

Nas condições da ciência atual, a filosofia objetiva da realidade deverá ser dual e complementar. Ambas são necessárias e não excludentes. Para interpretar o mundo macroscópico a filosofia objetiva da realidade é a clássica, para interpretar o mundo microscópico, a filosofia objetiva da realidade é a quântica. Elas não podem ser usadas simultaneamente e quem a escolhe é o tipo de estudo que está sendo realizado: clássico ou quântico. O princípio da correspondência de Bohr não se aplica e as palavras são justapostas (clássica quântica), elas não se aglutinam.

Uma epígrafe conclusiva:

Frequentemente ouvimos dizer que a física clássica e quântica são hostis entre si. Isto não é verdade. A física clássica e quântica não são

hostis entre si. A física clássica e quântica jamais foram hostis entre si, porque na verdade, não existe entre elas absolutamente nada em comum.

Referências

ALMEIDA, A.M.O. *Correlação Quântica no Espaço de Fases*. Editora Livraria da Física. São Paulo, 2010;

ABDALLA, E.; SAA, A. *Cosmologia. Dos Mitos ao Centenário da Relatividade*. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 2010.

BOHR, N. *O Arquiteto do Átomo*. Odysseus Editora. São Paulo, 2006.

CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A. *Partículas Elementares: 100 anos de descobertas*. Livraria da Física, Rio de Janeiro, 2012

CARUSO, F.; OGURI, V. *Física Moderna. Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos*. Elsevier Editora Ltda. Rio de Janeiro, 2006.

CROCA, J.; MOREIRA, R. *Diálogos Sobre Física Quântica*. Capax Dei. Rio de Janeiro, 2010.

CREASE, R. P. *As Grandes Equações – A história das fórmulas matemáticas mais importantes e os cientistas que as criaram*. Editora Zohar. Rio de Janeiro, 2011.

EINSTEIN, A. *A Teoria da Relatividade Especial e Geral*. Contraponto. Rio de Janeiro, 1999.

FREIRE JR, OLIVAL; PESSOA JR, OSVALDO; BRUMBERE, JOAN LISA. *Teoria Quântica: Estudos Históricos e Implicações Culturais*. Eduesp. Campinas Grande – PB. São Paulo – SP, 2011.

FEYNMAN, R.P.; LEIGHTON, R.B; SANDS, M. *Lições de Física*. Vol. 1, Bookman. São Paulo, 2009.

GUELINSKI, W. *A Evolução da Mecânica Quântica – O Duelo Heisenberg Versus Schrodinger*. Bodigaya. Porto Alegre, 2008.

- GREENE, B. *A Realidade Oculta – Universos Paralelos e as Leis Profundas do Cosmo*. Companhia das Letras. São Paulo, 2011
- GLEISER, M. *Criação Imperfeita. Cosmo, Vida e o Código Oculto da Natureza*. Editora Record. Rio de Janeiro, 2010.
- GUIMARÃES, A. P. *A pedra com alma. A fascinante história do magnetismo*. Editora Civilização Brasileira. Rio de Janeiro, 2011.
- HERBER, N. *A realidade quântica*. Francisco Alves, 1989.
- JAUCH, J. M. *São os Quantas Reais?* da Universidade de São Paulo, 1986.
- MALEVOY, J. P.; ZARATE, O. *Entendendo Teoria Quântica – Um guia ilustrado*. Texto Editores Ltda. São Paulo, 2012.
- MAIA, N. B. *Introdução à Relatividade*. Editora Livraria da Física. Rio de Janeiro, 2009.
- NETO, N. P. *Teorias e Interpretações da Mecânica Quântica*. Editora Livraria da Física. São Paulo, 2010.
- NOVELO, M. *Máquina do Tempo – Um olhar científico*. Jorge Zahar Editora. Rio de Janeiro, 2005.
- NOVELO, M. *Do Big Bang ao Universo Eterno*. Zahar. Rio de Janeiro, 2010.
- ORZEL, CHAD. *Como ensinar física ao seu cachorro – Uma visão bem-humorada da física moderna*. Elsevier Editora Ltda. Rio de Janeiro, 2010.
- OLIVEIRA, I. S. *Física Moderna, para iniciados, interessados e aficionados*. Vol. 1 e 2. Livraria da Física. São Paulo, 2005.
- OLIVEIRA, I. S.; VIEIRA, C. L. *A Revolução dos q-bits – O admirável mundo da computação quântica*. Zahar. Rio de Janeiro, 2009.
- OLIVEIRA, I. S.; VIEIRA, C. L. *Uma Aventura pela Natureza: dos átomos ao universo*. Ciência Hoje (CBPF). Rio de Janeiro, 2007.

PESSOA JR, O. *Conceitos de Física Quântica*. Vol. I e II. Editora Livraria da Física. São Paulo, 2006.

PESSOA JR, O. *Fundamentos da Física*. Vol. I e II. Simpósio David Bohm. Editora Livraria da Física. São Paulo, 2001.

PATY, M. *A Física do Século XX*. Ideias e Letras. Aparecida – SP. 2009.

POLKINEHORNE, J. *Teoria Quântica*. L e PM Editora. Porto Alegre – RS. 2011.

PIRES, A. S. T. *Evolução das Ideias da Física*. Editora Livraria da Física. São Paulo, 2011.

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Editora Campus Ltda, Rio de Janeiro, 1979.

ROCHA, J.F. (Org.). *Origens e Evolução das Ideias da Física*. Edufba. Salvador, 2002.

SMITH, W. *O Enigma Quântico – Desvendado a chave oculta*. Vide Editorial, Campinas - SP. 2011.

SCHRODINGER, E.; HEISENBERG, W. *A Física Além do Senso Comum*. Oysseus Editora. São Paulo, 2003.

VARELA, J. *O Século dos Quanta*. Editora UnB.

ZEILINGER, A. *A Face Oculta da Natureza – O novo mundo da física quântica*. Editora Globo. São Paulo, 2005.