

A TEORIA FÍSICA – O DILEMA DA MECÂNICA QUÂNTICA

CMG (Ref) Paulo Roberto Gotaç

INTRODUÇÃO

O presente trabalho se propõe a mostrar, através de uma resumida seqüência histórica, como as teorias físicas passaram a ser estruturadas a partir de Galileu (1564-1642). Mostra-se também que, apesar do sucesso da chamada Física Clássica que daí decorreu, esta foi incapaz, no auge de seu sucesso, de explicar determinados fatos experimentais importantes, o que deu origem à formulação da hipótese quântica por Max Planck (1858-1947), dando início à mais retumbante revolução no desenvolvimento da Física, com a edificação de um formidável formalismo conceitual e matemático sob designação de Mecânica Quântica. Após uma ligeira resenha do seu conteúdo, são comentados alguns aspectos ligados à sua interpretação.

A TEORIA FÍSICA

Dentro de uma perspectiva esquemática, uma teoria física compreende duas partes constitutivas: a logicamente arbitrária e a objetiva [1]. A primeira caracteriza a sua essência, sendo uma criação exclusiva da mente humana - relembro Werner Heisenberg (1901-1976) [1], prêmio Nobel de Física em 1932, "A Ciência é feita pelos homens. Este fato, em si evidente, é facilmente esquecido; talvez seja útil lembrá-lo, o que pode contribuir para desfazer o abismo, tantas vezes criado, entre os dois tipos de cultura: a cultura literária e artística, de um lado, e a cultura técnica e científica, de outro." A segunda engloba os elementos objetivos (objetos), cujo comportamento será cada vez mais bem expresso por pesquisas posteriores. Como exemplo[1], pode-se citar o sistema cosmológico de Ptolomeu. Nele distingue-se como parte logicamente arbitrária a idéia da centralidade da Terra, e como parte objetiva o fato de que os planetas e os demais corpos celestes se movem no espaço, podendo-se, em princípio, prever seu movimento com correção. Como se sabe, tal modelo foi muito bem-sucedido por mais de 1000 anos na

determinação dos movimentos, embora ninguém atualmente se disponha a utilizá-lo face às informações cada vez mais precisas sobre a natureza dos corpos celestes obtidas inicialmente através dos trabalhos de Copérnico (1473-1543), Kepler (1571-1630) e Galileu, com desenvolvimentos cada vez mais excitantes na atualidade e que obrigaram os estudiosos a modificar constantemente a parte logicamente arbitrária, embora a objetiva se tenha mantido, porém mais enriquecida. É bom acrescentar que a atividade arbitrária não é tão livre como a princípio se poderia imaginar e decorre, quase sempre, de pressões sociais e culturais da época em que a teoria é formulada. Ptolomeu só poderia escolher a Terra como centro. Os Gregos que, possivelmente, não estavam submetidos a pressões semelhantes, já haviam idealizado o sistema heliocêntrico séculos antes de Ptolomeu.

A metodologia ainda hoje adotada para edificação das teorias físicas teve seu início com Galileu, que acrescentou à abordagem aristotélica, vigente à época e baseada na contemplação e na intuição, com toda a polêmica associada a este último conceito, a importante etapa da observação experimental. É claro que a contemplação e a intuição continuam sendo importantes na criação das teorias, mas a sentença final para a sua aceitação é a comprovação experimental. Uma teoria é bem-sucedida se suas previsões estão de acordo com a experiência. Caso contrário, ela manifesta suas limitações e é absorvida por outra mais geral do qual a anterior normalmente constitui um caso particular.

A FÍSICA DO SENSO COMUM (*COMMON SENSE*)

As idéias de Copérnico, Galileu e Kepler foram aprofundadas por Sir Isaac Newton (1642-1727), que as organizou e formalizou em linguagem matemática, inerente desde então a qualquer corpo teórico, dada a necessidade de apresentar suas conclusões de modo quantitativo a fim de serem submetidas a medidas experimentais atuais ou futuras.

(Newton: "Se pude ver mais longe que outros, é porque me apoiei em ombros de gigantes").

A partir daí e durante os próximos 300 anos, impulsionada inicialmente pelas demandas da Revolução Industrial, a hoje denominada Mecânica Newtoniana experimentou um enorme desenvolvimento, vindo a constituir, ao lado das ciências ligadas ao Eletromagnetismo e da Termodinâmica, um corpo teórico de grande generalidade, hoje designado por Física Clássica[2], com considerável grau de sofisticação matemática. Nomes como os de Lagrange (1736-1813), Jacobi (1804-1851), Hamilton (1805-1865), Faraday (1791-1867), Maxwell (1831-1879), Helmholtz (1821-1894), dentre muitos outros, estão fortemente vinculados a este desenvolvimento.

Tão retumbante foi o sucesso da Física Clássica ao longo de seu desenvolvimento conceitual e experimental, chegando ao auge da abrangência e refinamento matemático no final do século XIX, que, acreditava-se com convicção, não haveria mais perguntas sem respostas em relação aos fenômenos naturais[2]. No seu fundamento filosófico, três princípios básicos lhe serviam de apoio[1]:

1) Princípio da Objetividade: “As entidades da Física a serem compreendidas existem realmente e sua

existência independe dos seres humanos e de suas observações”;

2) Princípio da Compreensibilidade: “ Uma vez aceita a realidade das entidades físicas, elas são compreensíveis no sentido de que a mente humana é capaz de construir teorias que as descrevem corretamente no confronto com a experiência”;

3) Princípio da Causalidade: “ As Leis Físicas, alicerces das teorias, são formuladas de tal modo que a descrição de cada fato físico decorre da descrição de outro imediatamente anterior, sendo a história, como um todo, determinada pelas condições que originaram a seqüência”.

A REVOLUÇÃO

No início do século XX, a Física sofreu a sua mais profunda revolução desde Galileu, com o estabelecimento da Relatividade e da hipótese quântica. As sementes dos dois movimentos residiam exatamente em inconsistências verificadas nas bases conceituais da Mecânica, do Eletromagnetismo e da Termodinâmica, ou seja, da Física Clássica. A Relatividade surgiu da necessidade de harmonizar medidas de tempo e espaço realizadas por

Tecnologia Ambiental

Operações, Treinamentos e Logística

Manutenção e Desenvolvimento de novos Equipamentos

Estudos Ambientais e Planejamento

A Alpina Briggs, empresa do grupo Alpina, desenvolve produtos e serviços para o combate a derramamentos de petróleo e derivados em toda a América Latina. Seu grande diferencial está no desenvolvimento de equipamentos de alta tecnologia, que tornam possível a contenção de acidentes ambientais com maior agilidade e precisão.

Treinamento simulado em porto, com colocação de barreiras de contenção e recolhedor de óleo

Certificações:

Alpina Briggs Defesa Ambiental S/A.
Rua Tiguassu, 154 • Bairro Inamar • CEP 09970-310 • Diadema • SP • Brasil
Fone: +55 (11) 4059-9999 • Fax: +55 (11) 4059-9956
Departamento Comercial: + 55 (11) 4059-9957 / 9958 / 9987 / 9990
0800 7039133 • www.alpinabriggs.com.br

Produtos e serviços para o combate a derramamentos de petróleo

observadores em movimento relativo e a hipótese quântica, formulada por Max Planck, foi capaz de explicar, com incrível precisão, os resultados experimentais, até então inexplicáveis pela física vigente, da radiação do corpo negro. O caráter revolucionário da hipótese quântica, com a introdução do quantum de energia e da chamada constante de Planck (elevada posteriormente ao status de constante fundamental da natureza), foi tão intenso que o próprio Planck, sem saber que estava inaugurando uma nova era da Física, dedicou grande parte de seu esforço intelectual no sentido de incluir sua hipótese no esquema clássico[3]. Coube a Einstein (1879-1955) reconhecer o caráter fundamental das novas idéias, considerando-as não como algo a ser enquadrado dentro de esquemas antigos mas como manifestação inerente à interação radiação-matéria. Com esta abordagem, aperfeiçoou o novo modelo, utilizando-o na explicação de outros fenômenos desafiadores, tais como o efeito foto-elétrico, a partir do qual foram introduzidos o conceito de fóton e a chamada dualidade onda-partícula (característica corpuscular da radiação, até então considerada ondulatória). Estava inaugurada a chamada fase heróica da Mecânica Quântica.

Mas o quantum veio para ficar. Experiências envolvendo o espalhamento de partículas-alfa realizadas em 1911 sob a liderança de Rutherford (1871-1937) evidenciaram o fato de que a estrutura atômica constava de um núcleo positivo, onde se situava a maior parte de sua massa, e partículas negativas (elétrons, cuja existência já havia sido comprovada através de experiências executadas por Thomson (1856-1940), em 1897) orbitando em torno do núcleo (modelo planetário). Tal modelo colocava em cheque a própria estabilidade atômica, pois, segundo o eletromagnetismo clássico, cargas aceleradas (elétrons orbitando) emitiriam constantemente energia radiante e, eventualmente colapsariam no núcleo. Nada existiria. Diante de tal impasse, Niels Bohr (1885-1962) apresentou, em 1913, os seguintes postulados, com conteúdos completamente estranhos à Física Clássica, baseados no quantum de Planck:

a) Um elétron move-se numa órbita circular em torno do núcleo;

b) Ao invés de adotar qualquer órbita, o elétron só se permite circular em determinadas órbitas (quantizadas), qualificadas mediante a constante de Planck;

c) Apesar de estar constantemente acelerado, o elétron, se numa destas órbitas, não emite radiação eletromagnética (hipótese proibida pelo eletromagnetismo clássico); e

d) Uma radiação é emitida se o elétron passar de uma órbita permitida para outra permitida e a frequência da radiação está também relacionada com a constante de Planck.

Tais postulados, mais tarde aperfeiçoados por Arnold Sommerfeld (1868-1952), constituem a essência da chamada “velha Mecânica Quântica”, muito bem-sucedida na explicação de estrutura de elementos mais simples, como o hidrogênio.

Embora a velha Mecânica Quântica seja utilizada até hoje para modelar determinados fenômenos quânticos, algumas limitações sérias começaram a se manifestar pouco tempo após seu aparecimento. Dentre estas, destacava-se a sua impossibilidade de determinar *quando* a transição de uma órbita permitida para outra ocorria e a enorme dificuldade de análise de átomos mais complexos que o do hidrogênio. Tornava-se cada vez mais evidentes que se tratava de uma teoria de caráter provisório.

Como resultado, a partir dos anos 1920, e com duração de aproximadamente 15 anos, iniciou-se, por parte dos físicos dedicados, uma atividade verdadeiramente esquizofrênica, buscando descobrir as leis que regiam o comportamento do microcosmo atômico. Hipóteses e princípios, cada vez mais divorciados do chamado senso comum, foram formulados, com comprovações experimentais precisas. Decididamente, os caprichos que regiam o comportamento último da matéria não manifestavam os aspectos confortáveis da intuição da escala humana. As principais etapas deste processo avassalador foram:

a) Em 1924, o Príncipe Louis de Broglie (1892-1974), aproveitando a imagem da dualidade onda-partícula, lançou a idéia de que entidades até então reconhecidamente corpusculares (como o elétron) apresentariam propriedades ondulatórias. Formulou a dualidade partícula-onda. Por volta de 1925, o misto de físico e filósofo Erwin Schrödinger (1887-1961) criou sua famosa equação que descrevia a evolução da onda associada à partícula;

b) Em 1926, o físico alemão Max Born (1882-1970) postulou a interpretação probabilística, segundo a qual, em linhas gerais, a amplitude da função de onda representava a probabilidade de se medir a posição da partícula em determinado ponto; e

c) No período compreendido entre 1926 e 1932, P.A.M. Dirac (1902-1984), aproveitando abordagens devidas a Heisenberg, desenvolveu o aparelho matemático da nova Física, que diferia em forma, mas abrangia, por ser mais geral, o formalismo de Schrödinger.

Inúmeros outros nomes, dentre os quais Jordan (1902-1980), Pauli (1900-1958), criador do chamado Princípio da Exclusão, fundamental na elucidação de ligações características de reações químicas, e Von Neuman (1903-1957), deixaram sua contribuição para esta época frenética do desenvolvimento da Física.

Todo este corpo teórico praticamente montado num lapso de aproximadamente 15 anos permanece válido até hoje, constituindo a base da mais intensa revolução tecnológica jamais verificada pela Humanidade ao longo de período comparável (aproximadamente 70 anos), inclusive com desdobramentos comportamentais profundos (a vida atual, com o telefone celular e os computadores, por exemplo, é abissalmente diferente daquela que se levava há algumas décadas).

Os conceitos e as conclusões do novo formalismo estão em completo desacordo com a intuição da escala humana e, além disso, colocam em cheque os três princípios básicos da Física Clássica, já citados. Tais conclusões podem ser resumidas da seguinte forma:

- As dualidades onda-partícula e partícula-onda são partes essenciais do formalismo – desafio ao Princípio da Objetividade (afinal o que “existe”-partículas ou ondas associadas?);

- A base fundamental da nova teoria é probabilística e, portanto, contrária à crença determinista até então profundamente enraizada no pensamento clássico – desafio ao Princípio da Compreensibilidade. É importante ressaltar que a probabilidade já estava presente na Física, mas como uma medida da ignorância em relação aos processos. De certa forma, a probabilidade introduzida na nova teoria quântica é o processo; e

- Há um limite para a medida simultânea de alguns pares de grandezas que, antes, podiam ser determinadas com precisão infinita (Princípio da Incerteza). Ou seja: se se mede uma, a outra se altera de maneira imprevisível – desafio ao Princípio da Causalidade.

A INTERPRETAÇÃO

Tais impasses, associados ao ritmo quase alucinado de seu desenvolvimento, deram ensejo a

que, praticamente desde a sua concepção, a nova teoria quântica fosse o centro de um grande debate, que permanece até hoje, e que diz respeito às suas bases interpretativas. Embora fossem espetaculares o sucesso e a abrangência (a Física Clássica passou a ser um caso particular) do formalismo na explicação de inúmeros fenômenos físicos, não se sabia qual era seu significado.

Pode-se afirmar hoje que duas escolas de pensamento se posicionaram em campos opostos: a primeira, chamada de realista, em cujo time figuravam ícones dos tempos heróicos da hipótese quântica e alguns pioneiros da nova ciência, tais como Planck, Ehrenfest (1880-1933), Einstein, Schrödinger e De Broglie, recusava-se a abrir mão da objetividade, da compreensibilidade e da causalidade que, segundo ela, deveriam caracterizar as teorias físicas; a segunda, a positivista, designada também por Escola de Copenhague, liderada por Bohr e advogada por nomes tais como Sommerfeld, Born, Pauli, Heisenberg, Jordan, Dirac e Landau (1908-1968), dentre outros, afirmava seu rompimento com a visão conservadora, sustentando que, em princípio, os objetos atômicos não são compreensíveis no sentido de que sua evolução não pode ser descrita por imagens espaço-temporais ligadas às suas realidades, o que torna sem sentido a própria realidade e a sua causalidade. Para esta escola, a nova teoria não passava de um conjunto de regras destinadas a descrever os fenômenos físicos. Como dizia o próprio Bohr [2]: “É errado supor-se que o propósito básico da Física é descobrir como é a natureza. A Física consiste no que se diz *sobre* a natureza.”

O pensamento de Copenhague, adotado pela maioria dos físicos da época, centra-se no conceito de complementaridade que inclui as condições experimentais como condicionantes para o resultado de uma dada medida física realizada sobre um sistema. Ou seja: o instrumento de medida, segundo a interpretação de Bohr e seus discípulos, passa a ser considerado como uma contrapartida clássica que vai interagir com o sistema a ser medido, interferindo, portanto, no resultado que dependerá, então, das condições do conjunto sistema-instrumento. O aparato de medida deixou de ser independente do sistema a ser medido, como na Física Clássica.

O grande questionamento à Escola de Copenhague veio através de um memorável trabalho de Einstein, Poldosky (1896-1966) e Rosen (1909-1995), de 1935, conhecido a partir de sua divulgação como EPR[4], no

qual os autores colocavam em dúvida o fato da nova teoria ser completa, ou seja, de possuir recursos para prever, através da sua estrutura conceitual, o resultado de algumas experiências. Ao longo do trabalho, foi proposto um experimento de pensamento (realizável em princípio) no qual duas partículas correlacionadas (não importa para o presente trabalho a aceção precisa deste conceito) interagem e, a partir de um determinado instante eram lançadas em direções opostas, deixando de interagir. Aplicando o formalismo à situação, os autores concluíram que uma medida realizada numa das partículas deveria influenciar, de maneira instantânea, o resultado que deveria ser obtido na outra com a qual não mais interagia, o que contrariava a chamada separabilidade, característica até então considerada inerente à realidade física [5]. Como analogia (só analogia!), seria como se dois gêmeos, nascidos no Rio, fossem separados na hora do nascimento e um deles fosse para Tóquio. Se, algum tempo depois, o gêmeo que ficou levasse uma palmada, o outro a sentiria no mesmo instante. Para interpretar tal paradoxo, Einstein e seus parceiros propuseram que, talvez, o formalismo fosse incompleto na medida em que seria insuficiente para descrever corretamente determinados aspectos da realidade, acrescentando ainda que, provavelmente, consistiria numa etapa intermediária de uma teoria mais completa capaz de, esperavam os autores, devolver à Física, provisoriamente probabilística, seu aspecto determinista.

O impacto provocado pelo EPR nas hostes de Copenhagen foi bastante profundo e mereceu uma resposta quase que imediata de Bohr[6]. Na ausência, porém, de uma evidência experimental que decidisse definitivamente por uma posição, a questão ficou latente até que o físico teórico irlandês John S. Bell (1928-1990), baseado no ponto de vista defendido pelo EPR, isto é, na “não-completude”, publicou, em 1965, seu famoso teorema [7] (para alguns estudiosos, de importância semelhante às leis de Newton), cuja conclusão veio sob a forma de uma desigualdade. Ou seja: se a localidade for uma característica fundamental da realidade física, a desigualdade seria obedecida no confronto com a evidência experimental e a escola de Copenhagen teria que rever suas premissas. Se, por outro lado, a desigualdade fosse violada, a interpretação de Bohr e seus seguidores estaria correta e a não-localidade faria parte do mundo quântico.

De qualquer forma, o Teorema de Bell estabeleceu um critério quantitativo contra o qual seria possível cotejar os resultados de um experimento envolvendo partículas que inicialmente interagiam no mesmo lugar e que, após determinado instante, seriam separadas, sendo realizadas medidas sobre elas, dentro, portanto, do esquema de pensamento do EPR.

E os experimentos vieram (suas particularidades não serão descritas aqui) [8] e mostraram, de forma inequívoca, que a mecânica quântica, em algumas situações experimentais, era não-local. Ou seja: se o gêmeo que permaneceu levasse uma palmada, o de Tóquio a sentiria instantaneamente, numa espécie de ação fantasmagórica (não se pode levar tal analogia muito longe, pois o corpo humano é um sistema macroscópico e a mecânica quântica, através de seu formalismo se destina a descrever o comportamento de microsistemas). A não-localidade, por mais estranha que possa parecer aos padrões de intuição da escala humana, é uma característica intrínseca da natureza última da matéria.

CONCLUSÃO

A partir da formulação da hipótese quântica Planck, ficou evidente que certos resultados experimentais não encontravam explicação à luz dos cânones teóricos da Física Clássica, considerada até então definitiva para elucidar fatos da escala humana. A estrutura atômica se mostrou rebelde a qualquer esquema clássico e o formalismo que resultou a partir da década de 1920, embora extremamente bem-sucedido, nada tem a ver com o chamado senso comum. Apesar disso, foi possível submeter a um teste experimental a chamada Escola de Copenhagen, concluindo-se pela sua consistência

Além da Interpretação de Copenhagen, outras interpretações da mecânica quântica apareceram [9,10], cada uma pretendendo ser mais abrangente que a outra. Todas, porém, são probabilísticas, qualidade que, em última análise, é responsável pela não-localidade. Neste momento, alguns países desenvolvidos estão investindo grandes recursos em pesquisas que têm como propósito o desenvolvimento de computadores de grande velocidade (praticamente instantâneos) cuja base é a não-localidade que, no jargão, da pesquisa associada recebeu a designação de “entanglement”.

Por que o comportamento quântico não é percebido na escala humana? Porque sistemas macroscópicos são compostos por um grande número

de sistemas microscópicos e o comportamento isolado destes últimos, embora determinante, torna difícil o entendimento do agregado, que faz parte da escala humana. É como se se tentasse entender o comportamento de uma torcida de futebol a partir do estado psicológico com que cada torcedor despertou. É possível, porém complexo.

BIBLIOGRAFIA:

1. *SELLERI, F.* Le Grand Débat de la Théorie Quantique. Champs-Flammarion, 1986
2. *GOTAÇ, P. R.* Os Últimos Cem Anos da Física - Um rápido sobrevôo. Villegagnon, Escola Naval, número 1, 2006
3. *GOTAÇ, P.R.* "...um ato de desespero". Villegagnon, Escola Naval, número 2, 2007

4. *EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N.* Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, **47**, 777-80, 1935
5. *d'ESPAGNAT, B.* The Quantum Theory and Reality. *Scientific American*, Nov. 1979
6. *BOHR, N.* Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, **48**, 696-702, 1935
7. *BELL, J.S.*; On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physica* **1** No. 3, 195-200, 1964
8. *ASPECT, A.; GRANGIER, P.; ROGER, G.* Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities. *Physical Review Letters*, **49**, No.2, 12 July 1982
9. *MERMIN, N. D.* What is quantum mechanics trying to tell us?. *American Journal of Physics*, **66**, No. 9, Sept, 1998
10. *MOHRHOFF, U.* What quantum mechanics is trying to tell us. *American Journal of Physics*, **68**, No. 8, Aug. 2000

Tecnologia Naval para Produtos e Serviços de Qualidade

Construção e reparo de meios navais, integração de sistemas de combate, fabricação de munição de médio e grosso calibres, sistemas digitais, guerra eletrônica e apoio logístico integrado.

Naval Technology Applied to Quality Products and Services

Naval Shipbuilding and Repair, Systems Integration, Ammunition Production of Medium and High Calibers, Digital Systems, Electronic Warfare, Integrated Logistic Support.

Empresa Gerencial de Projetos Navais - Edifício 8 do AMRJ - 3º andar - Ilha das Cobras
 Cep.: 20091-907 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - Tels.: (21) 3907-1800
 Fax: (21) 2233-5142 - E-mail: marketing@emgepron.mil.br Site: www.emgepron.com.br

EMGEPRON
 EMPRESA GERENCIAL DE PROJETOS NAVAIS