

CONTRIBUIÇÃO DE PAUL DIRAC PARA MECÂNICA QUÂNTICA: NOTAÇÃO DE BRAS E KETS

Besna Fernando Ndungue¹
João Philipe Macedo Braga²

RESUMO

Nascido em 1902, em Bristol, Inglaterra. Paul Adrien Maurice Dirac foi o único inglês que contribuiu significativamente na fase inicial de desenvolvimento da Mecânica Quântica. O seu livro mais influente, cuja primeira edição foi publicada em 1930, intitulado "Os princípios da mecânica quântica" foi atualizado pelo autor três vezes em 1935, 1947 e 1958, respectivamente, e na terceira edição do mesmo já se introduziu a notação de bras e kets. Com essa notação foi possível resolver o problema de que não se podia obter um número através do produto de dois vetores no espaço abstrato de Hilbert, mas com o truque do complexo conjugado, este problema foi contornado. A nova notação de Dirac permitiu a unificação das duas formas matemáticas de Heisenberg e Schrödinger da mecânica quântica e assim conseguiu fazer passar de uma para a outra sem sobressaltos no fluxo dos pensamentos. Dirac foi ganhador do Prêmio Nobel em 1933 juntamente com Schrödinger. O presente trabalho se deu do fato de que, apesar de sabido da sua relevância para a pesquisa acadêmica, existe muito pouco texto em língua portuguesa abordando o assunto da notação de bras e kets. . Portanto, este trabalho tem por objetivo potencializar o ensino e aprendizagem da mecânica quântica e conhecer as contribuições de Niels Bohr, Schrödinger, Von Neumann e Dirac para essa nova área do conhecimento. Ao visitarmos alguns textos que abordam o tema foi possível obter um olhar diferente daquele comumente apresentado em livros-textos mecânica quântica. Podendo assim inspirar novos leitores fazendo com que aumente o interesse na história da nossa era, na vida e no pensamento de alguns dos maiores cientistas do século XX. Além de instigar a curiosidade por assuntos fascinantes como, por exemplo, o experimento do gato de Schrödinger, a dualidade onda-partícula e o princípio de incerteza de Heisenberg.

Palavras-chave: Ensino de Física; História da física; Mecânica quântica.

INTRODUÇÃO

Nascido em 1902, em Bristol, Inglaterra. Paul Adrien Maurice Dirac foi o único inglês que contribuiu significativamente na fase inicial de desenvolvimento da Mecânica Quântica [1]. Formou-se pela universidade de Bristol em 1921 e doutorou-se pela universidade de Cambridge [2]. Foi em Cambridge onde conheceu Ralph H. Fowler, que se dedicava à mecânica estatística e à teoria atômica quântica. Ali Dirac viria a se interessar por novos estudos da física quântica.

Um dos principais problemas que assombrava os físicos no final do século XIX e início do XX que procuravam explicar a estrutura da matéria com base na mecânica clássica e eletromagnetismo era a estabilidade de sistemas atômicos [3]. Com cargas em movimento e considerando a visão clássica, esperava-se que os átomos perdessem a energia depois de irradiassem. No entanto, eles eram estáveis e só emitiam (absorviam) radiação em circunstâncias específicas [3]. Como citado anteriormente Niels Bohr deu explicação a esse fenômeno. Afirmou que os sistemas atômicos não obedeciam a dinâmica clássica. Abordou a questão de estados estacionários e que cada estado teria a sua energia específica e constante. Seguindo essa abordagem, várias teorias quânticas foram formuladas na segunda e terceira década do século XX [3].

Com a formulação da mecânica matricial por Heisenberg, Born e Jordan, em 1925, onde as quantidades de posição, velocidade ou energia passaram a ser representados por um conjunto infinito de números. Como afirma [3],

Matrizes infinitamente dimensionais cujas linhas e colunas eram rotulados pelos números quânticos da antiga teoria quântica. Assim, os estados estacionários de Bohr passaram a corresponder formalmente às linhas e colunas das matrizes infinitas. A energia era representada neste esquema por uma matriz diagonal, cujo elemento genérico não zero E_{nn} era igual à energia n -ésimo estado estacionário.

Essa representação matricial não contribuiu muito para o entendimento da noção de estado estacionário, entretanto, substanciou a noção de que as descrições clássicas não podiam ser usadas para sistema atômico.

Em 1926, Schrödinger propôs uma nova teoria, mecânica ondulatória, cujo elemento chave era a conhecida hoje como a equação de Schrödinger. [3] O mais importante nessa equação era que:

Suas soluções podiam ser classificadas em termos de números inteiros com os mesmos valores que os números quânticos do átomo de hidrogênio da teoria de Bohr. Equações semelhantes poderiam ser escritas também para os sistemas quânticos mais complexos que o átomo de hidrogênio [...]. Portanto, na mecânica ondulatória, os estados estacionários poderiam ser descritos por um formalismo matemático que previsse os valores dos números quânticos e não dependesse de condições quânticas impostas externamente.

Assim a busca por uma teoria que interpretasse os sistemas atômicos continuou. Born deu passo importante ao propor a interpretação probabilística [1], o que desencadeou várias outras pesquisas nessa direção. Dois nomes se destacaram: Jordan e Dirac. Vamos nos dedicar ao trabalho de Dirac.

METODOLOGIA

Para realização do presente trabalho foi utilizado o método da revisão bibliográfica combinando recurso da busca sistemática da literatura e a seleção e análise qualitativa dos textos e livros. Para os textos utilizamos os bancos de dados de google acadêmico e scielo. E para seleção dos artigos realizamos a leitura dos títulos, resumos e palavras-chaves, e excluímos os artigos que não apresentam aderência aos objetivos da pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No seu artigo publicado em 1927 sobre “A Interpretação física da dinâmica quântica”, Dirac observou que a mecânica quântica fornecia menos informações sobre a evolução de um sistema do que a mecânica clássica

[3] uma vez que os valores das coordenadas q e momento p não podiam ser determinados ao mesmo. Para solucionar esta questão, Dirac propôs as funções de transformações e suas notações. Elas transformavam uma matriz associada a uma quantidade g com linhas e colunas etiquetadas pelos valores das quantidades ar numa matriz ainda associada a g , porém com linhas e colunas etiquetadas por outro conjunto de quantidade $\&r$.

Com sua notação, Dirac abria um espaço totalmente novo de operações físico-matemáticas e de potencial significado físico-matemático [3]. Outro físico que contribuiu também no endireitamento tanto da parte matemática quanto da física da mecânica quântica foi Von Neumann com seu trabalho “Os fundamentos da mecânica quântica” onde analisou as formulações anterior da mecânica quântica (Mecânica Ondulatória, Matricial e teoria de transformação) desenvolvidas por Heisenberg, Born, Jordan, Schrödinger e Dirac respectivamente. segundo [3],

Ele ofereceu a esses trabalhos uma definição rigorosa das estruturas matemáticas que possuíam exatamente essas características: estes seriam os fundamentos matemáticos da mecânica quântica. Definiu um novo objeto matemático: o espaço abstrato de Hilbert, cujos elementos (vetores) não eram números nem funções, mas podiam ser adicionados e multiplicados seguindo um conjunto de axiomas que, como era de se esperar, se assemelhava muito à forma como as funções das ondas podiam ser adicionadas e multiplicadas.

Apesar de vários trabalhos foram feitas em busca de uma notação que facilitasse a vida dos físicos no entanto só foi possível com a nova notação do Dirac.

A notação é uma questão de primordial importância na história da filosofia natural pré-moderna e da ciência moderna [3]. Um exemplo evidenciando isso é a atenção dada pelo Dirac a esta questão. No seu artigo publicado em julho de 1939, ele afirma que “uma boa notação pode ser de grande valor para ajudar no desenvolvimento de uma teoria, facilitando a descrição daquelas quantidades ou combinações de quantidades que são importantes”.

A nova notação introduzida por Dirac foi proposta para resolver problemas vetoriais no espaço abstrato de Hilbert. De acordo com [4], a notação usada atualmente na mecânica quântica é bastante adequada aos seus propósitos, mas com alguns inconvenientes. É preciso lidar com vetores no espaço de Hilbert, representando os estados de um sistema dinâmico, variáveis dinâmicas, etc. Esta nova notação possibilitou a resolução da questão de que não se podia, numa formulação rigorosa de espaço abstrato de Hilbert, pegar o produto de dois vetores para obter um número [3]. Na nova notação o complexo conjugado desempenha esse papel. Este problema foi contornado através de truques simbólicos segundo [4], “temos também que lidar com outro tipo de vetor de espaço de Hilbert, o complexo conjugado do primeiro tipo. Isto foi denotado na antiga anotação por ϕ ou $\bar{\psi}$, e agora será denotada por

CONCLUSÕES

A introdução de um estado estacionário onde os átomos não irradiavam por Bohr, em 1913, desencadeou várias pesquisas nessa direção. Em 1927, partindo de trabalhos anteriores da mecânica quântica, Dirac introduziu nova forma de manipular matrizes quânticas e funções ondulatórias. Baseado nesses trabalhos, Von Neumann se encarregou de dar uma definição rigorosa da estrutura matemática da mecânica quântica. Ao apreciar o trabalho de Von Neumann, Dirac desenvolveu a notação de bras e kets. Graças a esta notação foi possível contornar o problema de produto de vetores no espaço abstrato de Hilbert.

Esperamos que com aspecto histórico da notação bras e kets consigamos despertar interesse do leitor para essa nova área do conhecimento e também que consigamos mostrar a extrema importância desta notação e como ela facilitou a manipulação de ferramentas matemáticas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira-UNILAB, pela oportunidade que me deram para estudar, ao professor João Philipe Macedo Braga pelo direcionamento dado durante a construção do presente trabalho

REFERÊNCIAS

- 1 - MARTINS, Roberto de Andrade. Ensaio sobre História e Filosofia das Ciências I. Extrema: Quamcumque Editum, 2021.
- 2 - Aragão, Maria José. História da física - Rio de Janeiro: Interciência, 2006.
- 3 - BORRELLI, Arianna. Dirac's bra-ket notation and the notion of a quantum state. In: Styles of Thinking in Science and Technology. Proceedings of the 3rd International Conference of the European Society for the History of Science. 2010. p. 361-371.
- 4 - DIRAC, Paul Adrien Maurice. A new notation for quantum mechanics. In: Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. Cambridge University Press, 1939. p. 416-418. - 1a ed. São Paulo, 2005