

INVARIANTES OPERATÓRIOS EM UMA SITUAÇÃO-PROBLEMA CLÁSSICA COMO BASE PARA A APRENDIZAGEM DE CONCEITOS DE MECÂNICA QUÂNTICA

Angela Mary Gaulke, Carlos Raphael Rocha
Universidade do Estado de Santa Catarina

RESUMO: Este trabalho visa analisar os invariantes operatórios utilizados por alunos de Ensino Médio ao responder uma questão envolvendo a descrição de um estado de sistema físico apresentada ao longo de um curso que abordava conceitos de Mecânica Quântica. Os alunos participaram de um curso de aproximadamente 25 horas-aula sobre conceitos de Mecânica Quântica e, em determinados momentos, avaliações escritas foram aplicadas, além de outras formas de verificação da aprendizagem. Uma das questões é aqui analisada para verificar se a linguagem usual da Mecânica Quântica e a operacionalidade da notação de Dirac foram devidamente compreendidas pelos alunos, mesmo que em situações inerentemente ligadas à Física Clássica. Ao todo, foram 147 respostas analisadas de alunos de primeira e de terceira série do Ensino Médio. As respostas apresentadas pelos alunos parecem indicar que os invariantes operatórios criados em sua estrutura cognitiva dão conta de situações-problema que envolvem a notação de Dirac, pois um elevado número de alunos a usou corretamente, inclusive fazendo menção a componente temporal. Isso leva a crer, também, que houve devida compreensão da notação de Dirac e que tópicos como este podem ser abordados neste nível de ensino com bom domínio por parte dos alunos e não havendo diferenças substanciais entre os alunos das duas séries analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: Invariantes Operatórios, Estado de Sistemas Físicos, Mecânica Quântica, Ensino Médio.

OBJETIVOS: Analisar e categorizar os invariantes operatórios utilizados por alunos de Ensino Médio ao responder uma questão que visa a descrição de um estado de sistema físico em um curso de Mecânica Quântica. Verificar se os alunos sabem utilizar corretamente a notação de Dirac para expressar estados de sistemas físicos.

INTRODUÇÃO

Trabalhos sobre o ensino de Mecânica Quântica podem ser encontrados desde a década de 1970 e, em geral, afirmam que os estudantes apresentam grandes dificuldades conceituais no estudo introdutório desta disciplina (Rüdingen, 1976; Frederick, 1978). Tais dificuldades, no entanto, não devem induzir a

uma negligência no esforço a fim de buscar a introdução adequada de tais tópicos em todos os níveis de ensino para que se consiga atingir um nível satisfatório de aprendizado. Pode-se dizer que a introdução de temas de FMC no EM já é unanimemente considerada necessária e urgente nos currículos de Física em diversos níveis introdutórios de ensino.

Um dos conceitos mais fundamentais da teoria quântica é o de estado de um sistema físico e uma das formas de se representá-lo é lançando mão da notação de Dirac, tal qual apresentada em Dirac (1930), em que o estado quântico é simbolizado por um vetor ($;$ ket), acrescido de uma característica interna, por exemplo, ou \cdot . Assim, como a internalização da representação de uma teoria faz parte do processo de aprendizagem, visamos aqui analisar a compreensão e utilização da notação de Dirac por estudantes de Ensino Médio em um curso introdutório de Mecânica Quântica. Acreditamos que, no início de um curso de Mecânica Quântica, pode-se utilizar uma estrutura clássica, com o objetivo de melhorar compreensão dos conceitos de Mecânica Quântica, para que o aluno vá se familiarizando com os elementos da teoria, para posteriormente inserir a nova notação.

REFERENCIAL TEÓRICO

Neste trabalho, utilizamos a Teoria dos Campos Conceituais como base para o desenvolvimento da pesquisa e para a análise do material coletado. Para analisar a cognição, Vergnaud considera fundamental trabalhar com o conceito de esquema, definido como a organização invariante do comportamento para uma determinada classe de situações (Vergnaud, 1993). Esquemas são formados pelos seguintes componentes (Vergnaud, 2012): metas e antecipações; regras de ação e controle; invariantes operatórios; possibilidades de inferência. Os invariantes operatórios, foco deste estudo, são conceitos e conhecimentos contidos nos esquemas e que servem para categorizar a informação e inferir, a partir desta, metas e comportamentos relevantes.

Outro ponto central na teoria dos campos conceituais é o conceito de conceito. Um conceito não pode ser reduzido à sua definição, principalmente se o interesse é no ensino e na aprendizagem do mesmo (Vergnaud, 1990). Conceito pode ser definido como um conjunto de situações, invariantes operatórios e representações.

Teoremas-em-ação e conceitos-em-ação estão inclusos nos invariantes operatórios. Um teorema-em-ação é uma proposição tida como verdadeira sobre o real e um conceito-em-ação é uma categoria de pensamento tida como pertinente ou relevante (Vergnaud, 1998). Em Ciência, conceitos e teoremas são explícitos e pode-se discutir acerca de sua pertinência e veracidade. Este não é necessariamente o caso dos invariantes operatórios. Teoremas e conceitos explícitos se constituem em uma pequena parte visível do iceberg da conceitualização; sem a parte oculta formada pelos invariantes operatórios, a parte visível não faz qualquer sentido. Assim, é papel do professor buscar a externalização dos invariantes operatórios dos alunos para que seus esquemas se desenvolvam de modo a estarem de acordo com a interpretação cientificamente correta dos fenômenos em estudo.

A transformação de invariantes operatórios em textos e palavras não é simples e direta. Ela requer, inicialmente, o aprendizado e a prática da linguagem natural e de diversos outros meios semióticos, tais como, por exemplo, signos e representações. Além disso, os sistemas linguísticos e semióticos não são direcionados para expressar exatamente o que cada indivíduo tem em mente quando é colocado diante de uma situação-problema, selecionando informações e processando-as, porque existe muita diferença entre o que é representado na mente de cada um e o significado usual das palavras. Ainda assim, em Física, a verificação do significado de representações simbólicas não depende somente de uma habilidade potencial de representar concretamente as entidades e relações expressas, mas também em levar em conta os elementos conceituais, tais como sistema, estado, conservação, interação, etc. (Barais & Vergnaud, 1990). O professor deve auxiliar os estudantes nesse processo de construção de

esquemas e representações, apresentando situações novas e mais complexas que visem a construção de novos esquemas e, portanto, de novos invariantes operatórios.

Em Mecânica Quântica, assim como em toda a Física, a linguagem e a simbologia adotadas tornam-se instrumentos para o domínio das situações-problema e construção de esquemas adequados. O domínio de representações como, por exemplo, a notação de Dirac deve ser analisado para verificar se o aluno possui uma relativa compreensão do campo conceitual da MQ.

Percebe-se que, tanto em conceito como em esquema, os invariantes operatórios são seus componentes. Visamos aqui, então, a análise de invariantes operatórios apresentados por alunos de primeira e terceira série do Ensino Médio em uma questão de avaliação respondida dentro de um curso de Mecânica Quântica.

METODOLOGIA

Para este trabalho, escolhemos a análise dos invariantes operatórios utilizados pelos alunos ao externalizarem o conhecimento acerca do conceito de estado de um sistema físico, por considerarmos que o conceito de estado é fundamental para a compreensão dos demais conceitos da Mecânica Quântica. Assim, a análise da questão proposta aos alunos pretende identificar os invariantes operatórios utilizados em sua resolução. Apenas uma questão é analisada, pois a discussão de todas resultaria em um trabalho demasiado extenso. As atividades desenvolvidas faziam parte da disciplina obrigatória de Física de uma instituição pública de ensino localizada em Araquari, SC, Brasil. No total, foram analisadas as respostas de 147 alunos, sendo 70 de primeira série e 77 de terceira série do Ensino Médio.

A questão analisada foi apresentada aos alunos com a seguinte redação: “Analise o objeto tradicionalmente descrito pela Física Clássica proposto pelo professor e caracterize o mesmo. A seguir, descreva um estado possível deste objeto”. O objeto analisado pelos alunos é mostrado na figura 1.



Fig. 1. Objeto clássico descrito pelos alunos na questão analisada.

As respostas, segundo os invariantes operatórios encontrados, foram assim categorizadas:

Tipo 1: uso da notação de Dirac, com menção à componente temporal;

Tipo 2: uso da notação de Dirac, sem menção à componente temporal;

Tipo 3: sem uso da notação de Dirac, mas descrevem o estado do objeto e com menção à componente temporal;

Tipo 4: sem uso da notação de Dirac, mas descrevem o estado do objeto sem menção à componente temporal.

Buscou-se categorizar as respostas dos alunos de ambas as séries dentre os tipos de respostas apresentados acima para que, posteriormente, fossem analisados e comparados, visando identificar as semelhanças e diferenças existentes.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir, nas tabelas 1 e 2, respectivamente, são mostrados exemplos de respostas de cada tipo fornecidos pelos alunos da primeira e da terceira série.

Tabela 1.
Exemplos de respostas dos alunos da primeira série na descrição do estado

Resposta	1ª série
Tipo 1	<p>① GARRAFA DE ÁGUA > = está no meio da mesa do professor, 19/11/12, 13:46, está verticalmente, cheia de água, tem um tampa azul, é transparente, está fechada >.</p> <p> estado da GARRAFA > = dentro da GARRAFA tem água, está fechada, em cima da mesa, 19/11/12, 13:50, em pé ></p>
Tipo 2	<p>1- garrafão > = está no muro, na frente da sala 14, muro do professor, sem etiqueta, no JFC, está no vertical, cheio de água, tampa azul, plástico transparente ></p>
Tipo 3	<p>1) é uma garrafa transparente, com água dentro, está tampada, sua tampa é azul, está sobre a mesa do professor, está cheia, 19/11/12, 14:46 horas.</p>
Tipo 4	<p>2. parada, no JFC, com água dentro, na sala 13 em cima de uma carteira, perto do quadro, perto da mesa do professor</p>

Tabela 2.
Exemplos de respostas dos alunos da terceira série na descrição do estado

Resposta	3ª série
Tipo 1	<p>① Garrafa d'água > = frasco transparente, tampa abeto azul, em cima da mesa, sem rótulo, horário 16:08, é do professor Raphael, possui 1,6m, sem etiqueta e frasco, está no JFC-Araquari, ... ></p>
Tipo 2	<p>1) Garrafa de água > = garrafa de plástico, água dentro, tampa azul, é do professor, está em cima da mesa, possui 1,6m, tampa de rosquear, está na sala 6, arredondada ></p>
Tipo 3	<p>7- É uma garrafa transparente, praticamente cheia de água, com tampa azul avulso, sem rótulo, em cima de uma parede na parede, às 16:00 do dia 25/10/12, Fambriata</p>
Tipo 4	<p>① Garrafa utilizada para armazenar água. Seu estado é sólido.</p>

Segundo a categorização realizada, o número de cada tipo de resposta é indicado na tabela 3.

Tabela 3.
Número de respostas de cada tipo para os alunos em cada uma das séries

<i>Tipo de Resposta</i>	<i>1ª série</i>	<i>3ª Série</i>	<i>TOTAL</i>
Tipo 1	52	48	100
Tipo 2	12	23	35
Tipo 3	4	2	6
Tipo 4	2	4	6

A tabela 3 indica que a maioria dos estudantes usou respostas do tipo 1, que contém a notação de Dirac e a menção à componente temporal, o que demonstra que houve internalização e uso de tais invariantes. As respostas do tipo 2 foram a segunda mais utilizada pelos estudantes. Tais respostas estão corretas, porém menos completas do que as do tipo 1. Os 135 estudantes que utilizaram respostas dos tipos 1 e 2 reconheceram e souberam utilizar a notação de Dirac para descrição do estado de um objeto, o que nos leva a crer que houve incorporação deste invariante operatório em sua estrutura cognitiva. A semelhança desses dois tipos de resposta está na utilização de uma notação em comum, havendo somente a diferença na componente temporal. Nas análises feitas, entretanto, a componente temporal é uma informação adicional e não compromete a devida compreensão do conteúdo.

As respostas dos tipo 3 e 4, utilizados por doze estudantes, não trazem a representação de Dirac, mas ainda assim descreve o estado do objeto. Isto indica também que houve compreensão do conceito de estado de um sistema físico, mas sem a adoção total da representação. No tripé de conjuntos que formam o conceito apresentado por Vergnaud, vê-se que estes alunos souberam lidar com o conceito de estado de um sistema físico em situações-problema e usar os invariantes operatórios, mas não dominam sua representação, faltando assim uma parte para a compreensão do conceito.

A análise indica um mesmo sentido, em que a maioria dos estudantes de ambas as séries utilizaram as respostas tipo 1 ou 2, que são as mais completas, e foram muito mais utilizados do que as respostas do tipo 3 e 4. Saliente-se que nenhum dos estudantes deixou a resposta da questão analisada em branco, o que pode indicar que os alunos efetivamente compreenderam o que foi questionado e foram capazes de apresentar respostas coerentes com o que estavam estudando, mesmo sem utilizar a devida representação, em poucos casos.

Como 135 dos 147 estudantes utilizaram a notação de Dirac para responder a questão solicitada, isto indica uma possível compreensão desta notação. É possível perceber, também, que os alunos relacionaram seu conhecimento prévio, sobre estados de objetos clássicos, com seu novo conhecimento, usando então a notação de Dirac para descrever tais estados, ou seja, ligando o novo conhecimento com o conhecimento anterior, algo que remete à aprendizagem significativa.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que a maioria dos estudantes usou a notação de Dirac para resolver a situação-problema que lhes foi proposta, indicando que o invariante operatório foi criado em sua estrutura cognitiva. O elevado número de alunos que a usou corretamente, inclusive fazendo menção a componente temporal, leva a crer, também, que houve boa compreensão da notação de Dirac e que tais tópicos podem ser abordados neste nível de ensino com bom domínio por parte dos alunos, não havendo diferenças substanciais entre os alunos das duas séries analisadas. Dados preliminares também nos mostram que houve uma boa compreensão por parte dos estudantes sobre

outros conceitos apresentados no decorrer do curso, tais como superposição de estados e emaranhamento quântico.

Mesmo que a situação analisada seja típica de descrição de um sistema físico da Física Clássica, a estrutura utilizada é a mesma para situações da Física Quântica e, por isso, o invariante operatório criado pode auxiliar a compreensão de fenômenos da Mecânica Quântica, segundo os preceitos da aprendizagem significativa. Para muitos dos alunos, esse contato pode ser o último de suas vidas com alguma disciplina que aborde tais temas, fazendo-se necessária assim a contrapartida da educação formal.

Diversos tópicos podem ser usados para promover uma atualização curricular e uma alfabetização científica. No caso particular do ensino de Mecânica Quântica, pode-se utilizar um grande número de situações-problema nas quais os principais conceitos são aplicados para que os alunos possam compreendê-los. Alguns exemplos de situações-problema são os experimentos de dupla fenda e de Stern-Gerlach, o emaranhamento quântico e a criptografia quântica. Além disso, situações mais comuns à Física Clássica, tais como a superposição de ondas e de vetores geométricos, servem para a formação do conceito de superposição linear, fundamental também para a devida compreensão de tópicos de Mecânica Quântica e tido como de difícil compreensão pelos alunos (Greca & Herscovitz, 2005). A utilização de uma estrutura clássica, nestes casos, deve auxiliar a conceitualização de determinados conceitos da Mecânica Quântica e não explicar fenômenos quânticos utilizando conceitos e leis, cronologicamente, apresentados na Física Clássica.

- BARAIS A. W., y VERGNAUD, G. (1990). Students' conceptions in physics and mathematics: biases and helps. In: Caverni, J. P.; Fabre, J. M.; Gonzalez, M. (Eds.). *Cognitive Biases*. North Holland: Elsevier Science Publishers.
- DIRAC, P. A. M. (1930). *The principles of quantum mechanics*. London: Oxford University Press.
- FREDERICK, C. (1978). A mechanical model for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 46(3), 242-243.
- GRECA, I.M., y HERSCOVITZ, V. E. (2005). Superposição linear em ensino de mecânica quântica. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*. 5(1).
- RÜDINGER, E. (1976). On the teaching of introductory quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 44(2), 144-148.
- VERGNAUD, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10(2-3), 133-170.
- (1993). Teoria dos campos conceituais. In: Nasser, L. (Ed.). *Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro*.
- (1998). A comprehensive theory of representation for mathematics education. *Journal of Mathematical Behavior*, 17(2), 167-181.
- (2007). ¿En qué sentido la teoría de los campos conceptuales puede ayudarnos para facilitar aprendizaje significativo? *Investigações em Ensino de Ciências*, 12(2), 285-302.
- (2012). Forme opératoire et forme predicative de la connaissance. *Investigações em Ensino de Ciências*, 17(2), 287-304.