

Revisão sobre as propostas didáticas para o ensino de Mecânica Quântica

Revision on didactic proposals for the teaching of Quantum Mechanics

Rafaelle da Silva Souza

SEE-PB; PPGEFHC, UFBA-UEFS

rafaellessouza@gmail.com

Indianara Lima Silva

Departamento de Física, UEFS; PPGEFHC, UFBA-UEFS

indianara.slima@gmail.com

Elder Sales Teixeira

Departamento de Física, UEFS; PPGEFHC, UFBA-UEFS

eldersate@gmail.com

Resumo

Uma revisão sistemática e crítica sobre as propostas didáticas para o ensino da Mecânica Quântica (MQ) é realizada. Foram selecionados 77 artigos, dos quais 27 compõe o *corpus* do presente trabalho. Estes, foram analisados com destaque nos equívocos, ferramentas de pesquisa e estratégias de ensino. Os resultados foram categorizados de acordo com sua contribuição na tentativa de superar dificuldades em ensinar/aprender MQ. Os resultados reafirmam que as dificuldades em sua compreensão, em grande parte, são devido ao seu caráter abstrato e profundamente matematizado em que esta é ensinada; as práticas docentes acabam apresentando ideias muito diversas sobre estratégias de ensino; faltam pesquisas de como essas estratégias promovem a compreensão, bem como a importância dos métodos de ensino e materiais didáticos. Portanto, elucida-se a necessidade de mais pesquisas empíricas sobre estratégias de ensino destinada a abordagem conceitual da MQ que colabore para aprendizagem dos estudantes.

Palavras chave: Mecânica Quântica; Proposta didática; Ensino de Física.

Abstract

A systematic and critical review about didactic proposal on the teaching of Quantum Mechanics (QM) is performed. A total of 77 articles were selected, of which 27 are the corpus of the present study. These were analyzed with emphasis on misunderstandings, research tools and teaching strategies. The results were categorized according to their contribution in trying to overcome difficulties in teaching/learning QM. The results reaffirm that the difficulties of understanding are largely due to their abstract and deeply mathematic character in which it is taught; the teaching practices end up presenting very diverse ideas about teaching strategies; there is a lack of research on how these strategies promote understanding, as well as the importance of teaching methods and teaching materials. Therefore, it is

elucidated the need for more empirical research on teaching strategies aimed at the conceptual approach of the QM to assist in the student learning.

Key words: Quantum Mechanics; Didactic Proposals; Teaching Physics.

Introdução

O ensino de Mecânica Quântica (MQ) tem sido muito discutido na literatura (GRECA, 2000; OSTERMANN e MOREIRA, 2000; PEREIRA e OSTERMANN, 2009). Há preocupação em propor mudanças e adaptações para ensinar os conceitos quânticos criando condições para que estudantes os compreendam (GRECA *et al.*, 2001). Em contrapartida, as ações apresentadas na prática são muito sutis, se estabelece uma lacuna entre o proposto e o executado em sala de aula (POSPIECH e SCHÖNE, 2014). Perpetuam-se as dificuldades no processo de ensino-aprendizagem e, portanto, mais pesquisas são necessárias (CUESTA-BELTRÁN 2018).

Essa perspectiva abre possibilidades de investigação até então pouco exploradas. Acentuam-se a busca por recursos facilitadores de ensino e aprendizagem. Temas, dilemas, interrogações e desdobramentos têm merecido a atenção. Atualmente, mais ênfase é colocada no desenvolvimento de uma compreensão conceitual e introdução de diversas ferramentas didáticas (KOHLE *et al.*, 2014; CUESTA-BELTRÁN 2018).

Isto posto, propõe-se avaliar sistematicamente a literatura científica da área a fim de reconhecer as características predominantes e perceber as dificuldades para efetivas práticas didáticas que busquem melhorar as discussões em sala de aula, nas quais o entendimento pode, então, ser desenvolvido. É realizada uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de analisar estudos relativos ao ensino de MQ nos cursos de física observando: 1) a natureza das dificuldades de compreensão conceitual; 2) se há uma busca por superá-las; 3) como estas são contempladas nas salas de aula; d) quais estratégias de ensino podem influenciar na aprendizagem dos principais conceitos da MQ.

A preocupação desta pesquisa é a caracterização das recorrentes práticas no ensino de MQ em relação aos materiais e recursos didáticos. Busca-se evidenciar a produção acadêmica e a respectiva atenção dos pesquisadores no que se refere à formação inicial de professores e a articulação dos processos de ensino com a formação nos cursos introdutórios de física quântica. Espera-se apontar diretrizes que possam orientar professores e pesquisadores.

Método

O levantamento bibliográfico foi operacionalizado por busca eletrônica de artigos indexados nas bases de dados *Education Resources Information Center*, *Web of Science* e *Springer* – principais bases de dados com literatura especializada – a partir de palavras-chave. De forma sistemática elencam-se os principais resultados da área em foco, todos os quais podem ser extremamente pertinentes para os investigadores (BENNETT *et al.* 2005).

A combinação de palavras-chave foi de modo a obter artigos com similaridade ao conteúdo pretendido e de relevância para a pesquisa. Para tanto, foram utilizados os cruzamentos das palavras-chave: *Modern Physics*, *Quantum Mechanics* e *Physics Teaching*.

A amostra compreendeu artigos indexados em periódicos, selecionados a partir da leitura prévia dos resumos e seguiu os critérios de inclusão: 1) veículo de publicação – periódicos de fácil acesso para os pesquisadores; 2) idioma – artigos publicados na íntegra em língua inglesa; 3) ano de publicação – entre 1990 e 2016; 4) área de concentração - aqueles, prioritariamente, voltados para os cursos de física observando as principais características do

ensino de MQ, bem como a natureza das dificuldades de aprendizagem; 5) investigações voltadas para o ensino-aprendizagem da MQ em contexto de sala de aula; 6) preparação e utilização de material didático. Devido aos critérios rigorosos utilizados pelas duas bases de dados consultadas, acredita-se ter englobado os artigos mais relevantes sobre o tema.

Em seguida, foram recuperados os artigos completos constituindo o *corpus* que delimitou o material de análise. De posse dos artigos recuperados, foi feita a leitura analítica e integral de cada estudo; e o tratamento dos dados: identificação das ideias-chave, hierarquização dos principais achados e a síntese dos resultados.

Para organização e compreensão da produção científica em questão, tabulou-se as principais informações e se analisou as linhas mestras dos resultados de cada trabalho. Foi adotado 10 dimensões de análise, a saber: ano de publicação, fonte de publicação, autor, país de origem, objetivos, desenho metodológico, procedimentos, instrumentos utilizados, metodologia didática e resultados da aplicação das propostas.

Em sequência, o procedimento de análise envolveu: pré-análise (organização dos dados através da leitura flutuante); exploração do material (com os dados já categorizados e tabulados); interpretação dos dados (foram selecionados os temas mais recorrentes destacados por categorias temáticas).

Resultados

Um total de 77 artigos foi selecionado mediante consulta às bases de dados, lidos na íntegra, qualificados e submetidos a critérios de exclusão visando precisar sua importância para este trabalho. Os critérios de exclusão foram: a) Artigos que tratam de conteúdo específico da MQ com ênfase no formalismo matemático ainda que com aplicação em sala de aula (Excluídos: 38 artigos - 49,35% do total. Nos interessam estudos que invistam em discussões conceituais); b) Artigos de natureza teórica que não priorizam o ensino e aprendizagem ou preparação de materiais didáticos (Excluídos: 12 artigos - 15,58% do total).

Aplicados os critérios de exclusão, restaram 27 artigos ($\approx 35\%$ do total), constituindo o *corpus* da pesquisa com valor significativo enquanto estudos de natureza empírica. Esse número não descarta a possibilidade de haver uma maior incidência de estudos referentes ao ensino de MQ durante os anos abrangidos pela presente revisão, porém não estruturados de acordo com o enfoque deste estudo.

Houve maior quantidade de artigos nos anos de 2010 e 2015, com incidência de publicações nos Estados Unidos - 59,3% dos artigos. Outros países, como Turquia, Alemanha, Canadá, Croácia, Dinamarca e Austrália tiveram entre 3 - 1 publicação. Essa distribuição evidencia que tal discussão está presente em diversos países e apresenta em comum a ênfase nas recorrentes dificuldades dos estudantes.

Com relação aos procedimentos e instrumentos, os 27 (100%) artigos explicitam a exploração nas propostas didáticas a abordagem conceitual no ensino de MQ e como instrumento de pesquisa: questionários, entrevistas estruturadas ou semi-estruturadas e metodologia qualitativa, cujas investigações mais frequentes perpassam a discussão de conceitos. Ao término desse trabalho listam-se as respectivas referências, classificadas de A1 a A27 apenas para identificação nos quadros 1 e 2.

Há diferentes percepções entre os autores sobre os aspectos metodológicos que podem influenciar positivamente o processo de ensino e aprendizagem da MQ, bem como na utilização dos diversos recursos didáticos, variando entre atividades dissertativas, resolução de problemas, concepções prévias, tecnologia, abordagem histórica, construção de modelos

mentais e formalismo básico.

Os 27 artigos apresentaram potencialidades em suas abordagens para atingir o objetivo final que é a compreensão conceitual da MQ ao promover um raciocínio profundo dos fundamentos quânticos. Porém, não deixam explícitos a descrição ou análise de como foi indicado pelos estudantes à obtenção de sua compreensão. A utilização dos instrumentos de coleta de dados supracitados não foi suficiente para compreender como o estudante aprendeu. Não há indicadores adequados para o entendimento e reprodução posterior.

Com relação à metodologia percebem-se algumas “ausências”. Fica ausente a discussão explícita da metodologia utilizada; outros só a nomeiam ou ainda a apresentam subentendida. Esta ausência reafirma outro problema: déficit no processo metodológico fundamental vinculado a falta de exposição tanto sobre metodologia de pesquisa como de sua utilização no processo de investigação. Além destes, outros problemas com relação direta ao ensino também são observados.

Essas fragilidades reforçam a necessidade de mais investigações na área. Os artigos ainda que reconhecidos internacionalmente, reafirmam a vulnerabilidade da área. Os resultados imediatos de cursos e propostas oferecidas indicam que pode haver um maior interesse dos pesquisadores em avaliar aspectos ligados a aprendizagem propriamente dita, distanciando-se das estratégias de ensino. Observam-se diferentes percepções sobre os aspectos metodológicos que podem colaborar para o processo de ensino e aprendizagem da MQ. Não há uniformidade nos recursos didáticos, tampouco quanto à ênfase curricular. Consideramos como ponto de partida o conhecimento e reflexão sobre essas questões. Os resultados não são conclusivos. Maiores esforços são necessários para implementar intervenções didáticas que expressem uma compreensão de situações reais de sala de aula.

Dificuldades para ensinar/aprender MQ

Há uma forte preocupação com a não compreensão das ideias quânticas fundamentais apresentadas nos cursos. Os estudantes têm dificuldade em dominar os conceitos e aplicá-los. São tidos com obstáculos à aprendizagem:

Quadro 1: Categorização das dificuldades para aprender MQ

EQUÍVOCOS	CAUSA	REFERÊNCIA	INFERÊNCIA
Ruptura do paradigma clássico/quântico	Modelos clássicos são persistentes e prevalentes	A4 – A7, A16 – A19, A21, A25, A26	As concepções dos estudantes de entidades quânticas são essencialmente extensões simples de representações clássicas. É preciso tempo para ocorrer à ruptura
Caráter abstrato e visões equivocadas	Apenas a leitura de definições não é o suficiente	A2 – A4, A7 – A9, A16, A18, A21, A22, A24 – A26	Se não há uma compreensão adequada, os equívocos são inevitáveis
Formalismo matemático	Visto como trivial para os estudantes	A5, A13, A15 – A17, A21, A23, A25, A26	Os conceitos normalmente são descritos em termos de modelos matemáticos complexos, que acaba por desempenhar um papel crucial nas dificuldades de aprendizagem
Caráter intuitivo	Equívocos no tratamento dos fenômenos quânticos	A4, A7, A15, A17, A24, A26	Os estudantes fazem confusão com as noções clássicas e quânticas. Deve-se, também, a instrução tradicional e o caráter contra intuitivo da MQ

Equívocos e generalizações inadequadas	Método de ensino	A6, A9, A21, A22, A24, A25, A27	Faltam experiências sensoriais sobre os conceitos quânticos. A compreensão partindo da definição dos conceitos é importante para a aprendizagem
Conceitos não convencionados	Confusão conceitual	A11, A17, A23	Tópicos como relação de incerteza tempo energia ou dualidade onda-partícula não são, facilmente, compreendidos

Fonte: dados da pesquisa.

Essas dificuldades conceituais e de raciocínio categorizadas são recorrentes nas pesquisas. Nos 27 artigos, apesar da preocupação com a compreensão conceitual, há forte presença de uma resistente aprendizagem superficial pelos estudantes – não passa de deduções isoladas apoiando-se precariamente umas nas outras. Por essa razão, é comum a busca de possibilidades para o aprimoramento do ensino de MQ, as quais, discutiremos a seguir.

Possibilidades para o aprimoramento para o ensino de MQ

Nos 27 artigos, há uma busca por novas estratégias para ensinar MQ. A saber:

Quadro 2: Categorização das alternativas para melhoria do ensino de MQ

ALTERNATIVAS	REFERÊNCIAS	INFERÊNCIA
Reavaliar os estilos de ensino, livros e/ou material didático	A6, A8, A13, A14, A17, A18, A22 – A25	Diferentes abordagens pedagógicas têm impactos diferenciados no pensamento do estudante
Explorar as relações teóricas e matemáticas	A2, A9, A13 – A16, A21, A23, A24, A26	Uma estrutura conceitual tem dependência do formalismo matemático, mas não só dele
Uso de recursos computacionais	A7 – A9, A20, A24, A25	Fenômenos não visualizados facilmente podem ser gerenciados através de recursos computacionais e suprir a falta de atividades experimentais
Buscar elementos motivacionais	A8, A16, A20, A24 A26, A27	É interessante romper com o ensino limitado ao uso de lápis e quadro branco e despertar o interesse do estudante
Promover a argumentação	A2, A5, A10, A14, A18	As observações dos estudantes e a sondagem da dificuldade em aprender determinado conteúdo pode atribuir um caráter mais didático ao ensino
Promover atividades e resolução de problemas	A2, A11, A22, A27	Erros cometidos ao resolver atividades oportunizam meios de aprendizagem ao reconhecê-los e ajustá-los
Direcionar mais tempo ao ensino de MQ	A3, A13, A19	O domínio conceitual da MQ é um processo que demanda tempo. Por sua complexidade, novos meios e diferentes abordagens pedagógicas de ensino criam maiores condições de promover aprendizagem
Inserir a abordagem histórica	A1, A12, A15	Abordar alguns episódios históricos e as diferentes posições dos físicos auxiliam na compreensão dos conflitos abertos pela física quântica
Promover representações multimodais	A10	A dificuldade de ter uma compreensão multimodal dos conceitos quânticos é vista como um desafio a ser superado

Fonte: dados da pesquisa.

O método de ensino e os livros/materiais didáticos utilizado pelos professores podem influenciar na aprendizagem. Uma compreensão adequada dos princípios da MQ requer a construção de uma estrutura de conhecimento consistente com explicações coerentes e aprofundada dos conceitos. É preciso oportunizar a reorganização das ideias iniciais dos estudantes com os conceitos cientificamente aceitáveis.

Inferimos que os professores devem estar interessados na explicação de conceitos por redesenhar as instruções considerando a dinâmica de ensino e entendimento, porém, sem descartar o formalismo matemático. A capacidade dos estudantes para responder a questões conceituais sobre a MQ é altamente correlacionada com a sua capacidade de resolver problemas de cálculo sobre os mesmos tópicos. É interessante incentivar a compreensão dos conceitos ao invés de apenas priorizar o formalismo matemático, não “ignorando” os conceitos fundamentais que formam a base da física quântica.

Considerações

Na interlocução com o legado da literatura, percebe-se que são diversas as inquietações sobre os processos de ensino e aprendizagem da MQ. Alguns problemas apresentados permanecem no estágio atual do ensino de MQ (CUESTA-BELTRÁN, 2018). Contudo, os estudos revisados ressaltam que frente as várias dificuldades ao ensinar MQ algumas ações em práticas de sala de aula podem ser viáveis.

O relato dessas experiências permite-nos afirmar que o aperfeiçoamento dos cursos de MQ depende de sua construção. Se construído em um espaço bem definido e que explore, aspectos históricos, fenomenológicos, matemáticos e/ou conceituais de um mesmo conteúdo quântico poderá se obter melhores resultados de aprendizagem.

As principais áreas nas quais o curso de MQ pode ser melhorado ressonam sobre os livros didáticos, métodos de ensino e ferramentas de avaliação. Inferimos que um ensino no qual se privilegie a construção do conhecimento, e o estudante passa a ser o sujeito do processo educativo, é o mais indicado para o desenvolvimento de uma compreensão conceitual; questões estas fundamentais, também, para a formação inicial do professor de Física.

O conhecimento gerado pela presente revisão constitui um recorte para percepção das atuais questões que perpassam as discussões sobre o ensino de MQ. Não foi objetivo do presente estudo esgotar o assunto, e sim, oferecer suporte teórico e empírico para o argumento de que trabalhos de intervenção podem abrir novos rumos para os desafios colocados pela MQ.

Em destaque ao considerar estas questões voltadas para a formação inicial de professores, para que o mesmo se sinta preparado para prática docente, investir nesta etapa torna-se fundamental. É preciso repensar as práticas didáticas no ensino da MQ investindo nas que possam possibilitar uma compreensão dos conceitos fundamentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Referências

BENNETT, J.; LUBBEN, F.; HOGARTH, S.; CAMPBELL, B. Systematic reviews of research in Science Education: rigour or rigidity? *International Journal of Science Education*,

London, v. 27, n. 4, 387- 406, 2005.

CUESTA-BELTRÁN, Y. J. Estado del arte: tendencias en la enseñanza de la física cuántica entre 1986 y 2016. TED: N° 44, segundo semestre de 2018, p. 147-166.

GRECA, I. M. R. Construindo significados em Mecânica Quântica: resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de Física geral. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física – Tese. Porto Alegre, 2000.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma Proposta para o Ensino de Mecânica Quântica. Rev. Bras. Ensino Fís. v.23, n.4 São Paulo, 2001.

HÖTTECKE, D., HENKE, A., RIESS, F. Implementing History and Philosophy in Science Teaching: Strategies, Methods, Results and Experiences from the European HIPST Project. Science & Education, 21, 1233, 2010.

KOHNLE, A.; BOZHINOVA, I.; BROWNE, D.; EVERITT, M.; FOMINS, A.; KOK, P.; KULAITIS, G.; PROKOPAS, M.; RAINE, D.; AND SWINBANK, E. A new introductory quantum mechanics curriculum. Eur. J. Phys. 35, 01500, 2014.

MATTHEWS, M. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. Cad. Cat. Ens. Fís., v. 12, n. 3: 164-214, 1995.

PEREIRA, A. P. e OSTERMANN, F. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. Investigações em Ensino de Ciências, Porto Alegre, v.14, n.3, pp. 393-420, dez. 2009.

POSPIECH, G.; SCHÖNE, M. Quantum Physics in Teacher Education. In: BURRA G. SIDHARTH, B. G., MICHELINI, M., SANTI, L. Ed(s). Frontiers of Fundamental Physics and Physics Education Research. Springer Proceedings in Physics, v. 145: 407- 416, 2014.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio". Investigações em Ensino de Ciências, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-48, jan. 2000.

Artigos que compõe o *corpus* dessa pesquisa

A1 - KRAGH, H. A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum physics. Sci&Educ 1:349–363, 1992.

A2 - STYER, D. F. Common misconceptions regarding quantum mechanics. American Journal of Physics, 64(1), 31–34, 1996.

A3 - JOHNSTON, I. D.; CRAWFORD, K.; FLETCHER, P. R. Student difficulties in learning quantum mechanics. International Journal of Science Education, 20:4, 427-446, 1998.

A4- MÜLLER, R.; WIESNER, H. Students' conceptions on quantum physics. Paper presented at the meeting of the National Association for Research in Science Teaching (NARST), 1999.

A5 - IRESON, G. The quantum understanding of pre-university physics students. Physics Education, 35(1), 15–21, 2000.

A6 - SINGH, C. Student understanding of quantum mechanics. American Journal of Physics, 69(8), 885–895, 2001.

A7 - MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. American Journal of Physics, 70(3), 200–209, 2002.

A8 - CATALOGLU, E.; ROBINETT, R. Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career. American Journal of Physics, 70, 238–251, 2002.

A9 - SINGH, C.; BELLONI, M.; CHRISTIAN, W. Improving students' understanding of

quantum mechanics. *Physics Today* 59, 43–49, 2006.

A10 - GUNEL, M.; HAND, B.; GUNDUZ, S. Comparing student understanding of quantum physics when embedding multimodal representations into two different writing formats: presentation format versus. *Science Education*, 2006.

A11 - NIKOLIC, H. Quantum Mechanics: Myths and Facts. *Found Phys*, 37: 2007.

A12 - NASHON, S.; NIELSEN, W.; PETRINA, S. Whatever happened to STS? Pre-service physics teachers and the history of quantum mechanics. *Sci&Educ* 17:387–401, 2008.

A13 - CARR, L. D.; MCKAGAN, S. B. Graduate quantum mechanics reform. *American Journal of Physics*, 77, 2009.

A14 - McKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; WIEMAN, C. E. Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. *Physical review special topics - Physics Education Research* 6, 020121, 2010.

A15 - SCHNEIDER, M. B. Quantum Mechanics for beginning physics students. *Phys. Teach.* 48, 484–486, 2010.

A16 - DIDIŞ, N.; ERYILMAZ, A.; ERKOÇ, S. Pre-service Physics Teachers' Comprehension of Quantum Mechanical Concepts. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 227-235, 2010.

A17 - BAILY, C.; FINKELSTEIN, N. D. Refined characterization of student perspectives on quantum physics. *Physical review special topics - Physics Education Research* 6, 02011, 2010a.

A18 - BAILY, C.; FINKELSTEIN, N. D. Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses. *Physical review special topics - Physics Education Research* 6, 010101, 2010b.

A19 - DESLAURIERS, L.; WIEMAN, C. Learning and retention of quantum concepts with different teaching methods. *Physical review special topics - Physics Education Research* 7, 010101, 2011.

A20 - ZHU, G.; SINGH, C. Improving students' understanding of quantum measurement. I. Investigation of difficulties. *Physical review special topics - Physics Education Research* 8, 010117, 2012.

A21 - SINGH, C.; MARSHMAN, E. Review of student difficulties in upper-level quantum mechanics. *Physical review special topics - Physics Education Research* 11, 020117, 2015.

A22 - PASSANTE, G.; EMIGH, P. J.; SHAFFER, P. S. Examining student ideas about energy measurements on quantum states across undergraduate and graduate levels. *Physical review special topics - Physics Education Research* 11, 020111, 2015.

A23 - SADAGHIANI, H. R.; POLLOCK, S. J. Quantum mechanics concept assessment: Development and validation study. *Physical review special topics - Physics Education Research* 11, 010110, 2015.

A24 - MARSHMAN, E.; SINGH, C. Framework for understanding the patterns of student difficulties in quantum mechanics. *Physical review special topics - Physics Education Research* 11, 020119, 2015.

A25 - EMIGH, P. J.; PASSANTE, G.; SHAFFER, P. S. Student understanding of time dependence in quantum mechanics. *Physical review special topics - Physics Education Research* 11, 020112, 2015.

A26 - KÖRHASAN, N. D. The place of learning quantum theory in physics teacher education: motivational elements arising from the context. *Educational Sciences: Theory & Practice*, 15(4). 1087-1101, 2015.

A27 - BROWN, B. R.; MASON, A.; SINGH, C. Improving performance in quantum mechanics with explicit incentives to correct mistakes. *Physical review special topics - Physics Education Research* 12, 01012, 2016.