

Resultados de uma proposta didática: predição do momento de dipolo magnético no contexto macroscópico e microscópico mediada pelo experimento de Stern-Gerlach

Results of a didactic proposal: prediction of magnetic dipole moment in the macroscopic and microscopic context mediated by Stern-Gerlach

Rodolfo Alves de Carvalho Neto

Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
rodolfoacn@gmail.com

Resumo

Este artigo tem como objetivo descrever como estudantes de graduação da Universidade Federal da Bahia (2014) internalizaram os conceitos de momento de dipolo magnético no contexto macroscópico e microscópico através de uma situação-problema envolvendo a predição teórica dos resultados experimentais obtidos com a limalha de ferro e átomos de prata num campo magnético não homogêneo. A metodologia qualitativa utilizada baseou-se na teoria histórico-cultural de Lev Vygotsky. Como principal resultado do presente trabalho destaca-se a tomada de consciência, de um estudante, ao longo do processo de debate sobre as previsões teóricas, de que o momento de dipolo permanente do átomo de prata é quantizado. Inferimos que estes resultados podem facilitar o estudo dos sistemas de dois níveis e do espaço vetorial subjacente.

Palavras chave: momento de dipolo induzido, momento de dipolo permanente quantizado, Stern-Gerlach, teoria de Vygotsky.

Abstract

This article aims to describe how undergraduate students at the Federal University of Bahia (2014) internalized the concepts of magnetic dipole moment in the macroscopic and microscopic contexts through a problem situation involving the theoretical prediction of the experimental results obtained with iron filings and silver atoms in an inhomogeneous magnetic field. The qualitative methodology used was based on Lev Vygotsky's cultural-historical theory. As the main result of the present work, one emphasizes how a student became aware, during the process of debating theoretical predictions, that the permanent dipole moment of the silver atom is quantized. We infer that these results can facilitate the study of two-level systems and of the underlying vector space.

Key words: moment of induced dipole, moment of quantized permanent dipole, Stern-Gerlach, Vygotsky theory.

Introdução, objetivo, problema de pesquisa e justificativa

Este artigo tem como objetivo descrever o processo de internalização dos conceitos de dipolo magnético induzido e momento de dipolo quantizado, no contexto de uma situação-problema envolvendo a predição teórica dos resultados experimentais obtidos com a limalha de ferro e átomos de prata num campo magnético não homogêneo. Esta experiência didática se deu com alunos da graduação de Física da UFBA (2014-2). Trata-se de um objetivo específico de um estudo mais amplo. A questão que se coloca como problema de pesquisa do presente artigo é: como a discussão em torno das predições teóricas dos resultados com limalha de ferro e átomos de prata interagindo com campo magnético não homogêneo e colidindo com placas coletoras contribuíram para a internalização dos conceitos de dipolo magnético induzido e momento de dipolo magnético permanente, quantizado? Os dados da pesquisa foram coletados e analisados, mediante método qualitativo fundamentado na teoria de Vygotsky. É importante esclarecer que o experimento de Stern-Gerlach não foi reproduzido em sala de aula em virtude do custo inviabilizador. O que foi feito foi uma discussão teórica a partir de uma representação do resultado desse experimento.

O ensino de Mecânica Quântica é desafiador e a discussão pedagógica sobre o experimento de Stern-Gerlach, continua sendo aperfeiçoada para a aprendizagem de conceitos quânticos necessários para comunicar resultados experimentais (JUSTICE; MARSHAN; SINGH, 2022), (ZHU; SINGH, 2011). No que pese não haver espaço para uma revisão da literatura sobre ensino e aprendizagem desta teoria física, deve-se destacar que ao longo dos últimos dez anos, foi possível identificar valiosas investigações sobre sistemas de dois níveis, Marshman, E.; Singh, C. (2016), Cavalcanti et al (2020), além de renovados estudos com abordagem histórica voltada, contudo, para o ensino de conceitos fundamentais da Mecânica Quântica: Lima; Cavalcanti; Ostermann (2022). A ideia de se conseguir um ensino da teoria quântica que tente equilibrar as ênfases conceituais, formalismos matemáticos e fundamentações epistemológicas: Greca; Freire (2015) continua sendo, a nosso ver, uma ideia atual, em aberto, para o professor-pesquisador. A justificativa para apresentação deste artigo está inserida numa premissa mais geral de trabalho: ideias fundamentais da Física, a exemplo das predições intrinsecamente probabilísticas da Mecânica Quântica não devem prescindir da compreensão acerca do determinismo implícito na segunda lei de Newton (FREIRE JR.; CARVALHO NETO, 1997). Isso nada tem a ver com uma defesa de ensino de Mecânica Quântica a partir de elos de analogia com a Mecânica Clássica, pelo contrário, serve para contrastar as bases conceituais de uma e de outra. O mesmo raciocínio vale para contrastar ideias básicas do Eletromagnetismo com ideias fundamentais da Mecânica Quântica, que foram investigadas (dipolo induzido e momento de dipolo magnético quantizado, respectivamente). As questões epistemológicas ligadas aos conceitos quânticos tratados no Stern-Gerlach levaram em conta Pessoa Jr. (2003), onde o vetor de estado, de acordo com a interpretação adotada (complementaridade) deve ser interpretado de forma epistêmica.

Referencial teórico e metodologia da pesquisa

Uma das ideias centrais da teoria de Vygotsky é a atividade mediada (indireta), ou mediação. Sustenta que a relação do homem com o mundo não é direta. Os signos e instrumentos, construídos historicamente, são os meios auxiliares de mediação dos seres humanos entre si e com o mundo. Uma distinção fundamental entre signo e instrumento está na forma como eles orientam o comportamento humano. Vygotsky é enfático na diferença entre ambos, e explicita



que a função do instrumento é servir como um condutor da influência humana sobre o objeto da atividade. Ele é orientado externamente e deve necessariamente levar a mudanças nos objetos. Constitui um meio pelo qual a atividade externa é dirigida para o controle da natureza. O signo, por sua vez, não modifica em nada o objeto da operação psicológica. Constitui um meio da atividade interna dirigido para o controle do próprio indivíduo; o signo é orientado internamente. Essas atividades são tão diferentes umas das outras que a natureza dos meios por elas utilizados não pode ser a mesma (VYGOTSKY, 2007). Uma das hipóteses centrais da teoria de Vygotsky é a noção de que o processo de desenvolvimento mental avança de modo mais lento do que o processo de aprendizagem. Disso resulta o conceito de sua teoria com fortes implicações para o ensino, denominada de Zona de Desenvolvimento Proximal ou Potencial (ZDP). Ele a define como a distância entre o nível de desenvolvimento real, que se costuma determinar através da solução independente de problemas, e o nível de desenvolvimento potencial, determinado através da solução de problemas sob a orientação de um adulto ou em colaboração com companheiros mais capazes (VYGOTSKY, 2007, p. 97). Esta zona define aquelas funções que ainda não amadureceram, mas que estão em processo de amadurecimento. Levando-se em conta que o nível de desenvolvimento real caracteriza o desenvolvimento retrospectivamente e que a zona de desenvolvimento proximal caracteriza o desenvolvimento mental prospectivamente, a conclusão evidente é que um bom ensino, nessa perspectiva teórica, deve ser prospectivo. Desse modo, então, o direcionamento, por parte do professor, para os níveis de desenvolvimento que já foram atingidos é ineficaz. Destaque-se que o processo de internalização consiste numa série de transformações, conforme assinala Vygotsky (2007, p. 58): uma operação que inicialmente representa uma atividade externa é reconstruída e começa a ocorrer internamente. Em seguida, um processo interpessoal é transformado num processo intrapessoal. Para Vygotsky a transformação de um processo interpessoal num processo intrapessoal é o resultado de uma longa série de eventos ocorridos ao longo do desenvolvimento.

Quanto à metodologia de pesquisa adotada, optou-se pelo método qualitativo-descritivo. Foram utilizados três tipos de coleta de dados: observação do grupo de alunos e entrevistas individuais. Em todos os procedimentos metodológicos, considerou-se essencial o papel da interação social, inclusive nas entrevistas individuais, uma vez que foram planejadas em função das falas (gravadas em vídeo) dos alunos, levando em conta risos, gestos e momentos em que um dos participantes se colocava como mais capaz. Antes de cada entrevista, eram projetados os vídeos gravados em sala de aula, para que o aluno entrevistado refletisse sobre o intercâmbio de significados ocorridos no processo de interação com os colegas e professor. Dos sete alunos matriculados, um estudante foi selecionado como sujeitos de pesquisa, tendo em vista a vontade e disponibilidade de horário para concedê-las. Os cuidados éticos nos levaram a denominá-lo com o pseudônimo de Alexandre, mas toda a turma (7 alunos) participou da aula experimental, totalizando 6,0 horas (incluindo a entrevista), de uma carga horária total de 64 h de um estudo mais geral, conforme mencionado previamente.

Tendo em vista o conteúdo programático, foram propostos os seguintes tópicos para a pesquisa.

- investigar o conhecimento prévio sobre o conceito científico *momento de dipolo magnético*;
- problematizar as previsões dos resultados experimentais das limalhas de ferro e dos átomos de prata (Ag), submetidos a um campo magnético não homogêneo;
- compartilhar, com ajuda do parceiro mais capaz, no caso o professor-pesquisador, a ideia de que os átomos de prata têm momento de dipolo permanente.



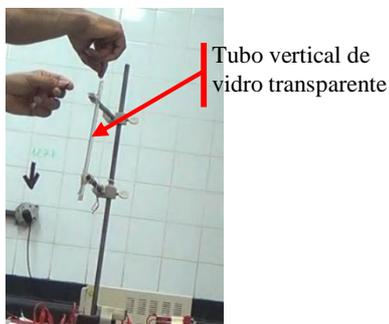
Proposta Didática

Levou-se em conta o aspecto prospectivo da teoria de Vygotsky, partindo-se de uma questão na qual se solicitava dos alunos predizerem resultados experimentais em duas situações distintas: inicialmente, limalhas de ferro (experimento macroscópico) passando por um campo magnético não homogêneo e depositando-se no vidro; num segundo momento foi discutido o experimento realizado com átomos de prata vaporizados e que atravessaram um campo magnético não homogêneo colidindo com as placas coletoras.

Foram propostos dois experimentos, apresentados a seguir, discutidos com a participação ativa dos alunos.

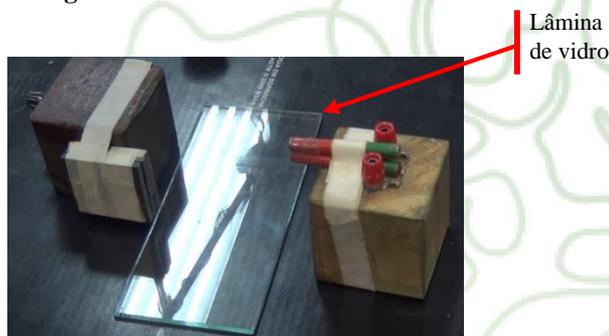
O material utilizado no experimento com limalha de ferro está registrado na **Figura 1**, **Figura 2** e **Figura 3**.

Figura 1: Tubo vertical de vidro transparente.



Fonte: Experimento montado pelo professor José Fernando Moura Rocha.

Figura 2: Lâmina de vidro.



Fonte: Experimento montado pelo professor José Fernando Moura Rocha.

Figura 3: Resultado experimental das limalhas de ferro depositadas no vidro: banda contínua constituída de limalhas de ferro.



Fonte: Experimento montado pelo prof. José Fernando Moura Rocha (UFBA)¹

¹ Foi possível observar como um campo não homogêneo age em limalha de ferro. Os resultados dessa observação motivaram as discussões sobre o Stern-Gerlach, uma vez que em ambos os experimentos há presença de campo magnético não homogêneo. É importante ter em conta, contudo, que tais são campos magnéticos são quantitativamente distintos, de modo que o experimento com a limalha não é um “Stern-Gerlach”. Além disso, a limalha é um ímã macroscópico enquanto que o átomo de prata é um ímã microscópico.

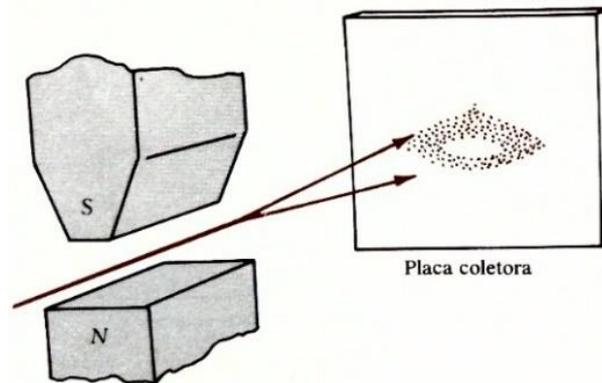
Este experimento em que limalhas de ferro são soltas e caem no interior de vidro transparente, ao saírem do tubo entram em um campo magnético não-homogêneo e, em seguida, são depositadas numa placa de vidro contendo vaselina, conforme ilustra a **Figura 3**.

O segundo experimento, como parte da estratégia didática, foi sobre átomos de prata (Ag), submetidos a um campo magnético não-homogêneo.

Em seguida, foi solicitado que esses alunos dissessem o que esperavam que ocorresse experimentalmente quando átomos de prata (Ag) incidiam numa placa coletora após passar por um campo magnético não homogêneo, conforme ilustra a **Figura 4**.

A estratégia didática está centrada na ideia de que ao contrastar os dois resultados experimentais, agindo na zona de desenvolvimento proximal, os alunos possam, com a ajuda do professor, justificar que a deflexão em duas componentes com átomos de prata só pode ser aceita se considerarmos que o momento magnético dos átomos de prata é quantizado.

Figura 4: Resultados de uma experiência de Stern-Gerlach. O feixe atômico desdobra-se em duas linhas, indicando que os momentos magnéticos dos átomos são quantizados no espaço para duas orientações. A forma da linha superior é devida à maior inhomogeneidade do campo magnético perto do polo da face superior.



Fonte: Tipler, 1981, p. 218.

Discussão física²: o Eletromagnetismo Clássico

Um sistema de partículas carregado terá um momento de dipolo magnético que é diretamente proporcional a seu momento angular. Considere uma partícula de massa M e carga q em movimento circular e uniforme com raio de curvatura r , velocidade de módulo v e frequência

$f = \frac{v}{2\pi r}$. O momento angular da partícula é $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$, onde \vec{p} é o momento linear e $\vec{p} = M\vec{v}$. Para uma carga que circula delimitando uma área A tem-se, por definição, que o momento de dipolo é $\vec{\mu} = iA\hat{n}$, onde \hat{n} é um vetor perpendicular à área A . Levando-se em conta

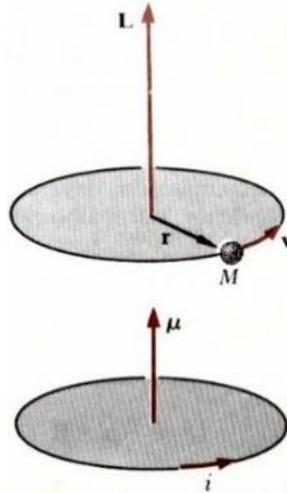
que $i = qf = \frac{qv}{2\pi r}$ pode-se concluir que $\mu = q\left(\frac{v}{2\pi r}\right)(\pi r^2) = \frac{1}{2}qvr = \frac{1}{2}q\left(\frac{L}{M}\right)$.³

² A discussão física levou em conta o livro Física Moderna, de Tipler (1981).

³ O experimento de Stern-Gerlach com átomos de prata não foi realizado neste curso, em virtude do custo, inviabilizando sua realização e levou em conta o livro de Sakurai e Napolitano (2013).

Pode-se escrever então que: $\vec{\mu} = \frac{q}{2M} \vec{L}$.

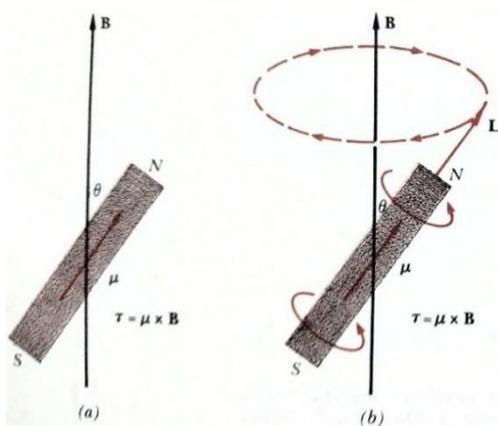
Figura 5: Uma partícula que se move num círculo tem momento angular L .
Se a partícula tem uma carga positiva, o momento magnético, devido à corrente, é paralelo a L .



Fonte: Tipler, 1981, p. 215.

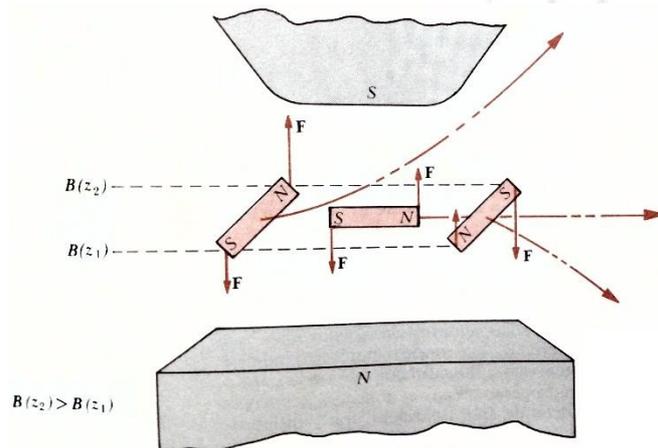
O comportamento de um sistema de partículas com um momento magnético em um campo magnético pode ser visualizado, considerando-se uma pequena barra magnética.

Figura 6: Modelo magnético de Bohr para o momento magnético. (a) Em um campo magnético externo, o momento experimenta um torque que tende a alinhá-lo com o campo. Se o magneto estiver girando, (b) o torque provoca a precessão do sistema em torno do campo externo.



Fonte: Tipler, 1981, p. 216.

Figura 7: Num campo magnético não-homogêneo, um magneto experimenta uma força resultante que depende de sua orientação.



Fonte: Tipler, 1981, p. 217.

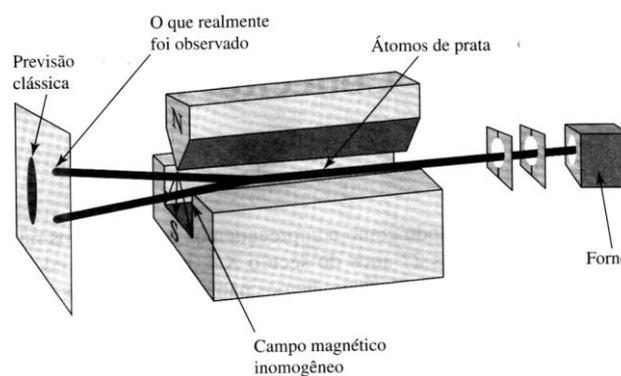
Uma vez inserido o magneto num campo magnético externo \vec{B} , um torque $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ é aplicado ao ímã, fazendo-o tender a alinhar-se com o campo \vec{B} .

É importante perceber que se o campo magnético não for homogêneo haverá uma força resultante não nula aplicada no magneto, tendo em vista que a força sobre um polo será mais intensa que no outro polo, a depender da orientação do magneto no campo magnético, conforme ilustra a **Figura 7**.

Descrição do experimento Stern-Gerlach⁴

O aparato experimental que recebeu o nome dos físicos Stern e Gerlach (SG) consiste em um forno que vaporiza átomos de prata (Ag). Após escaparem por um orifício, conforme ilustra a **Figura 8**, o feixe passa por um colimador e interage com um campo magnético não homogêneo, devido a um ímã cuja geometria produz elevada intensidade de campo.

Figura 8: O experimento de Stern-Gerlach.



Fonte: Sakurai; Napolitano, 2013, p. 2.

Desprezando o spin nuclear dos átomos, pode-se observar que o momento angular de todo o átomo de prata provém somente do momento angular de spin do 47º elétron. O momento magnético μ do átomo é, portanto, diretamente proporcional ao spin do elétron S . Este modelo é suficiente para calcular o efeito do campo magnético sobre os átomos.

Análise de dados

A entrevista que será descrita e analisada a seguir, visa compreender como o aluno Alexandre internalizou os conceitos científicos de dipolo magnético induzido (no contexto do experimento envolvendo limalha de ferro) e de momento magnético de dipolo permanente quantizado (no contexto do experimento envolvendo átomos de prata). Será analisada, particularmente, de que forma as perguntas formuladas pelo professor-pesquisador capturaram indícios de internalização dos conceitos físicos explicitados. Destaque-se que, no decorrer das aulas, houve uma intenção explícita de, num primeiro momento, tratar da predição clássica dos resultados sobre quais posições os pedaços de limalha de ferro depositados na placa coletora deveriam ocupar (banda contínua). Tal fundamentação teórica vygotskyana serviu de estratégia didática para que, na análise de um segundo experimento (Stern-Gerlach), com a ajuda do parceiro mais experiente, no caso o professor, o aluno pudesse dar significado ao momento de dipolo magnético quantizado para o átomo de prata, visando uma resposta ao problema de pesquisa

⁴ Esta discussão teórica levou em conta o livro de autoria de Sakurai e Napolitano (2013).

formulado. Sem essa significação essencial, todo processo subsequente de adotar o “tratamento de choque” preconizado pelo Sakurai (SAKURAI; NAPOLITANO, 2013) ficaria comprometido, especialmente para o nosso público-alvo de alunos iniciantes de graduação. Este esclarecimento teórico-metodológico é fundamental, pois a análise de dados buscou justamente capturar como a zona de desenvolvimento proximal do aluno se movimentou.

É nesse sentido que buscou-se avaliar, de modo qualitativo, um amadurecimento das funções psicológicas superiores, a abstração, em particular, para conectar a ideia de predição com os conceitos físicos subjacentes, expresso pela sua fala, pela forma como verbalizou o que fora, em princípio, internalizado.

Buscando compreender o significado de como o aluno pesquisado externalizou aquilo que inicialmente esteve na esfera do interpessoal, organizou-se a entrevista individual em torno de dois eixos específicos.

- como o aluno justifica os resultados experimentais da limalha de ferro, interagindo com o campo magnético, depositando-se na lâmina de vidro;
- como o aluno busca explicar os resultados experimentais com átomos de prata interagindo com campo magnético num aparato Stern-Gerlach, depositando-se na placa coletora.

A seguir, a transcrição de fragmentos da entrevista:

P: (...) Alexandre, me diga, me descreva como é que você compreendeu esse experimento e quais foram as coisas que lhe chamaram atenção sobre o experimento com limalhas de ferro em campo magnético não homogêneo. Fale à vontade e dê a resposta mais completa possível.

ALEXANDRE: Eu compreendi bem a configuração, a ideia geral, que foi a questão de colocar um campo que é não homogêneo, colocando ali dois ímãs de tamanhos e formas diferentes. Eh, compreendi, também, o papel da limalha, ela servia ali pra que ela pudesse formar um dipolo e esse dipolo se alinhasse com esse campo pra poder ter uma configuração no papel. Isso ficou bem claro, ela estaria simulando um sistema microscópico, mas de uma maneira que a gente pudesse ver. Claro que ela não vai ter as mesmas características de um sistema microscópico, como o senhor mostrou, mas a gente consegue ver.

É importante destacar, como parte da análise dos dados, que o aluno numa entrevista, geralmente, para justificar suas respostas, seus argumentos, utiliza do conhecimento que o professor trabalhou em sala de aula para que possa dar a resposta com base em alguém que tem reconhecimento do lugar de onde fala, no caso o professor. Trata-se de situação semelhante quando alguém escreve um trabalho científico e cita, para justificar seus argumentos, um autor que é reconhecido por seus pares ou por parte de seus pares. Desta forma, a repetição do aluno acerca do que abordou o professor sugere que a fala, mesmo repetitiva, é parte da construção de significado.

P: Mas por que você disse que ela estaria simulando algo microscópico?

ALEXANDRE: Porque microscopicamente a gente também, como o senhor mostrou, pode ter um dipolo com um elétron girando em torno de uma carga central, como o átomo (...), se tiver um elétron girando em torno de um átomo eu também formo um dipolo, e ali, a limalha de ferro, ela também tinha esse papel de formar um dipolo, porque já que a gente queria que o mesmo experimento fosse feito com coisas de tamanho diferente (...). Então essa

ideia de fazer um experimento macroscópico, mas que também pode ser visto de um ponto de vista microscópico ficou bem claro pra mim (...)

Note-se que na descrição do aluno há, explicitamente, uso da palavra “giro” ao referir-se ao movimento dos elétrons, o que equivaleria a aceitar um modelo clássico para o elétron. O aluno, inclusive, gesticula com a mão em um movimento, simbolizando o giro de um elétron em torno do núcleo. Por isso, mobilizamos nossa atenção para detectar se é o caso de uso informal da linguagem, ou se o aluno ainda não percebeu que a descrição do elétron em torno do núcleo não é mais possível em termos de trajetória, com posição e momento bem definidos a cada instante.

P: Referindo-se a tela de vidro na **Figura 3** o professor pergunta: (...) como é que você justifica esse resultado experimental aqui?

ALEXANDRE: Como a gente tem um campo magnético que não é uniforme, a gente vai ter ali (...) duas forças magnéticas (...) competindo entre si. É um tendendo a alinhar o dipolo em uma posição e a outra tendendo a alinhar na outra. Aí você vai ter uma resultante que vai fazer com que o dipolo vá pra uma determinada direção (...)

É importante ter em mente que as limalhas de ferro não têm momento de dipolo permanente, mas, os átomos de prata têm. Investigaremos, adiante, de que forma poderemos agir na zona de desenvolvimento proximal do aluno para que ele, com a nossa ajuda, seja capaz de compreender os resultados experimentais com átomos de prata que, ao passarem num campo magnético não homogêneo, se dividem em duas componentes. Ressalte-se, ainda, que esta entrevista, em sintonia com a ideia de processo, onde não há neutralidade, deve ser considerada como atividade mediada, visando intervir na zona de desenvolvimento proximal do aluno que está permanentemente em mudança. A entrevista, dentro deste desenho metodológico, contribui para o processo de ensino-aprendizagem.

O professor, então, pergunta:

P: (...) a limalha de ferro tem momento magnético permanente?

ALEXANDRE: Não, o momento magnético dela vai ser induzido no momento que ela entrar em contato com o campo no momento que ela desceu aqui no tubinho e entrou em contato com o campo magnético (...)

A percepção de que o campo é induzido é importante, pois conforme veremos a seguir o aluno contrasta esta condição com o momento magnético permanente do átomo de prata, que ele próprio reconhece.

P: E o átomo de prata?

ALEXANDRE: Sim, esse tem momento de dipolo permanente.

P: Como é que você sabe?

ALEXANDRE: Porque como ali no átomo de prata eu já tenho um elétron girando, um elétron girando naquele átomo de prata eu já garanto que ali vai ter um dipolo pela teoria clássica, mesmo ela já diz que uma carga elétrica girando ela gera um campo magnético, na própria teoria clássica a gente tem isso.

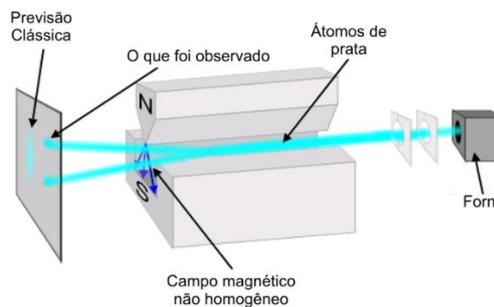
Esta observação nos faz considerar a possibilidade de o aluno estar falando de “giro” apenas para poder dizer que o Eletromagnetismo Clássico é suficiente para compreendermos o conceito de dipolo magnético, sem necessariamente estar equivocado quanto à inadequação do modelo de trajetória para o elétron de um átomo.

P: O que você entende, com suas próprias palavras, por momento magnético?

ALEXANDRE: Bom, eu entendo que seja uma grandeza associada à capacidade ou não dessa substância do átomo ou da limalha se alinhar com o campo, interagir com o campo.

P: Tá, nós falamos hoje sobre vaporizar átomos de prata (...) o que eu lhe mostrei no desenho (...) lhe causou algum tipo de surpresa, ou não causou? Estamos diante de algum tipo de novidade?

Figura 9: Aparato Stern-Gerlach.



Fonte: Disponível em:
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/29/Stern-Gerlach_experiment.PNG>. Acesso em: 07 mar. 16.

ALEXANDRE: Causou muita surpresa, eu pensei que não veria uma configuração dividida em duas, eu achei que não seria assim.

P: E a que você atribui essa seleção de duas manchas? (...) você jogou um feixe, vaporizou um feixe, e na hora que eles entram no campo magnético não homogêneo, você só tem ou eles rumando pra cima ou rumando pra baixo (...), a que você atribui este resultado experimental?

ALEXANDRE: Ao momento de dipolo.

P: Ao que do momento de dipolo? (...)

ALEXANDRE: Veja. Aí eu fiquei um pouquinho confuso, porque o momento de dipolo das limalhas eu tinha várias limalhas que quando eram jogadas no campo, elas iam se alinhando aos pouquinhos.

P: Sim.

ALEXANDRE: Várias então eu poderia ter diversas configurações. Nos átomos de prata, pelo que eu entendi, eu não consigo ter várias configurações.

P: Por quê?

ALEXANDRE: Eu acho que (...) da própria natureza.

P: Por que só tem duas?

ALEXANDRE: Da própria natureza da matéria mesmo, do átomo.

P: Ham.

ALEXANDRE: A própria natureza dele não permite, microscópica.

P: (...) essa natureza microscópica tem alguma influência em alguma particularidade no momento magnético do átomo de prata? (...) como é que você pode justificar (...) uma mancha contínua e lá (refiro-me ao experimento feito com átomos de prata) ter tido uma mancha descontínua? (...)

O professor finalmente refere-se a duas manchas separadas por um espaço onde não chegam átomos de prata e pergunta:

P: O que justifica isso?

ALEXANDRE: Pelo que me parece, (...) quando você usa os átomos de prata há uma grande influência da quantização do momento de dipolo.

Note-se que, com a ajuda do parceiro mais experiente (o professor-pesquisador), agindo na zona de desenvolvimento proximal, o aluno consegue apropriar-se da ideia de “quantização do momento de dipolo” para os átomos de prata.

Conclusão

Pode-se concluir, considerando os dados analisados, que ocorreu o processo de internalização dos conceitos científicos de momento de dipolo magnético induzido, no caso da limalha de ferro, e de momento de dipolo magnético quantizado (permanente), no caso dos átomos de prata. Assim, a novidade quântica internalizada, qual seja a de que os átomos de prata têm momento de dipolo permanente e quantizado, sugere que essa internalização, enquanto atividade mediada, revela que as perguntas formuladas referentes as duas previsões teóricas foram efetivas, pois possibilitaram, ao aluno pesquisado, construção de significados compatíveis com os conceitos científicos citados. Acrescente-se, finalmente, que, de acordo com o desenho da pesquisa e sua fundamentação teórica, o processo de entrevista fez parte do processo de internalização. É por essa razão que o próprio professor-pesquisador busca agir na Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP), mesmo durante a entrevista. Finalmente, a investigação feita acerca do conhecimento prévio sobre o momento de dipolo magnético no contexto clássico revelou generalizada deficiência por parte dos alunos. Esse resultado reforça uma ideia mais geral, já descrita neste artigo, de que apresentar conceitos da Mecânica Quântica implica rever a apresentação da própria Física Clássica. Acredita-se que os experimentos analisados em condições reais de sala de aula foram eficientes ao proporcionarem um amadurecimento das funções psicológicas superiores, em particular da abstração, implícita na ideia de predição física tanto no contexto do Eletromagnetismo Clássico, quanto na Mecânica Quântica.

Referências

- CAVALCANTI, C.J.H.; OSTERMANN, F.; NETTO, J.S.; LIMA, N. W. Teaching wave-particle complementarity using the Virtual Mach-Zehnder Interferometer. In: **Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol. 42, e20190283. BRASIL: Sociedade Brasileira de Física, 2020. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1xkFK416eac53pbliWd_LQ4nF8ZKwkUbO/view>. Acesso em: 06 out. 2022.
- FREIRE, JR., Olival; CARVALHO NETO, Rodolfo Alves de. **O universo dos quanta: uma breve história da Física Moderna**. São Paulo: FTD. 1997, 95 p.
- GRECA, Ileana Maria; FREIRE JR., Olival. Meeting the Challenge: Quantum Physics in Introductory Physics Courses. In: **Science & Education**, Handbook, 2015, 38p.
- JUSTICE, Paul; MARSHMAN, Emily; SINGH, Chandralekha. Improving student understanding of quantum mechanics underlying the Stern-Gerlach experiment using a research validated multiple-choice question sequence. In: **European Journal of Physics**. n. 40, 055702, 23 pp. UK: IOP Publishing Ltd. 2019. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6404/ab2135>>. Acesso em: 06 out. 2022.
- LIMA, Nathan; CAVALCANTI, Cláudio; OSTERMANN, Fernanda. Concepções de Dualidade Onda-Partícula: Uma proposta didática construída a partir de trechos de fontes primárias da Teoria Quântica. In: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 43 (e20200270). Brasil: Sociedade Brasileira de Física, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0270>>. Acesso em: 09 out. 2022.
- MARSHMAN, Emily; SINGH, Chandralekha. Interactive tutorial to improve student understanding of single photon experiments involving a Mach-Zehnder interferometer. In: **European Journal of Physics**. n. 37, 024001, 22pp. UK: IOP Publishing Ltd, 2016. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/37/2/024001>>. Acesso em: 06 out. 2022.
- PEREIRA, Alessandro Pereira de; OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Cláudio José de Holanda. Um estudo sobre a fala privada em uma tarefa mediada por um interferômetro virtual de Mach-zehnder. In: **VII Enpec**. Florianópolis. 08 nov. 2009.
- PESSOA JR., Osvaldo. **Conceitos de Física Quântica**. 1 ed., vol. 1. São Paulo: Editora Livraria de Física, 2003.
- SAKURAI, Jun John; NAPOLITANO, Jim. **Mecânica Quântica moderna**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- TIPLER, Paul A. **Física Moderna**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois. 1981.
- VIGOTSKY, Lev Semenovich. **A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores**. 7 ed. São Paulo: Martins Fontes, 2007.
- ZHU, Guangtian; SINGH, Chandralekha. Improving students' understanding of quantum mechanics via the Stern-Gerlach experiment. In: American Association of Physics Teachers – **American Journal of Physics**. Nº 79, Mai. 2011, p. 499-507.