

O ensino de Física Quântica na perspectiva sociocultural: uma análise de um debate entre futuros professores mediado por um interferômetro virtual de Mach-Zehnder

Alexandro Pereira, Fernanda Ostermann e Cláudio Cavalcanti

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Física. Porto Alegre. Brasil. E-mails: alexandro.pereira@ufrgs.br; fernanda.ostermann@ufrgs.br; claudio.cavalcanti@ufrgs.br

Resumo: O presente trabalho apresenta uma análise das interações discursivas de nove estudantes do curso de licenciatura em física em uma atividade didática mediada por um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. O objetivo desse estudo é analisar as tensões nos enunciados dos alunos à luz do referencial sociocultural e avaliar em que medida os significados em física quântica são criados e desenvolvidos em sala de aula por meio do uso da linguagem e de instrumentos semióticos. Os resultados de nossa análise mostram que: (a) em atividades colaborativas com outros colegas, um dos alunos sempre assume a função do parceiro mais capaz; (b) as ações explicativas dos parceiros mais capazes geralmente contêm traços de fala egocêntrica; (c) alguns debates entre os alunos são marcados por um processo análogo ao fenômeno da cognição socialmente distribuída; (d) alguns enunciados constituem gêneros do discurso de situações típicas de instrução de física quântica; (e) as ações mediadas pelo uso do interferômetro virtual atuaram, na maior parte das vezes, na zona de desenvolvimento proximal, viabilizando a construção e a negociação de novos significados.

Palavras-chave: Análise do discurso, conceitos de física quântica, interferômetro de Mach-Zehnder, formação inicial de professores.

Title: Researching Quantum Physics teaching in the sociocultural framework: a debate analysis among pre-service teachers mediated by a virtual Mach-Zehnder interferometer.

Abstract: This work presents a discursive analysis of interactions among nine students of Physics education course in a didactic activity mediated by a virtual Mach-Zehnder interferometer. The focuses of this research are directed to the analysis of tensions on the students' utterances in the light of sociocultural framework and evaluate the extent of quantum physics meanings creation and development in classroom context, through the use of language and semiotical tools. The main results of our analysis shows that: (a) in collaborative activities with other students, one of them always assumes the role of most capable partner; (b) the explicative actions of the most capable partner generally contains signals of egocentric speech; (c) some debates among students are characterized by a process analogous to the socially distributed cognition phenomena; (d) some utterances

constitute speech genres on typical instruction situations in quantum physics; (e) the actions mediated by the virtual interferometer had acted, in most cases, on the zone of proximal development, making possible the construction and the negotiation of new meanings.

Keywords: Discourse analysis, quantum physics concepts, Mach-Zehnder interferometer, preservice teacher formation.

Introdução

No intuito de promover novos estudos no âmbito da formação inicial de professores de física, apresentamos uma investigação sobre o ensino de física quântica fundamentada na perspectiva sociocultural. Trata-se de uma análise dos movimentos discursivos de nove estudantes universitários, futuros professores de física, em uma atividade didática centrada no uso de um *software* que simula uma bancada virtual do interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) desenvolvido independentemente por Ludwig Mach e Ludwig Zehnder por volta de 1892, capaz de demonstrar o fenômeno da interferência da luz a partir da divisão de um feixe luminoso. A representação esquemática do interferômetro de Mach-Zehnder é apresentada na figura 1. Um feixe de luz monocromático e coerente, emitido por uma fonte luminosa, incide sobre um espelho semi-refletor S_1 que divide o feixe em uma componente transmitida (caminho A) e outra componente refletida (caminho B), ambas de mesma intensidade e coerentes.

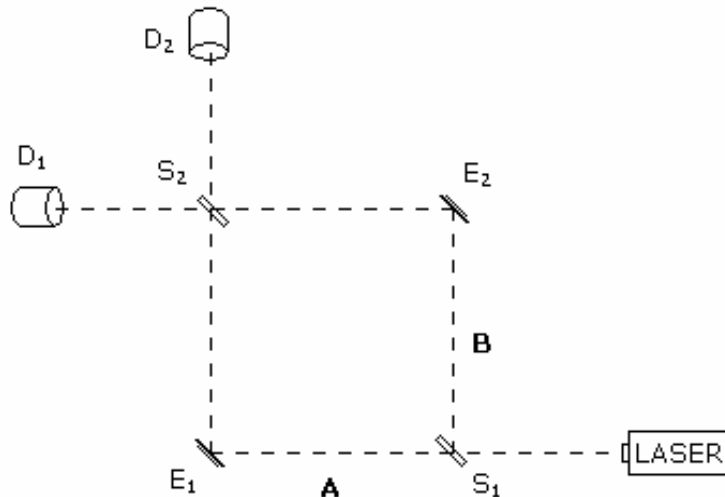


Figura 1.- Esquema do interferômetro de Mach-Zehnder.

Após serem refletidos pelos espelhos E_1 e E_2 , ambas as componentes recombinam-se num espelho semi-refletor S_2 antes de atingirem os detectores D_1 e D_2 . Sabendo-se que as componentes refletidas do feixe luminoso sofrem um deslocamento de fase de $\pi/2$ (Degiorgio, 1980), correspondente a uma diferença de caminho óptico de $1/4$ de comprimento de onda, pode-se verificar que as componentes do feixe que incidem em D_1

estão em fase (interferência construtiva), enquanto que as componentes do feixe que incidem em D_2 estão defasados em $\lambda/2$ (interferência destrutiva). Têm-se, portanto, 100% do feixe detectado em D_1 e 0% do feixe detectado em D_2 .

O objetivo de nosso estudo é analisar as tensões nos enunciados dos alunos e avaliar em que medida os significados em física quântica são criados e desenvolvidos no contexto da sala de aula por meio do uso da linguagem e de instrumentos semióticos, tais como o IMZ virtual utilizado no presente trabalho. Inspirados nos trabalhos de Müller e Wiesner (2002) e na abordagem conceitual da física quântica apresentada por Adams (1998), Pessoa Jr. (1997), e por Scarani (1998), exploramos, através de um roteiro exploratório desenvolvido para esse estudo, diversas situações no IMZ virtual que fazem alusão à dualidade onda partícula, buscando, através destas, analisar o debate resultante das diferentes posições que os alunos tomam frente aos fenômenos observados. A atividade didática como um todo visou estabelecer uma analogia entre física quântica e a óptica ondulatória. Essa proposta está fundamentada na idéia defendida por Pessoa Jr. de que o regime quântico é a física das ondas para baixas intensidades, quando propriedades corpusculares passam a aparecer (Pessoa Jr., 2005, p. 6). A presente investigação foi desenvolvida junto a uma disciplina da sétima etapa do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, durante o segundo semestre de 2007. Esse trabalho é parte de uma investigação que resultou numa dissertação de Mestrado Acadêmico em Ensino de Física, concluída em março de 2008.

Por que o ensino de física quântica?

Há um consenso entre pesquisadores da área de ensino de física sobre a necessidade de atualização curricular nos cursos de física de nível médio, mediante a inclusão de tópicos de física moderna e contemporânea, embora não haja um acordo pleno com relação à maneira como esta atualização curricular deva ocorrer (Aubrecht, 1989; Gil *et al.*, 1987; Kalmus, 1992; Swinbank, 1992; Wilson, 1992). Uma vez superada a fase de justificativas para a inclusão de temas de física moderna e contemporânea no ensino médio, muitos pesquisadores da área de ensino de física se ocuparam com o ensino de física quântica, buscando novas estratégias didáticas voltadas para o ensino médio e superior (Budde *et al* 2002, Cuppari *et al.* 1997, Fischler e Lichtfeldt 1992, Gil e Solbes 1993, Gil *et al* 1987, Gil *et al* 1988, Greca e Freire Jr. 2003, Greca e Herscovitz 2002, Gunel *et al* 2006, Kalkanis *et al* 2003, Ke *et al* 2005, Müller e Wiesner 2002, Olsen 2002, Solbes *et al* 1987, Stefanel 1998). Na abordagem tradicionalmente adotada em cursos de física quântica em nível de graduação há uma forte ênfase no emprego do formalismo matemático como mera ferramenta matemática, na resolução de listas de problemas, além de introduzir a teoria de maneira fortemente correlacionada com a física clássica, seja em seus fundamentos e pressupostos mais básicos, seja em sua história. Essa abordagem acaba relegando a um segundo plano o fato de que os objetos quânticos são de uma natureza muito diversa dos objetos clássicos (Ostermann e Ricci, 2004).

Em uma revisão bibliográfica recente sobre o ensino de física moderna e contemporânea, realizada através da consulta às principais revistas internacionais da área de pesquisa em ensino de ciências (American Journal of Physics, Enseñanza de la Ciencias, International Journal of Science Education, Investigações em Ensino de Ciências, Journal of Research on Science Education, Journal of Research on Science Teaching, Physics Education, Revista Electrónica de Enseñanza de la Ciencias, Science Education), no período de 2001 a 2006, foi possível constatar que a maioria dos trabalhos publicados refere-se à bibliografia de consulta para professores. No âmbito do desenvolvimento, estes trabalhos têm apresentados textos de apoio ao professor de física, novas tecnologias aplicadas ao ensino de FMC, novos recursos didáticos e laboratórios de física moderna. Esse resultado justifica plenamente a pesquisa em ensino de física quântica por se tratar ainda de um terreno bastante fértil.

Por que a perspectiva sociocultural?

A perspectiva sociocultural da pesquisa em ensino de ciências, amplamente adotada nos últimos anos, surge como uma oposição às abordagens cognitivistas do ensino de ciências, em especial a perspectiva da mudança conceitual, cuja premissa básica é de que as pessoas podem simplesmente mudar suas visões em um tópico ou domínio científico, sem necessidade de mudar nada mais em suas vidas ou em suas identidades. Segundo Lemke (2001), mudar de idéias não é apenas uma simples questão de tomar uma decisão racional. Trata-se de um processo social com conseqüências sociais. De modo geral, a perspectiva sociocultural parte da idéia de que as práticas sociais e seus aspectos culturais e institucionais regulam, expressam, transformam e modificam a psique humana (Wertsch, 1993). Ter uma perspectiva sociocultural no ensino de ciências significa vislumbrar a pesquisa como uma atividade social pautada em aportes teóricos institucionais e culturais, vendo os objetos de estudo como "atividades sociais". A metodologia de análise da pesquisa deve, de alguma forma, estar relacionada com fatores culturais, históricos ou institucionais específicos. Isto implica, antes de tudo, formular questões sobre o papel da interação social no ensino de ciências e na aprendizagem, isto é, dar um peso teórico substancial ao papel da interação social, considerando-a como central e necessária para a aprendizagem e não meramente auxiliar ou secundário (Lemke, 2001). No âmbito da filosofia das ciências, ter uma perspectiva sociocultural significa considerar o estudo científico do mundo como inseparável da organização social das atividades dos cientistas.

Por que uma análise de interações discursivas?

A utilização da linguagem, segundo Bakhtin (1997), efetua-se em forma de enunciados (orais e escritos) concretos e únicos que emanam dos integrantes de uma ou de outra esfera da atividade humana. As interações discursivas são consideradas, portanto, como constituintes do processo de construção de significados ou entendimento (Rezende e Ostermann, 2006). Segundo Lemke (2001, p. 304), *social and functional linguistics regards our use of language as a socially and culturally contextualized meaning-making, in which language plays the part of a system of resources for meaningful verbal actions*. Junto com todas as ciências sociais, a educação em ciências

assumiu a “virada discursiva” e começou a examinar como as pessoas aprendem, falam e escrevem a linguagem da ciência. Muitas investigações no campo da educação, na década de 80, desenvolveram a visão de que a aprendizagem é um processo social e cultural no qual a linguagem desempenha um papel fundamental (Lemke, 1997).

Por que a preocupação com futuros professores?

A partir da revisão bibliográfica sobre o ensino de FMC, foi possível identificar apenas dois trabalhos envolvendo professores em formação (Kalkanis *et al.*, 2003; Ostermann e Moreira, 2004). Esse resultado aponta para uma carência na área de pesquisa em educação em ciências no que se refere aos estudos sobre o ensino de FMC na formação inicial de professores, processo de fundamental importância para a construção de estratégias capazes de promover mudanças significativas na educação básica brasileira.

No âmbito da formação inicial de professores, no entanto, é crucial que se busque uma abordagem mais conceitual e qualitativa da FMC, em particular dos fundamentos de física quântica. A abordagem conceitual, proposta por Pessoa Jr. (2005) e por Scarani (2006) e desenvolvida em nosso trabalho, não é uma desvalorização para a formação do professor de física. Esse tipo de ensino, pelo contrário, requer um profundo conhecimento do assunto por parte do professor. Possíveis transposições didáticas de fundamentos da física quântica para o ensino médio dependem, fortemente, de uma sólida formação conceitual por parte dos futuros professores de física.

Por que o uso de um IMZ virtual?

Apresentando uma releitura mais moderna do experimento de dupla fenda, o IMZ tornou-se um dos experimentos cruciais para a compreensão dos fundamentos da física quântica ao provocar naturalmente reflexões sobre o problema conceitual da escolha dos caminhos pelo fóton. Apesar de ter sido consagrado por Richard Feynman nos anos 60, o experimento de dupla fenda para elétrons dá margem à uma interpretação clássica do fenômeno, na qual o padrão de interferência observado no anteparo pode ser explicado como sendo o resultado da interação do feixe de elétrons com os átomos das bordas das fendas. No IMZ, o fenômeno de interferência é causado por uma diferença de fase, introduzida pela combinação dos espelhos e semi-espelhos, entre as duas componentes do feixe luminoso. O uso do IMZ em simulação virtual justifica-se plenamente pela falta de recursos nos laboratórios didáticos que possibilitem a preparação de estados monofotônicos (um fóton emitido de cada vez). Essa tecnologia foi alcançada somente a partir dos anos 80 em laboratórios avançados de física. O *software* utilizado no presente trabalho pode ser utilizado, facilmente, em laboratórios de informática de escolas da rede públicas.

Marco teórico-metodológico

O aporte teórico-metodológico que fundamenta o presente trabalho está pautado nas teorias de Vygotsky e Bakhtin. A teoria de L. S. Vygotsky (1896-1934) é uma teoria psicológica com bases marxistas. Vygotsky

procurou compreender de que forma o materialismo dialético poderia contribuir para o estudo da mente (Cole e Scribner, 1994). Seus estudos partem da hipótese de que as mudanças históricas na sociedade e na vida material produzem mudanças na natureza humana.

Segundo o psicólogo norte-americano James Wertsch (1993), a teoria da mediação de Vygotsky pode ser compreendida a partir de três aspectos fundamentais. O primeiro aspecto consiste na *análise genética* do desenvolvimento. Esta análise pressupõe que muitos aspectos das funções mentais podem ser compreendidos a partir do estudo de sua origem e de suas transformações. Segundo Vygotsky (1998), no desenvolvimento da criança o pensamento e a fala têm raízes diferentes no qual é possível estabelecer no desenvolvimento da fala um estágio pré-intelectual, e no desenvolvimento do pensamento, um estágio pré-lingüístico. Em um certo estágio, essas linhas de desenvolvimento se cruzam, tornando o pensamento verbal e a fala racional. O segundo aspecto importante da abordagem vygotskyana é a crença de que *as funções psicológicas superiores derivam da vida social*. Diferentemente dos processos psicológicos elementares – processos cognitivos de origem biológica – as funções psicológicas superiores têm origem sociocultural. Elas caracterizam a forma puramente humana de inteligência, responsável, entre outras funções, pelo ato de fala. O terceiro elemento fundamental da teoria de Vygotsky é a idéia de que *toda ação humana é mediada por instrumentos e signos*. Os signos, segundo Vygotsky, são estímulos artificiais ou autogerados que atuam como um instrumento da atividade psicológica. A simples operação de dar um nó num laço ou marcar um pedaço de madeira no intuito de lembrar-se de alguma coisa, modificam a estrutura psicológica do processo de memória. Ela estende a operação de memória para além das dimensões biológicas do sistema nervoso humano.

A palavra constitui o signo mais fundamental no qual a linguagem deve ser entendida como um sistema complexo de signos. Segundo Vygotsky, a fala é tão importante para a criança quanto a sua ação durante a execução de uma tarefa.

As crianças não ficam simplesmente falando o que elas estão fazendo; sua fala e ação fazem parte de uma mesma função psicológica complexa, dirigida para a solução do problema em questão [...] Quanto mais complexa a ação exigida pela situação e menos direta a solução, maior a importância que a fala adquire na operação como um todo. (Vygotsky, 1994, p. 34).

Em certas circunstâncias, a fala adquire uma importância tão vital que a proibição do seu uso, em atividades mais elaboradas, torna as crianças pequenas incapazes de resolver a tarefa. Para Vygotsky, a invenção e o uso dos signos como meios auxiliares para solucionar determinados problemas psicológicos tais como lembrar, escolher, comparar coisas, é semelhante à invenção e ao uso de instrumentos. O signo atua como um instrumento da atividade psicológica e tem a mesma função que os instrumentos utilizados pelo homem no trabalho. A semelhança mais fundamental entre signo e instrumento repousa na função mediadora que os caracteriza. Segundo Vygotsky, a *internalização* é a reconstrução interna de uma operação externa (Vygotsky, 1994, p. 74). O desenvolvimento da capacidade de usar

a linguagem como um instrumento para a solução de problemas ocorre no instante em que o discurso social é internalizado. A partir desse momento, a linguagem, de uso interpessoal, passa a adquirir também uma função intrapessoal.

Vygotsky afirma que os estudos do desenvolvimento cognitivo de crianças, em seu tempo, admitem erroneamente que só é indicativo da capacidade mental aquilo que as crianças conseguem fazer sozinhas. Segundo Vygotsky, existem dois níveis de desenvolvimento psicológico na criança: o *desenvolvimento real*, nível em que ela consegue resolver problemas por si mesma; e o *desenvolvimento potencial*, nível em que a criança só consegue resolvê-los sob a orientação de um adulto ou em colaboração com um parceiro mais capaz (Vygotsky, 1994, p. 112). A *zona de desenvolvimento proximal* é definida como sendo a distância entre estes dois níveis.

Apesar de propor uma psicologia marxista, é surpreendente que Vygotsky tenha feito tão pouca menção ao contexto social e institucional mais amplo, tais como a alienação, as lutas de classes e o consumismo. Alguns estudiosos de Vygotsky atribuem esse fato à sua morte prematura, aos trinta e sete anos de idade, por tuberculose. A valorização da linguagem e a concepção marxista de sociedade, defendidas por Vygotsky, são temas igualmente abordados em lingüística por M. M. Bakhtin (1895-1975). O psicólogo norte-americano James Wertsch defende a tese de que a obra de Bakhtin pode dar continuidade aos trabalhos de Vygotsky, tese assumida em nosso estudo.

A filosofia da linguagem de Bakhtin, e de seus colaboradores, é a filosofia do signo ideológico. Convém esclarecer que existe uma polêmica acerca da verdadeira autoria do livro *Marxismo e Filosofia da Linguagem*. As primeiras edições atribuem a obra a V. N. Volochinov. Segundo Bakhtin, todo signo ideológico possui significado e remete a algo situado fora de si. Ele valoriza a fala, a enunciação, e afirma sua natureza social e não individual, definindo a língua como expressão das relações e lutas sociais (Bakhtin, 2006). Um dos aspectos mais importantes da obra de Bakhtin é a *dialogicidade* ou *pluralidade de vozes*. Para Bakhtin, a enunciação é um elemento do diálogo, fazendo parte de um processo de comunicação ininterrupto. Ela é determinada tanto pelo fato de que procede de alguém, como pelo fato de que se dirige para alguém, constituindo o produto da interação do locutor e do ouvinte. Toda a enunciação, mesmo na forma imobilizada da escrita, é sempre uma resposta a alguma coisa e é construída como tal. A palavra, dirigindo-se a um interlocutor, torna-se função da pessoa desse interlocutor. A enunciação dependerá do fato de se tratar de uma pessoa do mesmo grupo social ou não, do fato desta ser inferior ou superior na hierarquia social, ou ainda, do fato do ouvinte estar ligado ao locutor por laços sociais mais ou menos estreitos.

Outro aspecto de fundamental importância é a polissemia da palavra. Para o locutor, a palavra não se apresenta como um item de dicionário. O sentido da palavra é totalmente determinado por seu contexto e há tantas significações quantos contextos possíveis. Classes sociais diferentes servem-se de uma só e mesma língua. Conseqüentemente, em todo signo ideológico confrontam-se *índices de valor* contraditórios. Bakhtin define o

índice de valor como sendo o conjunto das significações que tem maior destaque para um dado interlocutor no momento em que aprecia o enunciado. Segundo Bakhtin, não são palavras que pronunciamos ou escutamos, mas verdades ou mentiras, coisas boas ou más, importantes ou triviais, agradáveis ou desagradáveis e assim por diante. A língua, no seu uso prático, não pode ser separada de seu conteúdo ideológico.

Segundo Bakhtin, a cada palavra da enunciação que estamos em processo de compreender, fazemos corresponder uma série de palavras nossas, formando uma réplica. Quanto mais numerosas e substanciais forem, mais profunda e real é nossa compreensão. A compreensão é uma forma de diálogo; ela está para a enunciação assim como uma réplica está para a outra no diálogo. Compreender é opor à palavra do locutor uma contrapalavra. A significação não está na palavra nem na alma do falante, assim como também não está na alma do interlocutor. Ela é o efeito da interação do locutor e do receptor.

Outro aspecto importante da análise bakhtiniana são os gêneros de discurso. Segundo Bakhtin, os gêneros do discurso são tipos relativamente estáveis de enunciado, que corresponde a situações típicas de comunicação verbal. Segundo Bakhtin:

Uma das funções (científica, técnica, ideológica, oficial, cotidiana) e dadas condições, específicas para cada uma das esferas da comunicação verbal, geram um dado gênero, ou seja, um dado tipo de enunciado, relativamente estável do ponto de vista temático, composicional e estilístico. (Bakhtin, 1997, p. 284)

Não se trata de uma forma de linguagem, mas sim de um tipo de enunciado que inclui uma determinada classe típica de expressões que lhe são inerentes, no qual a palavra adquire uma expressão particular. Para Bakhtin, a produção de qualquer enunciado implica a invocação de um gênero discursivo. Todos os enunciados têm formas de construção globais típicas, definidas e relativamente estáveis.

Na perspectiva bakhtiniana, um locutor sempre apela para a linguagem social ao produzir um enunciado. Essa linguagem social dá forma ao que a voz do locutor pode falar. Uma classe particular de dialogicidade ou pluralidade de vozes é a ventriloquação. Para Bakhtin, ventriloquação é o processo pelo qual uma voz fala através de outra voz ou tipo de voz na linguagem social (Wertsch, 1993, p. 78). A palavra na linguagem é sempre em parte de outrem. Ela só se torna propriedade do locutor quando ele a utiliza com sua própria intenção, com seu próprio acento, isto é, quando ele se apropria da palavra.

Metodologia de pesquisa

No âmbito da pesquisa em ensino de ciências, Mortimer e Scott (2002), pautados pelas teorias de Vygotsky e Bakhtin, elaboraram uma ferramenta sociocultural para analisar as interações discursivas entre professor e alunos em situação formal de sala de aula. Essa ferramenta apresenta a seguinte estrutura: (a) intenções do professor; (b) conteúdo; (c) abordagem comunicativa; (d) padrões de interação; (e) intervenções do professor. A ferramenta tem sido utilizada em outros estudos, nos quais vem sofrendo

algumas adaptações. No presente trabalho, utilizamos esse instrumento para analisar as interações entre alunos, fazendo uso apenas da *abordagem comunicativa*.

A abordagem comunicativa pode ser classificada da seguinte forma: *discurso dialógico*, no qual o aluno considera o que o colega tem a dizer sob o ponto de vista do próprio colega; *discurso autoritário*, no qual o aluno considera o que o aluno tem a dizer somente do ponto de vista do discurso científico; *discurso interativo*, o qual ocorre com a participação de mais de um aluno; *discurso não-interativo*, o qual ocorre com a participação de um único aluno.

Assim, a análise apresentada no presente trabalho levou em conta os seguintes aspectos: (1) o uso da fala como mediadora da ação dos alunos; (2) o nível de colaboração dos alunos com parceiros mais capazes; (3) a criação, ou não, da zona de desenvolvimento proximal; (4) o uso da língua como expressão das relações e lutas sociais; (5) as réplicas aos enunciados e os processos de compreensão; (6) o uso de gêneros discursivos e ventriloquação; (7) a abordagem comunicativa dos enunciados.

Após um levantamento inicial das noções prévias dos alunos acerca da dualidade onda-partícula, realizado a partir da aplicação de um instrumento constituído de 16 questões sobre situações que evidenciam o comportamento dual dos objetos quânticos tais como o efeito fotoelétrico, o experimento de dupla fenda e o interferômetro de Mach-Zehnder, realizou-se uma seqüência inicial de oito seminários sobre alguns temas da óptica ondulatória (reflexão e refração, interferência, polarização e difração) e de física quântica introdutória (radiação térmica e a quantização da energia, efeito fotoelétrico e o efeito Compton, dualidade onda-partícula, princípio da incerteza, a equação de Schrödinger). Após os seminários, o professor da disciplina discutiu alguns aspectos do IMZ, apresentando uma discussão conceitual sobre óptica ondulatória aplicada ao interferômetro.

A seguir, com base nos trabalhos de Pessoa Jr. (2005) e Scarani (2006), implementamos, no décimo terceiro encontro, uma atividade didática centrada no uso de um IMZ virtual. Esta atividade, realizada em um laboratório de informática do Instituto de Física da UFRGS, teve a duração aproximada de três horas, distribuídas em dois encontros. Organizados em duplas, os alunos receberam um roteiro especialmente elaborado para as atividades com o *software*. Três alunos, num total de quatorze, estiveram ausentes durante a atividade. Os onze alunos, organizados em quatro duplas e um trio, utilizaram cinco computadores equipados, cada um, com um IMZ virtual, um microfone e um gravador de som. Os diálogos dos alunos foram gravados em áudio e posteriormente transcritos para análise. Após a intervenção didática, o professor da disciplina retomou algumas situações observadas no *software* e discutiu o formalismo matemático da física quântica aplicado ao interferômetro, apresentando uma síntese das diferentes interpretações epistemológicas da teoria. Nossa investigação centrou-se no levantamento inicial das noções prévias dos alunos acerca da dualidade onda partícula e da análise dos diálogos mediados pelo IMZ virtual durante a intervenção didática.

No presente trabalho, apresentamos os resultados da análise dos enunciados de nove dos onze alunos presentes na atividade, devido à

ausência de um dos integrantes da quarta dupla durante o segundo encontro. Os diálogos transcritos no presente trabalho, ocorridos durante o primeiro e o segundo encontro, referem-se aos fenômenos observados no IMZ virtual operando em regime quântico. A análise detalhada destes e dos demais diálogos pode ser encontrada em Pereira (2008).

Resultados da análise do discurso

A primeira etapa dessa intervenção didática foi realizada em setembro de 2007 e consistiu na exploração inicial do *software* a partir do roteiro exploratório, com duração aproximada de uma hora e quinze minutos. Os episódios da primeira etapa foram classificados em quatro categorias: (a) caminhos dos feixes do *laser*; (b) polarização dos feixes do *laser*; (c) interferência em regime clássico; (d) interferência em regime quântico. A segunda etapa da intervenção didática, realizada na semana posterior, teve a duração de cerca de uma hora e trinta minutos e consistiu na resolução de um questionário conceitual sobre os fenômenos observados no IMZ virtual. Os enunciados foram separados em duas categorias: (e) óptica ondulatória; (f) física quântica.

De acordo com a proposta do presente trabalho, apresentamos apenas os diálogos pertencentes às categorias "d" e "f". As frases sublinhadas sinalizam uma leitura em voz alta, por parte dos interlocutores. Os erros de português e as eventuais ocorrências de linguagem vulgar foram preservados para não alterar o contexto e a autenticidade dos diálogos. Para designar a superposição de duas ou mais vozes emitidas simultaneamente, utilizamos um pequeno espaçamento de linha. Os episódios de cada grupo são apresentados a seguir.

Episódios da dupla A₁ e A₂

Os episódios analisados nessa seção foram vivenciados pelos estudantes A₁ e A₂, ambos do sexo masculino, licenciandos do curso de Física da UFRGS. No item 13 do roteiro exploratório, os estudantes retiraram o segundo espelho semi-refletor e operaram o IMZ virtual em regime quântico, substituindo os anteparos por detectores de fótons, conforme a figura 2. A duração do diálogo foi de 2 minutos e sete segundos.

A₂: Ligue a fonte.

A₁: Às vezes ele liga o azul, às vezes o amarelo... Ah! Como é só um fóton, ele tem a probabilidade ou de vim... Ou de ser refletido ou de ser refratado.

A₂: É, olha lá, ó... Dá pra ver lá em cima, ó... Ó, tá indo pro azul, outra hora pro amarelo, pro azul... Aleatório.

A₁: É, aleatório. É aquela probabilidade. É 50% do fóton ir por algum lugar e 50% pro outro.

A₂: Acompanhe a contagem de fótons emitidos pelo quadro bláblabá e compare com o número de fótons coletados em cada detector. Por que obtemos esse padrão? A gente já disse... Clique no botão acelerar cinco vezes e compare novamente a contagem de fótons emitidos pelo número coletados.

A₁: Tem que apertar cinco vezes?

A₂: Hã, cinco vezes.

A₁: Tá. Continua. Quase 50 %. A diferença é pequena. Vou apertar mais uma vez!

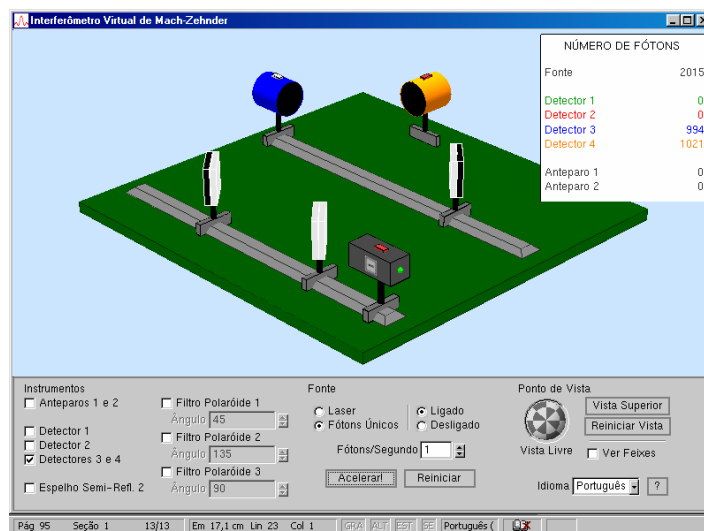


Figura 2.- Verificando a indivisibilidade dos fótons.

No diálogo acima, é possível identificar a organização social estabelecida pelos alunos durante a execução da tarefa. Enquanto A₂ orienta a atividade mediante a leitura do roteiro exploratório, A₁ fica responsável pelas explicações, assumindo a função do parceiro mais capaz, ao mesmo tempo em que opera o IMZ virtual. É interessante notar que a explicação “Às vezes ele liga o azul, às vezes o amarelo...” (2^a linha) é orientado internamente, como uma fala egocêntrica, organizando a ação de A₁. Após atingir a compreensão do fenômeno, evidenciada pela emissão de um “Ah”, A₁ passa a orientar sua explicação externamente, organizando a ação do colega. O enunciado “Como é só um fóton, ele tem a probabilidade ou [...] de ser refletido ou de ser refratado” (2^a e 3^a linha) sugere o uso da analogia entre a intensidade do feixe eletromagnético (regime clássico) e o caráter probabilístico inerente à física quântica.

No item 15 do roteiro exploratório, os estudantes recolocaram o segundo espelho semi-refletor e mantiveram os detectores 3 e 4, conforme a figura 3. Os alunos tiveram que explicar o padrão de interferência quântica no regime monofotônico. A duração do diálogo foi de 1 minuto e 9 segundos.

A₂: Tá. Desligue a fonte do 'laser' e clique no botão reiniciar. Os instrumentos... Em instrumentos, marque a caixa de seleção espelho semi-refletido... semi-refletor 2 e ligue a fonte de 'laser' novamente.

A₁: O que que eu vou te dizer agora... Só vai marcar o azul! Hehehe. Que que eu te falei? Ele deve mandar apertar no acelerar de novo, não deve?

A₂: Hu, hum. acelerar cinco vezes e compare normal.

A₁: Um, dois, três, quatro, cinco! Eu te falei! Heehehehe.... E agora? Hehehehe.

A₂: Barbaridade! Agora tá ficando ruim.

A₁: Cara, eu te falei. Eu fiz um trabalho sobre isso aí semestre passado.

A₂: Tá.

A₁: Só um detector detecta os negócios...

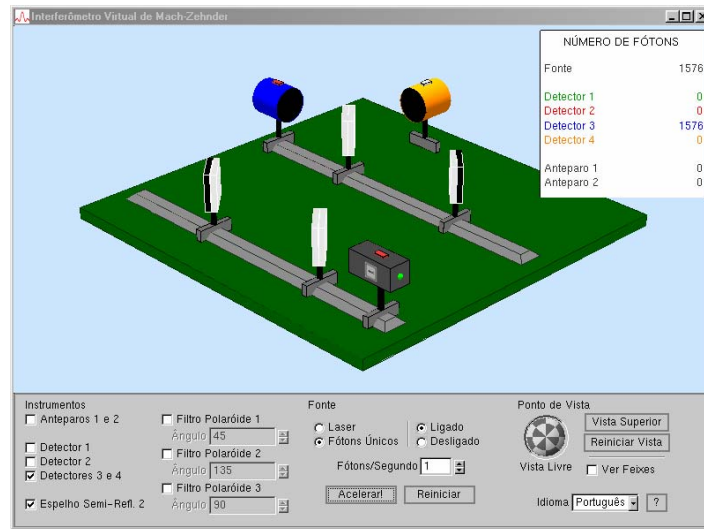


Figura 3. Interferência quântica com detectores

No diálogo acima, podemos observar em A₁ uma abordagem do tipo autoritária. No entanto, a previsão “Só vai marcar o azul!” (4^a linha) foi feita com base em uma experiência passada, evidenciada pela fala “Cara, eu te falei. Eu fiz um trabalho sobre isso aí semestre passado” (9^a linha). Isso não revela, necessariamente, um domínio pleno do assunto por parte de A₁. As expressões “E agora?” e “Barbaridade! Agora ta ficando ruim” (7^a linha) mostram o estado de surpresa e perplexidade dos estudantes ao falharem na busca de uma explicação adequada para o comportamento do fóton.

Os diálogos a seguir referem-se ao item 13 do roteiro exploratório (figura 3) e tiveram a duração de cerca de 1 minuto e 30 segundos.

A₁: Vamos ligar. Tá, a situação que a gente tem é essa daí.

A₂: Aquele dia não era o azul que tava mais? Não entendi. Não era o azul que... por ter interferência no...

A₁: Aqui não. Era pra dar a mesma quantidade pros dois!

A₂: É... É possível interferir o caminho percorrido pelo fóton? Explique... Não, é possível inferir um caminho! É possível inferir um caminho? Não, né?

A₁: Eu só to tentando entender o que que tá acontecendo aqui porque pra mim, era pra ser 50% pra cada um.

A₂: Mas tá normal. Aleatório, ó.

A₁: Não! Olha o detector três e quatro... Ah! Agora melhorou um pouco a diferença. Ah, tá. Agora voltou. Ah, tá. Agora tá certinho. Tá praticamente 50%.

A₂: Existe uma probabilidade dele ir pelo caminho A ou caminho B, mas a gente não pode falar nada sobre isso.

A₁: É, só pode dizer que existe a chance, 50% de chance pra cada caminho. Só isso.

A₂: Sim. (escreve na folha)

A₁: Não não, mas a gente tá viajando. Aqui ele tá ... Olha, lê essa outra pergunta. Eu acho que isso aqui não é o que a gente tá respondendo. Se a gente pode inferir o caminho, a gente pode! Por que ele ou pode... Se ele é detectado pelo azul, obviamente ele seguiu o caminho... esse aqui. Se ele é detectado pelo laranja, ele obviamente seguiu esse caminho aqui. Nós podemos inferir o caminho percorrido pelo fóton. De acordo com o detector que pega ele.

As abordagens comunicativas, presentes no início do diálogo, podem ser consideradas interativas, pois ambos participaram do ato de fala, e dialógicas, uma vez incorporados os pontos de vista de ambos estudantes na negociação de significados. No final do diálogo, no entanto, as interações discursivas entre A₁ e o roteiro exploratório permitiu que ele fizesse uma reavaliação da resposta dada ao item anterior da questão 9. A partir do enunciado "Olha, lê essa outra pergunta. Eu acho que isso aqui não é o que a gente tá respondendo." (16^a e 17^a linhas) podemos supor que o item b da questão 9 organizou, de alguma forma, sua ação na resolução do item a. É curioso notar que a questão 9b não responde a questão 9a. A dinâmica do diálogo sugere, portanto, que A₁ não teria conseguido responder adequadamente a questão 9a sem antes ter lido a 9b. Esse tipo de interação lingüística, no qual não podemos definir claramente quem respondeu à questão, parece ser um fenômeno análogo ao que alguns autores socioculturais denominam de cognição socialmente distribuída (Werstch, 1993, p. 45).

Episódios da dupla A₃ e A₄

Os episódios analisados nessa seção foram vivenciados pelos estudantes A₃ e A₄, ambos do sexo masculino. O próximo diálogo refere-se ao item 13 do roteiro exploratório (figura 2) e teve a duração de 37 segundos.

A₄: Ligue a fonte. O que observa? Tá, vai um pra cada detector.

A₃: Não.

A₄: Como não?

A₃: Tão indo muito mais pro detector três. Olha ali, ó. Olha o numerozinho do detector.

A₄: Tá, mas tá errado... Ah! Tá lá. Agora a coisa tá ficando linda. Tem que ser igual.

A₃: Ah, é que de repente é a única... é a coisa quântica.

A₄: Sim, sim, sim.

A₃: A probabilidade...

A₄: Sim, sim, sim...

A₃: Põe ali.

A₄: Vou botar, ó: acelerar... Já fica mais parecido.

No texto acima, é possível identificar a presença das vozes de ambos alunos no diálogo, o que caracteriza a abordagem comunicativa como sendo essencialmente interativa. Podemos perceber que A₄ assume para si a função do parceiro mais capaz. Os enunciados "Como não?" (4^a linha), "Tá, mas tá errado" e "Tem que ser igual" (6^a linha) mostram que, apesar da aparente contradição observada no IMZ, A₄ impõe-se autoritariamente, tendo como base o domínio do conteúdo científico.

No item 15 do roteiro, os estudantes recolocaram o segundo espelho semi-refletor no interferômetro, operando-o em regime quântico, conforme a figura 3. O dialogo durou cerca de 45 segundos.

A₄: Em instrumentos tu bota o segundo semi-espelho... e ligue a fonte novamente. O que se observe em cada um deles? Tá, agora o que eu imaginei, ô. Esse aqui tá bem no centro, né?

A₃: Hu, hum.

A₄: Ele só tá coletando os fótons que vão bem no centro do anteparo. Então vai todos pra esse aqui agora. Por causa da interferência. Essa figura de interferência que vai ter na...

A₃: Aaah...

A₄: Não é?

A₃: Hu, hum.

A₄: Sacou?

A₃: Sim, sim, sim.

Os enunciados acima reforçam a idéia de que A₄ exerce a função do parceiro mais capaz. Esse diálogo é marcado por uma mudança abrupta na sua dinâmica, no momento em que A₄ introduz na sua fala a palavra *interferência* (6^a linha). A compreensão do fenômeno observado no IMZ virtual, por parte de A₃, evidenciado na fala "Aaah..." (8^a linha) tornou desnecessária qualquer tipo de explicação posterior.

Os enunciados a seguir referem-se ao item 13 do roteiro exploratório (figura 2) e teve a duração de 1 minuto e 43 segundos.

A₄: É possível inferir o caminho percorrido pelos fótons? Explique.

A₃: Não. Hããã...

A₄: Mas eu acho que nesse caso sim, cara. O que atingir esse detector aqui só pode ter passado por esse daqui! O que atingiu o outro só pode ter passado por aqui. Não pode ter feito isso daqui: pá, pá, pá pum. Sacou? Nesse caso acho que sim. Sim! Não acha?

A₃: Acho que quanticamente... Não, quer dizer... Veja bem. Por aqui, sim. Só que quanticamente, né... Hããã, ali tem um estado de superposição. Ele passa por aquele primeiro espelho, semi-espelho ali. Ele tem uma probabilidade de 50% de passar por um ou por outro.

A₄: Sim, mas isso...

A₃: Mas, ele passar por um ou por outro é que tem o colapso da função de onda que faz com que ele escolha um dos caminhos.

A₄: É, isso aí. Mas, mas olhando nos detectores tu pode saber qual caminho que ele fez. Então, sim!

A₃: Acho que... Vamos perguntar pra ele antes.

A₄: Porque... mas... sim, perguntamos. Mas eu acho que sim, porque se ele atingiu esse detector, só pode ter passado por esse caminho aqui.

A₃: Ah, não. É isso.

A₄: Então, acho que a resposta é sim.

A₃: Mas eu acho que... não é a interpretação quântica.

A₄: Se tivesse o segundo semi-espelho, daí a gente não pode saber qual o caminho dele.

A₃: Ah, é verdade.

A₄: E eu acho que é isso que ele vai querer depois que ele pede pra botar. O item 15 pede pra botar o segundo semi-espelho... Boto isso?
A₃: Vamos, vamos só ver o que eles acham... Achei melhor.

O debate acima reproduz uma disputa ideológica entre os oponentes da dupla. Diferentemente de A₄ que constrói todo seu argumento apoiado nas evidências observadas no IMZ virtual (3^a a 5^a linhas), A₃ utiliza seu conhecimento prévio, evocando os conceitos de *superposição* (8^a linha) e *colapso da função de onda* (12^a linha). Sua fala pode ser interpretada de duas maneiras distintas: ou trata-se de um discurso autoritário pautado no conhecimento científico ou trata-se de uma tentativa de assumir a função do parceiro mais capaz, lançando mão de alguns gêneros discursivos específicos de situações que tipicamente envolvem conceitos de física quântica. A segunda interpretação supõe a idéia de que alguns enunciados extraídos do discurso social são utilizados em determinados contextos de forma análoga a uma caixa de ferramentas (Werstch, 1993).

Episódios da dupla A₅ e A₆

Os episódios analisados nessa seção foram vivenciados pelos estudantes A₅ e A₆, ambos do sexo masculino. O próximo diálogo refere-se ao item 13 do roteiro exploratório (figura 2) e teve a duração de cerca de 2 minutos.

A₆: O Detector pisca.

A₅: Sim, pra ver os fótons. Pra que lado foi o fóton. É bem provável que era isso. O que se observa em cada um dos detectores? Ah, e ligue a fonte. Detector 3 e 4, que é o que a gente tá vendo. O que se observa em cada um dos detectores? Porque obtemos este padrão? Ó, eles não vão interferir. É, se eu to emitindo um único fóton... Tu viu que não é igual. Tá vendo? Aqui aponta quantos tá chegando em cada um deles. Aqui é o total emitido. Não é proporcional.

A₆: Isso é uma coisa aleatória.

A₅: Não, é aleatório. Porque tu tá vendo, ó. Não existe uma baita diferença, esse aqui já passou. É aleatório. Mas um...

A₆: É aleatório. 50% de chance de passar ou de refletir.

A₅: Isso... É aleatório.

Isso é verdade. Ou bate aqui e vê lá... Beleza. É aleatório. Beleza.

O diálogo acima é marcado pela participação decisiva de A₆ na construção e negociação de significados. Embora coubesse a A₅ a tarefa de explicar (função do parceiro mais capaz), conforme mostram o texto acima, os enunciados "Isso é uma coisa aleatória" (8^a linha) e "50% de chance de passar ou de refletir" (11^a linha), emitidos por A₆, possibilitaram a re-elaboração das explicações do colega. A incorporação da voz de A₆ na fala de A₅, nos enunciados "Não, é aleatório" (9^a linha) e "Beleza, é aleatório" (13^a linha), caracteriza a abordagem comunicativa como sendo essencialmente interativa e dialógica.

O diálogo a seguir refere-se ao item 15 do roteiro exploratório (figura 3) e teve a duração de 1 minuto e 30 segundos.

A₅: *Só aparece um deles. Detector 3 só o que é refletido. Ah, claro. O padrão de interferência. Se ele vier no centro, aqui não era aonde tinha a... é...*

A₆: *A construtiva?*

A₅: *Construtiva... aonde tinha um centro iluminado... aonde tava chegando os fótons... Então aqui eu esperaria realmente ter os fótons.*

A₆: *É um fóton de cada vez, né?*

A₅: *É um fóton de cada vez.*

A₆: *Ele não pode se dividir!*

A₅: *Essa que é a questão da quântica, né.*

A₆: *Então, se ele é um de cada vez, não podia ter ... se é um só, não podia se... não podia ter diferença, né.*

A₅: *É aquela questão. Ele se... como é que é? Ele interfere com ele mesmo depois. Essa que é a questão da quântica. Mas se tu pensar nas manchas, né. No centro, tu vai ter fótons ali mesmo. (Ininteligível). Sempre no 3, sempre no centro do 3.*

A₆: *É.*

A₅: *Se eu pensar assim. E aqui no centro do 4, nada porque ele tá em destrutiva. Agora fica essa questão mesmo. Um único fóton está interagindo com ele mesmo. Atira, ele chega. Então, ele tá interagindo com ele mesmo.*

O diálogo acima mostra a transição de um discurso inicialmente autoritário para sua forma dialógica e interativa. No início da fala de A₅, é possível identificar alguns traços de fala egocêntrica. Ele começa sua explicação orientando sua fala internamente, organizando a própria ação conforme mostra o enunciado "Só aparece um deles" (1ª linha). A expressão "Ah, claro" (mesma linha) evidencia o momento de compreensão. A partir deste instante, os enunciados de A₅ são orientados externamente para organizar a ação do colega. A pergunta "É um fóton de cada vez, né?" (6ª linha), emitida por A₆, marca o início de uma interanimação de vozes que possibilita a construção de significados. É possível identificar o uso de enunciados típicos em aulas de física quântica, tal como "Um único fóton está interagindo com ele mesmo" (17ª linha). Esse tipo de expressão pode ser considerado um gênero discursivo em física quântica.

Os enunciados a seguir ocorreram durante o segundo encontro e referem-se ao item 15 do roteiro exploratório (figura 3). O diálogo teve a duração de 2 minutos e 53 segundos.

A₅: *Como você explica o padrão de interferência observado para fótons únicos? Aquilo do fóton se dividir. Aquilo que o professor tava dizendo na outra aula, que a função de onda do fóton... Ele chama de braço da função de onda. Um fóton interfere, né.*

A₆: *É, a gente pode pensar que classicamente não poderia haver interferência, mas quanticamente...*

A₅: *Como você explica?*

A₆: *basicamente não existiria...*

A₅: *Basicamente não existiria e não há como...*

A₆: *Obter... haver interferência.*

A₅: *Basicamente não existiria e não há como entender o efeito. Pensando somente classicamente, né.*

A₆: Perfeito.

A₅: *Quanticamente é como se o fóton interagisse com ele mesmo.*

A₆: *O fóton interfere com ele mesmo.*

A₅: *Mas devemos considerá-lo como onda.*

A₆: *Hu, hum.*

O diálogo acima é marcado pela ocorrência de uma ventrilocução evidenciada na frase “que a função de onda...” (1^a e 2^a linhas). A abordagem comunicativa de ambos estudantes nesse diálogo pode ser considerada interativa e dialógica, pois a partir da interanimação de vozes eles foram capazes de construir, passo a passo, a resposta que juntos consideraram ser a mais adequada para a questão.

Episódios do grupo A₇ e A₈ e A₉

Os episódios analisados nessa seção foram vivenciados pelos estudantes A₇ e A₈, ambos do sexo feminino, e A₉, do sexo masculino. O diálogo a seguir refere-se ao item 15 do roteiro exploratório (figura 3) e teve a duração de cerca de 2 minutos.

A₇: *Desligue o 'laser' novamente. Posso desligar?*

A₈: *Sim.*

A₇: *Clique o botão reiniciar. Em instrumentos ...*

A₈: *Semi-espelho 1. Ligue a fonte de 'laser' novamente. Se observa o padrão de interferência construtiva no detector azul.*

A₇: *Tá, o que que a gente botou? O semi... Esse ali, né?*

A₈: *Espelho. Ou seja, tá acontecendo a interferência construtiva no azul e destrutiva no amarelo.*

A₇: *Isso que...*

A₈: *Na verdade tu tá considerando o fóton um feixe único e em uma direção.*

A₇: *Sim. Só que daí, tu tem que pensar ali porque ele tá indo só naquele.*

A₈: *É a questão... é que ele não tá saindo aqui.*

A₉: *Por causa de isso aqui ó. Tem que ter diferença de caminho óptico.*

A₈: *Como?*

A₉: *Diferença de caminho óptico. Tem 2L... que é esta distância aqui 2L, tá?*

A₇: *A distância aqui é a mesma.*

A₉: *Mais Nd. Nd é o...*

A₈: *Ah, mas agora tu tem que considerar um único fóton, né.*

A₇: *Mas a diferença é a mesma!*

A₉: *Sim, mas é isso que ele fez, ó.*

A₇: *Mas a diferença aqui é a mesma!*

A₈: *Se tu considerar como um campo eletromagnético se propagando.*

A₉: *Não. É diferente. Olha aqui, ó.*

A₇: *Porque olha aqui, ó. Aqui, aqui e aqui ou aqui, aqui e aqui.*

A₉: *Tá, mas o problema é que tem Nd aqui, ó. Quando tu reflete uma... uma diferença de comprimento de onda de π meio.*

A₈: *Sim. Isso aqui é exatamente a mesma coisa que aconteceu com o 'laser'. Só que no 'laser' era emitido milhares de fótons por segundo e aqui é um fóton por segundo.*

A₉: *Sim.*

A₈: *O que a gente observa é que um fóton só interage por si mesmo.*

A₉: *Ó, ele considera que cada reflexão...*

A₈: *Daí, só é explicado por aquela superposição de estados.*

O debate acima é marcado por uma disputa ideológica por parte de A₉. Na medida em que as meninas organizam juntas a atividade (1^a a 9^a linhas), A₉ impõe-se autoritariamente, interrompendo o diálogo e sobrepondo sua voz às demais falas (14^a e 16^a linhas). O termo "ele" na frase "... ele considera que cada reflexão..." (penúltima linha) sugere um argumento construído com base na autoridade do discurso do professor. Em outras palavras, não é o seu conhecimento prévio que fundamenta seu discurso, mas sim as anotações em seu caderno.

Outro aspecto de igual destaque é o uso do termo "superposição de estado" (última linha). A falta de detalhes na explicação sobre a natureza da interferência quântica nos dá a impressão de que tal termo foi extraído do discurso social de sala de aula, em disciplinas cursadas anteriormente, e evocado em um outro contexto igualmente típico. Se for este o caso, estamos diante de um outro exemplo de gênero discursivo pertencente ao domínio da física quântica.

Ao responder o questionário durante o segundo encontro, os estudantes refizeram o item 13 do roteiro exploratório (figura 2). O diálogo durou 1 minuto e 40 segundos.

A₈: *É possível interferir... inferir. Não é Interferir no caminho óptico. Inferir o caminho percorrido pelo fóton? Há...*

A₇: *Como assim?*

A₈: *Se tem como a gente tentar explicar o caminho que o fóton percorre.*

A₇: *Não.*

A₈: *É, eu não me arriscaria. É eu vou botar escrito, eu não me arriscaria explicar.*

A₇: *Põe. Porque não tem como.*

A₉: *Tu consegue... Tu só consegue saber se é a metade do feixe.*

A₈: *É, inferir...*

A₇: *Tu sabe... Sim, mas daí é a probabilidade... não é ...*

A₈: *É que tu não tem um (ininteligível) como o fóton se dividir, né.*

A₇: *É.*

A₈: *Tu tem uma função de onda. Tu tem um monte de auto-estados.*

A₇: *Tu tem um momento. É, tu tem uma probabilidade.*

A₈: *Tem só probabilidade de percorrer os caminhos.*

A₇: *Tu não tem como adivinhar qual o momento...*

A₈: *Vou botar aqui ó, não nos atrevemos a isto.*

A₉: *Não, mas tu... Tu consegue saber que é a metade da intensidade.*

A₇: *Sim. Isso sim. Mas tu não sabe dizer 'agora é esse caminho que ele tá percorrendo'. Tu não sabe dizer se ele tá indo pra cá ou se ele tá indo por aqui.*

A₈: *Não, não é a metade da intensidade. Tu não sabe...*

A₇: *Metade, metade.*

A₈: *... quando tu liga e tá saindo um fóton. Não vão chegar a metade da intensidade no anteparo e metade no outro.*

A₇: *É.*

A₈: O fóton ou vai chegar no anteparo ou no outro.

A₇: Mas é que com o tempo, vai ser metade, metade.

Esse diálogo é marcado por uma redução abrupta da fala de A₉. Sua participação resume-se a duas pequenas intervenções, incorporadas ao diálogo das meninas (8^a e 18^a linhas). Sua abdicação da função do parceiro mais capaz permitiu que as meninas tivessem maior liberdade para negociar os significados, tornando o diálogo, essencialmente, interativo e dialógico. É curioso notar que o uso de alguns conceitos-chave da física quântica, tais como “função de onda” e “auto-estados”, são emoldurados na fala dos alunos na medida em que o debate avança. Isso demonstra que a atividade proposta com o IMZ virtual possibilitou a contextualização de vários conceitos e princípios estudados em cursos de semestres anteriores.

Após recolocar o segundo espelho semi-refletor, os estudantes retomaram a discussão sobre a questão do caminho percorrido pelo fóton. O diálogo durou 2 minutos e 40 segundos.

A₇: Tá, mas aqui e posso dizer. É.

A₈: Não porque ele não tá indo só para aquele detector. Ele tá interferindo construtivamente em um.

A₇: E destrutivamente em outro. Anota isso.

A₈: Então ele tá percorrendo os dois caminhos, né. Vou botar NÃO.

A₉: Acho eu que... não sei não. Dá pra criar dúvidas.

A₈: O que foi?

A₉: Só, só voltando uma pergunta. Nessa questão aqui, ó. Pra responder essa, tá. Ele ia, ele pergunta qual o caminho óptico, né. Do fóton. A gente viu que tinha um fóton aqui e fóton aqui, né.

A₈: Hu, hum.

A₉: Então não é assim que a gente fez, que é 2 Nd mais d, mais d, pra cá, né. E aqui seria Nd, não. Hã... d mais d, né.

A₈: Sim.

A₉: Sim se não tivesse esse espelho aqui, né.

A₈: Sim. Mas é que ele não tá perguntando... ele... acho que ele só tá perguntando... porque como tá em regime monofotônico, qual caminho que o fóton vai seguir. Se a gente teria como saber o caminho que ele vai seguir e explicar. Vendo por ele ser detectado no anteparo.

A₉: Mas concorda que a gente sabe que ou ele vai por esse caminho aqui ou ele vai por esse caminho, né.

A₈: Sim. Se ele for detectado no detector 1, ele foi pelo caminho 1.

A interanimação de vozes presente no diálogo acima permitiu que os participantes do debate vislumbrassem o problema conceitual da escolha do caminho pelos fótons. Esse debate é marcado pela participação decisiva de A₉ na construção de novos significados. Sua fala, embora confusa, reorganizou a ação das meninas de modo a movê-las discursivamente em uma direção totalmente nova. O argumento confuso desenvolvido por A₉ (11^a e 12^a linhas) sugere que até aquele exato momento ele não tinha resposta para a questão. Sua fala não é simplesmente retórica. Pelo contrário, ela organiza sua própria ação enquanto dialoga com as outras vozes. A conclusão “Se ele for detectado pelo detector 1, ele foi pelo

caminho 1" (última linha) surge através de um processo de interanimação de vozes no qual não se pode identificar um único autor para a resposta. Esse parece ser outro caso análogo ao fenômeno de cognição socialmente compartilhada.

Síntese dos resultados

Os resultados da análise mostram que em atividades colaborativas com outros colegas um dos integrantes do grupo sempre assume pra si a função do parceiro mais capaz. Em alguns casos, esse papel é conquistado através de uma disputa ideológica entre os componentes do grupo, no qual o domínio do conteúdo científico envolvido na atividade em questão é utilizado para definir as relações sociais de poder e de autoridade. Essas tensões e conflitos ideológicos, emoldurados na fala dos estudantes, reforçam a noção bakhtiniana de que a palavra é a arena onde se desenvolvem as lutas de classes (Bakhtin, 2006). É interessante notar que o mesmo não ocorre com as meninas. Elas procuram agir de maneira colaborativa e sempre se opõem as intervenções autoritárias do colega.

Nos enunciados explicativos, a fala do parceiro mais capaz é perpassada por um mecanismo de transição que modifica sua função mediadora, deslocando o sentido de sua orientação. Inicialmente, os enunciados são orientados internamente, organizando a ação do locutor de forma bastante similar à fala egocêntrica encontrada nas crianças ao executar uma tarefa (Vygotsky, 1994; 1998). É interessante notar que para Vygotsky, a fala egocêntrica é, quanto a sua função, a fala interior, isto é, a fala em processo de interiorização, estando intimamente ligada à organização do comportamento do sujeito. Quando o parceiro mais capaz atinge um estado de compreensão, evidenciado pela imposição de uma réplica ao próprio enunciado, ele passa a imprimir uma série de perguntas retóricas e afirmações que são orientadas externamente, com a finalidade de organizar a ação do colega. Ao longo desses movimentos discursivos, é possível identificar o uso de gêneros do discurso de situações típicas de instrução de física quântica, tais como "o fóton interfere com ele mesmo".

Alguns debates mais polêmicos são marcados por um fenômeno análogo ao que alguns autores socioculturais definem como cognição socialmente distribuída ou memória social (Werstch, 1993, p. 45). A construção colaborativa de significados durante a atividade surge através de um processo de interanimação de vozes no qual é impossível identificar o autor das respostas aos itens do questionário. Essa interanimação de vozes é normalmente caracterizada pela construção deliberada de argumentos confusos que acabam por orientar o pensamento do colega.

Considerações finais

As atividades desenvolvidas com o IMZ virtual, quando articuladas ao roteiro exploratório, atuaram, em vários momentos, na zona de desenvolvimento proximal ao proporcionarem tarefas que só puderam ser resolvidas em colaboração com os colegas. As ações mediadas pelo uso do *software* possibilitaram ainda, por parte dos estudantes, a construção e a negociação de significados em física quântica. Em outras palavras, as atividades desenvolvidas na exploração do *software* possibilitaram a

contextualização de uma série de conceitos e princípios introduzidos nas disciplinas cursadas pelos alunos em semestres anteriores, tais como fóton, interferência quântica, densidade de probabilidade, colapso da função de onda e superposição de estados. Nesse sentido, o IMZ virtual se mostrou uma ferramenta cultural extremamente poderosa, tanto em termos de motivação para o estudo da física quântica, quanto no que diz respeito à facilitação dos processos de compreensão e construção de significados aceitos cientificamente.

Referências bibliográficas

- Adams, S. (1998). Quantum bombing reality. *Physics Education*, 33, 6, 378-385.
- Aubrecht, G.J. (1989). Redesigning courses and textbooks for the twenty-first century. *American Journal of Physics*, 57, 4, 352-359.
- Bakhtin, M.M. (2006). *Marxismo e filosofia da linguagem*. São Paulo: Editora Hucitec.
- Bakhtin, M.M. e Volochinov, V.N. (1997). *Estética da criação verbal*. São Paulo: Martins Fontes.
- Budde, M.; Niedderer, H.; Scott, P. e Leach, J. (2002). The quantum atomic model 'Electronium': a successful teaching tool. *Physics Education*, 37, 3, 204-210.
- Cole, M. e Scribner, S. (1994). Introdução. En: L. S. Vygotsky (Ed.), *A formação social da mente* (pp. 1-19), São Paulo: Martins Fontes.
- Cuppari, A., Rinaudo, G., Robutti, O. e Violino, P. (1997) Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum. *Physics Education*, 32, 5, 302-308.
- Degiorgio, V. (1980). Phase shift between the transmitted and the reflected optical fields of a semireflecting lossless mirror is $\pi/2$. *American Journal of Physics*, 48, 1, 81-82.
- Fischler, H. e Lichtfeldt, M. (1992). Modern physics and students' conceptions *International Journal of Science Education*, 14, 2, 181-190.
- Gil, D.P., Senent, F. E Solbes, J. (1988). Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, 1, 16-21.
- Gil, D.P., Senent, F. e Solbes, J. (1987). La introducción a la física moderna: un ejemplo paradigmático de cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 209-210. n. extra.
- Gil, D.P. e Solbes, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, 15, 3, 255-260.
- Greca, I.M. e Freire Jr., O. (2003). Does an emphasis on the concept of quantum status enhance student's understanding of quantum mechanics? *Science & Education*, 12, 5/6, 541-557.

Greca, I.M. e Herscovitz, V.E. (2002). Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *Enseñanza de las Ciencias*, 20, 2, 327-338.

Gunel, M.; Hand, B. e Gunduz, S. (2006). Comparing student understanding of quantum physics when embedding multimodal representations into two different writing format: presentation format versus summary report format. *Science Education*, 90, 6, 1092-1112.

Kalkanis, G.; Hadzidaki, P. e Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concept. *Science Education*, 87, 2, 257-279.

Kalmus, P.I. (1992). Particle physics at A-level-the universities' viewpoint. *Physics Education*, 27, 2, 62-64.

Ke, J; Monk, M. e Duschl, R. (2005). Learning introductory quantum physics: Sensori-motor experiences and mental models. *International Journal of Science Education*, 27, 13, 1571-1594.

Lemke, J.L. (1997). *Aprender a hablar ciencia: lenguaje, aprendizaje y valores*. Barcelona: Ediciones Paidós Ibérica.

Lemke, J.L. (2001). Articulating communities: sociocultural perspectives on science education. *Journal of Research in Science Teaching*. 38, 3, 296-316.

Mortimer, E.F. e Scott, P. (2002). Atividade discursiva nas salas de aula de ciências: uma ferramenta sociocultural para analisar e planejar o ensino. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7, 3, 1-12.

Müller, R. e Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics*, 70, 3, 200-209.

Olsen, R.V. (2002). Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *International Journal of Science Education*, 24, 6, 565-574.

Ostermann, F. e Moreira, M.A. (2004). Updating the physics curriculum in high schools: a teaching unit about superconductivity. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 3, 2, 1-13. Em: <http://www.saum.uvigo.es/reec>

Ostermann, F.; Prado, S.D. e Ricci, T.S.F. (2006). Desenvolvimento de software para o ensino de fundamentos de física quântica. *A física na Escola*, 7, 1, 22-25.

Ostermann, F. e Ricci, T.S.F. (2004). Construindo uma unidade didática conceitual sobre mecânica quântica: um estudo na formação de professores de física. *Ciência & Educação*, 11, 2, 235-258.

Pereira, A.P. (2008). *Fundamentos de física quântica na formação de professores: uma análise de interações discursivas em atividades centradas no uso de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Pessoa Jr, O. (2005). *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física.

Pessoa Jr., O. (1997). Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à física quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 19, 1, 27-48.

Rezende, F. e Ostermann, F. (2006). Interações discursivas on-line sobre epistemologia entre professores de física: uma análise pautada em princípios do referencial sociocultural. *Revista Electrónica de Enseñanza de la Ciencias*, 5, 3, 505-522.

Scarani V. e Suarez, A. (1998). Introducing quantum mechanics: One-particle interferences. *American Journal of Physics*, 66, 8, 718-721.

Scarani, V. (2006). *Quantum physics, a first encounter: interference, entanglement, and reality*. New York: Oxford University Press.

Solbes, J., Calatayud, M.L., Climent, J.B. e Navarro, J. (1987). Diseño de un currículum para la introducción del modelo atómico cuántico. *Enseñanza de las Ciencias*, 5, 209-210. n. extra.

Stefanel, A. (1998). Una experiencia en el marco de la introducción de la física cuántica en la escuela secundaria. *Revista de Enseñanza de la Física*, 11, 2, 35-44.

Swinbank, E. (1992). Particle Physics: a new course for schools and colleges. *Physics Education*, 27, 2, 87-91.

Vygotsky, L.S. (1994). *A formação social da mente*. São Paulo: Martins Fontes.

Vygotsky, L.S. (1998) *Pensamento e linguagem*. São Paulo: Martins Fontes.

Wertsch, J.V. (1993). *Voces de la mente: un enfoque sociocultural para el estudio de la acción mediada*. Madrid: Visor Distribuciones.

Wilson, B. (1992). Particle physics at A-level - a teacher's viewpoint. *Physics Education*, 27, 2, 64-65.