

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENSINO DE FÍSICA**

**UMA PERSPECTIVA SOCIOCULTURAL PARA A INTRODUÇÃO DE
CONCEITOS DE FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO:
ANÁLISE DAS INTERAÇÕES DISCURSIVAS EM UMA UNIDADE DIDÁTICA
CENTRADA NO USO DO INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LUCAS TELICHEVESKY

PORTO ALEGRE

2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENSINO DE FÍSICA**

**UMA PERSPECTIVA SOCIOCULTURAL PARA A INTRODUÇÃO DE
CONCEITOS DE FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: ANÁLISE DAS
INTERAÇÕES DISCURSIVAS EM UMA UNIDADE DIDÁTICA CENTRADA
NO USO DO INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER**

LUCAS TELICHEVESKY

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do prof. Cláudio José de Holanda Cavalcanti e co-orientação da profa. Fernanda Ostermann, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

**UMA PERSPECTIVA SOCIOCULTURAL PARA A INTRODUÇÃO DE
CONCEITOS DE FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: ANÁLISE DAS
INTERAÇÕES DISCURSIVAS EM UMA UNIDADE DIDÁTICA CENTRADA
NO USO DO INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER**

LUCAS TELICHEVESKY

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do prof. Cláudio José de Holanda Cavalcanti e co-orientação da profa. Fernanda Ostermann, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Dedico a minha avó Anna “Nhanha” Goldstein.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Cláudio José de Holanda Cavalcanti, meu orientador, por suas imensas contribuições ao desenvolvimento deste trabalho.

À professora Fernanda Ostermann, minha co-orientadora, por me apresentar a este projeto cativante e me mostrar os caminhos do mestrado.

Ao professor André Diestel por embarcar neste projeto comigo e mostrar-se um excelente parceiro na preparação e aplicação da oficina.

Aos professores Fernando Lang da Silveira e Neusa Teresinha Massoni pelas importantes contribuições ao trabalho feitas ao avaliarem meu projeto de mestrado.

À Jêniifer Andrade de Matos, minha namorada, por todo amor, carinho e paciência dedicados ao longo destes últimos dois anos.

Aos meus pais Nilton Telichevesky e Rejane Goldstein Telichevesky que me ensinaram o valor do estudo.

A toda minha família: irmã, avós, tios e primos porque eu tenho a melhor família que alguém poderia desejar.

Aos meus colegas de mestrado, em especial a Josiane de Souza, por sua companhia e ajuda nas disciplinas e tarefas do mestrado.

Aos meus amigos, com os quais pouco pude interagir nestes últimos anos.

RESUMO

Este trabalho relata a produção, implementação e avaliação de um curso sobre física quântica destinado a alunos do Ensino Médio. A unidade didática foi inspirada nas propostas de Ostermann *et al.* (2009) e Pessoa Jr. (1997, 2003). Ela introduz a física quântica considerando a óptica ondulatória como um contexto para introduzir algumas analogias conceituais básicas para conceitos fundamentais da física quântica. O conceito central desta abordagem é a dualidade onda-partícula e o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ) é utilizado como sua ferramenta didática principal ou, em termos vygotskyanos, ferramenta de mediação. A proposta foi aplicada no formato de uma oficina extracurricular em uma escola privada de Porto Alegre no Brasil. Um dos professores de Física da escola se engajou e colaborou com este projeto. As aulas ocorreram entre os meses de Outubro e Novembro de 2013, em encontros semanais de uma hora. A perspectiva sociocultural de Vygotsky foi utilizada para embasar as aulas do curso. A translinguística de Bakhtin e os conceitos vygotskyanos foram utilizados para a análise das falas dos estudantes durante as atividades do curso. Nesta perspectiva analítica buscamos compreender como os estudantes elaboram estratégias discursivas para entender o conceito de dualidade onda-partícula, analisando a importância das interações com parceiros mais capazes (como professores), textos, simulações e outras ferramentas didáticas. Os resultados indicam que os estudantes desenvolveram algum domínio das ferramentas mediacionais necessárias para compreender a dualidade onda-partícula em um nível satisfatório. O Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder, os roteiros exploratórios e os professores mostraram-se importantes para tornar mais efetivas as experiências de aprendizagem dos estudantes.

Palavras-chave: Física quântica; Dualidade onda-partícula; Ensino Médio; Interferômetro de Mach-Zehnder; Perspectiva sociocultural.

ABSTRACT

This dissertation reports the development, implementation and evaluation of a quantum physics course directed to high school students. The course was conceived inspired in proposals of Ostermann *et al.* (2009) and Pessoa Jr. (1997, 2003). It introduces quantum physics considering wave optics as a context to introduce some basic conceptual analogies to quantum fundamental concepts. The core concept of this approach is the wave-particle duality and the Virtual Mach-Zehnder Interferometer (VMZI) is used as its main didactical tool or, in vygotskian terms, a mediational tool. The course was applied as an extracurricular workshop in a private school from Porto Alegre, Brazil. One of the school's Physics teacher collaborated and engaged in this project. The classes took place between October and November 2013, in a set of one-hour weekly meetings. Vygotsky's sociocultural perspective is adopted to ground the practices of the course. Both Bakhtin's translinguistics and Vygotsky's concepts were used to perform the analysis of students' utterances along didactical activities at the classes. In this analytical framework, we try to understand how students elaborate discursive strategies to understand the concept of wave-particle duality, analyzing the importance of interaction with more experienced peers (like teachers), texts, simulation and other teaching tools. The results indicate that the students developed some mastery of mediational means needed to understand the wave-particle duality at a satisfactory level. The Virtual Mach-Zehnder Interferometer, the exploratory guides and the teachers were important to enhance the students' learning experiences.

Key-words: Quantum physics; Wave-particle duality; High School; Mach-Zehnder interferometer; Socio-cultural perspective.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	DESCRIÇÃO	10
1.2	JUSTIFICATIVA	12
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1	PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ARTIGOS	14
2.2	ANÁLISES DE CONCEPÇÕES	18
2.3	REVISÕES DA LITERATURA	22
2.4	PROPOSTAS DIDÁTICAS	23
2.4.1	<i>Indicações didáticas.....</i>	<i>23</i>
2.4.2	<i>Propostas experimentais</i>	<i>24</i>
2.4.3	<i>Propostas para o uso de TIC's.....</i>	<i>25</i>
2.4.4	<i>Abordagem CTS e aspectos filosóficos.....</i>	<i>29</i>
2.4.5	<i>Propostas teórico-conceituais.....</i>	<i>31</i>
2.5	ATUALIZAÇÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	36
2.6	CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
3	REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO.....	41
3.1	A PERSPECTIVA SOCIOCULTURAL DE VYGOTSKY	41
3.1.1	<i>Mediação, instrumentos e signos.....</i>	<i>41</i>
3.1.2	<i>Método genético-experimental.....</i>	<i>42</i>
3.1.3	<i>A gênese das funções mentais superiores.....</i>	<i>44</i>
3.1.4	<i>Origens sociais das funções mentais superiores.....</i>	<i>47</i>
3.2	A TRANSLINGUÍSTICA DE BAKHTIN	55
3.2.1	<i>Enunciado</i>	<i>56</i>
3.2.2	<i>Vozes</i>	<i>57</i>
3.2.3	<i>Dialogicidade.....</i>	<i>58</i>
3.2.4	<i>Linguagens Sociais.....</i>	<i>59</i>
4	UNIDADE DIDÁTICA E ANÁLISE DE ENUNCIADOS.....	60
4.1	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	60
4.2	UNIDADE DIDÁTICA	61
4.2.1	<i>Contexto</i>	<i>61</i>
4.2.2	<i>Aula 1 – Introdução à oficina.....</i>	<i>62</i>
4.2.3	<i>Aula 2 – Comportamento ondulatório da luz.....</i>	<i>67</i>
4.2.4	<i>Aula 3 – Comportamento Corpuscular da Luz.....</i>	<i>71</i>
4.2.5	<i>Aulas 4 e 5 – Dualidade onda partícula.....</i>	<i>72</i>
4.2.6	<i>Finalização.....</i>	<i>96</i>

5 CONCLUSÕES.....	99
REFERÊNCIAS	103
APÊNDICES.....	115
APÊNDICE I: TABELAS COM OS TEMAS DE CADA ARTIGO DE CADA REVISTA ANALISADA NA REVISÃO DA LITERATURA	115
APÊNDICE II – ROTEIRO DE TÓPICOS UTILIZADO NA PRIMEIRA AULA	149
APÊNDICE III – APRESENTAÇÃO DE SLIDES PARA AS AULAS 2, 3 E 4.	150
APÊNDICE IV – ROTEIRO PARA UTILIZAÇÃO DO IVMZ I.....	153
APÊNDICE V – APRESENTAÇÃO DE SLIDES USADA NA AULA 6.....	162
APÊNDICE VI – TEXTO DE APOIO PARA A OFICINA	164

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESCRIÇÃO

Este trabalho de mestrado tem por objetivo propor soluções para melhorar o ensino de física quântica em nível de Ensino Médio. Para alcançar este objetivo o trabalho dedica-se a propor, implementar e analisar uma unidade didática voltada ao ensino de conceitos fundamentais da física quântica, em especial, a dualidade onda-partícula.

No intuito de propor uma unidade didática voltada ao ensino de física quântica, uma série de questões precisa ser respondida. A primeira delas corresponde a uma questão de valor: por que é importante se ensinar física quântica no Ensino Médio? A esta pergunta, a seção de justificativa, presente na introdução deste trabalho, busca trazer algumas respostas.

Uma segunda questão refere-se ao processo de ensino-aprendizado. Afinal, como os alunos aprendem? A todo o processo de ensino subjaz uma resposta a esta pergunta. Em algumas situações, professores apenas repetem as formas de ensino que vivenciaram; o que torna ainda mais importante e urgente a reflexão sobre esta questão. Este trabalho não tem a pretensão de trazer uma resposta definitiva e completa sobre esta questão, uma área extremamente complexa que envolve as dimensões psicológicas, sociais, culturais e afetivas dos alunos, sendo também palco de disputas entre distintas correntes teóricas, mas traz ao longo do capítulo de referencial teórico-metodológico partes de uma possível resposta, baseada em um referencial sociocultural fundado nas ideias de Vygotsky.

Finalmente, uma terceira questão consiste em determinar como transpor o conhecimento sobre a forma de aprendizagem dos estudantes para a escolha das estratégias utilizadas na unidade didática. Para responder a esta questão, a revisão da literatura desenvolvida para este trabalho analisa os principais artigos publicados sobre ensino de física quântica ao longo dos últimos anos. A leitura e análise desses artigos possibilitam importantes *insights* sobre como estruturar a unidade didática. Dentre os artigos de revisão da literatura, aqueles que apresentam resultados de intervenções em sala de aula recebem especial atenção por indicarem erros e acertos de outras propostas didáticas, servindo como importante fonte de inspiração para as estratégias aqui adotadas.

Durante a preparação da unidade didática, também foi decidido o modelo de implementação a ser adotado. Escolheu-se pelo modelo de oficina extracurricular. Esta escolha deve-se ao interesse em se formar uma turma reduzida e com alunos que

estivessem interessados no tema. A escolha pelo Colégio Israelita Brasileiro deve-se ao fato de que o autor deste trabalho havia estudado na instituição, que a escola mostrou-se aberta à proposta e já mantinha previamente um espaço para aulas extracurriculares de física e que um dos professores de física da instituição, ao ser convidado para participar do projeto, aceitou.

Na etapa de implementação do projeto, fez-se necessário a organização e preparação dos materiais de todas as aulas: roteiros, textos de apoio, demonstrações experimentais, apresentações de *slides*, além da organização de uma visita a laboratórios de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). No capítulo quatro estão descritas as aulas da unidade; os diversos materiais preparados para a unidade didática foram colocados nos apêndices.

Uma vez preparada e aplicada a unidade didática, procedeu-se à análise dos resultados. A avaliação dos resultados da unidade didática buscou identificar se e como as aulas possibilitaram a aprendizagem dos alunos. Os elementos a serem avaliados para determinar se houve aprendizagem dependem do referencial teórico e metodológico adotado. Neste trabalho algumas das questões que buscaram ser respondidas a partir da análise dos resultados foram:

- a) Os alunos mostraram se interessar e aproveitar as aulas?
- b) Os alunos apresentaram um desenvolvimento no domínio do conceito de dualidade onda-partícula?
- c) E em relação ao efeito fotoelétrico, ao princípio da incerteza, ao comportamento das ondas e ao comportamento das partículas?
- d) Como as ferramentas de mediação (roteiros, simulações, aparatos experimentais, apresentações de *slides*, entre outros) influenciaram a ação e a aprendizagem dos alunos?
- e) Os professores ou algum dos alunos assumiram o papel de parceiro mais capaz ao longo da aplicação da unidade e como isto influenciou a aprendizagem dos envolvidos?

Para responder a estas questões foi utilizada uma análise do discurso baseada na filosofia da linguagem de Bakhtin. Os elementos da teoria de Bakhtin utilizados para a análise são descritos no capítulo de referencial teórico-metodológico. A análise do discurso encontra-se no capítulo de descrição e análise dos resultados. No capítulo de conclusão, são apresentados os principais resultados deste trabalho e propostas para prosseguimento da pesquisa sobre ensino de física quântica em nível de Ensino Médio.

1.2 JUSTIFICATIVA

A física quântica constitui-se como a mais importante teoria no campo da Física desenvolvida durante o século XX. Ela introduziu indeterminismo, probabilidades e não-localidade entre os conceitos fundamentais para a compreensão de diversos fenômenos da natureza (Müller & Wiesner, 2002). Ao mesmo tempo, ela tornou possíveis diversas novas tecnologias. Microprocessadores, lasers e lâmpadas de LED são alguns dos exemplos. Ao menos nos próximos anos, pode-se esperar que outros novos e importantes equipamentos sejam desenvolvidos com base na teoria quântica. Como afirmou Richard Feynman certa vez: *há muito espaço lá embaixo*.

Ao mesmo tempo em que impacta no modo como compreendemos e nos relacionamos com o mundo, a física quântica tem se mostrado um importante motivador aos jovens para a escolha da Física como carreira. Stannard (1990, citado por Ostermann & Moreira, 2000) e Kalmus (1992, citado por Ostermann & Moreira, 2000), em pesquisas com estudantes de física em seus países, mostraram que temas de física moderna foram listados como as principais razões para que escolhessem estudar Física em nível superior. Pode-se especular que este potencial motivador da física quântica deva-se aos seus resultados muitas vezes surpreendentes e contraintuitivos, a sua grande presença na mídia em função de temas como energia atômica e o bóson de Higgs e por se mostrar uma teoria promissora, tanto para descobertas teóricas como para aplicações tecnológicas.

Diversos autores da área de ensino de física têm defendido o ensino de temas de física moderna no Ensino Médio. Na III Conferência Interamericana sobre Educação em Física (Barajas, 1998, citado por Ostermann & Moreira, 2000) foi organizado um grupo para discutir o ensino de física moderna que apontaram uma série de motivos para o ensino destes tópicos. Outros autores que defendem esta inserção são: Torre (1998, citado por Ostermann & Moreira, 2000), Terrazan (1992, 1994, citado por Ostermann & Moreira, 2000), Stannard (1990, citado por Ostermann & Moreira, 2000), Kalmus (1992, citado por Ostermann & Moreira, 2000).

Apesar deste consenso na literatura sobre a importância do ensino de física quântica no Ensino Médio, ainda são poucos os trabalhos que apresentam propostas didáticas testadas no Brasil. Em artigo de revisão da literatura feito por Ostermann e Moreira (2000) apenas um artigo sobre ensino de física quântica foi encontrado; nele, Pinto e Zanetic desenvolvem uma unidade didática em uma escola de São Paulo (1999, citado por Ostermann & Moreira, 2000). Em uma revisão da literatura posterior, Pereira e Ostermann (2009) encontraram entre periódicos nacionais e internacionais, entre os anos de 2000 e 2006, cinco trabalhos apresentando resultados de experiências didáticas sobre Física Quântica no Ensino Médio (Silva & Kawamura, 2001; Paulo & Moreira,

2004; Ostermann & Moreira, 2004; Machado & Nardi, 2006; Köhnlein & Peduzzi, 2005 citado por Pereira & Ostermann, 2009).

A importância da física quântica para a física e para a sociedade, suas características que a tornam ao mesmo tempo estranha e fascinante, seu potencial de encantar os alunos e o fato de que são ainda poucas as experiências de pesquisa em ensino de física quântica no Ensino Médio brasileiro justificam a importância da realização deste trabalho. Desejo a todos uma boa leitura.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão da literatura tem o objetivo de apresentar um panorama atual da pesquisa em ensino de física moderna, com ênfase no ensino de física quântica, tema central deste trabalho. Com este intuito, foram revisados os principais periódicos da área no período de 2007 a 2012¹. A escolha deste período possibilita uma continuidade em relação às revisões de Ostermann e Moreira (2000) e de Pereira e Ostermann (2009).

2.1 PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ARTIGOS

A definição dos periódicos relevantes para a revisão baseou-se na classificação Qualis da Capes de 2011. Foram selecionados os periódicos, tanto nacionais quanto internacionais, que obtiveram classificação A1, A2 ou B1 na área de Ensino e que tratam de temas de ensino de Física ou ensino de Ciências. A partir deste critério, determinaram-se vinte e três revistas de interesse, das quais duas não estavam disponíveis no portal de periódicos da Capes e nem na modalidade impressa, decidindo-se por não revisá-las (*Research in Science and Technological Education* e *Historical Studies in the Natural Sciences*). Assim, delimitou-se a revisão a vinte e um periódicos, sendo sete brasileiros (*Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Ciência e Educação*, *Ensaio: Pesquisa em educação em Ciências*, *Investigações em Ensino de Ciências*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências* e *Scientiae Studia*), nove em língua inglesa (*American Journal of Physics*, *Cultural Studies of Science Education*, *International Journal of Science Education*, *Physics Education*, *Science & Education*, *Science in Context*, *Science, Technology and Society*, *Scientiae Studia* e *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*) e cinco em língua espanhola (*Enseñanza de las Ciencias*, *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, *Revista de Enseñanza de la Física*, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* e *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*).

Na etapa seguinte, todas as revistas selecionadas foram visitadas em seus endereços eletrônicos e todos os artigos publicados por elas no período foram classificados em função de seu conteúdo. Desta forma, os artigos foram classificados em nove categorias: Mecânica, Eletromagnetismo, Óptica e Oscilações, Termodinâmica e Mecânica Estatística, Astronomia, Física Quântica, outros tópicos de física moderna, outros temas de Física ou de Ensino de Física e de outras disciplinas. A classificação atribuída aos artigos baseou-se nos títulos, nas palavras-chave e nos resumos.

¹ Há algumas exceções. Alguns poucos trabalhos que estão fora desse período foram revisados, em função de sua importância.

Neste período, foram publicados nos periódicos selecionados um total de 5.454 artigos, dos quais 3.058 abordaram tópicos da área da Física ou Ensino de Física (total de artigos, excluindo-se os classificados como outras áreas) e 637 abordaram tópicos de física moderna ou ensino de física moderna (soma dos artigos classificados como física quântica e outros tópicos de física moderna). A Tabela 1 apresenta o número de artigos publicados em cada revista, quantos tratam de tópicos de Física ou Ensino de Física e quantos tratam de tópicos de física moderna. No Apêndice I estão disponíveis as tabelas que detalham os assuntos de cada artigo por número e volume de cada periódico.

Tabela 1: Total de artigos publicados em cada revista selecionados em função do conteúdo.

Revista	Artigos	Física	Física Moderna
American Journal of Physics	945	933	226
Caderno Brasileiro de Ensino de Física	194	183	21
Ciência e Educação	251	40	8
Cultural Studies of Science Education	141	7	2
Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências	141	28	2
Enseñanza de las Ciencias	176	38	5
International Journal of Science Education	595	115	10
Investigações em Ensino de Ciências	136	33	4
Physics Education	691	690	59
Revista Brasileira de Ensino de Física	417	391	81
Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	132	39	4
Revista de Enseñanza de la Física	70	67	6
Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias	266	66	8
Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias	57	13	3
Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias	233	59	4
Science & Education	331	107	21
Science Education International (Online)	120	12	2
Science in context	137	13	2
Science, Technology and Society	95	6	4
Scientiae Studia	133	28	14
Studies in history and philosophy of Modern Physics	193	190	151
TOTAL	5.454	3.058	637

Na classificação dos artigos em função de seus conteúdos, escolheu-se atribuir a cada artigo apenas uma categoria. Mesmo existindo diversos artigos que apresentavam características que possibilitavam enquadrá-los em mais de uma categoria, por questões de simplicidade buscou-se classificá-los de acordo com o tema que aparecia de forma mais enfática. Na contagem e classificação dos artigos de cada revista, consideraram-se apenas os artigos propriamente ditos, descartando-se editoriais, notícias, resumos de teses e textos de opinião eventualmente publicados nos diversos periódicos.

Tabela 2: Número de artigos selecionados de cada revista.

Revista	Física Moderna	Pré-Seleção	Seleção Final
American Journal of Physics	226	13	10
Caderno Brasileiro de Ensino de Física	21	16	7
Ciência e Educação	8	7	3
Cultural Studies of Science Education	2	0	0
Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências	2	2	2
Enseñanza de las Ciencias	5	3	0
International Journal of Science Education	10	2	2
Investigações em Ensino de Ciências	4	3	3
Physics Education	59	21	10
Revista Brasileira de Ensino de Física	81	22	5
Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	4	4	1
Revista de Enseñanza de la Física	6	2	2
Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias	8	8	4
Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias	3	3	2
Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias	4	3	0
Science & Education	21	16	3
Science Education International (Online)	2	1	0
Science in context	2	0	0
Science, Technology and Society	4	0	0
Scientiae Studia	14	7	0
Studies in history and philosophy of Modern Physics	151	10	0
TOTAL	637	143	54

Uma vez determinado o universo de artigos sobre física moderna publicados, procedeu-se a um novo processo de seleção entre os textos. Foram selecionados para a revisão trabalhos que analisavam as concepções dos alunos de diversos níveis sobre tópicos de física quântica, revisões de livros didáticos, artigos e roteiros, propostas didáticas inovadoras (que envolvessem o uso de simulações ou que foram testadas em sala de aula) e textos didáticos com viés histórico, filosófico ou conceitual. Neste processo, foram excluídos muitos trabalhos que apresentavam soluções matemáticas para problemas de física quântica (Barbero *et al.*, 2008), propostas experimentais sem uma fundamentação teórica que justificasse sua importância (por exemplo, Blanco *et al.* (2008)), trabalhos sobre relatividade e outros tópicos de física moderna que não interessavam a esta revisão (por exemplo, Ayala (2010)), discussões sobre filosofia e história da física quântica que tratavam sobre temas não discutidos neste trabalho (por exemplo, Bacciagaluppi (2007)), entre outros. Esse processo diminuiu o número de artigos a serem revisados de 637 para 143. Entre os 143 artigos restantes, um novo processo de filtragem foi realizado. Esse processo selecionou artigos que avaliavam as concepções dos estudantes, revisões de livros e revistas, propostas didáticas testadas em sala de aula ou que envolviam o uso de simulações, além de outros artigos considerados especialmente interessantes. Nesse processo, diminuiu-se o número de artigos para 54. A Tabela 2 apresenta o número de trabalhos selecionados por revista nas duas etapas de seleção.

Dentre os artigos escolhidos na seleção final, 25 são oriundos de revistas de língua inglesa, 21 são oriundos de revistas brasileiras e oito são oriundos de revistas de língua espanhola. Além desses trabalhos, outros três artigos publicados fora do período analisado foram incluídos por sua importante relação com o tema desta pesquisa. Apesar do grande número de trabalhos que tratam de temas de física moderna, as revistas voltadas para tópicos de história e filosofia da ciência (*Scientiae Studia* e *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*) não tiveram nenhum artigo na seleção final por todos os seus artigos terem sido classificados como textos de apoio ao professor, aprofundando discussões ou esclarecendo temas de história e filosofia da ciência. A fim de organizar a apresentação dos artigos selecionados, os mesmos foram classificados em três linhas: análise de concepções dos estudantes, revisões bibliográficas e propostas didáticas. Em função do grande número de trabalhos classificados como propostas didáticas, esta linha ainda foi subdividida em indicações didáticas, propostas experimentais, propostas envolvendo TIC's (Tecnologias de Informação e Comunicação), propostas de inserção de temas de cunho filosófico ou CTS e propostas Teórico-Conceituais. A seguir, serão detalhadas cada uma dessas categorias.

2.2 ANÁLISES DE CONCEPÇÕES

Nesta revisão da literatura foram encontrados dez artigos que analisam as concepções de estudantes de diversos níveis de ensino ou de outras pessoas em relação a tópicos de física quântica. Destes, cinco artigos investigam as concepções de estudantes do ensino superior (Barros & Bastos, 2007; Montenegro & Pessoa Jr., 2002; Pereira *et al.*, 2009a; Singh, 2008b; Wuttiptom *et al.*, 2009; Zhu & Singh, 2012), três as concepções de alunos do ensino médio (Coelho & Borges, 2010; Medeiros & Lobato, 2010; Park & Light, 2009) e um se refere às representações sociais da física quântica na sociedade em geral (Moreira *et al.*, 2009).

Moreira *et al.* (2009) apresentam resultados preliminares de uma pesquisa sobre representações sociais da física quântica. Em uma das etapas da pesquisa, os autores buscaram entre os usuários de um *site* de ensino de Física as dez palavras que estes mais associavam à física quântica. Foram analisadas cerca de 2000 respostas. As palavras mais associadas foram: Alma, Espiritualidade, física quântica, Incerteza, Partícula, Pensamento, Probabilidade, Quantum, Sobrenatural e Sucesso. Estes resultados evidenciam a repercussão que temas relacionados ao misticismo quântico podem gerar em contextos sociais externos ao meio acadêmico. Medeiros e Lobato (2010) analisaram o conhecimento de estudantes do ensino médio acerca de radiações. Embora esse tema não tenha uma relação tão estrita com o que se considera modernamente como *fundamentos da física quântica*², é interessante citá-lo por ele evidenciar a influência extraescolar nas concepções dos alunos sobre certos temas da ciência. Antes de aplicarem uma unidade didática sobre o assunto, os autores buscaram investigar os conhecimentos dos alunos sobre o tema. Todos os alunos mostraram já ter ouvido falar sobre o tema, sendo a escola e a televisão as fontes de informação mais citadas. Neste levantamento de concepções a maioria dos alunos (82%) associou a radiação a malefícios à saúde humana ou ao ambiente, o que talvez possa ser explicado pelo fato de que os veículos de comunicação mais populares apresentem o termo radiação associado a acidentes nucleares e outros riscos à saúde. Dado que ambos os trabalhos evidenciam influências extraescolares na formação das concepções acerca de tópicos de física moderna, é lícito concluir que o professor deve conhecer tais influências e considerá-las em seus projetos didáticos. Nesses trabalhos, os fundamentos da física

² De forma muito simplificada, serão considerados como *fundamentos da física quântica* aqueles conceitos diretamente relacionados aos conceitos centrais que deflagraram o que Alain Aspect denomina de *primeira e segunda revoluções da física quântica*: a dualidade onda-partícula e o emaranhamento quântico, respectivamente (Aspect, 2006). Podem-se enquadrar nesses fundamentos conceitos como estados quânticos (puros e mistos), superposição quântica, interferência quântica, complementaridade, princípio da incerteza, teoria da medição, desigualdades de Bell e outros. As diversas interpretações e os postulados da física quântica também fazem parte da discussão sobre seus fundamentos.

quântica não são detalhadamente discutidos, pois seus respectivos escopos não se concentram nisso.

Park e Light (2009) realizaram uma pesquisa com alunos de Ensino Médio sobre a estrutura atômica. Foram feitos pré e pós-testes em uma unidade didática sobre o tema com 20 alunos, e foram selecionados três destes para entrevistas. A partir de seus resultados, os autores defendem que os conceitos de quantização de energia e probabilidade de encontrar o elétron no espaço são fundamentais para que os alunos possam transformar seus modelos de átomo desde concepções mais simples até a concepção quântica. Eles também apontam a grande influência do modelo atômico de Bohr, com os elétrons orbitando o núcleo, nas concepções dos estudantes. Nesse trabalho há ênfase em um dos fundamentos da física quântica, que é a interpretação física probabilística do módulo quadrado da função de onda que descreve o elétron no átomo.

Coelho e Borges (2010) realizaram uma pesquisa com alunos do terceiro ano do Ensino Médio no qual buscaram investigar as concepções dos estudantes sobre a natureza da luz. Os autores classificaram as concepções em cinco categorias, sendo cada categoria dividida em até três subcategorias. Essas categorias englobam os modelos corpuscular, ondulatório e dual, além de variações dos mesmos ou outras concepções sobre a luz. No pré-teste, predominou a concepção ondulatória ou corpuscular, com estudantes apresentando algumas inconsistências teóricas nas suas explicações (por exemplo, fazendo uso implícito de modelos híbridos sobre a natureza da luz). Os autores indicam que este resultado pode ser devido à influência de conteúdos estudados em anos anteriores do Ensino Médio. Vale ressaltar que os autores consideram o modelo cientificamente aceito simplesmente como sendo dualístico, sem discutir detalhadamente o que vem a ser esse comportamento dualístico e sem considerar que a afirmação de que a luz é dual depende da interpretação (há interpretações na física quântica que não são dualistas). Os autores afirmam ainda que “em algumas circunstâncias, [o comportamento da luz] é explicado pelo modelo ondulatório eletromagnético e [em outras pelo] modelo corpuscular com a hipótese do fóton” (sic) (Coelho & Borges, 2010, p. 74), explicitando uma visão muito imprecisa da dualidade onda-partícula, aparentemente vinculada à velha física quântica³. Os autores parecem considerar que a hipótese do fóton é empregada apenas para explicar o comportamento corpuscular da luz. Na verdade, não é adequado falar em modelos corpuscular ou

³ Considera-se, neste trabalho, a velha física quântica como aquela que engloba as teorias que explicavam os fenômenos da radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, efeito Compton e outros, incluindo ainda os modelos do átomo de hidrogênio postulados por Bohr e Sommerfeld. Essas teorias foram propostas nas duas primeiras décadas do século XX, antes da física quântica ser formalmente desenvolvida por Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Von Neumann e outros.

ondulatório, mas em comportamentos corpuscular ou ondulatório. Rigorosamente falando, o fóton deve sempre ser parte do modelo teórico criado para representar a luz, independente se o caráter apresentado é ondulatório ou corpuscular – ao menos nas interpretações dualistas, é o fóton que apresenta comportamento dual.

Como constatado, os estudos com alunos do Ensino Médio, até aqui citados, privilegiam o ensino de física clássica e tópicos da citada velha física quântica, sem abordar mais profundamente os fundamentos da física quântica. Neste sentido, a unidade didática desenvolvida neste trabalho buscará justamente tratar alguns aspectos da nova física quântica buscando possibilitar aos alunos que desenvolvam uma concepção mais moderna em relação à ontologia dos objetos quânticos.

Barros e Bastos (2007) realizaram um levantamento de concepções em relação a tópicos de mecânica quântica, em especial sobre a dualidade onda-partícula, envolvendo alunos de licenciatura em Física que já haviam cursado disciplinas de física moderna. Entre os resultados obtidos, notou-se que os estudantes muitas vezes confundem conceitos da óptica geométrica com os da óptica física, não levam em conta o comportamento dual de fótons e elétrons, considerando apenas seu caráter corpuscular, desconhecendo ainda, quase que completamente, as interpretações da mecânica quântica.

Pereira *et al.* (2009a) também realizaram um levantamento de concepções relativas à dualidade onda-partícula com estudantes de licenciatura em Física. Os autores elaboraram, validaram e aplicaram um teste com 16 questões de múltipla escolha sobre o tema. A partir da análise das respostas, os autores indicam que muitos estudantes tendem a tratar os elétrons como partículas clássicas e tiveram extrema dificuldade na compreensão do comportamento do fóton na presença de um detector não-demolição, o que aponta para uma lacuna dos estudantes na compreensão do conceito de medição em física quântica.

Essa lacuna sobre o conceito de medição na física quântica é evidenciada também no trabalho de Montenegro e Pessoa Jr. (2002) que também se concentra na linha dos fundamentos da física quântica, em especial nas suas interpretações. Apesar dele ter sido publicado em 2002 (fora do período analisado com mais ênfase), não se pode deixar de citá-lo aqui. Nesse trabalho os autores organizam as principais interpretações da física quântica em quatro grandes grupos, segundo sua vertente epistemológica (realista ou positivista) e ontológica (dualista, corpuscular ou ondulatória). Tendo como sujeitos de pesquisa alunos de cinco turmas de graduação e três turmas de pós-graduação, os mesmos respondem a questionários contendo perguntas abertas e fechadas, relativas ao experimento da dupla fenda, princípio da incerteza, interpretação do estado quântico, retrodição e postulado da projeção. Algumas entrevistas também

foram realizadas. Os resultados explicitam diversos aspectos importantes. Entre eles: (1) há uma falta de coerência nas interpretações privadas dos alunos, que evidenciam contradições nas suas falas; (2) é comum mudar a interpretação privada em função do problema estudado; (3) aparecem ambiguidades em respostas dos alunos; (4) há uma defesa da interpretação ortodoxa sem que se adote essa mesma interpretação nas situações indagadas; (5) há negligência em tratar a teoria da medição na física quântica. Outro resultado importante é a necessidade que os alunos revelam em representar mentalmente os objetos quânticos como corpúsculos, embora também considerem que os mesmos podem ser deslocalizados. Isso mostra uma tendência em adotar interpretações privadas consistentes com as realistas, apesar de boa parte desses alunos também aceitarem a interpretação de Copenhague, de cunho epistemológico positivista e ontologia dualista.

Os trabalhos de Barros e Bastos (2007) e de Pereira *et al.* (2009a) também apontam para uma tendência dos estudantes tratarem fótons e elétrons como partículas clássicas. Neste sentido, ao tratar da dualidade onda-partícula na unidade didática a ser desenvolvida buscaremos apresentar a ocorrência dos comportamentos ondulatórios e de partícula tanto para elétrons como para fótons, enfatizando o comportamento dual apresentado pelos objetos quânticos. Assim, no sentido de criar uma sensação de desconforto inicial nos alunos, de partida se fará a escolha de adotar uma ontologia dualista para o objeto quântico.

Ainda na linha dos testes de concepções, Wuttiptom *et al.* (2009) construíram, validaram e aplicaram um teste com alunos do primeiro e segundo anos de graduação em uma universidade de Sidney, consistindo de um teste de múltipla escolha sobre conceitos de física quântica, tratando de tópicos como efeito fotoelétrico, comprimento de onda de De Broglie, experimento da dupla-fenda e dualidade onda-partícula. Os autores encontraram que tanto os alunos do primeiro quanto do segundo ano apresentaram melhoria significativa em seu desempenho entre o pré e o pós-teste, indicando que o uso da instrução tradicional não necessariamente impede que melhorem sua compreensão conceitual sobre os temas tratados. Os autores ainda apontam que, entre os alunos do segundo ano, alguns tópicos que não foram revisitados entre o pré e o pós-testes não apresentaram melhoria (efeito fotoelétrico e experiência de dupla-fenda).

Em outro teste de concepções, Singh (2008b) apresenta os resultados de sua aplicação no início de disciplinas de física quântica em sete universidades americanas. O teste trata da relação entre o formalismo da física quântica e sua relação com os conceitos que este representa, focando-se especialmente na equação de Schrödinger. Os resultados do teste apontam que os alunos apresentaram algumas dificuldades relativas especialmente à equação de Schrödinger dependente do tempo, muitas vezes

“esquecida” por eles. Os autores indicam que este fato pode ser devido à grande ênfase colocada na equação de Schrodinger independente do tempo, em especial à relação $\hat{H}\psi = E\psi$, onde \hat{H} é o operador hamiltoniano, E é a energia e ψ é a função de onda. Novamente os resultados mostram que os estudantes têm dificuldades em compreender a teoria da medição na física quântica.

Também dando destaque ao formalismo matemático, Zhu e Singh (2012) apresentam e discutem os resultados de outro teste aplicado a mais de 200 estudantes de 10 universidades americanas que já haviam estudado pelo menos um semestre de física quântica. O enfoque desse teste é o mesmo de Singh (2008b). Os autores apontam que, mesmo no caso de já terem participado de cursos avançados de física quântica, os alunos ainda apresentavam dificuldades em diversos tópicos da área. Um dos problemas conceituais mais comuns apresentados pelos estudantes era considerar que a atuação do operador Hamiltoniano sobre o estado de um sistema representa uma medição da energia do sistema, novamente evidenciando problemas em entender a teoria da medição na física quântica.

Como esperado, os trabalhos revisados que trazem análises de concepções dos estudantes apontam que alunos de todos os níveis de ensino apresentam diversos problemas em entender conceitos fundamentais de Física Quântica. Desta forma, o desenvolvimento e aprimoramento de unidades didáticas para o ensino de física quântica apresentam-se como importantes ferramentas no intuito de melhorar a compreensão dos alunos acerca de conceitos fundamentais dessa teoria. A unidade didática que foi desenvolvida neste trabalho (apresentada mais adiante) foi elaborada pautando-se em alguns desses trabalhos.

2.3 REVISÕES DA LITERATURA

Durante o processo de análise dos artigos, foram encontrados dois artigos que apresentam revisões da literatura sobre tópicos de física moderna. Dois trabalhos apresentam revisões de artigos, sendo que um trata de uma revisão sobre física moderna (Pereira & Ostermann, 2009) e o outro trata especificamente sobre o ensino de física quântica no Ensino Médio (Silva & Almeida, 2011).

Pereira e Ostermann (2009) fizeram uma revisão de artigos publicados em revistas das áreas de Ensino de Física e Ensino de Ciências. Os autores analisaram as publicações entre 2001 e 2006 em sete revistas nacionais e sete internacionais, encontrando 102 artigos voltados para o ensino de física moderna. Eles classificaram os artigos em quatro grandes categorias: propostas didáticas testadas em sala de aula, levantamento de concepções, bibliografia de consulta para professores e análise curricular. Os autores apontam que a maioria dos trabalhos concentrou-se na produção de bibliografia de consulta para professores. Entre os trabalhos que apresentam

propostas testadas em sala de aula, a maioria se preocupa com a análise dos conteúdos propostos e o rigor científico com que são apresentados. Desta forma, eles indicam a necessidade de avaliar a eficácia e adequação dos materiais bibliográficos produzidos e de intensificar investigações que analisem o processo de aprendizagem dos alunos em propostas didáticas sobre o tema.

Silva e Almeida (2011) também fizeram uma revisão bibliográfica em revistas da área de Ensino de Física e Ensino de Ciências, consultando artigos publicados nas revistas desde sua fundação até o ano de 2010, versando sobre física quântica no Ensino Médio. Foram encontrados 23 artigos sobre o tema, distribuídos em 11 revistas. Dezesesseis artigos foram classificados como elaboração e/ou aplicação de propostas de ensino. Entre suas conclusões, os autores apontam a necessidade de realização de mais trabalhos sobre o ensino de física quântica no Ensino Médio, alinhando-se ao que é proposto no trabalho de Pereira e Ostermann (2009).

Os trabalhos que apresentam revisão de artigos apontam para a necessidade de realização de mais trabalhos com propostas didáticas testadas em sala de aula. O presente trabalho enquadra-se justamente nesta categoria.

2.4 PROPOSTAS DIDÁTICAS

Nesta seção são apresentados e discutidos os artigos que apresentam propostas para a melhoria do processo de ensino e aprendizagem de física quântica. Foram classificados nesta categoria os artigos que apresentam propostas para o uso de simulações e experimentos, sugestões para a introdução de temas CTS, de história e filosofia da ciência, abordagens conceituais além de indicações sobre os conteúdos, estratégias teóricas e as metodologias que o professor deve utilizar no ensino de física quântica. Quarenta e quatro artigos foram classificados como propostas didáticas e, em função do grande número de trabalhos classificados nesta categoria, a mesma foi subdividida em cinco sub-categorias: indicações didáticas, propostas de laboratório, propostas de uso de TIC's, propostas de abordagens CTS ou de história e filosofia da ciência e propostas conceituais. Alguns trabalhos apresentam características de mais de uma categoria, neste caso eles foram discutidos apenas na categoria em que mais se encaixam.

2.4.1 Indicações didáticas

Paulo e Moreira (2011) refletem sobre o problema da linguagem no ensino de física quântica e, em especial, na introdução de tópicos de física quântica no Ensino Médio. Os autores defendem que no ensino de física quântica deve-se manter, na medida do possível, a linguagem clássica e alterar-se a lógica do pensamento a que os alunos estão acostumados, em geral arraigada aos conceitos clássicos. Os autores fazem

uma ressalva quanto a esta estratégia, no sentido de que a adoção da linguagem clássica deve ser feita com cuidado, buscando evitar excessos que possam se tornar obstáculos de natureza verbal, conforme reflexão presente na epistemologia de Bachelard.

Gianino (2008) sugere o ensino das relações de De Broglie no Ensino Médio a partir do uso de quatro exemplos: a partícula em uma caixa, o poço potencial finito, o átomo de hidrogênio e o oscilador harmônico. A vantagem desta abordagem, segundo o autor é a simplicidade matemática dos exemplos, compreensíveis no nível médio uma vez que não utilizam equações diferenciais, derivadas e integrais. Johansson e Milstead (2008) também apresentam uma proposta para o Ensino Médio que evita o uso de ferramentas matemáticas avançadas. Os autores sugerem o ensino conceitual do princípio da incerteza, utilizando-o para compreensão de fenômenos como difração em uma fenda e a energia do ponto-zero. Estes trabalhos apontam para a importância de se utilizar uma linguagem matemática adequada na introdução de tópicos de física quântica no Ensino Médio. Neste sentido, a proposta desenvolvida ao longo do presente trabalho buscou introduzir a física quântica de forma conceitual, exigindo poucos conhecimentos matemáticos.

2.4.2 Propostas experimentais

Dentre os artigos selecionados, cinco apresentam propostas experimentais para o ensino de física quântica. Silva e Assis (2012) apresentam um experimento de baixo custo para a demonstração do efeito fotoelétrico. O experimento foi chamado de “ouça seu controle remoto”.

Dimitrova e Weis (2008) e Pearson e Jackson (2010) apresentam experimentos que possibilitam visualizar o comportamento de fótons individuais. Os dois autores apresentam aparatos experimentais para a montagem de um interferômetro de Mach-Zehnder capaz de emitir poucos fótons por vez. Estes dois aparatos experimentais se destacam pela capacidade de evidenciar o caráter corpuscular da luz (por chegar em fótons individuais no anteparo) e o caráter ondulatório devido à formação de um padrão de interferência que é evidenciado após a chegada de um grande número de fótons no anteparo. Nessa mesma linha, cabe um destaque ao trabalho de Galvez *et al.* (2005), no qual os autores desenvolveram cinco experimentos de física quântica dirigidos a cursos de graduação (está fora do período analisado, mas ainda assim sua citação é importante no contexto do presente trabalho). Os experimentos cobrem assuntos importantes como interferência monofotônica e bifotônica, polarização de fótons, interferência e até mesmo uma proposta de experiência corroborando a existência do fóton (indivisibilidade). Além disso, foram realizados experimentos com fótons correlacionados que têm como objetivo o estudo do emaranhamento quântico. Em vários experimentos foi feito uso de um interferômetro de Mach-Zehnder. Apesar de os

experimentos serem bastante atraentes, o seu alto custo (entre catorze e trinta e cinco mil dólares) dificulta sua inserção em boa parte dos cursos de graduação em Física. Assim, uma alternativa viável para o estudo de fundamentos da física quântica seria recorrer a *softwares*, que podem simular experimentos semelhantes.

Anjos *et al.* (2008) propõem uma atividade experimental com um medidor de Geiger-Müller tradicional e barato para o ensino de radiações no Ensino Médio. Os alunos junto com os professores realizaram medições da radiação ionizante em diversos locais; em um barco, em um avião voando, em um jardim, entre outros. Estes experimentos possibilitam a discussão sobre diferentes fontes de radiação, tanto naturais quanto causadas pelo homem, além de questões relativas a potenciais riscos decorrentes da radiação e a relação com a intensidade das mesmas.

Os artigos com propostas de experimentos centrados no interferômetro de Mach-Zehnder têm estreita relação com os objetivos deste trabalho, pelo fato de que a unidade didática nele desenvolvida também se baseia na discussão sobre o papel do interferômetro de Mach-Zehnder na introdução de conceitos relacionados à dualidade onda-partícula, associado à boa parte dos principais fundamentos da física quântica. A proposta experimental que possibilita a demonstração do efeito fotoelétrico também foi relatada por apresentar um aparato simples e de baixo custo, capaz de evidenciar um importante fenômeno da gênese da teoria quântica. Finalmente a última proposta, que utiliza um medidor de Geiger-Müller, foi selecionada por apresentar uma proposta experimental testada em sala de aula. Outras propostas experimentais foram encontradas nas primeiras etapas da revisão, mas não foram apresentadas por trazerem experimentos sobre outros tópicos de física quântica que não os abordados neste trabalho.

2.4.3 Propostas para o uso de TIC's

Dentre os trabalhos analisados, nove artigos foram classificados como propostas para o uso de tecnologias da informação e comunicação para a introdução de tópicos de física moderna tanto para o ensino superior, como para o Ensino Médio. Nesta categoria, foram classificadas propostas para o uso de simulações, jogos de computador e portais educativos no ensino de física moderna, com ou sem resultados de testes em sala de aula. Cabe destacar que além dos artigos desta seção, diversos artigos categorizados como propostas CTS ou conceituais utilizam animações e simulações como ferramentas de apoio ao ensino.

Não se pode deixar de citar o trabalho de Müller e Wiesner (2002) – outro que está fora do período analisado – que desenvolveram um *software* que simula o interferômetro de Mach-Zehnder, o qual inspirou o que foi desenvolvido no nosso grupo

de pesquisa⁴. Nesse trabalho, os autores apresentam resultados obtidos em uma implementação didática de um curso introdutório de física quântica, no qual este e outros *softwares* foram utilizados. Os autores possuíam dados relativos às concepções dos estudantes, obtidos em um estudo prévio e formularam uma base conceitual no curso que centrava-se em alguns dos fundamentos da física quântica (por exemplo, a adequação de atribuir a propriedade “posição” a um fóton, teoria da medição quântica e outros). Ao avaliarem o curso, com base em dados obtidos por questionários e entrevistas, concluíram que o curso foi bem sucedido em prover condições aos estudantes quanto à compreensão dos conceitos abordados.

Seguindo uma linha similar aos trabalhos iniciais do nosso grupo de pesquisa (Ostermann *et al.*, 2006; Ricci *et al.*, 2007), Betz *et al.* (2009) propõem uma simulação para o interferômetro de Mach-Zehnder, produzida com o *software* Flash. Os autores diferenciam sua simulação de outras que simulam o Mach-Zehnder por apresentar o colapso do estado induzido pela medição. Eles apontam que, ao possibilitar a visualização do colapso, complementa-se a visualização realista do interferômetro facilitando a compreensão dos alunos. Há também uma “lupa” que permite visualizar de maneira detalhada o feixe de luz, observando-se, por exemplo, o trem de ondas. A simulação foi testada em uma aula com alunos do ensino superior. Estes alunos apontaram que o recurso da lupa revelou-se bastante útil. Os autores afirmam que adotam, de antemão, a interpretação de Copenhague para os fenômenos ocorridos dentro do interferômetro.

Gordon e Gordon (2010, 2012) apresentam dois jogos para a introdução de conceitos quânticos: o campo minado quântico e o *Schrödinger Cats and Hounds* (gatos e cães de caça de Schrödinger). O objetivo destes jogos é introduzir conceitos fundamentais da física quântica de forma divertida. O campo minado quântico possibilita a discussão dos conceitos de superposição, emaranhamento, da natureza probabilística da física quântica e do problema da medição. O jogo do Schrödinger Cats and Hounds possibilita a discussão dos conceitos de superposição, interferência construtiva e destrutiva, medição, emaranhamento, além de modelos para a dualidade onda-partícula e a decoerência. Este segundo jogo foi testado em duas situações, uma com alunos que não tinham nenhum contato prévio formal com a física quântica e outra com estudantes que haviam tido um dia de aulas de física quântica. Os alunos fizeram pré-teste, praticaram o jogo, recebendo explicações sobre suas regras e principais conceitos de física quântica envolvidos e, ao final, realizaram o pós-teste. Em ambos os

⁴ A versão inicial desenvolvida pelo nosso grupo de pesquisa possui mais recursos do que a versão de Müller e Wiesner. A versão atual, em fase de conclusão de remodelagem de interface, possui ainda mais recursos.

casos os alunos mostraram uma melhora no resultado, em especial nas questões relacionadas à interferência e superposição.

McKagan *et al.* (2008) propõem o uso de simulações sobre física quântica desenvolvidas pelo Physics Education Technology Project (PhET). São 18 simulações que tratam sobre tópicos de física quântica variados, incluindo simulações do efeito fotoelétrico, experiência da dupla fenda, tunelamento quântico, experimento de Stern-Gerlach e difração de elétrons. Os autores argumentam que as simulações são ferramentas importantes para que os alunos visualizem fenômenos que não podem ser vistos diretamente e para que construam modelos para compreendê-los. Ao realizar entrevistas com estudantes que utilizaram as simulações, os pesquisadores apontam a importância da interatividade das simulações para o engajamento dos estudantes e para que eles estabeleçam relações de causa e efeito (ao mudar os parâmetros da simulação, mudam-se os resultados observados). Outra alegada vantagem do uso de simulações é que elas permitem ao professor uma discussão mais qualitativa, uma vez que os cálculos necessários podem ser realizados diretamente pela simulação. No caso do tunelamento quântico, os autores propõem que o professor discuta primeiramente o comportamento de pacotes de onda e não das ondas planas, como geralmente é feito (em função da maior simplicidade matemática). Ao testar em sala de aula o uso da simulação do efeito fotoelétrico, os autores apontam que ela apresentou excelentes resultados. Em um curso com intenso uso de simulações os autores obtiveram grandes ganhos em aprendizagem dos alunos em comparação com uma unidade didática tradicional.

McKagan *et al.* (2009) propõem, aplicam e avaliam uma unidade didática elaborada a partir de resultados de pesquisa para o ensino do efeito fotoelétrico a alunos de engenharia. Nesta unidade, utiliza-se a simulação desenvolvida pelo PhET sobre o efeito fotoelétrico como importante ferramenta didática. Os pesquisadores estabeleceram duas metas de conhecimento como resultado da unidade didática: que os alunos conseguissem prever corretamente os resultados de experiências de efeito fotoelétrico e descrever como os resultados experimentais levam ao modelo corpuscular da luz. Na análise dos resultados, os autores apontam que a primeira meta foi alcançada enquanto os resultados da segunda meta foram ambíguos. Na mesma linha, Cardoso e Dickman (2012) também propõem, aplicam e testam uma unidade didática sobre o efeito fotoelétrico utilizando a simulação desenvolvida pelo projeto PhET. A unidade foi aplicada a alunos de Ensino Médio de uma escola de Minas Gerais, em um regime extracurricular, na qual participaram dez estudantes. A unidade foi composta por um pré-teste, elaboração de organizadores prévios, aplicação da simulação com roteiro de estudo, organizador explicativo e teste final, dentro de uma perspectiva ausubeliana. A partir da análise do teste final, os autores consideraram que a proposta trouxe bons resultados, sendo considerada potencialmente significativa. Ainda restrito ao efeito

fotoelétrico, Sales *et al.* (2008) propõem o uso de um jogo-simulação para o ensino desse tópico. O objeto de aprendizagem Pato Quântico possibilita diversas analogias com o fenômeno. Os autores propuseram e testaram uma atividade de modelagem exploratória baseada nas ideias sobre aprendizagem significativa de Ausubel. A atividade foi realizada com 32 alunos do ensino médio de uma escola no Ceará, na qual alunos primeiramente aprenderam sobre o efeito fotoelétrico para depois utilizarem o Pato Quântico para determinar o valor da constante de Planck. A partir da análise dos resultados da atividade os autores consideraram que a mesma possibilitou uma aprendizagem significativa sobre o efeito fotoelétrico pelos alunos.

Kohnle *et al.* (2012) propõem o uso de simulações para o ensino de física quântica em nível de graduação. Os autores desenvolveram mais de 40 simulações sobre diversos tópicos de física quântica, como o modelo atômico de Bohr, princípio da incerteza, efeito fotoelétrico e poço de potencial quadrado infinito. Uma das vantagens apontadas para o uso destas simulações é a disponibilidade de um “passo-a-passo” em cada uma, para auxiliar a exploração das mesmas. Uma experiência com alunos do segundo ano de cursos de graduação foi realizada e foram comparados os resultados obtidos em um teste de múltipla escolha entre alunos que haviam utilizado as simulações e aqueles que não o haviam feito. Na maioria das questões, os alunos que haviam utilizado simulações obtiveram melhores resultados.

Singh (2008a) propõe o uso de tutoriais interativos para o ensino de física quântica. O autor desenvolveu e avaliou tutoriais interativos para a aprendizagem de física quântica (QuILTs, na sigla em inglês) voltados para alunos de graduação. Estes tutoriais geralmente utilizam animações e simulações para ajudar os estudantes a compreenderem conceitos de física quântica e são sempre acompanhados de pré e pós-testes para cada tópico. Os autores apontam que estes tutoriais podem ser utilizados em aula como suplementos às explicações do professor ou como lições para os estudantes realizarem em casa. O autor indica que pedir ao aluno que prediga o resultado de uma simulação e depois compare com os resultados pode ser importante para que ele reflita sobre o que está sendo visualizado. Cabe destacar que os tutoriais utilizam simulações desenvolvidas por outros autores. Em uma avaliação preliminar desses tutoriais, os autores apontam que os estudantes obtiveram excelente ganho entre os pré-testes e os pós-testes, que cobriam temas como evolução temporal da função de onda, princípio da incerteza e interferômetro de Mach-Zehnder.

Nota-se que o ensino dos fundamentos da física quântica tem um espaço destacado nessa classe de trabalhos. Chama a atenção também o grande número de propostas de uso de simulações e jogos sobre o efeito fotoelétrico, que parecem se justificar pela importância histórica do experimento no desenvolvimento da teoria

quântica e pela simplicidade teórica do experimento que possibilita a compreensão do modelo de luz como composta por *quanta*.

2.4.4 Abordagem CTS e aspectos filosóficos

No intuito de se afastar do ensino tradicional, alguns autores propõem abordagens ao ensino de física quântica que envolvam questões de história e filosofia da ciência ou abordagens que integram Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). Dentre os trabalhos analisados, oito foram classificados nesta categoria.

Oon e Subramaniam (2009) propõem que o uso de tópicos de história da ciência podem ser ferramentas efetivas para sustentar o interesse e o entusiasmo dos alunos na sala de aula. Neste sentido, eles apresentam texto de apoio ao professor apontando aspectos do desenvolvimento das teorias sobre a luz desde a antiguidade até os dias atuais. Em tom enigmático, os autores apontam que a verdadeira natureza da luz talvez ainda esteja por ser descoberta.

Solbes e Sinarcas (2010) apresentam uma proposta didática para o ensino de física quântica no Ensino Médio. Partindo de dificuldades apresentadas por alunos na aprendizagem de física quântica, os autores apresentam uma unidade didática que envolve aspectos conceituais, históricos e CTS para o ensino. Entre as dificuldades encontradas pelos alunos na compreensão da física quântica, os autores destacam: não perceber a necessidade de rompimento com os modelos clássicos, não relacionar o salto de um elétron entre dois níveis quânticos com uma cor no espectro, interpretar o fóton e o elétron como partículas clássicas, dificuldades na interpretação da dualidade onda-partícula e das relações de incerteza de Heisenberg, não perceber as relações entre a teoria quântica e aplicações tecnológicas, entre outros. Os autores propõem uma unidade didática que inicie com o efeito fotoelétrico, passando pelos espectros atômicos e o átomo de Bohr, a difração de elétrons, as relações de incerteza de Heisenberg, a função de onda e os níveis de energia, chegando até às aplicações da física quântica. Nessa proposta, cabe destacar a descrição de diversas atividades para o professor aplicar em sala de aula com a justificativa de sua inserção e comentários. O professor interessado em aplicar essa proposta poderia diretamente preparar e aplicar as atividades descritas. Em relação ao efeito fotoelétrico, por exemplo, os autores apresentam nove atividades, que poderiam ser aplicadas em ordem. Nas primeiras atividades, foca-se no comportamento esperado classicamente para o efeito fotoelétrico, contrastando-os com os resultados obtidos até chegar à proposta de Einstein (Atividades 1 a 4). Nas atividades 5 a 8 são propostas aplicações matemáticas do efeito fotoelétrico e o uso de simulações. A atividade nove finaliza o estudo do tema propondo relações entre o conteúdo científico e aplicações tecnológicas. Nesse trabalho, novamente percebe-se uma hegemonia da velha física quântica.

Kortemeyer e Westfall (2009) apresentam um curso de história da física moderna. Os autores descrevem e analisam duas aplicações do curso; uma realizada dentro do Campus em uma sala de aula tradicional e outra realizada na Europa, com aulas em diversas cidades. Esses cursos foram ministrados conjuntamente por dois professores, um historiador da ciência e outro físico. Na parte ministrada pelo historiador, a aula focava-se na vida e no contexto histórico em que se deu a construção da física moderna, enquanto na parte ministrada pelo físico, focava-se em palestras sobre física e demonstrações experimentais. Os alunos que participaram dos cursos responderam a um questionário do tipo “escala Likert”, sobre crenças epistemológicas em relação à física e os resultados foram comparados com os de estudantes que participaram em cursos tradicionais de introdução à física. Na maioria das questões a diferença entre as respostas dos estudantes de cursos tradicionais e os desses cursos não foram significativamente diferentes, mas em algumas questões houve diferença estatisticamente significativa, de modo que aqueles que participaram do curso de história da física moderna tiveram opiniões mais coerentes com as opiniões de especialistas da área.

Paraskevopoulou e Koliopoulos (2011) apresentam e analisam uma unidade didática para o ensino sobre a natureza da ciência baseada na disputa entre Millikan e Ehrenhaft. A unidade é composta de 7 aulas de 1 hora. Ao longo da unidade, os autores utilizam elementos da discussão entre Millikan e Ehrenhaft sobre a quantização da carga elétrica para trazer questionamentos acerca do papel da experiência, da imaginação e das hipóteses iniciais no fazer científico. A partir de um pré e de um pós-teste foi avaliada a evolução na concepção de ciência dos estudantes e os resultados mostraram que houve uma melhora significativa na concepção dos estudantes em relação aos aspectos da natureza da ciência ensinados.

Kapon *et al.* (2009) realizaram um curso para professores de Ensino Médio sobre os principais tópicos de física moderna que fazem parte do currículo obrigatório em Israel. O curso teve duração de 19 semanas com 3 horas de encontro em cada semana. Dentro do curso, os autores incluíram três palestras públicas sobre temas contemporâneos da física, relacionando cada pesquisa atual com um dos temas do currículo obrigatório; relacionado ao tema de partículas elementares. Os autores propõem que estes tópicos contemporâneos da pesquisa atual também podem ser ensinados no Ensino Médio, desde que devidamente contextualizados e explicados em conexão com os tópicos obrigatórios. Os autores consideram que a inclusão destes temas seja uma forma de se ensinar sobre a natureza da ciência e desenvolver a argumentação.

Nashon *et al.* (2008) defendem o ensino de história e filosofia da ciência, bem como de aspectos CTS, nas aulas de física e, em especial, no ensino de física quântica. A defesa destes aspectos é realizada em um referencial teórico enfocando o modelo tradicional de mudança conceitual. Nesse contexto, os autores realizaram uma pesquisa com professores em formação, questionando quais aspectos da física quântica poderiam ser ensinados usando abordagens centradas na história e filosofia da ciência e quais seriam as possíveis vantagens e quais as possíveis dificuldades na implementação destas propostas. Entre as principais propostas dos professores em formação estavam o uso de temas de história e filosofia da ciência ou CTS no ensino do desenvolvimento dos modelos atômicos (relações com a indústria bélica e o contexto), da dualidade onda-partícula (debate científico entre diferentes posições filosóficas), o contexto histórico das produções científicas e o efeito fotoelétrico. Entre as potenciais dificuldades, os professores destacaram o desinteresse de alguns estudantes em alguns temas CTS, a falta de conhecimento dos professores em relação à história da ciência, além de limites no tempo disponível para a aplicação das propostas.

Hadzidzaki (2008) defende a incorporação de temas de história e filosofia da ciência no ensino de física quântica. A autora aponta que os alunos apresentam grandes dificuldades na compreensão da ontologia dos objetos quânticos, sendo necessário este viés epistemológico e histórico no intuito de promover uma melhor compreensão sobre esse assunto. Como outros autores constatam, os alunos, ao serem introduzidos ao ensino de física quântica tradicional (que, entre outras coisas, se caracteriza pela ausência de discussões filosóficas sobre física quântica), tendem a categorizar e criar modos de pensamento sobre o tema que são profundamente enraizados em conceitos e modos de pensar clássicos. Desta forma, o principal objetivo da proposta da autora é possibilitar conhecimento mais aprofundado das visões de mundo que a física quântica oferece.

Uma tendência entre os trabalhos que incorporam temas de cunho filosófico e histórico está na mudança do foco da avaliação dos resultados. Ao invés de testes e análises em relação aos conceitos ou ao uso do formalismo da física quântica, os autores buscam avaliar mudanças em relação às concepções sobre o fazer científico, à natureza da ciência e às atitudes frente à mesma.

2.4.5 Propostas teórico-conceituais

Nesta revisão, dezenove artigos apresentam e analisam propostas focadas no ensino de conceitos ou fundamentos da física quântica. Muitas das propostas utilizam simulações, animações, vídeos e experimentos como ferramentas didáticas auxiliares ao ensino dos conceitos, assim como podem apresentar elementos relativos a questões

filosóficas da ciência ou elementos CTS, como forma de melhor contextualizar a evolução dos conceitos abordados, enfatizando também sua importância.

Ostermann *et al.* (2009) propõem o uso da óptica ondulatória como uma espécie de *porta de entrada conceitual* para abordar conceitos fundamentais de física quântica. O Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ) é proposto como ferramenta mediadora (na perspectiva vygotskiana) e a dualidade onda-partícula como conceito central para o ensino de física quântica no Ensino Médio. Desta forma, os autores criticam as propostas encontradas usualmente em livros didáticos do ensino médio que privilegiam o caráter corpuscular dos objetos quânticos e a velha física quântica, bem como as propostas encontradas usualmente em livros de física em nível de graduação, que com a justificável opção de fazer uma abordagem histórica da física quântica, acabam por dedicar muito tempo à velha física quântica. Dentro desta proposta, alguns autores produziram materiais de apoio ao professor ou elaboraram e testaram unidades didáticas com esta abordagem. Ricci *et al.* (2007) produziram um artigo apresentando os aspectos ondulatórios do funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder em regime clássico, enquanto Pereira *et al.* (2012b) apresentam os postulados da física quântica a partir dos fenômenos observados no interferômetro de Mach-Zehnder no regime monofotônico. Ostermann *et al.* (2008) apresentam os resultados de uma unidade didática implementada no contexto de um Mestrado Profissional em Ensino de Física após a qual os autores compararam resultados de um pré e de um pós-teste respondido pelos alunos, mostrando que em todas as questões houve ganho de aprendizado, concluindo que o *software* do IVMZ tem grande potencial como recurso didático. Pereira, Ostermann *et al.* (2009b, 2011, 2012a) apresentam os resultados de uma unidade didática aplicada a alunos de licenciatura em Física. Entre os resultados, os autores ressaltam o papel da interação social no aprendizado de conceitos físicos, que origina os fenômenos discursivos como a interanimação de vozes (Bakhtin, 1997; Wertsch, 1993) em situações que envolvem resolução de problemas. A presença da fala privada (Vygotsky, 1978, 2012) na organização do pensamento que aparece em algumas situações também é estudada. Silva Neto *et al.* (2011) apresentam os resultados da implementação de uma unidade didática envolvendo alunos do Ensino Técnico em Radiologia. Os autores consideraram positivamente surpreendentes os resultados do uso do IVMZ no ensino da dualidade onda-partícula e ressaltaram o papel do professor como parceiro mais capaz (Chaiklin, 2003; Vygotsky, 1978; Wertsch, 1984) ao longo das atividades.

Asikainen e Hirvonen (2009) elaboraram, aplicaram e avaliaram uma unidade didática sobre física quântica para professores formados ou em formação. Esse trabalho foi desenvolvido em uma universidade na Finlândia e tinha como principal objetivo criar um curso de física quântica que complementasse a formação universitária,

aprofundando tópicos que são tratados brevemente na universidade e que são ensinados no Ensino Médio, como o efeito fotoelétrico e a radiação do corpo negro. O referencial teórico para o desenvolvimento do curso foi a teoria de Vygotsky, para proporcionar condições para que os alunos trabalhassem na zona de desenvolvimento proximal (Chaiklin, 2003; Vygotsky, 1978; Wertsch, 1984), sendo a interação com o professor e com os colegas fundamental para que o aluno compreendesse os principais conceitos e avançasse nos estudos. Os autores escolheram privilegiar a modelagem de situações físicas e tópicos de história e filosofia da física como forma de potencializar a compreensão dos estudantes. Para analisar os resultados da aplicação da unidade didática, os autores recorreram à análise de um pré e de um pós-teste e a entrevistas com três estudantes. Nos pré-testes, poucos alunos tiveram sua resposta considerada correta (4 alunos) ou parcialmente correta (5 alunos), enquanto a maioria respondeu de maneira insuficiente (8 alunos), incorreta (2 alunos) ou não respondeu (6 alunos). No pós-teste quase todos responderam de maneira correta (22 alunos). Convém dizer que uma análise fundamentada unicamente em resultados finais (comparação entre pré e pós-testes, por exemplo) é incoerente com uma pesquisa de fundamentação vygotskiana, que prioriza processos muito mais do que resultados de testes. Para investigar os processos, as interações discursivas seriam a maior fonte de dados e a análise dessas interações é que deveria ser privilegiada. Esse aspecto parece ter sido considerado nas entrevistas, realizadas com três dos alunos, nas quais eles mostraram evolução na forma como descrevem e compreenderam o efeito fotoelétrico durante a unidade didática. Em especial, pode-se destacar que dois dos entrevistados na entrevista posterior contrastaram as expectativas para o modelo clássico da luz, os resultados experimentais e o modelo proposto por Einstein para explicar o fenômeno. Apesar de centrado no efeito fotoelétrico, a unidade cobria outros tópicos mais vinculados aos fundamentos da física quântica, como a dualidade onda-partícula, por meio da interferência quântica com fótons e elétrons, e a interpretação física de Born para o módulo quadrado da função de onda.

Kiouranis *et al.* (2010) propõem e avaliam uma sequência didática para abordar a dualidade onda-partícula no contexto de uma turma de um curso de química quântica em nível superior. A sequência didática baseia-se na proposta de transposição didática de Yves Chevallard. Uma das motivações do projeto foi a constatação por parte dos pesquisadores de que os alunos eram capazes de solucionar problemas complexos com o uso de recursos matemáticos, mas o processo de verbalização dos fenômenos lhes era pouco familiar. Na proposta, a análise do experimento da dupla fenda com partículas e ondas exerceu papel importante no estudo da dualidade onda-partícula. Para avaliar os resultados da intervenção didática, os autores analisaram o discurso dos estudantes e do professor ao longo das atividades. Os autores apontam que, ao longo das atividades, os

alunos foram se mostrando progressivamente mais confiantes e autônomos na realização das tarefas.

Souza *et al.* (2010) propõem e avaliam uma unidade didática sobre a dualidade onda-partícula voltada a alunos de licenciatura em Física. Os autores baseiam sua proposta didática na teoria dos construtos pessoais e no ciclo da experiência kellyana. Para auxiliar no processo de ensino, os autores utilizam três experimentos didáticos e uma oficina sobre transdisciplinaridade a fim de discutir a lógica de um dos experimentos incluídos. Analisando as concepções prévias dos alunos e os resultados da unidade didática, os autores apontam que os alunos mostravam desde o princípio conhecer a dualidade onda-partícula, ainda que com diferentes níveis de profundidade, mas não conseguiam respaldar teoricamente este conhecimento. Uma das principais diferenças desta unidade didática em relação a outras é o foco na necessidade de se romper com a lógica aristotélica para se compreender a dualidade onda-partícula. Com o uso do ciclo da experiência kellyana, os experimentos didáticos e a oficina sobre transdisciplinaridade, ao fim da unidade didática, os alunos mostraram uma evolução em suas concepções a respeito da dualidade onda-partícula.

Arlego (2008) e Fanaro *et al.* (2007) propõem que o ensino de física quântica no Ensino Médio baseie-se na formulação dos caminhos múltiplos de Feynman. Os autores apontam que a abordagem a partir do desenvolvimento histórico (partindo da velha física quântica) mostra-se insatisfatório tanto para os alunos quanto para os professores. A partir da abordagem proposta pode-se mostrar a transição entre o comportamento clássico e quântico, além de apresentar claramente o surgimento dos comportamentos ondulatório e corpuscular de forma conceitualmente simples. Nesta proposta, une-se a discussão dos conceitos da física quântica com a fundamentação matemática (ainda que com um formalismo simplificado). Os autores propõem iniciar a unidade com discussões em torno da experiência da dupla fenda, prosseguindo para o ensino do princípio da mínima ação, incluindo aplicações simples e simulações que possam utilizá-lo. A partir da discussão adequada do princípio da mínima ação seria possível mostrar o surgimento das trajetórias clássicas para objetos macroscópicos e reinterpretar os resultados observados no experimento da dupla fenda com elétrons e outros objetos quânticos. A partir dessa proposta, uma unidade didática com doze encontros de duas horas semanais foi implementada envolvendo alunos do último ano do ensino médio na Argentina (Otero *et al.*, 2009). Entre os resultados destacados da implementação e investigação dessa unidade estão: a maioria dos alunos não aceita a impossibilidade de saber qual a melhor função para descrever o caminho do elétron, os estudantes compreendem que devido ao comportamento ondulatório pode-se atribuir um comprimento de onda tanto a objetos macroscópicos quanto a microscópicos e que o método da soma de todos os caminhos é uma forma apropriada de se compreender a

formação do padrão de interferência em uma experiência de dupla fenda (Fanaro *et al.*, 2009). Outros achados das aplicações foram: a concepção dos estudantes que veem os elétrons como bolinhas capazes de atravessar paredes dificulta na compreensão da caracterização do elétron como um objeto quântico (Fanaro *et al.*, 2009).

Hoekzema *et al.* (2007) propõem uma abordagem da dualidade onda-partícula em uma caixa para o ensino de fundamentos básicos de física quântica no Ensino Médio. Os autores apontam que desejavam incluir um pouco de modelagem matemática e computacional, além do ensino conceitual. Neste sentido, o modelo da partícula/onda na caixa estaria em um nível adequado para os estudantes – os autores temiam que a equação de Schrödinger se mostrasse excessivamente avançada. O modelo possibilita estimativas para os tamanhos dos átomos e dos núcleos atômicos, assim como *insights* qualitativos sobre a quantização da energia, níveis de energia e ligações moleculares. Os autores aplicaram a proposta com alunos do Ensino Médio na Holanda, mas o artigo não aprofunda a análise dos resultados, indicando apenas que os autores obtiveram bons resultados.

Carvalho Neto *et al.* (2009) propõem, implementam e avaliam uma unidade didática para o ensino de física quântica no Ensino Médio. A proposta envolveu alunos do 3º ano do Ensino Médio, em etapas: em 2004 foi realizado um mini-curso de 20 horas, considerado como uma pesquisa exploratória e em 2005 foi realizada uma segunda intervenção, reformulada em função da análise dos resultados da primeira. Na intervenção de 2004, em função dos conteúdos cobrados no concurso vestibular, os autores privilegiaram a velha física quântica, trabalhando inicialmente o efeito fotoelétrico e o átomo de Bohr, para depois introduzir a dualidade onda-partícula e a física quântica desenvolvida entre 1925 e 1927. Em 2005, a intervenção baseou-se na proposta de Feynman de que o grande mistério da física quântica pode ser compreendido a partir da discussão em torno da experiência de interferência quântica da dupla-fenda.

A partir da análise de pré e pós-entrevistas realizadas com cinco alunos na intervenção de 2004, os autores apontam que existem indícios de aprendizagem significativa em relação ao princípio da incerteza, pois a maioria dos estudantes compreendeu o caráter probabilístico da física quântica como uma característica da teoria e não como resultado da ignorância humana. No entanto, alguns estudantes encararam que o caráter probabilístico caracteriza a física quântica como uma teoria não preditiva. Para a avaliação da intervenção de 2005, também foram realizadas pré e pós-entrevistas. Os autores ressaltaram que o filme em que se apresenta a experiência da dupla fenda com elétrons individuais possibilitou que os alunos compreendessem que a

ausência de informação sobre o caminho percorrido pelo elétron possibilita a ocorrência de interferência.

Entre os trabalhos analisados nesta categoria, as propostas de introdução do ensino de física quântica a partir da óptica ondulatória e utilizando como conceito fundamental a dualidade onda-partícula proposto por Ostermann *et al.* (2009) e a abordagem a partir dos caminhos múltiplos de Feynman propostas por Fanaro et al. (2007) e Arlego (2008) se destacam. Este destaque ocorre em função do número de artigos baseados na proposta que foram produzidos. No caso da proposta de Ostermann *et al.* são nove artigos que se relacionam através de aprofundamentos teóricos e materiais para a consulta bibliográfica, além da análise de três intervenções didáticas diferentes. No caso da proposta de abordagem a partir dos caminhos múltiplos de Feynman foram encontrados cinco artigos que detalham o referencial teórico e as propostas metodológicas, além de avaliarem a implementação da unidade didática em uma escola de Ensino Médio.

2.5 ATUALIZAÇÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta pesquisa iniciou-se no mês de março de 2013, estendendo-se até o mês de janeiro de 2015. Neste período, as revistas pesquisadas publicaram suas edições de 2013 e 2014 e foram divulgadas novas classificações Qualis da Capes, alterando os periódicos classificados como A1, A2 e B1. Tendo em vista o detalhamento da pesquisa bibliográfica realizada previamente, não haveria tempo hábil para repetir os procedimentos realizados na revisão acima com as edições publicadas nos anos de 2013 e 2014 e com os periódicos que passaram a ser classificados como A1, A2 ou B1. Por outro lado, considerou-se também que seria importante atualizar a revisão bibliográfica, incluindo-se as mudanças no Qualis e as novas publicações, por se tratarem do que há de mais importante e atual na área. Assim, decidiu-se por organizar uma seção com uma atualização apresentando alguns dos principais artigos publicados no período ou em revistas que melhoraram sua classificação Qualis.

Kohnle *et al.* (2014) propõem uma nova abordagem para o ensino de física quântica em cursos universitários de introdução ao tema. O foco da proposta consiste em iniciar o ensino sobre o tema diretamente pela discussão de sistemas quânticos de dois níveis, tais como o interferômetro de Mach-Zehnder, o experimento de Stern-Gerlach e um átomo com dois níveis de energia em um campo magnético. Os autores defendem que a proposta apresenta uma série de vantagens, tais como: imediatamente imergir os estudantes em fenômenos quânticos, sem explicação clássica, discutir desde o princípio temas interpretativos da mecânica quântica e ser matematicamente menos desafiador, por exigir apenas conhecimentos básicos de álgebra linear. Em conjunto

com a proposta, os autores desenvolveram um *site* com diversos recursos, em especial simulações e textos de apoio, disponíveis em: quantumphysics.iop.org.

Henriksen *et al.* (2014) discutem o ensino de física moderna no Ensino Médio e propõem o uso de simulações e outros recursos computacionais para o ensino de tópicos de relatividade, física quântica e filosofia da física moderna. A proposta é voltada para o último ano do Ensino Médio norueguês; os autores apontam que o currículo de física quântica naquele país propicia trabalhar com certa profundidade temas como relatividade restrita e geral, o efeito fotoelétrico, o efeito Compton, as relações de incerteza de Heisenberg e, inclusive, fótons emaranhados. A proposta foi batizada ReleQuant e fundamenta-se em uma perspectiva sociocultural, baseada nas ideias de Vygotsky. Em uma aplicação inicial do projeto, os autores encontraram evidências de que os alunos conseguiram articular alguns dilemas filosóficos da física moderna, ao mesmo tempo em que valorizaram o uso de discussões em grupo como forma de facilitar a compreensão dos conceitos estudados.

Castrillón *et al.* (2014) apresentam uma proposta didática chamada de *Mecánica Cuántica Fundamental (MCF)*. A sequência didática destina-se à formação de professores e a alunos do Ensino Médio. O referencial teórico para o desenvolvimento da unidade são as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) idealizadas por Moreira. Os conceitos de superposição de estados e emaranhamento quântico ocupam uma posição central na proposta. A partir da discussão de conceitos fundamentais da física quântica a unidade busca possibilitar a discussão de importantes experimentos da área, como o Interferômetro de Mach-Zehnder e o experimento de Stern-Gerlach, além da compreensão de aplicações tecnológicas, como o teletransporte e a criptografia quântica.

Matteucci *et al.* (2010), Dimitrova e Weis (2010) e Rueckner e Peidle (2013) apresentam montagens experimentais para o ensino de física quântica. Suas propostas focam, respectivamente, no comportamento ondulatório dos elétrons, na interferência de fótons únicos e na perda do padrão de interferência com a presença de detectores. O uso de demonstrações experimentais, em especial de fenômenos tão contraintuitivos quanto os destacados nestes três trabalhos, podem causar importante impacto na aprendizagem dos estudantes. Por enquanto, no entanto, o alto custo destas montagens experimentais torna impeditiva a realização destes experimentos em escolas de Ensino Médio brasileiras. Apesar de não haver perspectivas imediatas para a popularização destes experimentos, o conhecimento do funcionamento e da efetiva realização dos mesmos pode se mostrar útil na explicação e argumentação com os estudantes, levando os alunos a se perguntarem: mas isso existe mesmo?

O uso de tecnologias da informação e comunicação no ensino em geral e no ensino de física quântica em particular vem ocupando cada vez mais espaço. Propostas com uso de vídeos e textos em *websites*, simulações, animações e aplicativos são cada vez mais comuns.

Kohnle *et al.* (2010) apresentam uma série de animações desenvolvidas para cursos básicos e intermediários de física quântica em nível universitário. As animações estão disponíveis gratuitamente no site da universidade de St. Andrews e incluem tópicos como: potencial degrau, tunelamento quântico, superposição de estados de energia, pacotes de onda e relações de incerteza de Heisenberg. Em cursos com duas turmas que misturavam aulas mais tradicionais e usos de animações com tutoriais, os resultados mostraram-se bastante positivos. Os alunos mostraram uma atitude positiva frente às metodologias adotadas e apresentaram importantes ganhos conceituais.

Malgieri *et al.* (2014) propõem o ensino de física quântica a partir da abordagem da soma de todos os caminhos proposta por Feynman. No núcleo da unidade didática está uma discussão conceitual e epistemológica de temas da física quântica, como o interferômetro de Mach-Zehnder e os experimentos de Zou-Wang-Mandel. A sequência didática utiliza diversas simulações desenvolvidas a partir do *software* GeoGebra. Em um teste com alunos de pós-graduação para professores de física, a unidade apresentou excelentes resultados, possibilitando um bom desenvolvimento conceitual dos estudantes.

Palop (2009) apresenta um aplicativo em Java que permite simulação de diversas situações do comportamento ondulatório das partículas. O aplicativo permite simular experimentos de fenda única e fenda dupla, variando parâmetros como largura da fenda e distância entre as fendas. Em um teste com estudantes de graduação, os autores consideraram os resultados muito positivos.

2.6 CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da análise da revisão bibliográfica, podem ser apontadas algumas tendências da comunidade de pesquisadores no que se refere ao ensino de física quântica e sugeridas propostas de caminhos que contribuam para a pesquisa nesse campo de conhecimento. Ao longo da revisão foram encontrados diversos artigos que apresentam propostas didáticas tanto para o Ensino Médio como para o Ensino Superior, muitas das quais apresentam resultados de implementações em sala de aula. Em relação a revisões bibliográficas anteriores (Ostermann & Moreira, 2000; Pereira & Ostermann, 2009) há um importante aumento no número de trabalhos com propostas didáticas e testes em sala de aula, indicando uma tendência na área de pesquisar cada vez mais o ensino de física moderna. Apesar disso, a maioria das propostas é apresentada e discutida em apenas um artigo. Desta forma, faltam aprofundamentos em

relação às possibilidades e problemas de cada proposta, como aprimorá-las, como adaptá-las em diferentes contextos e como fazer com que os resultados das pesquisas sejam expandidos e melhor compartilhados.

Duas outras tendências importantes são o uso cada vez mais generalizado de TIC's e um progressivo aumento no número de trabalhos que enfocam a nova física quântica no Ensino Médio. O uso de TIC's pode ser compreendido dentro do contexto mais geral de rápida disseminação do acesso a computadores, *smartphones* e outros aparelhos tecnológicos, que hoje podem ser encontrados na maioria das escolas e em um número crescente de famílias de estudantes. O aumento no enfoque acerca da nova física quântica é mais difícil de ser compreendido, mas suas raízes podem estar no descontentamento dos pesquisadores da área nas abordagens que priorizam os experimentos semiclássicos.

Uma característica interessante dos trabalhos que testam unidades em sala de aula é que a imensa maioria considera que a proposta utilizada propicia bons resultados. Provavelmente, a combinação de dois fatores deve explicar esta característica: por se tratar de um trabalho de pesquisa, a preparação da unidade didática e dos materiais de apoio é feita de forma mais cuidadosa; o outro fator é que pelo mesmo pesquisador geralmente propor, aplicar e avaliar a unidade didática, há uma tendência de que ele sobrevalorize os resultados positivos da proposta.

Em relação aos conteúdos propostos, o efeito fotoelétrico se destaca entre os mais abordados. Esse efeito é muito trabalhado tanto em propostas que se focam na velha física quântica (considerado como importante experimento no surgimento da física quântica), quanto em trabalhos focados na nova física quântica que o abordam como um experimento introdutório ao conceito de dualidade onda-partícula. Outra vantagem para o ensino do efeito fotoelétrico é a facilidade de demonstração do mesmo em sala de aula.

No ensino de conceitos fundamentais da física quântica, a dualidade onda-partícula aparece como um dos conceitos mais trabalhados. Existem trabalhos que o abordam por meio da interferência quântica em um sistema de dupla-fenda ou no interferômetro de Mach-Zehnder (ou mesmo em ambos). Cabe destacar que em função das dificuldades citadas para a demonstração destes experimentos em sala de aula, é comum se propor o uso de simulações para apresentá-los.

Sendo assim, a revisão da literatura proporciona bases para justificar a adoção do IVMZ como ferramenta mediadora, contribuindo ainda para o desenvolvimento da unidade didática que é apresentada neste trabalho. Vê-se que há carências em relação ao estudo sobre o ensino dos fundamentos da física quântica, principalmente no nível

médio. Esses são, respectivamente, o tema foco e o contexto de investigação do presente trabalho.

3 REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO

3.1 A PERSPECTIVA SOCIOCULTURAL DE VYGOTSKY

Este trabalho fundamenta-se na perspectiva sociocultural desenvolvida por Lev Semyonovitch Vygotsky (1896-1934). Vygotsky utiliza princípios marxistas, em especial o materialismo histórico e o materialismo dialético, para desenvolver sua teoria da formação e desenvolvimento dos processos mentais superiores (Vygotsky, 1978). Três temas formam o núcleo principal de sua teoria: o Método Genético-Experimental, a origem social dos processos mentais superiores e a importância dos signos e instrumentos como ferramentas de mediação (Wertsch, 1985). A compreensão destes temas e, em especial, da forma como Vygotsky os aborda é fundamental na compreensão dos detalhes desta perspectiva.

3.1.1 **Mediação, instrumentos e signos.**

As ações humanas são, geralmente, mediadas por instrumentos e signos (Wertsch, 1993). Os instrumentos, ou ferramentas técnicas, são meios utilizados pelo homem para controlar e mudar fisicamente o mundo e, portanto, são orientados externamente. Os signos, que são ferramentas psicológicas, são meios utilizados pelo homem para controlar e transformar o próprio comportamento ou seja, são orientados internamente. O uso de ônibus para o transporte e de telefones para a comunicação entre indivíduos, são exemplos do uso de instrumentos de mediação. A linguagem, seja ela falada, escrita ou gestual, se destaca como o mais importante sistema de signos e de ferramenta de mediação.

Vygotsky (1978, p. 41) analisa a “tarefa das cores proibidas”, realizada por Leontiev com crianças de diversas idades. Nesta tarefa, as crianças deveriam responder questões sobre as cores dos objetos, porém eles não poderiam falar certas cores e tampouco repetir uma cor mais de uma vez. Além disso, eles recebiam uma série de cartões coloridos que poderiam ser utilizados da forma como a criança quisesse.

As formas como utilizaram os cartões coloridos variou entre crianças em idade pré-escolar (entre 5 e 6 anos) e escolar (de 8 a 13 anos). Os que estavam em idade escolar utilizaram os cartões de diversas maneiras para lembrar as cores que já haviam sido ditas. Os que estavam em idade pré-escolar fizeram pouco ou nenhum uso dos mesmos. Algumas crianças espalharam os cartões à sua frente e quando utilizavam uma das cores, giravam a cor correspondente de cabeça para baixo, de forma que ela não fosse mais visível. Neste caso, as cores visíveis representavam as cores ainda disponíveis para a resposta. Apenas para as crianças que utilizaram os cartões como forma de alterar o ato de lembrar, os mesmos podem ser encarados como signos

mediadores. Os símbolos só adquirem significados e se tornam signos ao serem utilizados. Os significados dos mesmos são social e culturalmente construídos.

Wertsch (1993) aponta que a inclusão de signos na mediação de ações promove transformações fundamentais nas mesmas. Estas transformações ocorrem não apenas na sua forma externa, mas na própria estrutura das funções mentais. Em muitas situações, as ferramentas psicológicas possibilitam ações que não seriam possíveis sem o seu uso. Dentro desta perspectiva o agente da ação não é o indivíduo isolado, mas o indivíduo atuando em conjunto com os meios mediacionais (Wertsch, 1993). Essa relação do agente com a ferramenta mediadora, que torna o par inseparável como unidade de análise, é o que ele chama de *tensão irreduzível* (Wertsch, 1998, pp. 25-30).

As ferramentas, sejam elas psicológicas ou técnicas, podem ser também limitadoras das ações. Elas possibilitam e priorizam certas formas de ação, enquanto restringem outras. De acordo com Wertsch, o desenvolvimento de novas tecnologias modifica a ação dos usuários, retirando restrições que a ferramenta anterior impunha e introduzindo novas (Wertsch, 1998, pp. 38-42). A percepção das restrições impostas pelas novas tecnologias só costuma ser percebida em retrospectiva. Como exemplo, Pereira e Ostermann (2012) apontam que o uso de internet discada no contexto escolar representou um importante avanço para o rápido acesso à informação e que apenas com a introdução da banda larga, anos mais tarde, tornaram-se claras as limitações em termos de velocidade de acesso à informação impostas pela tecnologia anterior.

3.1.2 Método genético-experimental

Vygotsky baseia seu método de análise das funções mentais superiores em três princípios básicos: a análise de processos e não de objetos; a busca por uma psicologia explicativa, que não se contenta com a descrição dos fenômenos, e a preocupação com a análise dos comportamentos em desenvolvimento, em detrimento dos comportamentos fossilizados⁵ (Vygotsky, 1978, pp. 63-65).

Vygotsky propõe dividir o comportamento humano entre funções mentais elementares e funções mentais superiores. O controle, realizado pelo indivíduo e não pelo ambiente; a realização consciente dos processos mentais; as origens sociais e naturais; e o uso de signos na mediação são características que distinguem as funções mentais superiores das funções elementares (Wertsch, 1985).

⁵ Como detalhado mais adiante, são processos que experimentaram um longo desenvolvimento histórico e que se tornaram mecanicamente repetidos ao longo do tempo, sendo, portanto, difíceis de serem modificados (por exemplo, processos como atenção voluntária e involuntária). Esses processos, portanto, devem ser entendidos retrocedendo-se às suas origens (Vygotsky, 1978, p. 65).

A partir das últimas décadas do século XIX, bem como nas primeiras décadas do século XX, a grande maioria dos experimentos em psicologia baseava-se na díade *estímulo-resposta*. Isto significa dizer que os experimentadores preparavam situações-estímulo e analisavam as respostas a essas situações-estímulo eliciadas pelos participantes do experimento. Muitas vezes o experimentador fazia pequenas mudanças na situação-estímulo, para observar como mudavam as respostas eliciadas. Nesta perspectiva, o objetivo do experimentador é recriar de forma artificial e controlada o fenômeno que se deseja estudar (Vygotsky, 1978). O método proposto por Vygotsky retira o foco do fenômeno, passando-o para o *desenvolvimento do fenômeno*. Por exemplo, para estudar a atenção voluntária, deve-se selecionar indivíduos que ainda não tenham este comportamento plenamente desenvolvido e criar artificialmente situações para o seu desenvolvimento, para posterior análise destas situações.

Na análise de diversos fenômenos, podem-se diferenciar duas abordagens. Na primeira, o experimentador classifica e analisa o fenômeno a partir de suas características externas (fenotípicas); na segunda, o experimentador analisa os fenômenos baseado na sua origem (genótipo) (Vygotsky, 1978, pp. 62-63). Esta diferenciação entre análises fenotípicas e genotípicas se faz bastante presente na biologia. No estudo das baleias, por exemplo, suas características externas as classificariam como peixes, por sua semelhança com outros peixes e tubarões; no entanto, suas características genotípicas as classificam como mamíferos, por suas semelhanças com cachorros e tigres (Vygotsky, 1978, pp. 62-63).

Vygotsky propõe estender essa diferenciação entre análises fenotípicas e genotípicas à psicologia. Na análise de um fenômeno psicológico, pode-se utilizar uma abordagem descritiva (fenotípica) ou explicativa baseada na história de seu desenvolvimento (genotípica). Desta forma, ao analisar a fala de uma criança de dois anos, suas características fenotípicas serão similares às da fala de um adulto, porém suas características genotípicas serão fundamentalmente distintas. Assim, fenômenos psicológicos fenotípicamente similares podem ter características genotípicas completamente distintas. Cabe à psicologia tanto descrever quanto explicar os fenômenos. No entanto, a descrição deve estar subordinada à explicação e deve-se tomar cuidado para não supervalorizar semelhanças descritivas, considerando-as como semelhanças explicativas.

Como já citado, no estudo das funções mentais é comum encontrar formas de comportamento que cessaram de mudar, após de um longo processo histórico; tornaram-se fossilizados. Estas formas de comportamentos são mais facilmente observáveis em processos psicológicos automatizados (Vygotsky, 1978). No entanto, para se compreender estes comportamentos é necessário que o pesquisador busque

situações em que estas formas fossilizadas de comportamento surjam nos seus estágios iniciais, de modo que o comportamento possa ser analisado historicamente. Vygotsky argumenta que “estudar alguma coisa historicamente, significa estudá-la no processo de mudança: esse é o requisito básico no método dialético” (Vygotsky, 1978, pp. 64-65).

Pode-se resumir a proposta do método proposto por Vygotsky, utilizando suas palavras:

Nosso método pode ser chamado de genético-experimental, no sentido que ele cria ou provoca artificialmente um processo de desenvolvimento psicológico. Esta perspectiva é igualmente apropriada ao objetivo básico da análise dinâmica. Se substituirmos a análise do objeto pela análise do processo, então a tarefa óbvia da pesquisa torna-se a reconstrução de cada estágio do desenvolvimento do processo: o processo precisa retornar a seus estágios iniciais (Vygotsky, 1978, pp. 61-62).

Nesta pesquisa, o método genético-experimental provê fundamentos básicos para a metodologia de pesquisa e análise de dados. A aula é vista como o espaço no qual os alunos desenvolvem novos comportamentos e, assim, torna-se fundamental analisar como eles interagem ao longo das atividades didáticas para se compreender como são desenvolvidas as estratégias adotadas para compreenderem conceitos da Física Quântica abordados.

3.1.3 A gênese das funções mentais superiores

Vygotsky vê as funções mentais superiores, como um produto de fatores biológicos, sociais, culturais, históricos e individuais. Cada um destes fatores atua de forma relacionada aos demais, porém obedecendo a leis próprias. Assim, para a compreensão profunda da mente humana, Vygotsky indica três domínios que devem ser analisados: o filogenético, o sócio-histórico e ontogenético (Wertsch, 1985, 1993).

O domínio filogenético analisa as influências da evolução da espécie humana no comportamento. Os humanos compartilham certos comportamentos com outras espécies. O uso de ferramentas e a linguagem, por exemplo, aparecem também em outras espécies de primatas (Vygotsky, 2012). Assim, pode-se supor que estes comportamentos são possíveis graças a características genéticas compartilhadas com outras espécies. Pode-se supor também, que ao longo da evolução do homem, outras mudanças genéticas possibilitaram o surgimento de novos comportamentos. A partir destas premissas, Vygotsky propõe que as leis que determinam a influência das mudanças genéticas no comportamento humano sejam, essencialmente, as propostas pela teoria Darwinista.

Apesar de reconhecer a importância dos fatores biológicos na formação da mente, Vygotsky não considera este fator como único e nem mesmo preponderante. Neste

sentido, ele critica abordagens como a behaviorista, por tentarem reduzir, ainda que de forma implícita, o comportamento humano ao comportamento animal (Wertsch, 1985).

O domínio sócio-histórico analisa o papel da história social e cultural da humanidade na formação dos comportamentos, levando em consideração que sociedades diferentes passaram por processos sociais e culturais distintos. A espécie humana tem a capacidade de aprender com os erros e sucessos de outros grupos, sejam eles de locais ou tempos diferentes, compartilhando socialmente diversas experiências vivenciadas ao longo de sua existência. Um aspecto importante nesse domínio é o da *descontextualização das ferramentas mediadoras* – “processo pelo qual o significado dos signos se tornam cada vez menos dependentes do contexto espaço-temporal específico no qual foram [inicialmente] usados” (Wertsch, 1985, p. 33). Por essa via, após um (muitas vezes longo) processo sócio-histórico, as ferramentas mediadoras não se mantêm necessariamente amarradas ao contexto sócio-histórico específico que as originou, facilitando seu desenvolvimento e expansão para contextos mais amplos (incluindo outras comunidades e culturas). Um exemplo dessa descontextualização pode ser observado durante o processo de internalização da semiose básica da matemática (aritmética). Segundo Vygotsky, em civilizações primitivas (ou mesmo atualmente, em crianças) o ato de contar é extremamente dependente da existência do objeto físico a ser contado (pedras, alimentos, animais, entre outros). Nos sistemas de contagem primitivos, a contagem era comparativa, associando um conjunto de objetos (por exemplo, pedras) aos elementos concretos a serem contados (por exemplo, animais: associando uma pedra para cada animal um pastor poderia controlar com precisão o número de animais em seu rebanho). Com o desenvolvimento de sistemas numéricos (recurso semiótico mais básico da matemática), a contagem pode ser realizada sem a necessidade da existência física de objetos a serem contados ou mesmo de quantidades (Wertsch, 1985).

O domínio ontogenético caracteriza-se pelo estudo do desenvolvimento psicológico individual. Neste domínio, fatores sociais, culturais e biológicos atuam concomitantemente. Assim, como os domínios filogenéticos e sócio-histórico, este também apresenta uma série de leis e princípios próprios que o regem. Deve-se tomar cuidado para não confundir as influências biológicas no desenvolvimento psicológico individual, com a influência biológica no desenvolvimento da espécie humana caracterizada no domínio filogenético; eles são essencialmente distintos. A mesma ressalva é válida aos fatores sociais e culturais em relação ao domínio sócio-histórico. Assim, Vygotsky caracteriza o desenvolvimento da criança da seguinte maneira:

O desenvolvimento cultural da criança é primordialmente caracterizado pelo fato de que está imerso em importantes transformações orgânicas. O desenvolvimento cultural é superposto ao processo de crescimento,

maturação e evolução orgânica da criança. Estes dois processos formam um todo. É apenas de forma abstrata que se pode separar um processo do outro.

O crescimento da criança normal para dentro da civilização usualmente envolve a fusão com processos de maturação orgânica. Os dois planos de desenvolvimento – o natural e o cultural - coincidem e se misturam um com o outro. As duas linhas de desenvolvimento se interpenetram e formam, essencialmente, um único caminho de desenvolvimento sócio-biológico da personalidade da criança (Vygotsky, 1960; citado por Wertsch, 1985).

Em seus primeiros anos de vida (até os dois anos, aproximadamente), a criança desenvolve de forma independente a fala e o pensamento. Após, fala e pensamento passam a se fundir no que se define como *pensamento verbal* (Vygotsky, 2012). Nesse contexto, é importante entender aquilo que Vygotsky define como *fala privada*. Piaget foi o primeiro estudioso que observou um tipo de fala espontânea, não direcionada para outros, surgindo em crianças quando executam determinadas atividades (Piaget, 2012) – em especial, em atividades envolvendo resolução de problemas. Ele denominou esse tipo de fala como *fala egocêntrica*. Piaget afirmou que esse tipo de fala em crianças pequenas, como afirmam Frauenglass and Diaz (1985, p. 357), "eram um sinal de confusão das crianças em compreender o ponto de vista da outra pessoa, apoiando, assim, o seu pressuposto básico de que o pensamento das crianças pequenas é primariamente autista e egocêntrico". Em outras palavras, Piaget acreditava que a fala egocêntrica (ou privada) era uma espécie de fala social primitiva (discursos claramente dirigidos a outras pessoas) e que não executam qualquer função de autorregulação sobre as ações das crianças. Segundo ele, quando uma criança amadurece suas habilidades comunicativas e cognitivas, esse tipo de fala desaparece e dá lugar a uma fala totalmente social. Ao contrário de Piaget, Vygotsky considerou a fala privada como crucial para a autorregulação da criança em tarefas de resolução de problemas. Ele realizou estudos teórico-empíricos que mostram claro aumento da sua ocorrência quando as dificuldades foram propositadamente inseridas em tarefas propostas a crianças (Vygotsky, 2012, p. 31). Ele também defendeu que a fala privada é um estágio intermediário para o amadurecimento da *fala interna*, o que essencialmente constitui o pensamento verbal. Em suma, fala privada "não simplesmente atrofia, mas passa a ser oculta, ou seja, se transforma em fala interna" (Vygotsky, 2012, p. 34).

Em um experimento realizado com crianças de 4 e 5 anos, ele pedia que estas pegassem doces em cima de um armário que elas não alcançavam apenas com as mãos. Estavam disponíveis para uso, também uma vara e um banco. Uma menina, ao realizar a tarefa, antecipa suas ações com o uso da fala. Ela fala "subir no banco" e, aproxima o banco do armário, subindo nele em seguida. Após falhar com o uso apenas do banco, ela afirma "Não, não dá. Eu poderia usar a vara". Finalmente, com o uso do banco e da vara ela consegue (Vygotsky, 1978, p. 25).

Assim, segundo Vygotsky, a fala privada é muito importante para a criança em atividades de resolução de problemas. Em certas situações, a criança pode não conseguir realizar a ação caso o uso da fala seja proibido. No decorrer do desenvolvimento, esta fala privada é progressivamente substituída por murmúrios até se tornar em fala interna (que é difícil de ser detectada). A partir disto é importante perceber como o pensamento torna-se, em grande medida, verbal. É interessante ainda apontar que, ao contrário do que Vygotsky supunha, a fala privada pode persistir entre adolescentes e mesmo entre adultos (Duncan & Tarulli, 2009; Duncan & Cheyne, 2002; Silva & Almeida, 2011).

3.1.4 Origens sociais das funções mentais superiores.

De acordo com Vygotsky, “a dimensão social da consciência é primária em tempo e de fato. A dimensão individual da consciência é secundária e derivada” (Vygotsky, 1979; citado por Wertsch, 1985). Esta posição determina uma das questões centrais de sua teoria, a de determinar como as formas de ação individuais emergem da vida social.

Nesta perspectiva as funções mentais superiores aparecem ao longo do desenvolvimento em dois níveis: o interpsicológico e o intrapsicológico. No desenvolvimento da criança, a função mental aparece primeiramente no nível social (interpsicológico) para que depois ela possa ser internalizada ao nível individual (intrapsicológico). O processo de internalização consiste em uma reconstrução no plano intrapsicológico de uma atividade externa. Neste processo, o uso de signos e instrumentos realiza um papel fundamental. A internalização se estabelece quando o indivíduo adquire domínio das ferramentas mediadoras (Bakhurst, 2007, p. 54), passando a fazer pleno uso das mesmas em situações particulares. Cabe ainda ressaltar que a reconstrução no plano intrapsicológico não é uma mera reprodução interna de uma atividade externa. A internalização de uma linguagem, por exemplo, é um processo que pode ser essencialmente definido como “ganho de controle sobre um sistema de signos externo” (Wertsch, 1985, p. 65).

Isso, por sua vez, tem grande importância no desenvolvimento das funções mentais superiores da criança (memória voluntária, atenção direcionada, pensamento verbal, comportamento autorregulado e outros complexos processos semioticamente mediados) que estão “sob controle consciente da criança; ela pode planejar e direcionar suas próprias ações e aquelas dos outros que a circundam” (Hicks, 2008, p. 106). Assim, a internalização é um processo que leva a um substancial desenvolvimento psicológico, não se reduzindo a uma mera “transferência” de operações de um plano externo para um plano interno – há uma grande reconstrução intrapsicológica concomitante. Como colocado por Stetsenko and Arievitch (2002, p. 87), quando a criança internaliza a linguagem, por exemplo, isso “tem resultado não apenas na sua capacidade de

conversar, mas também a leva a um nível completamente novo de pensamento, autorregulação e intelecto em geral”.

Segundo Wertsch (1998, pp. 46-58), a internalização é um processo que envolve *domínio e apropriação*. O domínio se restringe à compreensão dos significados dos signos, sua gramática socioculturalmente construída, regras e/ou padrões linguísticos, ou seja, o que Wertsch chama de *know-how*. A apropriação vai bem além e seria um segundo estágio do processo de internalização, inspirado pela ideia de apropriação da língua proposta por Bakhtin (1981, p. 293): “a palavra na língua se torna própria de alguém somente quando o falante a povoa com suas próprias intenções, sua pronúncia, quando ele se apropria da palavra adaptando-a à sua própria intenção expressiva e semântica”. Em outras palavras, uma ferramenta psicológica (como a linguagem) “é apropriada quando ela pode ser moldada aos propósitos de quem executa a ação” (Koschmann, 1999, p. 309). Assim, o uso criativo de um sistema de signos, em contextos e propósitos diversos, é um sinal de apropriação e é, em essência, um ganho de controle sobre um sistema de signos. Como qualquer sistema de signos existe previamente em outros contextos e é povoado com intenções e ideologias alheias, isso faz com que tais sistemas não sejam neutros e inertes, não podendo ser “moldados” facilmente a intenções e propósitos particulares. O processo de apropriação é, portanto, difícil e exige tempo. Assim, não é difícil concluir que pode haver domínio de uma ferramenta psicológica sem necessariamente haver apropriação.

Um exemplo de internalização pode ser dado citando novamente a semiose básica da matemática. Crianças apresentam um conhecimento informal de matemática impressionante, ainda no período pré-escolar (para uma breve revisão, ver Wertsch, 1985, pp. 48-51), mas normalmente realizam contagens apontando objetos concretos e vinculando essas contagens a quantidades reais. Nesta fase, também costumam vincular operações aritméticas a contextos concretos (presença de objetos concretos), criando diversas estratégias para realizar tais operações (de Corte & Verschaffel, 2006; Starkey & Klein, 2008). Mesmo impressionantes, tais estratégias têm *bugs*, mostrando que não adquiriram ainda domínio das ferramentas culturais envolvidas para realizar operações aritméticas. Importante salientar que, ao contrário do que se pensava inicialmente, essa habilidade matemática pré-escolar não é adquirida naturalmente – o contexto sociocultural e a interação com pares têm papel importante nisso (ver uma breve revisão em Starkey & Klein, 2008, pp. 258-267), tanto na fase pré-escolar quanto na escolar. Esse é um dos aspectos que confere consistente suporte empírico em favor da tradição vygotskiana na análise desse tema, a exemplo do que ocorre no desenvolvimento de proficiência na linguagem verbal.

Já na escola, quando a criança começa a aprender a semiose básica da matemática (sistemas numéricos e a instrução formal na aritmética), o domínio dessa semiose consiste basicamente em compreender o significado dos números e operações, desenvolvendo estratégias para lidar com esses conceitos, sendo capaz de adotar métodos quantitativos básicos como meio para entender, interpretar e comunicar resultados. Alguns autores encaram isso como o desenvolvimento do *senso numérico* (de Corte & Verschaffel, 2006, pp. 107-108). O domínio envolve, então, o *know-how*, ou seja, fluência semiótica para pensar e expressar soluções de problemas com uso dessa semiose.

A apropriação vai além e em geral tem relação com a descontextualização da ferramenta semiótica – o sistema numérico e sua gramática, padrões semânticos e outros aspectos passam a ser adotados sem estarem vinculados à contagem ou mesmo a quantidades reais. A partir disso é que se pode fazer uso criativo do mesmo em situações e contextos diversos, ou mesmo sem contexto algum (ou seja, “moldar” a ferramenta de acordo com propósitos diversos). A apropriação de uma ferramenta psicológica como a semiose matemática requer que o agente tenha um “senso pessoal” em relação à mesma, de forma que possa atribuir a essa semiose um significado que não seja para ele distante e abstrato (Wertsch, 2004, p. 120). Entender de fato a natureza dos números e suas sutilezas pode requerer mais do que o domínio da ferramenta semiótica, exigindo formas mais sofisticadas de pensamento. Por exemplo, o entendimento dos números irracionais exige que se admita que o sistema numérico composto pelos números reais seja não enumerável (não contável), o que significa uma ruptura com contextos imediatos, nos quais objetos são enumeráveis, podendo ser contados por mediação de números naturais ou racionais (os últimos para representar semioticamente as frações). O entendimento dessa propriedade da não enumerabilidade certamente abre portas para que a pessoa possa lidar futuramente com situações mais complexas (por exemplo, na geometria plana ou mais futuramente o conceito de limites). Assim, na internalização de uma ferramenta psicológica como um sistema de signos, a apropriação é um processo longo, consistindo em um estágio mais difícil de ser alcançado do que o domínio. É improvável que possa ser alcançado sem que se frequente ambientes formais de educação, como as escolas – e mesmo assim não é um processo que se encerra quando termina a vida escolar (ou mesmo a universitária).

Quanto aos adultos, é sabido que pessoas que não foram letradas nos ambientes formais exibem dificuldades em descontextualizar a semiose da matemática elementar em seu dia-a-dia. Mesmo que apresentem domínio razoável dessa semiose, normalmente a empregam partindo de contextos concretos, abordagem caracterizada como nível matemático do tipo *sistema 2* (Wertsch, 1985, pp. 48-51) e a descontextualização da semiose matemática parece mesmo ser dependente dos

ambientes formais de educação. Tal dificuldade em descontextualizar essa ferramenta mediadora permite inferir que a apropriação não ocorreu, pois assim o agente não é capaz de empregar essa semiose segundo seus próprios propósitos, em situações e contexto (ou não-contextos) diversos. De fato, é observado que camponeses adultos que não tiveram acesso ao ensino formal (ou que foram levados a abandoná-lo muito cedo) usam uma espécie de matemática informal, distinta daquela que se aprende nas escolas. Isso é observado com camponeses do Movimento Sem Terra (MST) aqui no Brasil (Knijnik, 2002, 2007; Knijnik *et al.*, 2005). Mesmo apresentando um grau básico de domínio da semiose da matemática elementar e tendo “sucesso”⁶ em resolver de forma peculiar diversos problemas matemáticos simples da vida diária, a utilizam de forma quase sempre contextual. Essa característica é comum também em outras culturas envolvendo pessoas que trabalham em comércio informal como vendedoras de rua (Lekoko & Garegae, 2006, trabalho desenvolvido em Botswana, África). Embora as estratégias adotadas sejam fortemente dependentes do contexto sociocultural, essas pessoas tendem a empregar a semiose matemática “quando há um problema a resolver” (Lekoko & Garegae, 2006, p. 63), atribuindo significado a essa semiose apenas quando resolvem esses problemas práticos. Essa forte ligação a contextos específicos, a ponto da semiose matemática básica não fazer sentido se não for usada para resolver um problema prático, mostra que a apropriação não se estabeleceu, apenas algum domínio

⁶ Entende-se por “sucesso” não exatamente o sucesso estrito, alcançado quando se resolve determinado problema com o rigor acadêmico ratificado pela cultura científica, largamente dominante no contexto escolar e acadêmico formais. Apenas sob o ponto de vista dessa cultura dominante, tais estratégias podem certamente ser consideradas insatisfatórias, mesmo que gerem resultados corretos em resposta aos problemas enfrentados. No entanto, o contexto sociocultural no qual a referida comunidade ativamente constrói e se insere, essas estratégias cumprem seus objetivos primordiais e podem ser consideradas como bem sucedidas, mesmo parecendo ingênuas se pudessem ser comparadas às estratégias fundamentadas na matemática formal. Tal consideração não quer dizer de forma alguma que está sendo defendido um relativismo ingênuo, do tipo que afirma que a matemática informal e a formal tenham um mesmo valor universal e que a matemática informal deva ser ensinada nas escolas como tendo o mesmo valor acadêmico que a matemática formal – ambas servem a propósitos distintos, dependentes do contexto sociocultural em que estão inseridas. Assim, não há sentido em fazer juízo de valor comparativo entre ambas – como afirma Wertsch (2004, p. 12), “a contextualização sociocultural é imposta pelo uso dos meios mediacionais” (no caso, recursos semióticos da matemática elementar). Assim, ferramentas mediacionais são situacionais e fortemente dependentes do contexto sociocultural. Como decorrência, mesmo uma pessoa que frequenta regularmente a educação formal e se julgue letrada na matemática básica, usará diferentes estratégias mediacionais quando estiver sendo exigida na escola (por exemplo, resolvendo um problema proposto pelo professor) e na rua, resolvendo um problema prático (por exemplo, calculando o troco ou o desconto a receber por uma compra). Assim, o uso de estratégias mediacionais fundamentadas na matemática formal e informal pode ser percebido em uma mesma pessoa, dependendo da situação e do contexto no qual essa pessoa se encontra. É nesse âmbito que não há sentido em desvalorizar ou mesmo valorizar igualmente (como proposta de ensino) a matemática informal frente à formal, pois ambas ativamente se estabelecem em contextos socioculturais distintos, mesmo que esses contextos interajam entre si e que uma mesma pessoa possa se inserir em ambos. A matemática informal é e deve continuar sendo estudada por vários pesquisadores no sentido de entender como a criança desenvolve proficiência semiótica na matemática. Também é importante no sentido de perceber como esse conhecimento matemático informal ainda se faz presente entre os estudantes na fase escolar e como ele interage com o conhecimento formal.

dessas ferramentas culturais, satisfatório para os propósitos das exigências contextuais imediatas – essas pessoas não “tornaram suas” tais ferramentas semióticas, apenas a dominaram satisfatoriamente para usá-las quando determinada situação o exige.

Outro importante conceito na teoria vygotskyana é o de *Zona de Desenvolvimento Proximal* (ZDP). Vygotsky afirmou originalmente que a ZDP consiste na “distância entre o nível de desenvolvimento real, determinado pela capacidade de solucionar problemas por si mesmo, e o nível de desenvolvimento potencial, determinado pela capacidade de solucionar problemas sob a orientação de um adulto ou em colaboração com parceiros mais capazes” (Vygotsky, 1978, p. 86). Ao contrário de Piaget, que acreditava que a instrução deveria se ajustar ao nível de desenvolvimento psicológico do aprendiz, Vygotsky assume que “o único bom tipo de instrução é aquele que marcha à frente do desenvolvimento, o conduzindo” (Vygotsky, 2012, p. 200). Esse importante conceito deve ser encarado com cuidado. Primeiramente, a simples assistência de um parceiro mais capaz não necessariamente torna o aprendiz capaz de ampliar o campo de tarefas que ele é capaz de realizar.

A atenção de Vygotsky na ZPD não está relacionada diretamente com a capacidade de um indivíduo em realizar tarefas específicas ou um campo de tarefas quando conta com a assistência de um parceiro mais capaz, ou com a assistência em si, mas com o papel dessa assistência no aprendizado e no desenvolvimento psicológico (Chaiklin, 2003). Vygotsky deixa clara essa posição quando afirma que “o aprendizado desperta vários processos de desenvolvimento internos que são capazes de operar somente quando a criança está interagindo com pessoas em seu ambiente e em cooperação com seus pares” (Vygotsky, 1978, p. 90). Assim, Vygotsky deixa explícito também algo mais importante: o nível de desenvolvimento potencial não pode ser pensado em termos de habilidades individuais e traz à tona “as origens interpsicológicas das funções intrapsicológicas” (Wertsch, 1984, p. 12). Além disso, a ZPD é um processo dinâmico, uma vez que o aprendizado “desperta vários processos de desenvolvimento internos” no aprendiz. Mais importante, a ZPD não é um processo automático que dispara quando se estabelece um trabalho colaborativo entre pares (Hogan & Tudge, 1999, p. 43) – é preciso mais do que isso. Wertsch (1984) alerta que a ZPD é um processo que não se estabelece sem que se crie um espaço de intersubjetividade entre os pares (em contextos de educação formal, o professor é o mais típico parceiro mais capaz – esse importante papel do professor indica que a ZPD é um conceito que merece destaque na teoria vygotskiana, quando se pensa na educação em geral).

Em uma situação didática específica (por exemplo, em uma atividade planejada ao exemplo das que foram propostas neste trabalho) tanto o professor, que concebe e

propõe a atividade, como os alunos, que a executam, representam a situação de formas distintas. Isso é esperado, pois tipicamente o professor tem mais maturidade linguística e domina bem mais a semiose⁷ envolvida nos conceitos físicos abordados do que os alunos. Assim, a situação representada pelos alunos e pelo professor não são correspondentes. Essa representação, que envolve domínio semiótico do problema, entre outras coisas, é o que se chama *definição de situação*⁸ (Wertsch, 1984). Considerando-se as atividades concebidas com o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ), não se espera que os alunos construam uma definição de situação compatível com a do professor em relação a quaisquer das atividades que envolvem o *software*. No entanto, é esperado que o professor domine todos os recursos multissemióticos embutidos nele⁹, conheça o funcionamento do interferômetro e cada um de seus componentes, domine a teoria que o explique e, com tudo isso, tenha maturidade linguística para compreender e compartilhar seus inúmeros possíveis resultados nos regimes clássico e quântico. Certamente os alunos não têm o mesmo entendimento da situação didática proposta e nem a mesma maturidade linguística que o professor para compreender todos os recursos semióticos do *software* como ferramenta mediadora¹⁰. Assim, a definição de situação construída pelo professor e pelos alunos muito dificilmente coincide.

Se o objetivo é que percebam os aspectos contraintuitivos da interferência quântica e entendam o cerne da dualidade onda-partícula, não basta propor que realizem

⁷ Na verdade, é impossível de se comunicar e compreender completamente qualquer conceito da física adotando apenas a linguagem verbal, uma vez que tais conceitos são "híbridos semióticos, simultaneamente e essencialmente verbais, matemáticos, visual-gráficos, e acional-operacionais" (Lemke, 2005, p. 87). Essas múltiplas representações de conceitos científicos devem ser tratadas como uma unidade coerente. Como (Lemke, 2005, p. 109) argumenta, eles não são redundantes entre si: ao contrário, "os significados são formados pela co-utilização conjunta de duas ou mais modalidades semióticas, e tal co-utilização de recursos é igualmente necessária para uma interpretação canônica". Ou seja, um conceito físico não pode ser expresso e entendido consistentemente sem o uso de múltiplos sistemas semióticos. Neste trabalho não serão analisadas essas diferentes formas linguísticas presentes em um conceito e as interações entre esses múltiplos recursos. Embora sejam importantes para a construção coerente dos significados veiculados pelos conceitos e dos aspectos e fenômenos que eles representam, uma análise apurada envolvendo multissemiose requer longo tempo e é uma tarefa complexa (é um objetivo para trabalhos futuros no nosso grupo). Apesar desse aspecto não ter sido tratado em detalhe neste trabalho, é importante citá-lo para que se enfatize que são necessários múltiplos recursos semióticos para a compreensão e construção social dos significados dos conceitos físicos.

⁸ Isso pode ser entendido também como uma *perspectiva da situação* (Ferryhough, 1996, p. 54) ou, em outras palavras, um ponto de vista sobre a situação didática e os problemas nela propostos, bem como a forma como encaram os recursos mediacionais disponíveis para participar de tais situações.

⁹ Representações gráficas do interferômetro e cada um de seus componentes, significado dos parâmetros envolvidos, elementos de linguagem verbal do software, entre outros.

¹⁰ O software pode ser entendido como uma ferramenta mediadora mista. Faz intensivo uso de recursos semióticos múltiplos, cujos significados são socialmente compartilhados na comunidade científica e escolar, sendo os resultados expressos pictoricamente e numericamente (nesse caso o software atua como uma ferramenta psicológica). Ao mesmo tempo, o software permite, mesmo que em ambiente virtual, executar ações específicas no interferômetro (mudanças nos parâmetros, inserção e retirada de dispositivos, rotação 3D, entre outros) produzindo diferentes visualizações e resultados que devem ser interpretados (nesse caso, o software pode ser encarado como uma ferramenta técnica).

experiências com o software no sentido de obter tais resultados contraintuitivos. Nesse caso, seria muito mais provável que não conseguissem nem mesmo compreender a própria ferramenta mediadora. É necessário que antes os alunos entendam a própria interferência clássica (entre ondas) e os padrões de interferência, o papel de cada dispositivo do *software*, além de conceitos básicos da física quântica, incluindo a hipótese central do modelo quântico da radiação eletromagnética (o conceito de fótons), entre outros. Em resumo, cabe ao professor construir colaborativamente com os alunos uma terceira definição, diferente da sua própria e mais acessível aos estudantes. É diferente também daquela que os estudantes constroem. Isso é essencial, pois enquanto se pode dizer com certeza que a definição de situação construída pelos estudantes está ancorada no seu nível de desenvolvimento real, nada garante que a definição de situação construída pelo professor corresponda ao nível de desenvolvimento potencial dos mesmos. Assim, é por meio dessa terceira definição de situação, construída colaborativamente com os estudantes, que se espera operar no nível de desenvolvimento potencial dos estudantes.

Dizer que a construção dessa terceira definição de situação é colaborativa não quer dizer que seja planejada em conjunto com os estudantes. O que se deseja enfatizar é que o professor prepara atividades, cursos textos, roteiros e outros materiais de apoio, no sentido de estabelecer uma mediação semiótica com os estudantes, criando um contexto rico de aprendizagem, essencial para que as atividades com o software possam ser propostas em uma base sólida (Wertsch, 1984). Ou seja, é o professor quem conduz esse processo, sempre com um olhar analítico em relação às intervenções discursivas dos estudantes no sentido de ser sensível à definição de situação compartilhada pelos estudantes (ou grupos de estudantes, cada um compartilhando uma ou mais definições de situação). Para isso, foi elaborado um curso introdutório¹¹ em que o professor trabalha com intenso diálogo com os estudantes. Este curso foi auxiliado por um texto introdutório sobre os conceitos básicos a serem trabalhados – no entanto, esse texto foi entregue após o curso.

Com base nesse processo, foram elaboradas atividades com o IVMZ, todas guiadas por roteiros. É nesse sentido que a mediação semiótica desempenha um papel para fazer surgir nas atividades com o software uma terceira definição de situação, bastante mais compartilhada pelo professor e seus alunos do que aquelas concebidas individualmente por ambos. Essa mediação se dá não apenas pela comunicação verbal entre professor e estudantes durante o curso introdutório e o desenvolvimento das atividades com o software, mas também por outros textos e roteiros. Essas atividades

¹¹ O curso foi preparado pelo autor desta dissertação, em conjunto com o professor da oficina (ver o próximo capítulo).

são sempre pensadas para abordarem questões que os estudantes não possam resolver sozinhos, sendo conduzidas paulatinamente e discursivamente a aprofundar os conceitos trabalhados (por exemplo, ao longo das atividades o professor não dá respostas finais aos alunos, mas os auxilia com dicas ou propõe atividades intermediárias com o software, fazendo com que os estudantes direcionem atenção a pontos e conceitos específicos, podendo seguir na atividade e melhor entender os conceitos envolvidos). É nessa terceira definição de situação que se cria então o espaço de intersubjetividade, na qual estudantes e professor podem compartilhar significados e a própria definição de situação. Cabe ressaltar que, nessa nova perspectiva compartilhada pelos estudantes e professor, não há necessariamente um perfeito encaixe entre as perspectivas de ambos – é suficiente que se crie um espaço para que professor e estudantes possam dialogar no cenário dessa nova perspectiva (Fernyhough, 1996, pp. 54-55). É nesse cenário, nesse espaço de intersubjetividade que é negociado em sala de aula, que é criada a ZPD. É algo que deve ser construído e não basta, portanto, colocar em contato estudante e professor ou dois estudantes, um deles assumindo o papel de parceiro mais capaz.

É importante ainda ressaltar o papel do curso introdutório, textos, roteiros e diversos materiais utilizados no estabelecimento e manutenção do espaço de intersubjetividade. Como mostra o trabalho de Sawyer and Berson (2004), o curso, materiais, roteiro e mesmo conversas informais sobre os conceitos envolvidos atuam como *representações externas* e melhoram significativamente o trabalho colaborativo. É comum que os estudantes incorporem em seus discursos todos os tipos de vozes (ver próxima seção) presentes nos mais diversos materiais com os quais tiveram contato, no curso introdutório, notas de aula e outras fontes textuais¹², o que contribui para o enriquecimento das interações discursivas, estimulando *insights* e estratégias discursivas para aprendizado dialógico. Essa origem de todo discurso em contextos externos é conhecida como *intertextualidade*. Segundo Lemke (1992, p. 257), o princípio geral da intertextualidade basicamente afirma que "cada texto, o discurso de cada ocasião, constrói socialmente seus significados de encontro a outros textos e discursos de outras ocasiões". Não importa o quanto uma fala ou texto pareça autoral ou autônomo, é sempre possível rastrear relações com outros textos ou contextos (Kozulin, 2008). Note que essas relações não necessariamente se restringem a textos ou discursos presentes em um contexto próximo (temporal e/ou espacial). A intertextualidade tem relação estreita com a *intercontextualidade*, ou relações entre contextos distintos (Bloome *et al.*, 2005),

¹² Aqui, o termo "texto" pode ser pensado como qualquer forma de discurso, seja oral ou escrito (Lemke, 1990). Wertsch (2004, p. 14) também adota essa noção mais ampla do texto como manifestação discursiva, sendo esses textos que mediam o que ele chama de *memória coletiva* ou, melhor dizendo, *lembrança coletiva*. Lembrança (ou memória) não são ações realizadas por um indivíduo isolado, mas uma ação mediada por recursos textuais socialmente compartilhados. Tais recursos semióticos podem ser parte de um contexto amplo, temporal e/ou espacial. Por isso o termo *lembrança coletiva*.

ou, de forma mais geral, aborda relações "entre os contextos nível *micro* (eventos específicos e situações) e contextos de nível *macro* (estruturas sociais e culturais amplas)" (Bloome *et al.*, 2005, p. 45). Conceitos bakhtinianos como vozes, contexto extraverbal, dialogicidade e outros, têm estreita relação com intertextualidade e intercontextualidade como será visto na próxima seção.

As relações intertextuais e intercontextuais têm papel destacado no estabelecimento da intersubjetividade, crucial para que se abra a ZPD. Como afirma Kozulin (2008, p. 159), "a intersubjetividade muitas vezes se realiza por si na intertextualidade". Assim, a mediação semiótica, fundamental para se estabelecer o espaço intersubjetivo, não se dá apenas pela comunicação verbal entre professor e estudante ou entre estudantes, mas pelas relações intertextuais entre os diversos meios semióticos utilizados e os diferentes contextos em que os conceitos físicos foram abordados.

3.2 A TRANSLINGUÍSTICA DE BAKHTIN

Neste trabalho, a filosofia da linguagem proposta por Mikhail Mikhailovich Bakhtin (1895-1975) é encarada como uma possível expansão às ideias de Vygotsky. Em sua obra, Vygotsky delinea os fundamentos para uma perspectiva sociocultural da ação mediada. No entanto, ele não chegou a abordar efetivamente como os fatores sociais, culturais, institucionais e históricos específicos conectam-se às diversas formas de ação mediada (Wertsch, 1993). Sendo a linguagem verbal a mais importante ferramenta mediadora humana, a filosofia da linguagem desenvolvida por Bakhtin apresenta um caminho para compreender a relação entre o contexto social mais amplo e a fala. É importante perceber que um requisito relevante para a escolha desta teoria como complemento às ideias de Vygotsky é a compatibilidade filosófica entre ambas; duas características que facilitam esta compatibilidade são a inspiração marxista e o contexto histórico e cultural comum na qual foram desenvolvidas.

O termo translinguística reflete a proposta de Bakhtin sobre o estudo das interações discursivas. Para o autor, a realidade concreta da língua não pode ser analisada considerando-se apenas os aspectos formais da mesma, tais como a gramática, a morfologia e a sintaxe (Bakhtin, 2006). As línguas transformam-se constantemente ao longo do tempo e, mesmo em um dado tempo, diferentes manifestações linguísticas são observadas em comunidades distintas ou na mesma comunidade, mas em contextos distintos. Estas modificações ocorrem por meio da interação verbal entre indivíduos e as leis que as determinam são essencialmente sociológicas. O estudo apropriado das interações discursivas requer uma abordagem teórica que abarca fatores culturais, sociais e históricos não contemplados na linguística tradicional. Assim, o termo

translinguística refere-se ao estudo da língua que contempla em sua análise diversos fatores externos à disciplina.

A filosofia da linguagem proposta por Bakhtin diferencia-se em muitos aspectos das duas principais orientações linguísticas de sua época, o subjetivismo idealista defendido por autores como Wilhelm Humboldt e A. A. Potebniá e o objetivismo abstrato, apresentado primeiramente por Leibniz e defendido por Saussure (Bakhtin, 2006). Cinco proposições apresentam as bases da proposta do autor (Bakhtin, 2006 p. 131-132):

- A língua como sistema estável de formas normativamente idênticas é apenas uma *abstração científica* que só pode servir a certos *fins teóricos e práticos particulares*. Essa abstração não dá conta de maneira adequada da *realidade concreta* da língua.
- A língua constitui um processo de evolução ininterrupto, que se realiza através da interação verbal social dos locutores.
- As leis da evolução linguística não são de maneira alguma as leis da psicologia individual, mas também não podem ser divorciadas da atividade dos falantes. As leis da evolução linguística são essencialmente *leis sociológicas*.
- A *criatividade* da língua não coincide com a criatividade artística nem com qualquer outra forma de criatividade ideológica específica. Mas, ao mesmo tempo, a criatividade da língua não pode ser compreendida *independentemente dos conteúdos e valores ideológicos que a ela se ligam*. A evolução da língua como toda evolução histórica pode ser percebida como uma necessidade cega de tipo mecanicista, mas também pode tornar-se “uma necessidade de funcionamento livre”, uma vez que alcançou a posição de uma necessidade consciente e desejada.
- *A estrutura da enunciação é uma estrutura puramente social*. A enunciação como tal só se torna efetiva entre falantes. O ato de fala individual (no sentido estrito do termo “individual”) é uma *contradictio in adjecto*.

3.2.1 Enunciado

Bakhtin estabelece o enunciado como a unidade fundamental de análise das interações discursivas (1997). Esta escolha o diferencia de outras possíveis escolhas, como a palavra ou a frase. O enunciado consiste em um elo na cadeia de comunicação verbal. Cada enunciação possui um sentido definido e único. Este sentido é definido não apenas pelas formas linguísticas do enunciado (palavras, sons, entonações), mas também pelos elementos não verbais da situação (Bakhtin, 2006). Cabe perceber que os enunciados não precisam ser orais – podem ser tanto escritos como gestuais. Desta forma a análise do discurso pode ser realizada em qualquer tipo de discurso.

Cada enunciado é não reiterável, ou seja, a enunciação se dá sempre a partir de uma interação com outras enunciações. Os atos de enunciação são localizados tanto espacial quanto temporalmente, então quando uma mesma pessoa repete um mesmo enunciado em momentos e contextos diferentes, esses enunciados serão diferentes – a cadeia discursiva na qual esse enunciado foi produzido dificilmente coincide nas duas

situações e, nesse caso, os enunciados se articulam a propósitos distintos. Para ilustrar esta diferença entre enunciados que utilizam as mesmas palavras, Bakhtin (2006, p. 136) apresenta um trecho do livro *Diário de um Escritor*, de Dostoiévsky. Neste trecho seis operários utilizam um mesmo substantivo (“uma palavrinha censurada de largo uso”) em contextos diferentes e com entonações diferentes e, em cada situação, com significados diferentes que podem ser compreendidos pelos demais.

Todo o enunciado exige um locutor e um ouvinte (Voloshinov, 1981). O locutor é aquele que realiza o enunciado, enquanto o ouvinte é aquele a quem o enunciado se dirige. O ouvinte é um ouvinte suposto. Ele não precisa estar presente e sequer ter uma existência física real. Um escritor, por exemplo, orienta seu texto a um leitor suposto.

3.2.2 Vozes

O termo voz designa um ponto de vista ou uma perspectiva presente em um enunciado (Wertsch, 1993). Ao produzir um enunciado, o locutor considera não apenas a sua visão sobre o tema proposto, mas também suas perspectivas em relação ao ouvinte. Ela constitui justamente o *produto da interação do locutor e do ouvinte* (Bakhtin, 2006, p. 115). Os enunciados produzidos por um professor ao falar sobre conceitos de física quântica quando se dirige a uma plateia de alunos do Ensino Médio serão muito diferentes se produzidos em uma interação com alunos de um programa de pós-graduação em física.

Assim, em todo enunciado há pelo menos duas vozes, já que ele sempre se constrói com uma direcionalidade, endereçado a um *destinatário suposto* (ou ouvinte) e carregado de intencionalidade. No entanto, dificilmente apenas duas vozes estão presentes em uma cadeia de enunciado. Ao longo da vida, uma pessoa convive com familiares, amigos, professores e colegas, assiste a filmes e novelas, lê livros e revistas e em todas estas situações, assim como em muitas outras, ela entra em contato com diferentes vozes. Assim, ao produzir um enunciado, o locutor pode incorporar, além de sua própria voz e da voz do ouvinte, outras vozes com as quais teve contato. Deste modo, em todo enunciado há o que se chama de interanimação de vozes: uma liberdade para que distintas vozes se reforcem, se contradigam, se apoiem ou se polemizem, entre outros. Esse é um conceito que tem relação forte com a intertextualidade e intercontextualidade. No entanto, como em todo enunciado o locutor toma uma posição axiológica (valorativa), a intertextualidade bakhtiniana não é uma simples revocalização de discursos alheios, mas uma interanimação, na qual o locutor tem alguma liberdade para se contrapor ou para apoiar a diferentes vozes. Assim, um locutor sempre carrega no seu enunciado vozes, interanimando sua voz com estas. E essas vozes podem ter sua origem em contextos bem mais amplos, temporal e espacialmente, ou seja, não necessariamente o contexto mais imediato do espaço e momento no qual se materializou

o enunciado. Por isso, é importante, em toda produção discursiva, tentar inferir o contexto extraverbal (em algumas teorias de análise de discurso, esse contexto se chama *contexto de produção*).

3.2.3 Dialogicidade

Talvez o conceito mais fundamental dentro da teoria de Bakhtin seja a dialogicidade (Wertsch, 1993). Esse conceito se faz presente dentro de toda a obra do autor, seja na produção de enunciados, ou na compreensão dos mesmos. Bakhtin propõe utilizar o termo *diálogo* de forma mais ampla do que apenas na comunicação oral entre dois indivíduos, mas como forma de compreender toda e qualquer comunicação verbal (Bakhtin, 2006, p. 127). O livro, por exemplo, tem sua forma, bem como seu conteúdo, relacionada inexoravelmente com as formas e os conteúdos de outros livros e textos, com os críticos e com os conhecimentos da época (intertextualidade). Para o autor, qualquer enunciação, seja ela oral ou escrita, cotidiana ou formal, constitui apenas uma fração dentro de uma corrente de comunicação verbal ininterrupta (Bakhtin, 2006, p. 128).

Sobre este tema, Voloshinov afirma:

O diálogo - troca de palavras - é a forma mais natural da linguagem. Mais que isso: os enunciados, ainda que emanados de um interlocutor único (como, por exemplo, o discurso de um orador, a aula de um professor, o monólogo de um ator, os pensamentos em voz alta de um homem sozinho) são monológicos em razão da sua forma exterior, mas, dada a sua estrutura semântica e estilística, eles são, na realidade, essencialmente dialógicos (Voloshinov, 1981, p. 4 na tradução em português).

O processo de compreensão de enunciados também é primordialmente dialógico. Bakhtin afirma que a compreensão de um enunciado ultrapassa os limites do reconhecimento das palavras utilizadas e exige a compreensão das mesmas dentro do contexto específico em que são produzidas. As palavras, assim como todos os signos, refletem e refratam uma realidade. Os signos podem ser fiéis à realidade que representam, assim como podem distorcê-la ou apreendê-la dentro de uma perspectiva específica (Bakhtin, 2006). Assim, para compreender um enunciado, o ouvinte corresponde palavras próprias a cada palavra do enunciado do locutor. Estas palavras próprias utilizadas pelo ouvinte para a compreensão dos enunciados são denominadas *contrapalavras*. O grau de compreensão será maior, quanto maior for o número de contrapalavras utilizadas e mais substanciais forem as mesmas (Bakhtin, 2006). Como afirma Bakhtin (2006, p. 135) “compreender a enunciação de outrem significa orientar-se em relação a ela, encontrar o seu lugar adequado no contexto correspondente.”. Sobre o processo dialógico da compreensão, Bakhtin completa: “a compreensão é uma forma

de *diálogo*; ela está para a enunciação assim como uma réplica está para a outra no diálogo” (Bakhtin, 2006, p. 135).

3.2.4 Linguagens Sociais

Diferentes grupos sociais costumam compartilhar entre si expressões e entonações linguísticas que os diferenciam de outros grupos. Surfistas, militares, gaúchos tradicionalistas e qualquer comunidade inserida em um certo cenário sociocultural comunica-se utilizando formas características de linguagem. Por exemplo, um indivíduo expressa-se de maneiras diferentes quando está com a família, com os amigos ou com os colegas de trabalho, ou seja, para transitar nesses diversos meios ele deve dominar diversas formas de linguagem. Assim, pode-se definir linguagem social como uma “forma típica de discurso empregada por uma parcela específica da sociedade dentro de um sistema social em um determinado período de tempo” (Holquist & Emerson, 1981, p. 430).

A ciência possui também suas formas típicas de discurso. A linguagem científica distingue-se da linguagem do cotidiano dos alunos. As características distintivas da ciência em relação à linguagem do cotidiano dos alunos podem torná-la estranha e difícil para os mesmos (Mortimer *et al.*, 1998). A aprendizagem de ciências está, assim, indissolivelmente ligada à aprendizagem das formas específicas de discurso próprias da atividade científica. Sendo assim, a fonte primordial de dados para análise neste trabalho serão os enunciados produzidos nas interações discursivas que ocorreram ao longo da intervenção didática. Isso será melhor detalhado no próximo capítulo.

4 UNIDADE DIDÁTICA E ANÁLISE DE ENUNCIADOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos, detalhes da unidade didática desenvolvida, o contexto e os resultados de sua aplicação. Na primeira seção, serão apresentados os princípios norteadores para o desenvolvimento da unidade didática e seus conteúdos. Na segunda seção será apresentado o contexto no qual o curso foi executado: características dos estudantes e particularidades do modelo de oficina adotado. Na terceira seção, a dinâmica de cada aula será detalhada e analisada.

4.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Inicialmente, os alunos participaram de algumas aulas introdutórias envolvendo vários conceitos básicos, não apenas de física quântica. Isso foi essencial antes dos estudantes serem diretamente envolvidos em atividades didáticas com o IVMZ. Estas aulas estão descritas na seção 4.2. Como colocado no referencial teórico-metodológico, estas aulas tem como objetivo intensificar a intersubjetividade e possibilitar que o trabalho desenvolva-se na ZDP. Além disso, foi elaborado um texto que foi distribuído aos alunos, contendo o que foi tratado no curso, para servir como material de consulta. Esse texto foi entregue depois do curso.

As atividades desenvolvidas ao longo do curso foram gravadas em áudio e vídeo para análise posterior. Essa análise foi realizada com fundamento na teoria vygotskiana e na filosofia bakhtiniana. Na perspectiva sociocultural, em especial nas teorias de Vygotsky e Bakhtin, a linguagem verbal é uma fonte primordial de análise – esta é a principal forma de mediação semiótica e assumindo que os significados são socialmente construídos, manifestando-se primordialmente em interações discursivas (Lemke, 1982, 1990). A análise das atividades didáticas tem como fonte de dados os enunciados produzidos nas interações discursivas entre estudantes e entre estudante e professor. A internalização, como já citado, é um processo complexo e importante que é muito difícil de observar e “medir” diretamente (Lantolf, 2003). Assim, a melhor maneira de inferir sobre a possível internalização de ferramentas psicológicas, mesmo que se trate de uma internalização embrionária, deve se concentrar na análise de enunciados dos estudantes a cada momento (Gee & Green, 1998; Wickman & Östman, 2002). Portanto, deve ser dada especial atenção às estratégias discursivas que os estudantes utilizam para compartilhar significados, compreender conceitos ou comunicar sua própria interpretação para os outros. Assim, no âmbito da perspectiva sociocultural é usual (e, principalmente, coerente) concentrar a atenção muito mais na análise processual de interações entre membros do grupo estudado (principalmente nas interações discursivas)

do que em comparações entre resultados educacionais iniciais e finais (por exemplo, resultados de pré e pós-testes). Assim, é nos enunciados produzidos nas interações discursivas o foco da análise. Como ressaltado por Gee e Green (1998), cada dupla é encarada como constituída por membros de uma microcomunidade, com postura ativa nas práticas discursivas que surgem nos diversos eventos ao longo das atividades. Eles se engajam nessas práticas transformando esses discursos, elaborando construções e reconstruções dos significados relacionados aos conceitos físicos envolvidos, inseridos em contextos que consistem em oportunidades de aprendizagem. Tal ponto de vista é também defendido por Hicks (2008, p. 136) quando afirma que a aprendizagem manifesta-se como "a construção conjunta (ou reconstrução) de significados sociais a partir de parâmetros de atividades emergentes, de natureza discursiva e socialmente negociadas".

Embora as premissas metodológicas do referencial sociocultural não excluam os resultados educacionais fornecidos por testes (ou similares) como dados auxiliares, é inegável que esse tipo de resultado por si só não é capaz de capturar efetivamente estratégias de aprendizagem discursivas que ocorrem ao longo de intervenções didáticas que privilegiam o trabalho colaborativo entre pares.

4.2 UNIDADE DIDÁTICA

A unidade didática desenvolvida neste trabalho baseia-se nas propostas de Pessoa Jr. (1997, 2003) e Ostermann *et al.* (2009), que inspiram tanto a definição dos conteúdos quanto a forma como abordá-los. A unidade se inicia com a discussão de tópicos da óptica ondulatória, passa pelo efeito fotoelétrico, culminando com o estudo sobre a dualidade onda-partícula a partir da análise de diversas situações envolvendo o uso do IVMZ. A análise do funcionamento do interferômetro também é utilizada para uma breve discussão acerca do caráter probabilístico da mecânica quântica. Cabe destacar que a polêmica histórica sobre a natureza da luz começa a ser apresentada com a discussão de tópicos da óptica ondulatória a partir das posições de Newton e Huygens. É nessas bases que se começa a construir o espaço de intersubjetividade mencionado e explicado no capítulo anterior.

4.2.1 Contexto

A unidade didática desenvolvida neste trabalho foi implementada no Colégio Israelita Brasileiro, localizado em uma área central da cidade de Porto Alegre, em conjunto com um dos professores de Física da instituição, chamado neste trabalho de Professor Girafales. A unidade didática foi aplicada em forma de uma oficina extracurricular no turno inverso ao das aulas regulares. A participação na oficina era

facultativa a todos os alunos do Ensino Médio. Ao todo, dez alunos participaram de pelo menos uma das aulas da oficina; todos estudavam no 1º ano do Ensino Médio.

A unidade didática foi ministrada entre os dias 15 de outubro e 29 de novembro de 2013. Foram sete aulas, das quais seis foram realizadas na própria escola, sempre às terças-feiras das 13 horas e 30 minutos às 14 horas e 30 minutos. A última aula da oficina ocorreu no Instituto de Física da UFRGS, em uma sexta-feira entre as 14 e as 17 horas. Baseado na forma como a unidade didática está estruturada, foi desenvolvido um texto de apoio para os alunos (Apêndice VI), que poderia ser entregue em uma das primeiras aulas ajudando os alunos a melhorar sua compreensão sobre os conteúdos trabalhados. No entanto, o texto acabou sendo finalizado e entregue aos alunos apenas no ano seguinte.

Como já citado, a análise das interações discursivas ocorridas durante a implementação da proposta didática foi realizada por meio da análise bakhtiniana. Seguindo essa linha analítica, diversas falas dos alunos aparecem transcritas ao longo da descrição das atividades. Inicialmente, buscou-se transcrever *ipsis litteris* as falas registradas, mas em diversas situações elas tornavam-se incompreensíveis. Portanto, em muitos casos optou-se por retirar expressões repetidas ou gaguejos. Os trechos transcritos que estão sublinhados representam leituras diretas de algum texto. Comentários com objetivo de explicar o significado de alguma fala ou acrescentar algo a ela foram colocados entre colchetes. Os nomes dos professores e alunos citados ao longo da análise são fictícios a fim de preservar a identidade dos envolvidos.

4.2.2 Aula 1 – Introdução à oficina

Essa aula consistiu em uma discussão guiada. O objetivo da aula era que os alunos expressassem seus conhecimentos e concepções sobre tópicos relacionados à física quântica. Dessa forma, cabia aos professores questionarem os alunos sobre diversos temas de física quântica e incentivá-los a expressar suas opiniões. Ela ocorreu no dia 15 de outubro de 2013, tendo duração de 57 minutos. Estavam presentes nela o professor Girafales, professor-pesquisador, Artur, Bruno, Carlos, Daniel, Elisa, Fabio, Gustavo, Henrique, Igor e João.

Essa aula foi organizada em dois momentos distintos. No primeiro momento, os dois professores realizaram uma apresentação do projeto e do professor-pesquisador. Nesse processo, foi esclarecido que a oficina faria parte do trabalho de mestrado do professor-pesquisador, que as aulas seriam gravadas e analisadas, que seria mantido sigilo em relação à identidade dos participantes e que os principais objetivos da oficina eram que os alunos aproveitassem as aulas, se interessassem pelos assuntos abordados e aprendessem alguns dos conceitos centrais da teoria quântica.

Esse primeiro momento teve duração de aproximadamente doze minutos e os professores falaram durante praticamente todo o tempo. Dentre as falas dos professores, destaca-se o trecho no qual o professor-pesquisador explicita seus objetivos em relação à oficina:

1. **Professor-Pesquisador:** *Esse meu mestrado vai ser em ensino de quântica. E quero observar o desenvolvimento deste grupo nas aulas, [...]. e ver como é que vocês estão interagindo, como é que vocês estão falando para tentar descobrir se vocês realmente estão entendendo os conceitos, [...]. Que que eu espero: que a gente vai fazer do curso, a gente vai fazer um curso que vocês gostem, então descobrir o que vocês têm de interesse na área de Mecânica Quântica, Física Quântica e trazer várias oportunidades para vocês; tanto em aulas teóricas tanto em experimentos [...].*

O segundo momento consistiu em uma conversa entre os professores e os alunos. O objetivo era investigar os conhecimentos que os estudantes compartilhavam sobre física quântica, quais suas expectativas em relação à oficina e quais os assuntos na área que mais lhes interessavam. Os professores coordenavam a conversa, introduzindo questionamentos à medida que a discussão se desenvolvia. Essa estratégia é uma das estratégias básicas em estabelecer a intersubjetividade, pois ajuda a criar um plano comunicativo comum, compartilhado entre os professores e os alunos. Era esperado que os alunos tivessem familiaridade bastante limitada com o tema e, por isso, as intervenções do professor e do professor-pesquisador foram cruciais para que tal comunicação fluísse neste plano compartilhado. Como ferramenta mediadora para auxiliar os professores a lembrarem dos assuntos sobre os quais deveriam questionar os estudantes, foi desenvolvido um pequeno roteiro para a aula (Apêndice II). Entre os assuntos abordados estão o princípio da incerteza, dualidade onda-partícula e modelos atômicos. Este segundo momento durou aproximadamente 45 minutos. Nos primeiros minutos, os alunos mostraram-se bastante tímidos e, para fazê-los falar, os professores utilizaram a estratégia de chamar um aluno pelo nome para que este respondesse à pergunta.

2. **Professor-Pesquisador:** *Então, pergunta número 1, que vocês estão esperando do projeto? Quais as expectativas? Que vocês têm curiosidades, que vocês querem saber? [Silêncio].*
3. **Professor Girafales:** *Pode chamar pelo nome ó, fica mais fácil, é um incentivo. [...]*
4. **Professor-Pesquisador:** *Bom, então vou escolher assim. Fabio [Olhando para a chamada].*
5. **Fabio:** *Que eu espero?*
6. **Professor-Pesquisador:** *É.*
7. **Fabio:** *Eu espero aprender. [Risadas].*

Entre as expectativas para a oficina, os alunos destacaram a integração entre a criação das teorias científicas e os eventos históricos (ou sócio-históricos) que levaram a isso, a parceria com a Universidade e a realização de experimentos. Ao longo da conversa, alguns alunos participaram de maneira mais ativa do que outros. Artur, Carlos, Daniel, Elisa e Fabio foram os alunos que mais participaram da conversa, enquanto os demais tiveram poucas e breves participações. Esta característica é comum e esperada em dinâmicas de grupo, mas dificulta a análise de diferenças individuais

entre os estudantes. Em relação aos conhecimentos de física quântica, os alunos relacionaram-na ao estudo dos menores constituintes da matéria, além de mostrarem possuir um conhecimento incipiente sobre o princípio da incerteza, a dualidade onda-partícula e a difração de elétrons. Ao ser questionado sobre o que é a física quântica, Artur respondeu:

8. **Artur:** *A física quântica é uma série de teorias que pretendem descrever não só movimentação das partículas, mas também a constituição delas no nível atômico, da matéria, menor que atômico. É uma série de teorias que pretendem descrever isso.*

Ao falar sobre suas expectativas, Elisa comentou:

9. **Elisa:** *[...] Mas quando a gente trabalha com física quântica, que é a física das partículas [...]. Não sei eu acho muito mais interessante, aquele material que tu nos passou [dirigindo-se ao professor Girafales] [...].*

Em relação ao comportamento surpreendente dos objetos quânticos, Artur afirmou:

10. **Artur:** *[...] Tem uma coisa, tu só vai saber onde o elétron tá quando tu medir ele, e quando tu medir ele tua medição vai interferir no lugar dele [...].*

Em relação à dualidade onda-partícula, ocorreu o seguinte diálogo:

11. **Professor-Pesquisador:** *Vocês já ouviram falar sobre a dualidade onda-partícula?*
12. **Carlos:** *Sim, que o [incompreensível] pode se comportar como onda e como partícula [fazendo um movimento de onda com a mão].*
13. **Artur:** *Não, o elétron ele pode se comportar como onda e como partícula.*
14. **Professor-Pesquisador:** *E a banana que a gente come?*
15. **Artur:** *Não, não tem a dualidade onda-banana.*
16. **Professor-pesquisador:** *Não, não, a banana pode se comportar... [como onda ou como partícula?].*
17. **Artur:** *Não, não pode.*
18. **Carlos:** *Pode? [Em tom de surpresa].*

Nenhum dos professores responde à pergunta de Carlos, pois o objetivo geral do curso é criar colaborativamente uma definição de situação comum a professores e estudantes, estabelecendo a intersubjetividade nas experiências com o IVMZ. Note-se que há um tom de surpresa quanto à ideia da dualidade onda-partícula ser válida para objetos macroscópicos¹³.

¹³ De fato é, apesar de ser quase impossível sua observação direta considerando um objeto das dimensões de uma banana. Atualmente o recorde de tamanho de objetos cujo comportamento dual é observado experimentalmente pertence a certos tipos de moléculas orgânicas complexas ou *clusters* inorgânicos (Eibenberger *et al.*, 2013; Hornberger *et al.*, 2012), mas existe a possibilidade de que em breve a dualidade onda-partícula seja revelada por objetos bem maiores, da ordem de nanômetros (Bateman *et al.*, 2014; Romero-Isart *et al.*, 2011). Fenômeno ainda mais surpreendente, que está gerando discussão, são sistemas clássicos que exibem comportamento dual, análogo aos sistemas quânticos (Couder & Fort, 2012; Davydov, 2012). Este fenômeno ocorre com gotículas de óleo (“partículas” clássicas) que “pulam” em uma superfície líquida que é perturbada de modo a apresentar oscilações verticais. Em determinadas condições se estabelece um complexo acoplamento dinâmico entre a onda na superfície líquida e a onda provocada pelo “pulo” da gotícula, de modo que a onda resultante passa a governar a dinâmica da gotícula tal qual a onda piloto governa a dinâmica do objeto quântico (no modelo Broglie-Bohm). Nesses casos, podem ser previstos e observados fenômenos análogos aos previstos pela física quântica, como interferência e difração de partícula única (Couder & Fort, 2006), efeito túnel (Eddi *et al.*, 2009),

19. **Fabio:** *Óbvio que pode, senão ele não iria...*

Depois, ainda tratando sobre a dualidade o professor pesquisador questionou:

20. **Professor-Pesquisador:** *Não, não; vocês falaram: o elétron pode se comportar como uma onda, o elétron pode se comportar como partícula. São só essas duas únicas possibilidades que o elétron pode se comportar?*

21. **Carlos:** *É isso que a gente sabe.*

Os enunciados acima (8-21) apresentam manifestações das principais concepções apresentadas pelos estudantes ao longo da aula. Em sua definição de física quântica, Artur afirma que esta estuda átomos e partículas sub-atômicas (enunciado 8); ao tratar da deslocalização de objetos quânticos e da dualidade onda-partícula, Artur refere-se apenas ao comportamento de elétrons. Estes enunciados indicam que Artur não considera que o comportamento da luz ou de objetos macroscópicos sejam temas de estudo da física quântica, a mesma concepção parece ser compartilhada por outros estudantes, como apresentado no enunciado 9 por Elisa e pelo fato de que tanto a luz quanto objetos macroscópicos não terem sido citados em nenhum momento como objetos de estudo da disciplina. Ao longo da conversa, os alunos apresentaram um domínio rudimentar das ferramentas semióticas¹⁴ necessárias à compreensão dos conceitos e fenômenos da física quântica. Sempre que os professores questionavam em relação a um conceito, os alunos traziam respostas incompletas e mesmo que fossem feitos novos questionamentos para que aprofundassem o assunto, as respostas traziam poucas informações novas. No enunciado 10, por exemplo, Artur aponta para o papel da medição na física quântica, mas não aborda a questão do colapso ou o caráter probabilístico da medição. Também não especifica como a medição “interfere” no “lugar dele”.

Em relação à dualidade onda-partícula, Artur relacionou-a diretamente ao comportamento dos elétrons (enunciado 13) indicando que ele ainda não descontextualizou o conceito de modo a associá-lo a uma característica mais geral da matéria e da luz, esta percepção é corroborada pelo enunciado 17 em que ele nega a possibilidade de um comportamento dual às bananas. Esta relação entre dualidade onda-partícula e elétrons parece ser compartilhada por Carlos e Fabio que nos enunciados 18 e 19 se mostram surpresos após o questionamento do professor. Não fica claro se estes estudantes associam a dualidade onda-partícula exclusivamente ao comportamento dos elétrons ou ao de partículas elementares em geral. Ainda em relação à dualidade onda-

formação de estruturas análogas aos currais quânticos (Harris *et al.*, 2013) e até mesmo obtenção de autoestados quantizados quando a gotícula é sujeita a um potencial – o que é quantizado é o momentum angular da gotícula e a extensão da sua órbita (Perrard *et al.*, 2014).

¹⁴ Na verdade são ferramentas de natureza multissemiótica, como explicado no capítulo anterior. Obviamente, não se espera que alunos de ensino médio dominem plenamente a multissemiiose dos conceitos fundamentais da física quântica, pois, entre outras coisas, envolve domínio de um formalismo matemático sofisticado.

partícula, no enunciado 21, Carlos mostra desconhecer a existência de fenômenos intermediários¹⁵ (Pessoa Jr., 1997), concepção que ele acredita compartilhar com os colegas. A principal influência na formação dos conhecimentos dos alunos sobre física quântica parece ter sido algumas aulas com o Professor Girafales quando estavam na 8ª série do Ensino Fundamental. Vários alunos referiram-se a elas durante a conversa, ou seja, muitas falas parecem ser mediadas em termos dessas vozes – há uma vantagem nisso, uma vez que esse tipo de intertextualidade permite que já exista um espaço de intersubjetividade antes mesmo de iniciar o curso. É nesse sentido, de mediar falas do presente com interanimação de vozes que ocorreram em outros contextos, que representações externas são importantes para enriquecer o trabalho colaborativo (Sawyer & Berson, 2004). Em relação às suas expectativas para a oficina, Fabio afirmou:

22. **Fabio:** [...] mas numa aula a gente falava de um assunto, aí na outra aula a gente falava de outro assunto [...] [Referindo-se às aulas com o Professor Girafales e apontando que não conhecia relações entre os diferentes aspectos da teoria Quântica]

Durante uma discussão sobre os conhecimentos dos alunos ocorreu o seguinte diálogo:

23. **Professor-Pesquisador:** [...] Não sei, alguém viu filme sobre quântica, livro sobre quântica, cura quântica.

24. **Elisa:** [...] Não tá muito fresco na minha memória [...]. Desde o ano passado que eu não trabalho com isso, então, como era assim meio primeiro contato [...].

Ainda em relação ao que os estudantes sabiam, houve outro episódio.

25. **Professor-Pesquisador:** Tem alguma? [Abrindo espaço para outras contribuições]

26. **Daniel:** O que eu mais vi foi sobre o computador.

27. **Professor-Pesquisador:** Computador?

28. **Professor Girafales:** Ah é, nós abordamos o computador quântico.

Se por um lado as vozes veiculadas nas aulas que os estudantes assistiram sobre física quântica mostraram-se importantes ao longo da conversa, vozes associadas a temas de mecânica quântica em destaque na mídia ou ao misticismo quântico pouco se fizeram presentes nos enunciados dos alunos. No enunciado 23, o professor-pesquisador pede de forma explícita que os alunos falem sobre misticismo quântico ou temas veiculados na mídia e mesmo assim nenhum aluno fez comentários neste sentido. Isso pode ser sinal de que não tiveram contato com o assunto (o que é pouco provável, uma vez que há tempos esse assunto é bastante presente em vários veículos de informação e comunicação) ou uma interanimação de não alinhamento, ou seja, o silêncio pode indicar que não se alinham a essa perspectiva (voz) mística da teoria quântica e

¹⁵ Quando o objeto quântico apresenta comportamentos parcialmente ondulatório e corpuscular em um mesmo experimento – em um interferômetro de duas vias como o interferômetro de Mach Zehnder, isso gera padrão de interferência com visibilidade menor do que 1, simultaneamente sendo possível obter informação parcial sobre o caminho do objeto quântico no interferômetro.

simplesmente ignoram o assunto. Mesmo o silêncio e a omissão é, para Bakhtin, valorativa.

A análise da primeira aula aponta que, de modo geral, os alunos sabem da existência dos conceitos de física quântica que serão abordados durante a unidade didática, porém os compreendem de forma superficial – isso, como já citado, permite que se estabeleça uma intersubjetividade, mesmo que tênue, mesmo antes do curso. Como citado no capítulo anterior, mesmo um nível básico de intersubjetividade permite que muitas atividades possam ser realizadas em uma definição de situação compartilhada por professor e estudantes, o que ajuda a trabalhar na ZDP. É sabido que mesmo um domínio básico de recursos semióticos pode ser suficiente para participar efetivamente de uma dada atividade didática que exija que se faça uso de tais recursos. Como afirmam Wertsch e Kazak (2005, p. 3), “muitas vezes parece ser possível utilizar sistemas de signos para comunicar até mesmo quando se tem um nível muito baixo de entendimento compartilhado sobre todas as suas implicações”. Em situações didáticas, ou mesmo na vida diária, isso pode ser observado. O exemplo citado no capítulo anterior mostra como camponeses, mesmo com domínio básico da semiótica da aritmética, elaboram estratégias para contar e realizar operações básicas. Essa característica das ferramentas psicológicas tornam possível que os estudantes consigam atuar além do nível atual de domínio da ferramenta semiótica, o que é desejável em situações didáticas – é por essa via que se estabelece a intersubjetividade com parceiros mais capazes, mais comumente o professor, o que facilita trabalhar na ZDP (Wertsch & Kazak, 2005, p. 4).

4.2.3 Aula 2 – Comportamento ondulatório da luz

Nessa aula, os professores realizaram uma série de experimentos a fim de explicar de maneira simplificada algumas das principais características da luz: reflexão, refração, difração e interferência. Em conjunto com as explicações das características, os professores buscaram discutir as visões da luz como onda ou composta de partículas, ressaltando a vitória aparentemente definitiva do modelo ondulatório a partir da segunda metade do século XIX. A aula ocorreu no dia 29 de outubro de 2013, durando 55 minutos e contando com a presença do professor-pesquisador, do professor Girafales e dos alunos Bruno, Daniel, Elisa, Fabio e Gustavo. Totalizando dois professores e cinco alunos.

Essa aula teve por objetivo apresentar os modelos corpuscular e ondulatório¹⁶ para a luz, enfatizando que ao fim do século XIX a vitória do modelo ondulatório aparentava

¹⁶ Aqui estamos nos referindo não ao modelo fotônico atual da eletrodinâmica quântica (ou óptica quântica), mas à famosa controvérsia entre Newton e Huygens sobre a natureza da luz.

ser definitiva. A aula envolveu a realização de experimentos de demonstração, o uso de vídeos e simulações, uma apresentação de *slides*, explicações orais e desenhos no quadro branco. A aula iniciou-se com a explicação dos fenômenos da reflexão e da refração e a possibilidade de explicá-los com um modelo corpuscular. Uma vez explicados os fenômenos, utilizou-se um laser e um prisma triangular de acrílico para demonstrar os fenômenos da reflexão, refração e reflexão interna total. A Figura 1 apresenta o professor realizando o experimento (A), os fenômenos da reflexão interna total (B), reflexão e refração (C).



Figura 1: Imagens dos experimentos realizados sobre reflexão, refração e reflexão interna total.

A discussão em torno da reflexão e da refração da luz teve duração de aproximadamente 12 minutos. Ao longo das explicações e da realização dos experimentos, os estudantes fizeram perguntas e comentários sobre o que vinha sendo explicado, mostrando que estavam interessados e acompanhando as explicações. A forma como foi discutida a reflexão e a refração buscou levá-los a ter apenas um domínio básico dos conceitos. Assim, foi dito que a reflexão ocorre quando a luz incide sobre uma superfície e retorna ao meio de onde provém e que a refração ocorre quando a luz incide sobre uma superfície e a penetra, mudando sua velocidade e, em alguns casos, sua direção de propagação. Enfatizou-se ainda que tanto a reflexão quanto a refração são fenômenos que ocorrem com a luz e podem ser explicados tanto por um modelo corpuscular quanto por um modelo ondulatório. Nada se afirmou sobre

mudança de fase provocada por reflexão ou por transmissão quando há mudança de meio, pois nesse estágio não fazia sentido priorizar o modelo ondulatório (que na física clássica é o que explica consistentemente tais mudanças).

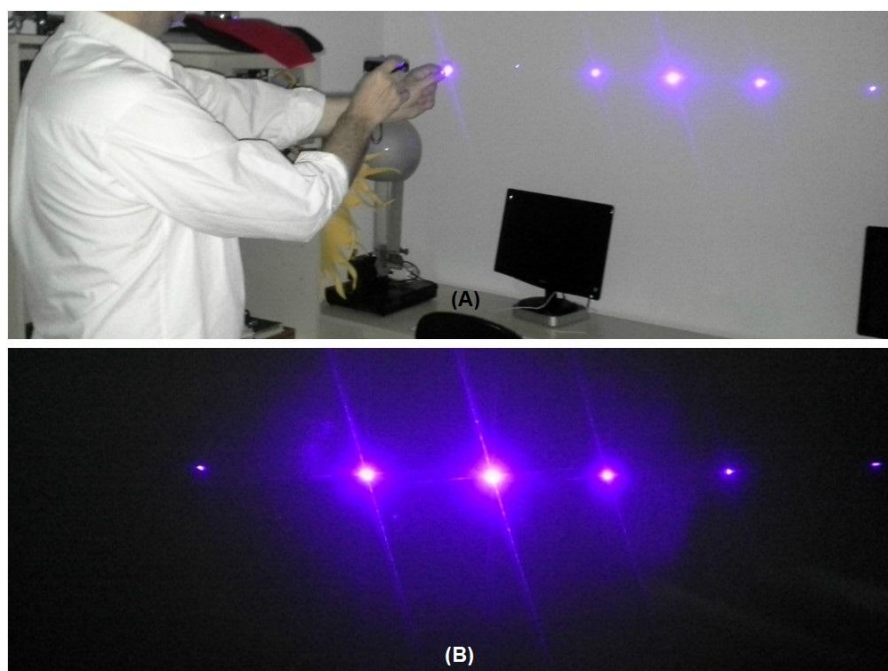


Figura 2: Imagens do experimento realizado sobre interferência com uma grade de difração.

Em um segundo momento, prosseguiu-se com a apresentação dos fenômenos de interferência e difração. Foi explicitado que estes fenômenos não podiam ser explicados pelo modelo corpuscular e realizou-se um experimento demonstrativo com o uso de uma rede de difração e um laser. A Figura 2 apresenta o professor Girafales realizando o experimento (A) e o padrão de interferência projetado na parede da sala (B).

Para a explicação dos fenômenos de interferência e difração, foram utilizados vídeos, animações e desenhos no quadro. Ao explicar a interferência recorreu-se à representação senoidal da onda, ou seja, com uso de semiose matemática para que pudessem ser entendidas certas propriedades básicas das ondas e os motivos da interferência ocorrer. A Figura 3 mostra os desenhos do Professor Girafales no quadro para explicar os conceitos de interferência construtiva e interferência destrutiva. Foi mostrado a parte inicial de um vídeo do Dr. Quantum¹⁷, que apresenta a interferência (ou não) no experimento da dupla fenda de Young, usando bolinhas de gude e após ondas, contrastando os comportamentos corpuscular (sem interferência) e ondulatório (obtendo interferência). Outro vídeo¹⁸, utilizado nas explicações sobre interferência,

¹⁷ Vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=e6pN8TDpAdw>.

¹⁸ Vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=SDPQHJx4FtM>

mostra uma experiência com duas fontes que perturbam a água de um lago, formando pequenas ondas que interferem entre si. Por fim, utilizou-se também uma simulação desenvolvida pelo projeto PhET¹⁹, que possibilita visualizar diversas situações envolvendo o comportamento das ondas e sua interferência.

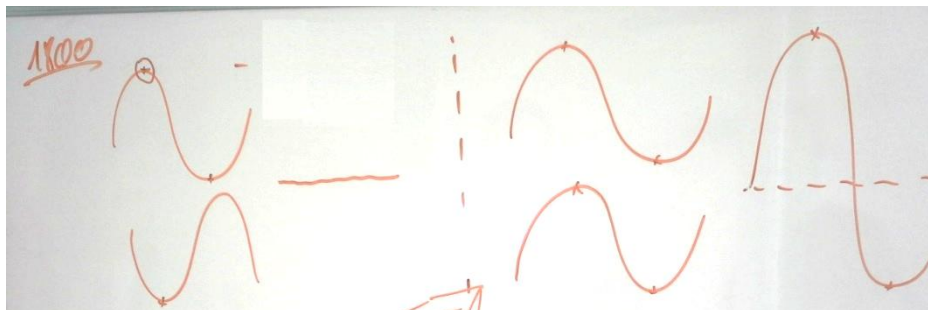


Figura 3: Desenhos do Professor Girafales sobre Interferência. À esquerda representa-se esquematicamente a interferência destrutiva entre duas ondas, enquanto à direita, a interferência construtiva.

Esse segundo momento teve duração de aproximadamente 30 minutos. Durante as explicações os alunos realizaram diversas perguntas, evidenciando que acompanhavam as explicações, embora com alguma dificuldade na compreensão do fenômeno. O objetivo da discussão em torno dos conceitos de difração e interferência não era que os alunos tivessem domínio pleno do assunto, mas que compreendessem que ondas não são localizadas, que ao passar por um obstáculo elas sofrem espalhamento, que interferência e difração são fenômenos tipicamente ondulatórios, que a interferência ocorre quando duas ondas se sobrepõem e que esta interferência pode criar padrões de máximos e mínimos, dependendo de como as cristas e vales se configuram.

Uma vez finalizada a discussão sobre interferência e difração, prosseguiu-se com a apresentação da grande contribuição teórica de Maxwell, teoria que prevê a existência de ondas eletromagnéticas e suas várias propriedades físicas. Para as explicações sobre a onda eletromagnética, o professor Girafales abriu uma apresentação de *slides* (Apêndice III), que trazia as equações de Maxwell e sua interpretação física. A explicação e discussão sobre a equação da onda eletromagnética durou cerca de seis minutos. Essa explicação não buscou discutir o que são campos elétricos, magnéticos ou o que exatamente significa uma equação de onda. Essa etapa tinha por objetivo apenas que os alunos soubessem que existe uma forma característica de equação para a descrição do comportamento de ondas e que Maxwell demonstrou teoricamente, por meio dessas equações, que sua teoria previa a existência de tais ondas. A luz, no contexto dessa teoria, é encarada como uma onda eletromagnética. Após as famosas experiências de Hertz (entre 1886 e 1889), que corroboraram as previsões de Maxwell,

¹⁹ Simulação disponível em: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-interference>.

parecia que se encerrava de forma definitiva a discussão sobre a natureza da luz e os cientistas da época aceitaram encará-la como onda. Nos últimos minutos da aula, o professor começou a introduzir a hipótese quântica para a luz, porém esse tema foi abordado na discussão da Aula 3, momento em que o debate é retomado e aprofundado.

4.2.4 Aula 3 – Comportamento Corpuscular da Luz

Esta aula teve por objetivo apresentar alguns fenômenos que não podiam ser explicados pelo modelo ondulatório da luz. A aula ocorreu no dia 5 de novembro de 2013 e durou 45 minutos, tendo a presença do professor Girafales e dos Artur, Bruno e Gustavo, totalizando um professor e três alunos. Essa aula teve por objetivo discutir a necessidade da hipótese da quantização da energia²⁰ da luz a partir da análise do efeito fotoelétrico e apresentar brevemente o que é um interferômetro. A aula utilizou uma apresentação de *slides* (Apêndice III, continuação da apresentação usada na Aula 2), explicações orais, desenhos no quadro branco.

A aula iniciou-se com uma breve retomada da Aula 2, com o professor enfatizando que na aula anterior foi abordado o comportamento ondulatório para a luz e que nesta aula se abordaria fenômenos que são melhor explicados admitindo que a luz possa apresentar comportamento corpuscular. Após, o professor passou a falar sobre o comportamento corpuscular da luz, apontando que a energia da luz é quantizada e esses *quanta* de energia denominam-se fótons e que a energia de cada fóton depende da sua frequência. A partir desse modelo, o efeito fotoelétrico foi explicado como a interação entre um fóton e um elétron na superfície de um metal. O professor apontou que o fóton precisa de uma energia mínima (função trabalho) para arrancar o elétron, que esta energia mínima variava para cada material, que um fóton poderia arrancar um só elétron e que, se a frequência da radiação incidente (e, portanto, a energia dos fótons incidentes) fosse menor do que essa frequência mínima, o efeito fotoelétrico não ocorreria. Cabe apontar que ao longo da explicação o professor não abordou os motivos pelos quais o modelo ondulatório não consegue explicar o efeito fotoelétrico. Essa omissão justificase pelo fato de que o objetivo dessa discussão não era que os alunos compreendessem

²⁰ Essa necessidade foi posta em suspeita no final da década de sessenta, quando o modelo fotoelétrico foi explicado por um modelo semiclássico para a radiação eletromagnética, sem uso da hipótese do fóton. Em outras palavras, sem necessidade de postular a quantização de energia (Lamb Jr. & Scully, 1969; Mandel, 1976). O efeito Compton igualmente pode ser obtido por via semelhante (Dodd, 1983; Strnad, 1986). No entanto, pode-se dizer que o modelo fotônico é hoje aceito plenamente. Uma razão é o incrível sucesso alcançado pela eletrodinâmica quântica em descrever e prever diversos fenômenos. Do ponto de vista empírico, experimentos com fótons individuais vêm sendo realizados desde o final da década de 60 (ver, por exemplo, Pfleeger & Mandel, 1967) e desde lá houve um significativo desenvolvimento tecnológico que possibilitou a concepção de experimentos cada vez mais precisos e ambiciosos no campo da óptica quântica, como os famosos experimentos realizados pelo grupo de Alain Aspect na década de 80 (Aspect *et al.*, 1982a; Aspect *et al.*, 1981, 1982b; Grangier *et al.*, 1986).

profundamente o efeito fotoelétrico, mas que compreendessem suas características básicas a fim de ficarem cientes sobre o comportamento corpuscular para a luz.

Ao fim da discussão sobre o efeito fotoelétrico, o Professor Girafales resume o objetivo das Aulas 2 e 3:

29. *Professor Girafales: Então esse é o efeito fotoelétrico, foi o primeiro fenômeno que comprova o caráter corpuscular da luz. Eu não posso explicar este fenômeno utilizando a ideia de que a luz é uma onda, isso que é importante. Já o fenômeno da difração e interferência, que vocês viram naquela primeira aula, eu não posso entender aquilo como uma partícula. Então a luz tem um comportamento dual, em determinados experimentos ela se comporta como partícula, em determinados experimentos ela se comporta como onda.*

Após este resumo, Artur faz a pergunta que resume o objetivo geral de toda a unidade didática:

30. *Artur: Eu sei que pode ser meio chato... Mas como que ela [a luz] se decide como ela vai se comportar?*

Esta pergunta do Artur aponta para um sucesso ao menos parcial das primeiras aulas da unidade didática, uma vez que a pergunta é justamente aquela que as aulas seguintes tentarão responder. Como se vê, parece que a intersubjetividade começa a se estabelecer de forma mais significativa em uma definição de situação comum. No enunciado 30, Artur ainda veicula uma voz de característica animista da luz, ao atribuir à mesma a capacidade de decidir seu comportamento.

A discussão sobre o efeito fotoelétrico durou 42 minutos (contando os 12 minutos de ausência do professor), restando três minutos para a explicação sobre o que são interferômetros. Esse curto espaço de tempo propiciou apenas que o professor citasse que interferômetros são instrumentos que possibilitam a obtenção de padrões de interferência. Existem, entre outros, os interferômetros de Michelson-Morley, famoso nos livros didáticos por estar relacionado com a teoria da relatividade²¹ e o de Mach-Zehnder, que seria utilizado por meio do software IVMZ nas próximas aulas.

4.2.5 Aulas 4 e 5 – Dualidade onda partícula

Nas Aulas 4 e 5 os alunos foram colocados a trabalhar com o IVMZ. A quarta aula durou 1 hora e 45 minutos, contando com a presença do professor Girafales, do professor-pesquisador e dos alunos Artur, Bruno, Elisa e Gustavo. Nessa aula os alunos receberam um primeiro roteiro para trabalharem com o IVMZ.

Na quinta aula estiveram presentes o professor Girafales, o professor-pesquisador e os alunos Artur, Bruno, Carlos, Daniel e Gustavo. Os alunos que estiveram presentes

²¹ Há sérias controvérsias quanto ao papel desse interferômetro no desenvolvimento da Relatividade Restrita. Ver o trabalho de Silveira and Peduzzi (2006) para mais detalhes.

na aula anterior receberam um segundo roteiro²² para trabalhar com o IVMZ, enquanto Carlos e Daniel receberam o primeiro por não terem participado da mesa.

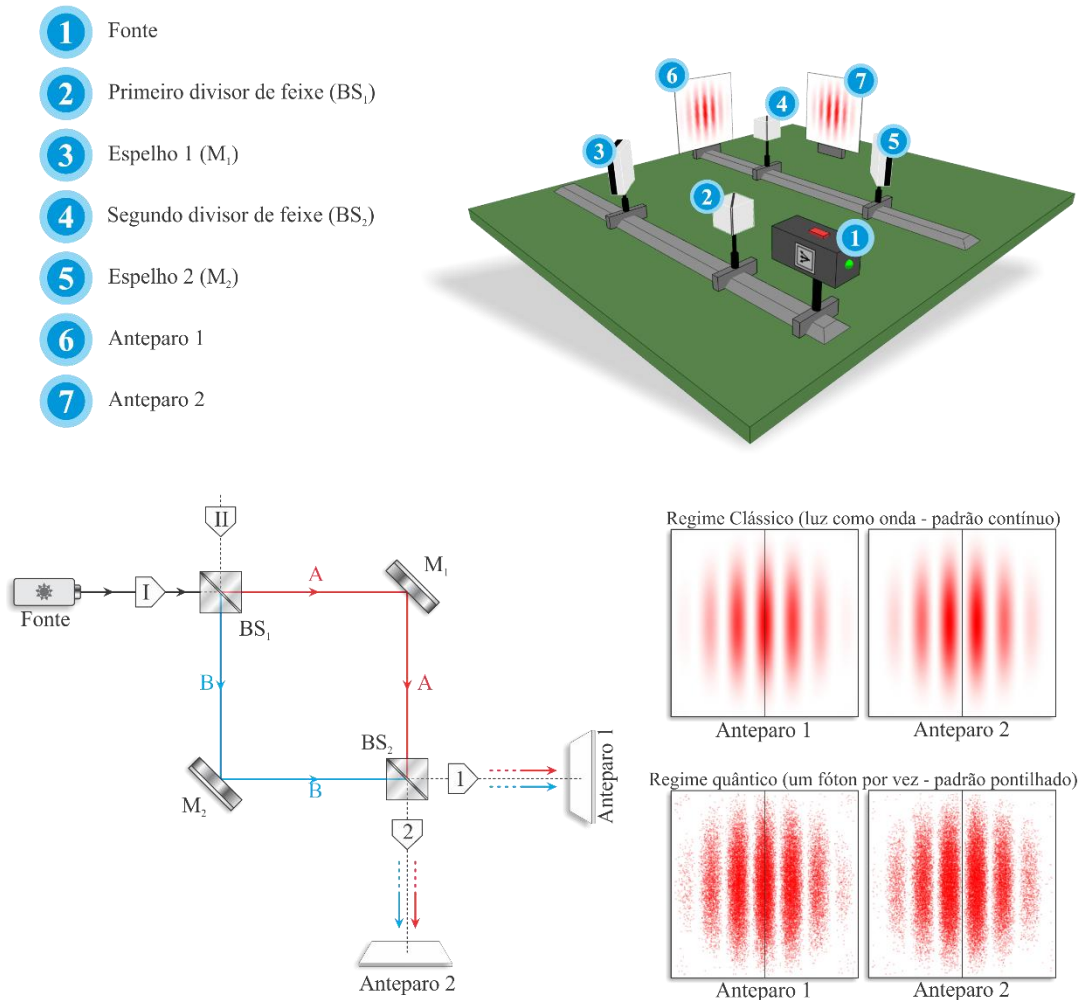


Figura 4: Acima: elementos do Interferômetro de Mach-Zehnder e sua correspondência na representação pictórica tridimensional mostrada no *software*. Abaixo: esquema do interferômetro, mostrando os elementos e os braços A (vermelho) e B (azul). O interferômetro possui duas entradas possíveis I e II. A fonte é colocada na entrada I. Há também duas saídas possíveis, nas quais podem ser posicionados anteparos (como nesta figura) ou detectores (apenas no regime quântico). Os padrões clássico e quântico obtidos quando os divisores de feixe são balanceados (coeficientes de reflexão e transmissão iguais a 1/2) estão mostrados – a linha vertical que passa pelo centro de cada anteparo permite visualizar que os padrões de interferência nos anteparos 1 e 2 são invertidos um em relação ao outro.

As Aulas 4 e 5 podem ser consideradas as mais importantes da unidade didática. Nelas, os alunos são colocados a trabalhar em pequenos grupos com o IVMZ, a fim de tomarem um primeiro contato com o interferômetro e com o *software*, para que entendam o funcionamento de ambos. A partir das situações propostas pretende-se que aprofundem a compreensão da dualidade onda-partícula, inicialmente na sua versão fraca (Pessoa Jr., 2003, pp. 3-4). O 1º roteiro aborda o Interferômetro de Mach-Zehnder em regime clássico, em regime quântico e com a presença de detectores. O 2º roteiro

²² Os roteiros utilizados nestas aulas estão disponíveis no Apêndice IV.

retoma os conceitos da aula anterior e propõe simulações para a discussão sobre fenômenos intermediários.

Nestas aulas residem os enunciados de maior interesse para este trabalho. A quarta aula pode ser dividida em dois momentos: no primeiro momento, os professores explicaram o funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder e a formação de diferentes padrões ao se utilizar uma fonte de laser (regime clássico, ondulatório) ou uma fonte monofotônica (um fóton por vez). No segundo momento, os alunos foram divididos em duplas e receberam um roteiro para realizar diversas simulações no IVMZ.

O primeiro momento teve duração de aproximadamente dezesseis minutos. Neste período os professores explicaram o modelo para o comportamento de ondas e partículas no interferômetro com a consequente formação de figuras, com ou sem interferência no anteparo, e a função de cada item do interferômetro: a fonte, os divisores de feixe, os espelhos e os anteparos.

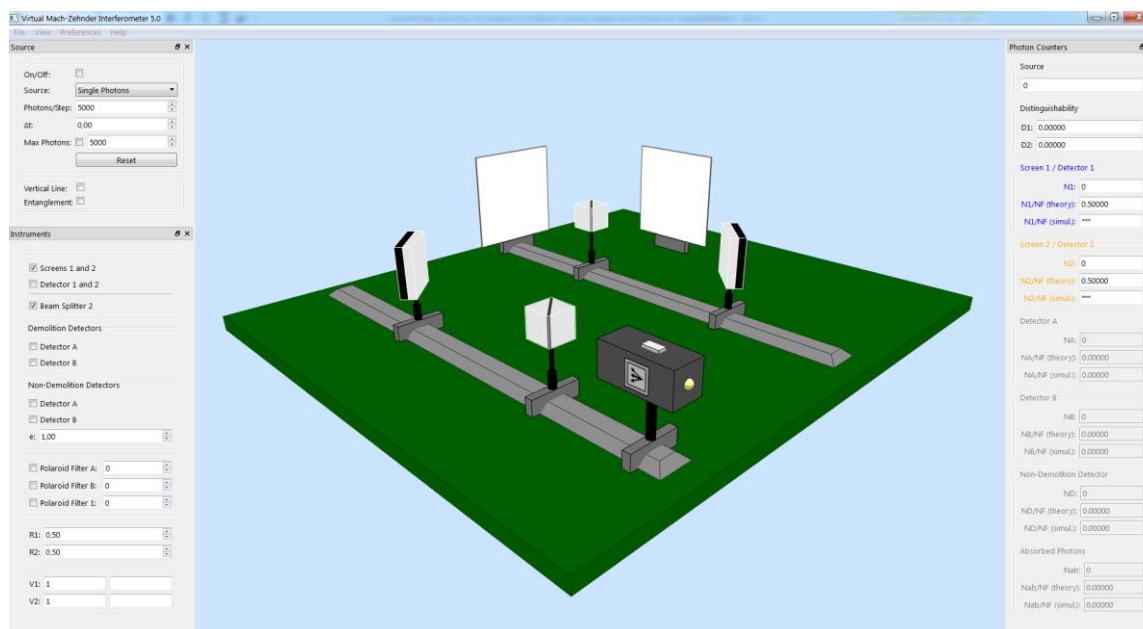


Figura 5: Layout do Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ). À esquerda estão os controles para se alterar a configuração do interferômetro (parâmetros relevantes, dispositivos e outros); no meio, a representação pictórica tridimensional do interferômetro e à direita as contagens do número de fótons, onde os valores obtidos na simulação são confrontados com os valores previstos teoricamente.

Como recursos didáticos foram utilizados os *slides* (9-13) da apresentação utilizada nas aulas 2 e 3, bem como algumas ações do IVMZ. A explicação da formação do padrão de interferência construtiva no centro do anteparo 1 e da interferência destrutiva no centro do anteparo 2 (Figura 4) foi feita a partir da adoção das seguintes regras²³: (1) cada reflexão em um divisor de feixe²⁴ causa uma diferença de fase de $\pi/2$

²³ O funcionamento do interferômetro encontra-se explicado mais detalhadamente no trabalho de Pereira *et al.* (2012c).

entre as componentes refletida e transmitida – isso corresponde a uma diferença de caminho de $\lambda/4$ (onde λ representa o comprimento de onda do feixe). A demonstração desse aspecto pode ser encontrada nos trabalhos de Degiorgio (1980) ou Hamilton (2000), para o caso clássico (luz como onda), e nos trabalhos de Zeilinger (1981) ou Holbrow *et al.* (2002) para o caso quântico (fótons individuais); (2) cada reflexão em um espelho causa uma mudança de fase de π em relação à onda incidente (resultado que, em boa aproximação, independe do ângulo de incidência se o espelho for considerado ideal) – isso corresponde a uma diferença de caminho de $\lambda/2$ (Pollack & Stump, 2005, pp. 502 e 510).

A principal dificuldade evidenciada nos enunciados dos alunos ao longo destas explicações ocorreu na compreensão dos diferentes padrões de interferência obtidos nos anteparos 1 e 2 (são invertidos). Eles fizeram diversas perguntas na tentativa de compreender como no centro de um anteparo ocorreria interferência construtiva e no centro do outro seria destrutiva. A seguinte conversa mostra o aluno Artur interagindo com o professor com o objetivo de compreender a formação dos diferentes padrões de interferência:

31. **Professor Girafales:** *Exatamente. Tá, então se uma refletiu três vezes e a outra refletiu uma vez, a diferença entre elas é um meio, que é meio comprimento de onda [está se referindo ao anteparo 2]. Então, quando chega aqui, tu vai ter uma para cima e a outra que tá defasada em meio comprimento de onda...*
32. **Artur:** *Diminuiu metade.*
33. **Professor Girafales:** *vai tá pra baixo.*
34. **Artur:** *E elas vão se anular.*

No segundo momento da aula, os alunos foram divididos em duplas: Artur trabalhou com o Bruno, enquanto Elisa trabalhou com o Gustavo. Os alunos receberam um roteiro (Apêndice IV) que propunha diversas atividades a serem realizadas com a mediação do IVMZ (Figura 5) e uma série de perguntas que os alunos deveriam responder para cada atividade.

O roteiro foi dividido em quatro grupos de atividades, detalhadas na descrição de cada um desses grupos. Será aqui apresentada uma análise mais longitudinal de uma das duplas (Artur e Bruno). Em parte, essa opção se dá por questões de espaço, para não estender demais o presente trabalho. Outro motivo é que Artur e Bruno protagonizaram um maior número de interações discursivas do que Elisa e Gustavo, que não interagiam muito entre si e solicitavam assistência quase contínua dos professores.

Artur e Bruno

O desenvolvimento das atividades de Artur e Bruno caracteriza-se por um intenso uso do roteiro como ferramenta mediacional, organizando as ações da dupla. Para as

²⁴ Os divisores de feixe são considerados simétricos, não polarizantes e supõe-se que não absorvam energia da onda que neles incide (no regime quântico, que não absorvam nenhum fóton).

perguntas em que parece haver consenso sobre a resposta, um dos alunos lê a pergunta e o outro responde. Em questões mais complexas, os alunos discutem, muitas vezes um dos professores interfere, seja por ser chamado ou por considerar um momento oportuno para realizar intervenções. Quando a discussão se estende, os alunos muitas vezes precisam reler a pergunta para lembrar sobre o que exatamente estavam refletindo. Na maior parte do tempo, Artur controla o roteiro apresentando as perguntas, enquanto Bruno faz as mudanças no *software* e tenta elaborar uma resposta inicial a cada pergunta.

Primeiro grupo de atividades

Esse primeiro grupo abordou o Mach-Zehnder em regime clássico (Figura 6), ou seja, quando a fonte emite um feixe de laser que pode ser descrito pela teoria eletromagnética clássica (ou seja, modelo ondulatório). Os alunos simularam a situação em que estavam presentes todos os dispositivos do interferômetro e a situação em que se retira o divisor de feixe 2. O objetivo dessas atividades era reiterar a formação do padrão de interferência e investigar que estratégias usavam para entender a diferenciação dos padrões de interferência nos anteparos em relação à primeira situação. Este padrão pode ser observado já na primeira atividade.

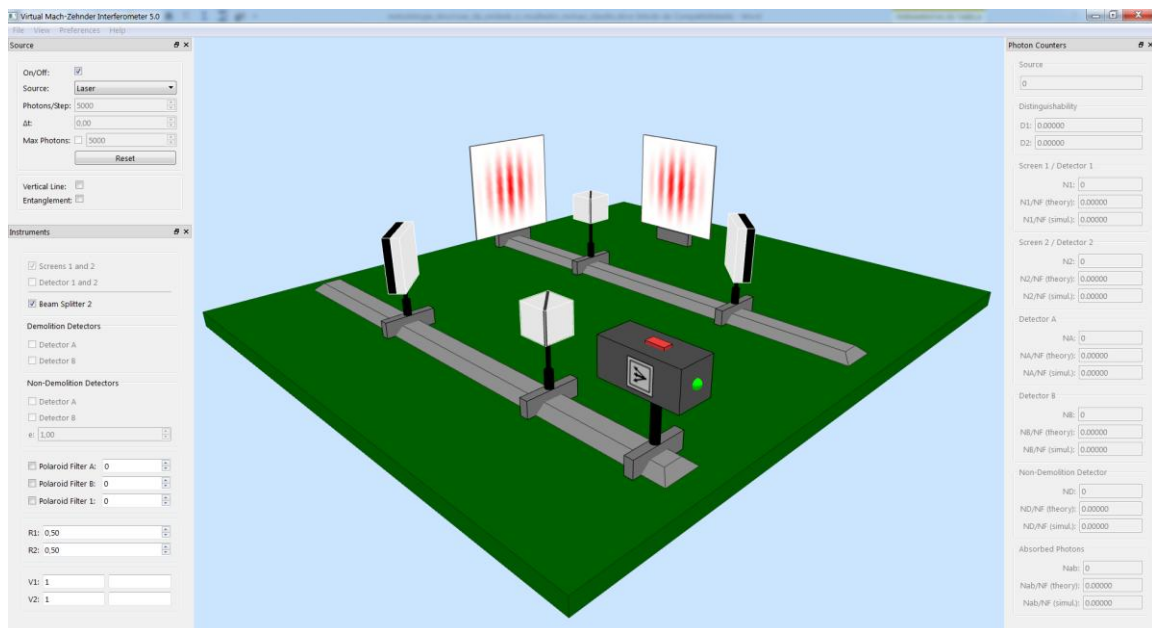


Figura 6: Imagem da tela do IVMZ (no regime clássico) vista pelos alunos durante a interação discursiva que produziu os enunciados 35 a 49.

35. **Artur:** [...] *Selecione o source, liga. Aperte o botão on e off [botões são apertados]. Observe os... Observe. Perguntas: O que você vê nos anteparos? [alunos veem uma imagem similar à da Figura 6]*
36. **Bruno:** *Riscos.*
37. **Artur:** *As imagens nos dois anteparos são iguais?*

38. **Bruno:** Não.
39. **Artur:** *Se forem diferentes, quais são as diferenças?*
40. **Bruno:** *Qual deles? [incompreensível] Tem um encontro construtivo.*
41. **Artur:** *Tá eu tô vendo se elas são iguais. Quais são as...*
42. **Professor Girafales:** *Essas figuras são iguais?*
43. **Artur:** São
44. **Bruno:** Não.
45. **Artur:** *Teoricamente não, mas aqui parecem. São parecidas.*
46. **Bruno:** *Conta quantas listras tem em cada um?*
47. **Artur:** 1,2, 3,4,5. 1,2,3 4,5,6
48. **Bruno:** *Então isso gera..[incompreensível] Se uma é ímpar e outra é par então já não pode ser igual.*
49. **Artur:** Tá.

Nos enunciados 35, 37 e 39, Artur lê o que está escrito no roteiro, orientando a partir desta leitura a ação de Bruno, que responde às questões nos enunciados 36, 38 e 40, estabelecendo-se falas com clara mediação explícita do roteiro e também do IVMZ (Wertsch, 2007, p. 180). A partir do enunciado 41, Artur retoma a questão sobre se os padrões de interferência são iguais²⁵. Nos enunciados 43 e 44, Artur e Bruno discordam, com o primeiro afirmando que as imagens são iguais, enquanto o segundo defende a posição oposta.

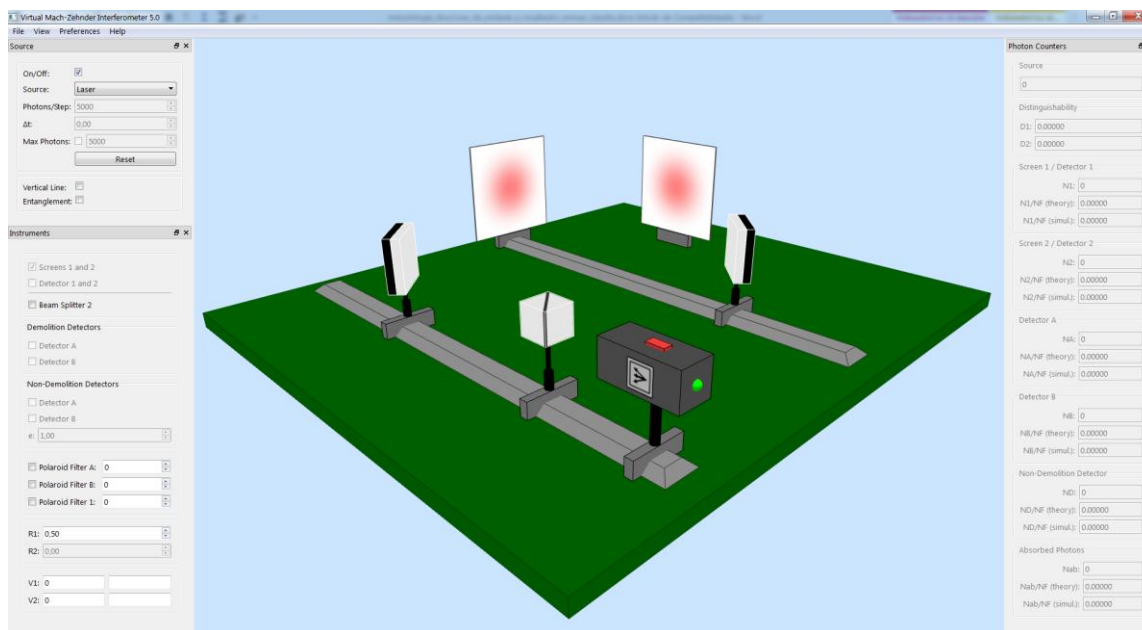


Figura 7: Imagem da tela do IVMZ com a ausência do segundo divisor de feixe. Não se forma padrão de interferência nesse caso.

No enunciado 45, Artur apresenta uma interessante interanimação com as vozes veiculadas durante o curso introdutório, em um exemplo de intertextualidade bakhtiniana; sua experiência imediata contradiz a voz veiculada pelo professor em uma

²⁵ Não é trivial perceber visualmente que os padrões são invertidos entre si. O *software* permite, como recurso auxiliar, que sejam mostradas linhas verticais, uma em cada anteparo, que passam pelo centro dos mesmos. Nesse caso, fica bem mais fácil perceber que os padrões são invertidos. Esse recurso propositalmente não foi usado nesse primeiro grupo de atividades.

explicação prévia, exposta durante o curso introdutório, mas ainda assim sua voz tende a se alinhar com a do professor. Assim, mesmo “sabendo” que as imagens devem ser diferentes, nenhum dos locutores consegue elaborar discursivamente o motivo físico desses padrões não serem idênticos. Nos enunciados transparece que houve a construção de um espaço intersubjetivo bastante razoável, pois recursos multissemióticos como os padrões de interferência, a representação pictórica do interferômetro e seus componentes, conceito de interferência e outros, são satisfatoriamente compartilhados por professor e locutores.

No entanto, os alunos parecem alinhar-se às vozes veiculadas no curso introdutório muito mais pela autoridade que atribuem ao professor do que por ter entendido de fato. Esse tipo de “intertextualidade valorativa”, que não é uma mera repetição ou revocalização de manifestações discursivas de outros (contextos ou autores), é típico da teoria bakhtiniana – a interanimação da voz dos estudantes com a do professor, veiculada no curso, foi de alinhamento provavelmente por uma posição axiológica dos alunos²⁶, expressando uma posição ideológica implícita de que quem detém o poder na sala de aula, ao menos quando se fala em conhecimento, é o professor. Do ponto de vista discursivo, comprovaram que os padrões são distintos apenas contando as franjas de interferência, ou seja, não evidenciaram discursivamente uma compreensão do fenômeno²⁷ – não há contrapalavras, apropriação das ferramentas mediadoras básicas para explicar o fenômeno, embora haja um domínio rudimentar das mesmas. Mas se alinham à voz do professor, mesmo com dificuldade em entender o fenômeno. Como citado anteriormente, mesmo um domínio rudimentar das ferramentas mediadoras não os impede de progredir na atividade. Essa característica humana é potencialmente uma grande aliada do processo de ensino.

Em suma, no enunciado 40, Bruno mostra que, ao visualizar que as imagens eram diferentes, ele já tinha expectativa teórica de que tal fato ocorreria, justamente por meio da intertextualidade (e intersubjetividade). Esse locutor explicita esta expectativa na fala “Tem um encontro construtivo” em que ele tenta explicar as diferenças entre as imagens em função da diferença no modo como o processo de interferência ocorre em cada anteparo. Uma interessante questão que pode ser enfatizada é que Bruno não perceberia tão imediatamente, mesmo que de forma rudimentar, que as imagens eram diferentes caso não tivesse havido interação com outras vozes e se não tivesse se estabelecido um

²⁶ Quando Artur diz “Teoricamente não...” no enunciado 45, e, mais sutilmente, quando resolvem contar as franjas para corroborarem a diferença entre os padrões.

²⁷ Pelo simples fato de que quem majoritariamente mediou a conclusão de que os padrões são distintos foi uma semiose básica da aritmética, não a semiose necessária para comunicar e compreender os conceitos físicos envolvidos no fenômeno. Essa semiose foi usada como mediadora de uma operação de verificação simples, não sendo adequada e nem tendo condições mínimas de auxiliar e comunicar uma compreensão do fenômeno.

grau razoável de intersubjetividade (no caso as explicações dos professores). As dificuldades claras demonstradas pelos alunos em entender a situação, mas aliadas ao grau razoável de intersubjetividade, mostram boa chance de que o trabalho esteja sendo realizado na ZDP dos estudantes. Quem fez o papel de parceiro mais capaz foi o professor, que enfatizou a atenção dos alunos sobre a importância de identificar a diferença entre os padrões nos anteparos (enunciado 42). Isso ajudou a manter a intersubjetividade, pois essa simples pergunta guiou as ações dos estudantes e reforçou o compartilhamento, entre professor (e professor-pesquisador) e estudantes, de uma definição de situação.

Na sequência deste episódio os alunos, com a participação do Professor Girafales, continuaram analisando as imagens formadas em cada anteparo. Neste momento, os alunos ainda não dominaram completamente a semiose relacionada à óptica ondulatória, de forma que apresentaram dificuldades em comunicar de forma fluente o porquê dos padrões terem aquela forma.

Esta dificuldade fica explícita no momento em que os alunos retomam as perguntas para respondê-las uma última vez antes de seguirem para a próxima simulação.

50. **Artur:** *Se forem diferentes, quais as diferenças?*
51. **Bruno:** *A, de, As diferenças estão no padrão de franjas claras e escuras. Como é que, como é que é o listra máxima, como é que é?*
52. **Artur:** *Não. A diferença são o padrão.*
53. **Bruno:** *Não, ia falar que tem o ponto máximo é que eu não sei como é que é também. O Professor Girafales, como é que chama o... Ó Professor Girafales, como é que é a listra do meio?*
54. **Professor Girafales:** *Como é que é o que?*
55. **Bruno:** *A listra do meio mais forte?*
56. **Professor Girafales:** *Máximo central.*
57. **Artur:** *Tá. Explique por que as imagens no anteparo estão nesta forma.*
58. **Bruno:** *O que?*
59. **Artur:** *Explique por que as imagens no anteparo ficam nessa forma. Isso acontece pois quando as ondas se encontram elas ocasionam o processo... Qual é o nome do processo?*
60. **Bruno:** *Difração, segundo tá escrito.*
61. **Artur:** *Difração, no qual ela é... Como é que é o termo mesmo?*
62. **Bruno:** *Elas criam um padrão de interferência*
63. **Artur:** *Isso, interferência. No qual elas ham,*
64. **Bruno:** *Criam o padrão de interferência.*
65. **Artur:** *Tá bonito. [...]*

Entre os enunciado 50 e 65, Artur e Bruno tentam se expressar de acordo com a cultura científica quando analisam a diferença observada entre as imagens nos dois anteparos (Figura 6). Bruno não consegue lembrar-se do termo *máximo central*, expressando-o de diferentes maneiras (listra máxima (51), listra do meio (53) e listra do meio mais forte (55)) até serem auxiliados pelo Professor Girafales (56). No enunciado 61, por sua vez, Artur parece não lembrar o termo padrão de interferência, recebendo neste caso a ajuda do Bruno.

Nos enunciados 60 e 61, os alunos mostram ainda não dominar o conceito de difração, confundindo-o com interferência (há estreita relação entre ambos, mas a difração é um processo mais complicado). Esta confusão provavelmente pode ser explicada pelo fato de que na experiência da dupla fenda o processo de interferência se torna mais facilmente observado no anteparo quando há difração quando a onda passa pelas fendas (caso contrário, os máximos e mínimos estariam próximos demais entre si, dificultando a observação). Foi neste contexto que os fenômenos foram explicados aos alunos durante a Aula 2. Bruno ainda afirma, no enunciado 60, que é o fenômeno da difração “segundo tá escrito”, mas não foi encontrado o texto onde ele viu escrita esta informação. Provavelmente estava confuso e se referindo ao que entendeu de alguma outra manifestação discursiva ocorrida durante as aulas.

Após este episódio, os alunos seguem com o roteiro. Ainda no regime clássico, os alunos não encontram maiores dificuldades em aceitar a ausência do padrão de interferência ao se retirar o segundo divisor de feixes (Figura 7), porém nas explicações ainda evidenciam dificuldades para utilizar a semiose necessária para compreender o fenômeno e comunicar suas conclusões:

66. **Artur:** *É, isso acontece pois as duas ondas não se encontram e mantém a forma do laser. A forma original. As imagens com e sem o segundo anteparo de feixe são bastante diferentes. Por que são diferentes? Ah, a gente já fez isso. É praticamente a mesma explicação da primeira. Éh, um só, só foi um so foi um inter um so*
67. **Bruno:** *Padrão de interferência e o outro...*
68. **Artur:** *[Incompreensível].*
69. **Professor Pesquisador:** *O segundo não tem interferência.*
70. **Artur:** *É.*

Importante salientar que, apesar do uso rudimentar, mais uma vez, da semiose, predominantemente verbal, mas com referências a representações pictóricas remetendo à ideia de onda – por exemplo, no enunciado 66, quando Artur afirma que “as duas ondas não se encontram” (ou seja, não se recombina e não são superpostas nas saídas 1 e 2 do interferômetro, pois é o segundo divisor de feixe que realiza essa superposição – sendo assim, não se forma o padrão de interferência) e “mantém a forma do laser” (ou seja, o que se observa em cada anteparo é o resultado da incidência de cada componente individual – a componente A segue ao anteparo 2 e a componente B ao anteparo 1). Note que o uso da mediação semiótica por Artur é ingênuo, mas ainda assim não o impede de entender a essência da situação. A expressão verbal de que “as ondas não se encontram” evidencia que ele interanimou sua voz com a voz docente veiculada no curso, mas reelaborou ativamente essa manifestação discursiva anterior, expressando na sua forma a compreensão de que as duas componentes, separadas no primeiro divisor de feixe, não se superpõem nas saídas 1 e 2 do interferômetro, não podendo, portanto, haver interferência alguma nos anteparos (uma contrapalavra ou, ainda, uma tentativa incipiente de apropriação). A segunda afirmação, de que onda “mantém a forma do

laser” é imprecisa e ainda mais rudimentar, mas expressa uma compreensão de que o que incide em cada anteparo são as componentes da onda emitida pela fonte, divididas no primeiro divisor de feixe, *sem que se superponham* e “mudem sua forma original”. Obviamente ambas não mantêm a mesma “forma do laser”, mesmo não havendo superposição. Primeiramente, ambos componentes não possuem a amplitude da onda original, mas metade desta (considerando o primeiro divisor de feixe balanceado). Adicionalmente, a componente A, que incide no anteparo 2, sofre uma reflexão no espelho 1 (portanto, uma inversão de fase π) e a componente B, que incide no anteparo 1, sofre uma reflexão no primeiro divisor de feixe (deslocamento de fase de $\pi/2$) e outra no espelho 2 (inversão de fase π), de modo que ambas apresentam ainda um deslocamento de fase em relação à onda original emitida pela fonte.

Ainda assim, com uso rudimentar da mediação semiótica, ao se alinhar às vozes veiculadas no curso, isso permitiu que Artur entendesse e manifestasse dois aspectos fundamentais na situação proposta: (1) não há superposição de ondas nas saídas do interferômetro; (2) as componentes seguem (sem superposição) para cada anteparo, não sendo possível formação de padrão de interferência. Isso é mais um exemplo de como uma interanimação com vozes veiculadas em outros contextos (talvez até fora do contexto do próprio curso com o professor Girafales) pode levar a uma reelaboração discursiva que, mesmo pela via de uma mediação semiótica incipiente, pode ainda assim ser suficientemente eficiente para manifestar discursivamente a compreensão sobre um fenômeno físico. Embora pareça haver um certo otimismo nisso, não se trata disso: como já dito, mesmo um domínio rudimentar de uma ferramenta semiótica, dada sua robustez, permite realizar satisfatoriamente um grande número de atividades que envolvem seu domínio – como afirma Wertsch (2007, p. 187), em ambientes instrucionais os aprendizes podem engajar-se em atividades nas quais eles dizem mais do que de fato pretendem ou entendam – esse “mais” deve ser entendido no sentido de que os interlocutores (no caso professores e/ou pesquisadores que analisam os enunciados) podem assumir que os aprendizes estão veiculando significados em um nível superior ao que o seu domínio do sistema semiótico supostamente garantiria.

Em grande parte é por esse motivo que a mediação semiótica é crucial no estabelecimento e manutenção da intersubjetividade, que permite trabalhar na ZDP – isso ficou explícito nessa manifestação singular de Artur. Trata-se de um aluno de primeiro ano de Ensino Médio, que não teve contato formal com o fenômeno de interferência ou com interferômetros de duas vias na escola, a não ser na própria oficina ministrada (ou seja, uma atividade extracurricular). É natural, portanto, que não domine plenamente a semiose necessária para mediar a compreensão dos conceitos físicos inerentes ao fenômeno. E, mesmo assim, mediante interação interpsicológica com parceiros mais capazes e amadurecidos na semiose envolvida no problema proposto,

usou essa semiose e esboçou discursivamente uma compreensão básica (mas importante) do fenômeno. Bruno, no entanto, apenas acompanhou a manifestação discursiva de Artur.

Segundo grupo de atividades

No segundo grupo de atividades, os alunos passaram a trabalhar com a fonte em regime quântico (emissão de um fóton por vez), com a presença dos dois divisores de feixe e sem a presença de detectores (Figura 8). O objetivo desta atividade era defrontá-los com a interferência no regime de fótons únicos, investigando nos enunciados as estratégias discursivas adotadas para compreenderem o fenômeno. Estas atividades foram preparadas de forma a causar surpresa nos alunos, no caso deles atribuírem ao fóton uma ontologia corpuscular. É razoável esperar tal interpretação dos alunos, principalmente quando o professor não aborda as possíveis ontologias do objeto quântico nos momentos iniciais de uma unidade didática, a exemplo do que foi constatado no trabalho de Baily e Finkelstein (2010) – propositalmente foi assim que foi concebida esta atividade²⁸.

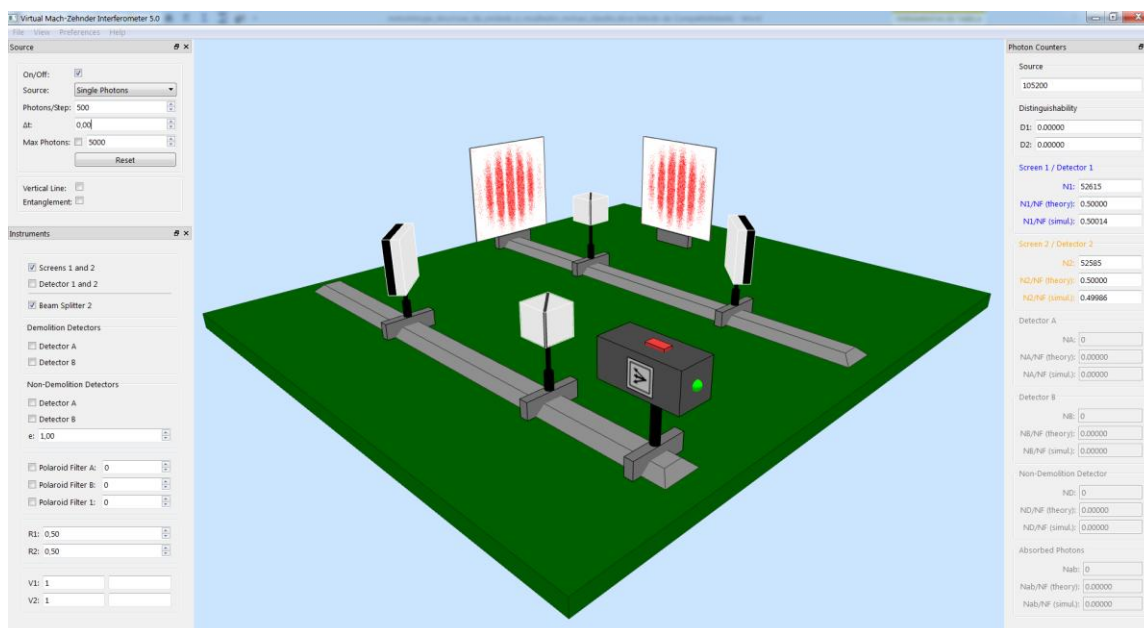


Figura 8: Imagem da tela do IVMZ com a fonte emitindo um fóton por vez (regime quântico). Os padrões são formados gradativamente, ponto a ponto, por meio das marcas que cada fóton registra quando incide no anteparo 1 ou 2. A incidência nunca se dá nos dois em um único evento – fótons não são “divididos” em um divisor de feixe (Grangier *et al.*, 1986), sendo transmitidos ou refletidos de acordo com as probabilidades de reflexão e transmissão do referido divisor de feixe (no caso, as probabilidades de reflexão e transmissão são iguais a 1/2).

²⁸ Embora tenha sido dito que a radiação eletromagnética pode apresentar comportamento dual, como a maioria dos livros didáticos faz, nada se disse sobre um *objeto quântico* tal como o fóton evidenciar tal comportamento. Em resumo, a dualidade onda-partícula foi propositalmente abordada em um nível mais tênue do que a versão fraca (que já exige que se apresente a interferência quântica).

De fato foi o que ocorreu. O roteiro propõe que os alunos prevejam como serão os padrões que se formarão nos anteparos, antes de visualizar o resultado da simulação. O aluno Artur, enquanto os dois buscavam prever tais padrões, logo de início atribuiu uma ontologia corpuscular ao fóton. O seguinte trecho ilustra isso:

71. **Artur:** *Vamos pensar; tá vindo tá vindo uma bolotinha, mas vamos imaginar que não, [que] são duas bolotinha ao mesmo tempo. Uma bolotinha bate aqui, uma bolotinha segue reto. Essa bolotinha que seguiu reto vem pra cá e essa outra bolotinha vem pra cá. As duas bolotinhas elas vão explodir o universo.*
72. **Bruno:** *Vão explodir o universo, tipo o pi dividido por zero Não é que pode acontecer duas coisas, tipo, uma bolinha pode interferir na outra*
73. **Artur:** *Que acontece se um fóton choca, se choca com outro fóton?*
74. **Professor Girafales:** *Não, eles, eles em si no ar eles não interagem.*
75. **Artur:** *Não, só cada um segue seu caminho.*
76. **Professor Girafales:** *Senão, pros dois feixes que, lembra que quando não teve interferência lá tirou os divisores, um feixe passou pelo outro.*
77. **Artur:** *É, isso que eu até comentei com ele.*
78. **Professor Girafales:** *Tá. Um feixe passa pelo outro, ok, não toma conhecimento do outro.*
79. **Artur:** *Por que não?*
80. **Professor Girafales:** *Por que ali eles não interagem. Vão interagir quando há superposição deles no anteparo.*
81. **Artur:** *Tá, mas fótons são partículas, partículas é matéria, quando elas se encostam...*
82. **Professor Girafales:** *Ah, bom.*
83. **Artur:** *alguma coisa tem que acontecer.*

Ao longo deste trecho, Artur afirma que fótons são bolotinhas (71), que se chocam (73) ou se encostam (81), que são partículas e que são matéria (81). Todas essas expressões são coerentes com a atribuição de uma ontologia corpuscular para o fóton. Bruno também atribui uma ontologia corpuscular ao fóton tratando-o como bolotinha (72). A expressão “interferir” neste mesmo enunciado deve ser interpretada com cuidado. Pelo contexto discursivo em que se insere, percebe-se que o aluno utiliza esta expressão quase como sinônimo para os termos “colidir” ou “encostar”.

A discussão se desenvolve e os alunos concluem que deve se formar uma “bolota” nos dois anteparos, referindo-se a um padrão sem interferência. O professor Girafales pede que os alunos escrevam esta conclusão, respondendo ao item b do roteiro (Apêndice IV). Enquanto escrevem ocorre o seguinte diálogo:

84. **Bruno:** *Tá cara, não importa, vamos com que que, qual era nossa primeira conclusão?*
85. **Artur:** *Que ia ficar uma bolota normal que cada um ia vir num momento tipo teoricamente*
86. **Bruno:** *Teoricamente*
87. **Artur:** *Cara isso é teórico, então não, não...*
88. **Bruno:** *Teoricamente deveria*
89. **Artur:** *Não. Achamos que*
90. **Bruno:** *Fazer uma bolota.*
91. **Artur:** *deverá formar...*
92. **Bruno:** *no centro mas...*

Neste trecho os dois alunos concordam que não deve formar nenhum padrão de interferência no anteparo, adotando, por consequência um modelo corpuscular para o fóton. O uso do termo “teoricamente” (enunciados 85, 86, 87 e 88) mostra uma insegurança (natural, dada a situação proposta) dos alunos em relação à resposta a ser

escrita. Possivelmente, os estudantes já esperam uma surpresa, mas não conhecem uma razão teórica para justificá-la.

Entre o enunciado 87 e 88, há uma quebra no diálogo. O enunciado 88 não constitui uma resposta de Bruno a Artur. No enunciado 88, Bruno começa a escrever sua conclusão e sua fala aparenta ser apenas uma narração do que está escrevendo. Isso se assemelha muito a um tipo de fala privada, descrito por Berk (1986, p. 673) como leitura em voz alta, em um tipo de comentário que auxilia a autorregulação de Bruno enquanto responde à pergunta solicitada no roteiro. Os enunciados 90 e 92 são continuações da fala privada de Bruno, uma manifestação em voz alta do que ele estava escrevendo. Artur percebe a ação de Bruno e também passa a escrever sua resposta, também narrando-a enquanto escreve (enunciados 89 e 91). Nesta situação, apesar da alternância de sujeitos, não há propriamente um diálogo uma vez que a fala de cada estudante não se orienta em relação ao outro, mas como fala privada e consequente autorregulação das ações de cada um.

A discussão entre Artur e Bruno sobre os padrões que esperam que surjam nos anteparos, conduzem às respostas aos itens c e d do roteiro:

93. **Artur:** *Tá, partícula. Cara, eu acho que é uma partícula*

94. **Bruno:** *É, em teoria vai se comportar como partícula. Tá não tem que ser [Ininteligível]*

95. **Artur:** *É. Quais características deste experimento fazem com que você acredite que surgirá este padrão? Olha, ham, as características em que nós estamos emitindo fótons separados que nesse caso eles tão se comportando como partículas e que, ham, e que como tá sendo um de cada vez eles não vão, como eles. Como eles viajam a mesma velocidade ao ser emitido um de cada vez eles nunca vão se encontrar ali no meio e por isso não vai causar nenhum tipo de interferência vai ficar uma bolota. Essa é nossa teoria.*

Nos enunciados 93, 94 e 95 os dois alunos reiteram a visão de fóton como partícula clássica. O enunciado 95 é de especial interesse, pois mostra Artur explicando porque deveria surgir uma “bolota” nos anteparos. Unindo-se este enunciado com o enunciado 71, pode-se perceber que Artur apresenta um bom domínio semiótico para mediar a comunicação do comportamento corpuscular do fóton. Afirmando que o fóton deve seguir um caminho bem definido, que são emitidos individualmente e têm todos a mesma velocidade, complementando que nunca poderá ocorrer qualquer tipo de interação entre os fótons para causar alguma espécie de “interferência”. No enunciado 95, Artur, assim como Bruno no enunciado 72, usa o termo interferência sem se referir especificamente ao fenômeno ondulatório, mas sim como um resultado desconhecido da “colisão” entre dois fótons, como se nessa colisão um interferisse na trajetória do outro.

Finalizada a discussão, o professor acelera a simulação e mostra aos alunos que surge um padrão de interferência nos anteparos, diferentemente do que eles haviam previsto. Neste momento os alunos mostraram um misto de surpresa com “eu sabia que vocês estavam me enganando”. Ao ver os resultados, os alunos conseguiram associá-lo a um comportamento ondulatório do fóton, mas não souberam explicar o motivo deste

comportamento (isso envolveria uma maturidade maior no tema). Segue abaixo um extrato da interação discursiva:

96. **Professor-Pesquisador:** Vou botar quinhentos
97. **Bruno:** Não podia ser um círculo porque ia ser muito óbvio.
98. **Artur:** Tá, eu sei, mas eu fui pela...
99. **Bruno:** Foi pela lógica.
100. **Artur:** É.
101. **Bruno:** Magia de Satanás.
102. **Artur:** Por que isso aconteceu?
103. **Professor-Pesquisador:** Por que isso aconteceu? Desligue o experimento, tá.
104. **Bruno:** Porque
105. **Artur:** Porque acontece dela ter se comportado como onda sem obedecer às nossas ordens.
106. **Professor-Pesquisador:** A luz se comportou como uma onda.
107. **Artur:** É.
108. **Professor-Pesquisador:** Perfeito Tá, isso. Agora, por que que vocês acham que ela se comportou como uma onda?
109. **Artur:** Porque ela é malvada.
110. **Bruno:** Porque ela fez um pacto com satã...

Os dois últimos enunciados mostram a surpresa dos estudante em relação a um dos aspectos não intuitivos da física quântica – a interferência quântica. É bastante contraintuitivo que incida um fóton por vez no interferômetro e, ainda assim, surja um padrão de interferência nos anteparos e apenas recentemente aja alguma suspeita de haver análogo clássico para esse comportamento (ver nota de rodapé 13). Os alunos expressam sua dificuldade até mesmo em aceitar o fenômeno. Citando novamente o trabalho de Baily e Finkelstein (2010), no qual constatam que, em maioria, os alunos tendem a atribuir uma ontologia corpuscular ao objeto quântico quando o professor não aborda explicitamente essa questão no início da instrução. Cabe uma observação: note-se que especificamente nessa atividade não houve preocupação em estabelecer uma intersubjetividade tal que permitisse que os alunos entendessem a atividade proposta a um nível em que a sua definição de situação fosse compartilhada com aquelas do professor e do professor-pesquisador. Assim, o nível de intersubjetividade entre estes estabelecido foi muito baixo. Com isso, a ZDP não foi criada e a atividade foi difícil demais para que os alunos lidassem com ela, o que é evidenciado nas manifestações discursivas, nas quais manifestam que construíram rapidamente uma definição de situação representando fótons como “bolotas” que, sem meias-palavras, são partículas clássicas.

Propositalmente não foi abordada explicitamente a interferência quântica no curso introdutório²⁹ e, por isso, os estudantes não puderam interanimar fortemente suas vozes com aquelas veiculadas pelo professor no curso – isso acarretou em uma fraca interação intertextual considerando as interações discursivas que ocorreram durante a execução da atividade, roteiro e as manifestações discursivas ocorridas no decorrer do curso. Como

²⁹ Para lembrar, apenas a parte inicial do vídeo do Dr. Quantum foi exibida aos alunos. A parte na qual a interferência quântica é abordada foi inicialmente omitida.

consequência, o nível de intersubjetividade entre os estudantes e os docentes foi, como dito, extremamente baixo.

Isso, por si, não explica o motivo de, ao menos no presente caso, os alunos atribuírem tão rapidamente uma ontologia corpuscular para o fóton. É necessário lembrar que a definição de situação que colaborativamente construíram, mesmo com a participação dos professores na atividade, foi construída muito mais pelos estudantes e, conseqüentemente, muito mais compartilhada entre eles do que entre eles e os professores. Houve nisso, a influência de um contexto institucional mais amplo, externo às atividades e ao próprio curso como um todo. Assim, a estratégia discursiva adotada pelos alunos pode estar relacionada ao contexto escolar em que os estudantes se inserem e no qual suas produções discursivas são construídas diariamente. Por serem alunos do 1º ano do Ensino Médio, estão, no contexto escolar, envolvidos pelo mundo descrito pela física clássica, no qual não se admite que os objetos possam ter caráter dual. Além disso, o mundo vivencial mais imediato não evidencia nada dessa estranheza quântica, o que também pode favorecer estratégias discursivas que veiculam vozes de cunho epistemologicamente realistas (mesmo que um realismo minimalista e ingênuo) e que atribuem ontologia corpuscular aos objetos quânticos como se fossem objetos clássicos. Como as descrições da física clássica além de serem deterministas não admitem comportamento dual, ou seja, comportamento ondulatório e corpuscular são mutuamente exclusivos para um mesmo objeto, isso pode se constituir na principal voz discursiva (perspectiva) com a qual interanimam suas vozes, terminando por ser veiculada no seu próprio discurso. O espaço de intersubjetividade não foi estabelecido entre os docentes do curso e os estudantes, mas entre os estudantes apenas, criado colaborativamente e influenciado pelo contexto do mundo vivencial imediato e/ou contexto escolar em que os estudantes vivenciam suas experiências didáticas diariamente. Isso talvez explique, ao menos no presente caso, a atribuição quase natural da ontologia corpuscular ao fóton no interferômetro.

Provavelmente por isso a ZDP não foi criada, mesmo tendo a assistência dos professores, seus parceiros mais capazes naquele momento. Os estudantes não criaram uma definição de situação compartilhada com os professores do curso – repetindo, seus parceiros mais capazes naquele momento – mas possivelmente compartilharam apenas entre si uma definição de situação elaborada a partir de um contexto mais amplo, vivenciado por ambos, mas não adequado para lidar com o problema proposto. Por isso também o aparente espanto ao constatarem que fótons individuais incidindo no interferômetro podem paulatinamente formar padrões de interferência nos anteparos. Uma abordagem possível para contornar essa questão, seria que o professor, durante o curso, discutisse sobre a versão fraca da dualidade onda-partícula em um contexto distinto do interferômetro de Mach-Zehnder ou da dupla fenda, que forneceria muitas

pistas para que resolvessem as situações propostas apenas revocalizando manifestações discursivas dos professores ao abordarem esses temas. Por exemplo, a difração de elétrons por um cristal, o microscópio eletrônico e outros, podem ser contextos iniciais interessantes. Abordar as possíveis ontologias do objeto quântico (corpúscular, ondulatória ou dualista) pode ser importante também para estabelecer intersubjetividade nessa situação. A intenção aqui foi justamente não adotar essa estratégia para evidenciar sua necessidade quando se deseja que os alunos compreendam a interferência quântica. Mesmo com isso em mente, é importante ressaltar que, embora adotando estratégias que criem efetivos espaços de intersubjetividade e definições de situação compartilhadas entre os estudantes e os professores da oficina, isso não garante que os alunos não veiculassem vozes do contexto escolar e/ou mundo vivencial imediato de forma a se alinharem e apoiarem tais vozes de forma tácita.

Na perspectiva bakhtiniana, a intertextualidade, como já dito, não se restringe a uma simples revocalização de outras manifestações discursivas, mas, além disso, uma tomada de posição axiológica, valorativa em relação a essas vozes. Trata-se, como já citado anteriormente, de uma intertextualidade ativa, responsiva, sintetizada na palavra interanimação. O estudante, ao mesmo tempo em que é influenciado por essas diferentes perspectivas, tenta se apropriar desses discursos proferidos em outros contextos e manifestá-los com sua própria entonação e intenção (Bakhtin, 1981, p. 293), ou seja, ao mesmo tempo em que não pode se livrar da influência de manifestações discursivas alheias, também não é refém destas, podendo recontextualizá-las, apoiá-las, polemizá-las, reforçá-las ou mesmo se opor totalmente às mesmas. Como as perspectivas (vozes) clássicas que permeiam a vida escolar dos estudantes são quase onipresentes no contexto escolar na fase em que se encontram, eles podem apoiar tais vozes independentemente da situação problema que seja apresentada e da intersubjetividade construída entre esses alunos e os professores da oficina. Para trazer outra voz equipotente a esse contexto, que veicule manifestações discursivas mais contemporâneas sobre os diversos conceitos da física, muito provavelmente seja necessário bem mais do que uma unidade didática que dure apenas um mês. A implementação de um ensino que realmente privilegie a reflexão requer que se repense radicalmente até mesmo as políticas públicas para a educação básica.

Terceiro grupo de atividades

No terceiro grupo de atividades, os alunos trabalharam com uma configuração do interferômetro similar à do grupo de atividades anterior, mas com a presença de um detector não-demolição³⁰ no braço A do interferômetro (colocá-lo no braço B leva a

³⁰ Simplificadamente, esse tipo de detector acusa a presença de um fóton sem destruí-lo (por exemplo, por absorção).

uma situação física análoga). O objetivo dessas atividades foi investigar como os estudantes encaravam a versão forte da dualidade onda-partícula (Pessoa Jr., 2003, pp. 17-18). As atividades foram preparadas com o intuito de igualmente surpreender os estudantes que creem que, pelo fato de o detector não alterar as propriedades do fóton (mais rigorosamente, o estado quântico translacional do fóton), o padrão observado no anteparo deva se manter inalterado (ou seja, mantendo a interferência). Nessa oportunidade o grau de intersubjetividade é maior. Ambos já vivenciaram a atividade em que o detector não-demolição não estava presente, obtendo interferência. Com dificuldade eles concluíram que o fóton apresentou comportamento ondulatório nessa situação anterior. É razoável inferir que esperariam o mesmo dessa nova situação. Dessa vez, uma assimetria foi introduzida na dupla: um dos estudantes (Bruno) teve anteriormente uma interação discursiva com o professor, que lhe explicou a mesma situação, mas no contexto do experimento de dupla fenda. Então, pode se supor que o grau de intersubjetividade era maior entre os professores e Bruno do que entre professores e Artur – além disso, Artur e Bruno não compartilhavam entre si a mesma definição de situação, o que influi na interação discursiva entre ambos.

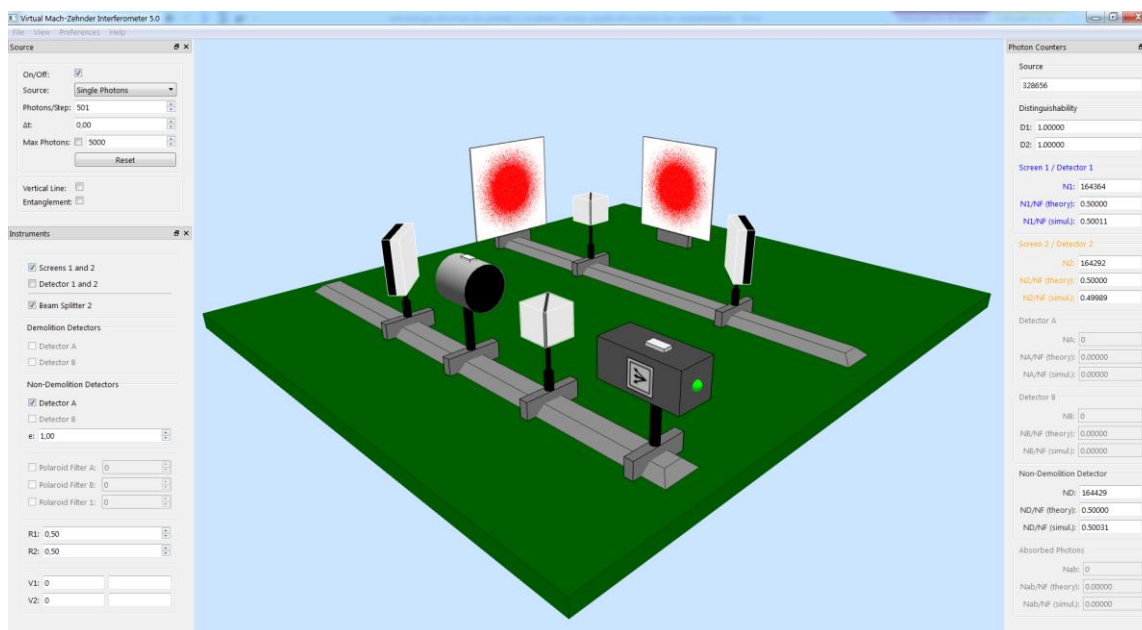


Figura 9: Imagem da tela do IVMZ com a presença de um detector não-demolição (com eficiência 1) no braço A do interferômetro. Não se forma padrão de interferência nessa situação, na qual se sabe com certeza o caminho associado ao fóton no interferômetro – se o detector dispara, o caminho é o braço A, se não dispara, é o braço B – nesse último caso, chama-se *experimento de resultado nulo* (Pessoa Jr., 2003, pp. 54-56).

A presença do detector torna disponível a informação acerca da “trajetória”³¹ de cada fóton, destruindo a possibilidade de interferência quando a eficiência do detector é 1 (acusa todos os fótons que interagem com ele), o que destrói completamente o padrão de interferência nos dois anteparos (ausência de máximos e mínimos). Espera-se, obviamente, dificuldade dos alunos em entender essa situação, mais complexa do que a anterior, principalmente para Artur. A primeira reação de ambos os alunos é de surpresa:

111.**Bruno:** *Ligue o aparelho*

112.**Artur:** *[incompreensível] fóton percorrerá sem impedir que o mesmo continue, sem que o, assim que o fóton passar pelo detector A ele detectará sua passagem. Ligue o aparelho [fonte monofotônica é ligada].*

113.**Artur:** *Ué que magia é essa?*

114.**Bruno:** *Eu sei por que isso [incompreensível].*

115.**Artur:** *Não era para isso acontecer. [Professor- Pesquisador ri].*

116.**Artur:** *Não, não, não, não...*

117.**Bruno:** *O Professor Girafales me explicou, eu sei.*

118.**Artur:** *Não, tá, esquece o que o Professor Girafales explicou, mas olha só, aqui tem 50/50. Por que que eles tão fazendo igual?*

No caso de Bruno, esta surpresa é seguida por uma afirmação de que ele compreende o fenômeno (enunciado 114). Ao ver o mesmo nessa atividade, como já citado, Bruno o associou a uma aula que ele teve em outro momento com o professor Girafales, na qual ele estudou o fenômeno, mas no contexto do experimento da dupla fenda. Podemos entender esta lembrança repentina de Bruno como uma manifestação do que Vygotsky chama de memória mediada (Vygotsky, 1978). Foi o ato de ver a não formação do padrão de interferência nos anteparos que possibilitou ao aluno lembrar a explicação ocorrida em um contexto anterior.

No caso de Artur, a reação de surpresa decorre de um mal-entendido. O aluno pensou que todos os fótons emitidos pela fonte estavam interagindo com o detector. Neste caso, o professor-pesquisador fez uma intervenção para explicar que isto era apenas aparente, pois a cada segundo estavam sendo emitidos milhares de fótons e aproximadamente metade destes passavam pelo detector. Após uma rápida explicação, o aluno rapidamente deu-se conta de como o fenômeno é contraintuitivo:

119.**Artur:** *Mas a única diferença disso pra antes é que agora tem um medidor.*

Não tendo uma resposta, Artur retoma o roteiro:

120.**Artur:** *Qual imagem você observa? Que tipo de imagem é essa? Tipicamente ondulatória ou de partículas? Partículas. Como você explica essa imagem? Ó agora sim a explicação que eu tinha dado antes que as coisas não se encostam e que não sei quê. Ahh, qual a diferença na montagem instrumental nesse caso para o anterior? A única diferença é que a gente colocou um detector.*

121.**Professor-Pesquisador:** *Muito bem*

³¹ Está se adotando aqui uma definição mais sofisticada de “trajetória”, veiculada por Kwiat (2009), associando a “trajetória dos fótons” dentro de um interferômetro de Mach-Zehnder com a “existência de qualquer informação sobre caminho, que rotula por qual caminho um fóton rumou” (Kwiat, 2009, p. 429).

122. *Artur: O que sabemos sobre o fóton nessa montagem que, calma. Peraí. Como você utilizaria essa diferença para explicar a diferença entre imagens?*

123. *Bruno: ah? O quê?*

124. *Artur: Como você usaria essa diferença para explicar a diferença entre as imagens? ...Ahm. Olha, não sei, depende do jeito que o detector usa para detectar, mas não...*

Neste trecho, pode-se perceber novamente a importância do roteiro como ferramenta mediacional. Ao se deparar com uma questão que não consegue responder sozinho (por que o padrão de interferência é destruído nesta montagem experimental?), Artur volta-se para as questões propostas no roteiro como forma de buscar subsídios para responder à pergunta.

No enunciado 120, Artur lê as primeiras questões do roteiro e responde-as sem dificuldades. Nos enunciados 122 e 124, Artur lê perguntas que ainda não é capaz de responder sozinho. A última frase do enunciado 124 mostra uma tentativa de resposta às perguntas por parte de Artur, atribuindo a diferença entre os padrões nos anteparos à ação do detector. Pode-se compreender a dificuldade de Artur em responder estas questões, pelo fato de o aluno ainda não dominar dois conceitos subjacentes importantes para entender e explicar o fenômeno: superposição de estados quânticos e emaranhamento.

Assim, não é difícil inferir o motivo pelo qual o aluno não compreende bem esse processo de medição, que é o mais comumente abordado nos livros de física quântica, embora existam processos mais gerais (Auletta *et al.*, 2009). Os conceitos subjacentes envolvidos nessa atividade requerem um certo domínio dos recursos semióticos do formalismo matemático da física quântica, de modo que seus significados socialmente compartilhados possam ser usados para entender e explicar a destruição do padrão de interferência quando o detector de não-demolição está presente. Quando não há o detector não-demolição em um dos braços, após a interação com o primeiro divisor de feixe o fóton comporta-se *como se* passasse pelos dois caminhos³², produzindo um padrão de interferência nos anteparos e assumindo comportamento ondulatório.

Quando o detector não-demolição está presente, ainda assim o fóton se comporta *como se* passasse pelos dois caminhos do interferômetro (o detector não altera o estado quântico translacional do fóton) após a sua interação com o primeiro divisor de feixe. A diferença é que o estado translacional do fóton se correlaciona com os estados quânticos do sistema microscópico do detector, deflagrando o que se chama de pré-medição. É nesse estágio que normalmente se usa a expressão verbal de que o “detector rotula o estado translacional do fóton” ou “marca o caminho do fóton” (por isso o nome *which-path marker* ou *which-way marker* são dados a esse tipo de detector – também são

³² Representa-se matematicamente essa característica contraintuitiva pela superposição linear de estados quânticos translacionais.

usados os nomes *which-path detector* ou *which-way detector*). Essas expressões são de natureza puramente verbal (linguagem natural) e parecem vagas quando se tenta, mediado por essa semiose incompleta, entender a destruição do padrão de interferência.

Tais expressões verbais só ganham significado completo quando usadas em conjunto com o formalismo matemático, sem o qual as metáforas “rótulo” ou “marcador de caminho” são vagas e pouco dizem. É nesse sentido que a física requer a multisseiose para comunicar e compreender conceitos e fenômenos – as metáforas verbais citadas só ganham significação completa quando utilizadas integradas ao formalismo matemático, cujos recursos semióticos são de natureza bastante distinta da linguagem verbal (por isso o nome multisseiose). Nesse caso, é a mediação multisseiônica que permite dar significado claro a tais metáforas³³. Essa integração se estabelece por um processo em que os diferentes sistemas semióticos interajam entre si e sejam empregados como uma unidade conexa, de forma a construir uma significação completa sobre o fenômeno.

Esse processo, essa interação mútua entre diferentes sistemas semióticos chama-se *intersemiose* (O'Halloran, 2005, pp. 158-188) e se estabelece entre linguagem verbal, representações pictóricas, semiose matemática, gráficos, esquemas, tabelas e outros – na interação intersemiotica os diferentes sistemas semióticos “se alternam como o principal recurso de significação, também interagindo entre si para construir significado” (O'Halloran, 1998, p. 360). Dominar multisseiose e relações intersemioticas, portanto, é um processo difícil. Mais difícil ainda é a apropriação.

Com tudo isso, não se espera que o aluno tenha condições de entender completamente o sumiço do padrão de interferência por meio apenas das metáforas “rótulo” ou “marcador de caminho”. Para contornar essa questão, pode-se então argumentar que o detector não-demolição, por meio dessa “rotulagem” torna disponível

³³ Isso se faz por meio da representação de vetores de estado em sistemas compostos – no caso, os sistemas são o fóton e o dispositivo microscópico interno do detector que realiza a pré-medição. O estado global do sistema composto envolve dois espaços de Hilbert, um relativo aos estados translacionais do fóton, outro relativo aos estados neutro (correspondente a fóton não acusado) e não neutro (correspondente a fóton acusado) do dispositivo interno do detector. Esse estado global, antes da interação do fóton com o detector é separável, ou seja, é um produto simples (externo) do estado translacional do fóton e o estado neutro do detector. Assim, o estado translacional do fóton antes da pré-medição não está correlacionado com o estado do dispositivo microscópico do detector. Após a interação com o detector, o estado translacional do fóton permanece inalterado, sendo uma superposição de dois estados translacionais possíveis no interferômetro: um associado ao braço A outro ao B. Quando ocorre a pré-medição, o estado associado ao braço A será correlacionado ao estado não neutro do dispositivo microscópico que realiza a medição e o estado translacional correspondente ao braço B continuará correlacionado ao estado neutro. Grosseiramente é como se afirmássemos se o fóton “ruma” pelo braço A, o detector o acusa, se “ruma” pelo braço B, o detector não o acusa. Nesse caso, o estado global do sistema composto não será mais separável e diz-se que representa um estado correlacionado entre estados translacionais do fóton e estados neutro e não neutro do dispositivo que realiza a pré-medição. Em outras palavras, o fóton emaranha-se com o dispositivo microscópico do detector e a simples pré-medição elimina o padrão de interferência.

a informação sobre o caminho associado ao fóton no interferômetro, o que destrói o padrão de interferência³⁴ quando a eficiência do detector não-demolição é 1. É por essa via discursiva que se espera que os alunos consigam compreender minimamente essa situação.

Assim, na sequência da atividade, o professor-pesquisador passou a explicar os resultados das duas experiências, salientando que o fóton apresenta comportamento ondulatório quando não há informação sobre o caminho percorrido, apresentando comportamento corpuscular quando esta informação passa a estar disponível. Neste processo discursivo, o professor lançou diversas questões aos alunos, enfatizando onde o entendimento dos alunos não é compatível com os resultados da simulação e explicando-os. Bruno, por já ter discursivamente interagido com o professor anteriormente sobre essa questão também ajudou na explicação, explicitando a assimetria entre ele e Artur e que o grau de intersubjetividade entre ele e o professor é mais significativo do que entre Artur e o professor. Com isso, todos estavam “sintonizando” suas definições de situação para construir, no momento da atividade, um espaço de intersubjetividade comum aos três. Ao longo da explicação Artur mostrou-se resistente à ideia de que o fóton comporta-se, na situação em que houve interferência, como se passasse pelos dois caminhos.

125. **Professor Pesquisador:** *A ideia é essa Vamo lá. Que que vocês disseram no primeiro experimento*

126. **Artur:** *Deixa eu tentar uma coisa [Artur manipula o software]*

127. **Bruno:** *O primeiro.*

128. **Professor- Pesquisador:** *É, não o primeiro com, só com fôtons sem o detector*

129. **Bruno:** *Que a gente achava que ia fazer um círculo*

130. **Artur:** *Que a gente achava que ia ficar assim*

131. **Professor Pesquisador:** *Que ia ficar assim, porque ele tinha 4 caminhos para seguir e que ele cada vez seguia...*

132. **Artur:** *Um.*

133. **Professor Pesquisador:** *Um caminho*

³⁴ Essa informação pode ser apenas parcial, gerando padrões de interferência com contraste menor do que 1. O contraste, ou visibilidade, é uma medida de quão discernível é o padrão de interferência. Na óptica ondulatória, a visibilidade é dada por $\mathcal{V} = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ onde I_{\max} é a intensidade máxima no anteparo e I_{\min} , a mínima. No experimento de Young padrão, que se encontra em livros de Física Geral, a intensidade mínima é nula (interferência totalmente destrutiva) e a visibilidade é 1 (máxima). No caso quântico, adota-se o princípio de que a intensidade em uma dada região do anteparo é proporcional ao número de fótons que incide nessa mesma região. Nesse caso, $\mathcal{V} = (N_{\max} - N_{\min}) / (N_{\max} + N_{\min})$ sendo N_{\max} o número médio de fótons incidentes nas regiões onde se formam os máximos de interferência no anteparo e N_{\min} o número médio de fótons nas regiões onde se formam os mínimos de interferência no mesmo anteparo. Quando não há detectores no interferômetro e os dois divisores de feixe são balanceados, a visibilidade é 1. A inserção do detector não-demolição destrói totalmente o padrão de interferência se sua eficiência for 1 (visibilidade nula, não havendo como diferenciar máximos e mínimos, ou seja, $N_{\max} = N_{\min}$). Se a eficiência for menor do que 1, ele não acusa todos os fótons que por ele passam e os fótons formarão um padrão de interferência (ou seja, visibilidade maior do que zero) nos anteparos, mas com visibilidade menor do que 1. Essa situação intermediária não foi abordada neste trabalho, para não introduzir atividades exageradamente complicadas aos alunos.

- 134.**Artur:** *É*
- 135.**Professor Pesquisador:** *Certo, é isso que vocês pensaram. Só que, justamente se vocês estivessem certos, tinha que se surgir...*
136. **Bruno:** *Um círculo*
- 137.**Professor Pesquisador:** *Este padrão no anteparo. certo? Agora, como é que se explica que tenha interferência? É que sempre, para ti explicar a existência de interferência, tem que imaginar que tem luz vindo por esse caminho e luz vindo pelo outro caminho e que elas se interferem ao chegar no anteparo. Então, quando tu não tinha o detector, a luz se comportava como se ela passasse pelos dois caminhos certo. O fóton, quando não tem detector, ele se comporta como se ele atravessasse os dois caminhos.*
- 138.**Artur:** *Como assim?*
- 139.**Bruno:** *É que assim, cara.*
- 140.**Professor Pesquisador:** *Isso não faz sentido tá?*
- 141.**Bruno:** *Não faz o menor sentido mas assim, Quando tu vê o negócio, sem o detector saber para onde é que tava indo, cara [incompreensível] sabia, você sabia? Não, tu não sabia então, tá indo pelos dois. Se tu não sabe, tá indo pelos dois ou não tá indo por nenhum Como a gente vê que tinha algum resultado, tava indo pelos dois.*
- 142.**Artur:** *Se eu não sei tá indo ou por um, ou por outro. É só um fóton é uma partícula [Professor-Pesquisador ri].*
- 143.**Bruno:** *Ou pelos dois Que que, qual que é a possibilidade? Ou não vai, Pode dar, porque tu não tá vendo, só que a gente viu porque tinha alguma coisa aparecendo ali.*
- 144.**Artur:** *Certo.*
- 145.**Bruno:** *Pode ir por um pode ir por outro ou pode ir pelos dois. E como é que tu sabe o que vai acontecer? Tu não sabe, porque tu não tá medindo, só que quando tu mede essas probabilidades colapsam em uma só. É isso, né?*
- 146.**Artur:** *É, não, só que...*
- 147.**Bruno:** *Uma coisa assim.*
- 148.**Professor-Pesquisador:** *É isso aí. É isto aí.*
- 149.**Professor Girafales:** *Já pode ter aula com a Ilana. [Professor- Pesquisador e Professor Girafales riem]*
- 150.**Artur:** *Só que ãh, é uma partícula, como é que ela vai pelos dois caminhos?*
- 151.**Professor-Pesquisador:** *Vou te contar um segredo: ninguém sabe, existem milhões de teorias sobre isso, existem milhões de interpretações que explicam, mas e efetivamente quando a gente não tem nenhuma informação sobre o caminho que o fóton seguiu, a gente tem que considerar como se o fóton tivesse ido pelos dois caminhos.*

O diálogo acima marca um ponto de inflexão na manifestação discursiva de Artur. Após este diálogo, o estudante passa a tratar com a possibilidade de o fóton se comportar *como se* passasse pelos dois caminhos, apesar de ainda atribuir ontologia corpuscular ao fóton (enunciados 142 e 150). Nota-se que ao longo do diálogo, foi paulatinamente sendo construída uma definição de situação comum entre os três, criando um espaço de intersubjetividade em grau bem mais significativo do que havia no início. Isso claramente é um processo que evolui no plano interpsicológico, interpessoal. Artur tem aqui uma situação não muito frequente na qual dois parceiros mais capazes lhe estão dando assistência ao longo da atividade (o professor e o Bruno).

Apesar de Artur expressar discursivamente que começa a admitir que o fóton se comporta *como se* rumasse pelos dois braços do interferômetro e manifestando uma mudança discursiva que evidencie uma mudança de perspectiva, um aprendizado, não implica um abandono por parte do estudante da visão do fóton como partícula. Cabe destacar o fim do enunciado 145, em que Bruno utiliza o termo *colapsar* para descrever o resultado da medição do caminho (na verdade, do seu estado translacional) para o

fóton quando há a presença do detector. Neste enunciado, percebe-se uma forte presença da voz do Professor Girafales e uma tentativa de uso de um gênero discursivo mais próximo do acadêmico.

Quarto grupo de atividades

No quarto grupo de atividades, foi utilizada a mesma configuração do IVMZ na atividade anterior, porém analisando-se as contagens de número de fótons, disponíveis no canto direito da interface do *software* (Figura 5), ao invés de analisar os padrões nos anteparos.

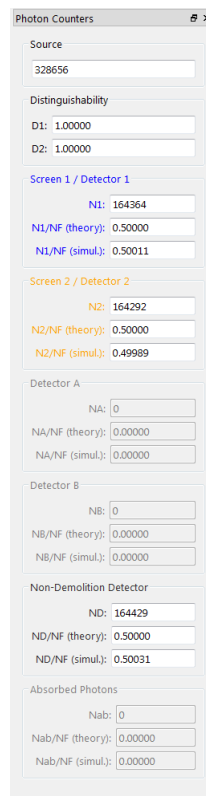


Figura 10: Imagem da contagem de fótons na simulação. As contagens absolutas são mostradas em cada anteparo e detector. As frações (relativas ao número de fótons emitido pela fonte) de fótons acusados em cada anteparo e no detector não-demolição são mostradas em duas formas: a previsão teórica e a mesma quantidade obtida pela simulação.

Uma captura dessa tela em que aparecem as contagens de fótons está mostrada na Figura 10. O objetivo destas atividades foi abordar em nível básico o caráter probabilístico da física quântica, enfatizando a diferença entre a probabilidade teórica e os resultados obtidos na simulação. A discussão deste quarto grupo de atividades durou aproximadamente dez minutos. A discussão para explicar que a fração de fótons teórica indica a probabilidade calculada teoricamente de cada fóton atingir determinado anteparo (ou ser acusado por algum detector) enquanto a fração de fótons simulada indica a razão entre o número de fótons emitidos pela fonte e o número de fótons

efetivamente acusados em cada anteparo (ou detector) foi breve. Igualmente breve foi a discussão em torno do fato destas razões serem diferentes. Nesta discussão, o professor que acompanhava a dupla poderia ressaltar (mas não o fez) que a probabilidade de 1/2 em atingir cada anteparo não implica na chegada de meio fóton em cada anteparo, ou que o fato de um determinado fóton atingir um dos anteparos leve necessariamente ao fóton seguinte atingir o outro. Não há indícios, no entanto, de que esta omissão tenha prejudicado a compreensão dos estudantes.

Ainda que não previsto nas questões do roteiro, o professor-pesquisador utilizou a discussão em torno de probabilidades para discutir a diferença fundamental entre probabilidades na física clássica e na física quântica, ressaltando que classicamente uma grandeza probabilística era causada pelo desconhecimento de todas as variáveis do sistema, enquanto, na física quântica, não há nenhuma informação sobre o sistema que possa, a priori, definir qual será o resultado da medição. Toda a explicação foi qualitativa, utilizando-se exemplos simples, como o ato de jogar uma moeda ou o uso de geradores de número aleatório para simular eventos aleatórios em programas. Na explicação, ressaltou-se que a simulação não é verdadeiramente aleatória, dadas as limitações do computador que a está executando.

Atividades não programadas

Após completarem as atividades do roteiro, os alunos mostraram-se interessados em continuar a aula. Desta forma, o professor-pesquisador propôs uma nova atividade aos estudantes, introduzindo algumas características da simulação que seriam estudadas na aula seguinte.

O professor pediu que os alunos repetissem as simulações realizadas no segundo e terceiro grupos de atividades, porém trocando os anteparos por detectores (Figura 11). Ao substituir-se os anteparos por detectores, também altera-se a fonte, que deixa de emitir fótons em uma pequena abertura angular e passa a emitir os mesmos em um feixe bem mais estreito. Assim, na situação em que não há detectores ao longo dos braços, todos os fótons emitidos pela fonte chegam ao detector 1 (que substitui o anteparo 1, no qual ocorria interferência construtiva no centro) e nenhum fóton atinge o detector 2 (que substitui o anteparo 2, no qual ocorria interferência destrutiva no centro). Após serem explicadas as mudanças na configuração do interferômetro e terem visualizado os resultados das duas montagens propostas, os alunos passam a discutir e tentar compreender os resultados. Suas falas indicam que dominaram parcialmente o conceito de dualidade onda-partícula, como mostra o seguinte trecho:

152. Artur: Primeiro vamos ver porque tá vindo tudo para cá: ã.., parte teoricamente mais simples. Então, ele tá emitindo como fóton só que a gente sabe que esses fótons, esse caras não são muito confiáveis estes caras de fótons. Se não tem ninguém medindo, pode ser tanto fótons como onda, então a gente tem que admitir que...

153. Bruno: Eles passam pelos dois caminhos.

154.**Artur**: É.

155.**Bruno**: Ah.

156.**Artur**: Ah.

157.**Bruno**: Eu acho que eu entendi. Aquela mesma coisa que criava os máximo centro, aqui faz...

Nos enunciados 153 e 157, Bruno utiliza a ideia de que o fóton se comporta *como se* passasse pelos dois caminhos simultaneamente, podendo ocorrer interferência para um único fóton. No enunciado 152, Artur passa a assumir que o fóton apresenta um comportamento estranho quando não há nenhum aparelho medindo o caminho pelo qual ele chega aos detectores. É uma mudança discursiva suave, mas importante, pois ele atribuía insistentemente uma ontologia corpuscular ao fóton, tendo resistência em aceitar resultados que não coincidisse com essa perspectiva. Ele mostra ainda resquícios da sua visão de fóton como partícula, uma vez que no enunciado 152 ele opõe fóton a onda e não tem claro que o comportamento “estranho” do fóton se deve ao seu comportamento dual. Após a discussão destes experimentos, a aula foi encerrada.

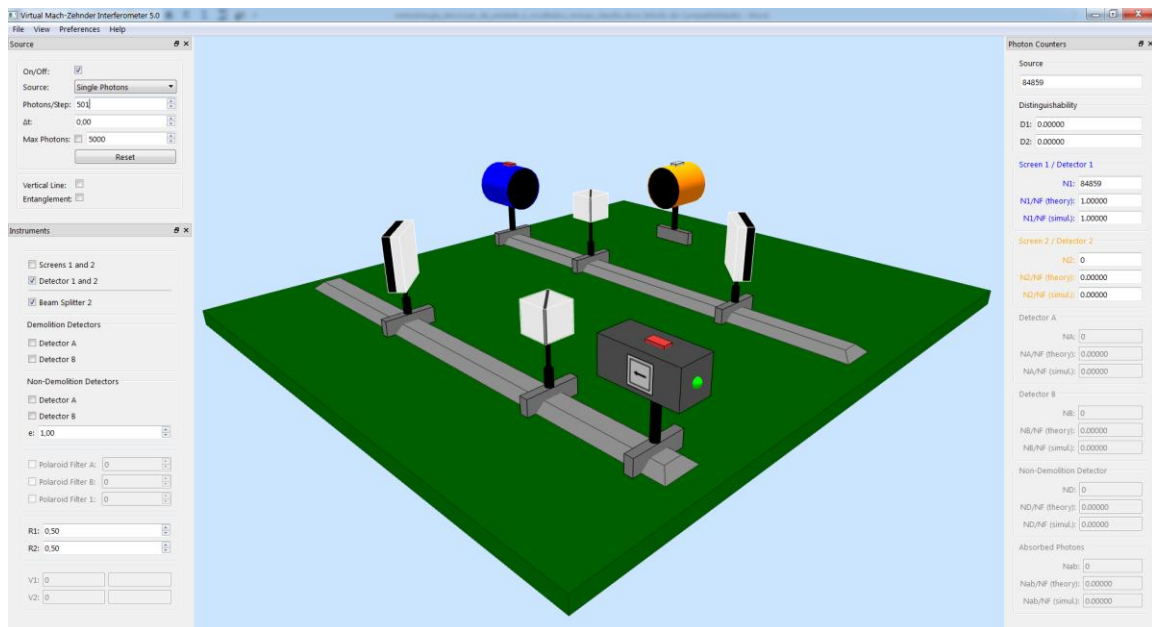


Figura 11: Imagem da tela do IVMZ com a presença dos detectores 1 (azul) e 2 (laranja), no lugar dos anteparos. Considerando divisores de feixe balanceados, todos os fótons incidem no detector 1 e nenhum no 2.

4.2.6 Finalização

Após as atividades com o *software* houve duas atividades: uma aula sobre o princípio da incerteza e uma visita a alguns laboratórios de pesquisa do Instituto de Física da UFRGS. A aula consistiu em uma palestra com uso de uma apresentação de *slides* (Apêndice V). A palestra pode ser dividida em dois momentos: no primeiro momento o Professor Girafales apresentou e discutiu com os alunos o princípio da incerteza. No segundo momento, o professor-pesquisador finalizou a unidade didática, fazendo uma retomada dos conteúdos trabalhados ao longo das aulas anteriores e

sintetizando os principais conceitos abordados. A aula foi marcada por longas falas dos professores, pontuadas por breves questionamentos ou comentários dos alunos. Durante a aula, os alunos mostraram um interesse passivo, mantendo-se silenciosos e aparentemente interessados e acompanhando as explicações do professor, mas sem participar ativamente da aula.

A discussão em torno do princípio da incerteza durou aproximadamente quarenta cinco minutos. Durante este período, o professor Girafales recorreu a diversos exemplos e histórias para contextualizar e esclarecer o conceito. A principal mensagem que se buscou passar sobre o princípio da incerteza foi que a impossibilidade de se medir simultaneamente a posição e o momentum de um objeto quântico deve-se a uma característica da própria natureza e não a uma limitação dos instrumentos de medida.

Nos últimos quinze minutos da aula, o professor-pesquisador buscou sintetizar com os alunos os principais assuntos abordados, respondendo à questão se fótons são onda ou partícula. Após retomar as visões clássicas acerca de ondas e partículas, o professor propôs utilizar a nomenclatura objeto quântico. A partir desta proposta, fótons, elétrons, átomos e até moléculas são objetos quânticos que apresentam comportamento corpuscular ou ondulatório, dependendo da configuração experimental usada para obter resultados sobre esse comportamento.

Na ida até o Instituto de Física da UFRGS, os alunos visitaram os laboratórios de Supercondutividade e Implantação Iônica da UFRGS, nos quais receberam informações sobre o funcionamento dos laboratórios e assistiram demonstrações de experimentos avançados. Em seguida, os alunos assistiram a uma curta palestra com um professor de física da UFRGS sobre experimentos importantes na gênese da teoria quântica. Além disso, foi combinado com outro professor da universidade que fizesse uma breve palestra apresentando e realizando demonstrações com os principais experimentos da gênese da física quântica. Essa visita cumpriu com uma série de objetivos pedagógicos, ainda que muitos dos conteúdos abordados nos laboratórios não tivessem ligação direta com os assuntos abordados no resto da unidade didática. A visita mostrou-se muito produtiva ao propiciar novos conhecimentos sobre a física quântica aos alunos, aproximar os alunos de Ensino Médio da universidade, propiciar um momento de aprendizagem fora da escola e propiciar momentos de aprendizagem conjugados com momentos de descontração.

A visita começou pelo laboratório de supercondutividade, onde os alunos foram recebidos por três laboratoristas, que explicaram o funcionamento do laboratório, as pesquisas que eram realizadas no local e depois fizeram um experimento demonstrativo de levitação magnética por supercondutividade (efeito Meissner). O momento em que foi demonstrada a levitação magnética mostrou-se o momento de maior interesse por

parte dos alunos, que ficaram maravilhados com a demonstração e com a possibilidade de manipularem nitrogênio líquido.

O segundo laboratório visitado foi o Implantador Iônico, onde os alunos foram recebidos por uma bolsista do laboratório. Essa visita acabou sendo breve, pois a responsável por nos receber não conhecia muito bem o laboratório e o funcionamento dos equipamentos. O professor-pesquisador acabou guiando a visita, repassando algumas informações que havia recebido do professor responsável pelo laboratório no momento em que foi agendar a visita.

O último momento da visita consistiu em uma palestra com um professor do Instituto de Física que apresentou alguns dos principais experimentos relacionados à gênese da física quântica. Foram abordados os funcionamentos dos tubos de Geissler e de Crooks, o experimento que determinou a relação carga-massa, entre outros. Durante as explicações os alunos mostraram-se bastante interessados e fizeram diversas perguntas ao professor. Assim, encerrou-se a implementação didática com os alunos de Ensino Médio.

5 CONCLUSÕES

Nesta seção busca-se apresentar os principais elementos positivos e negativos da unidade didática desenvolvida nesta pesquisa, avaliando como distintos fatores influenciaram nos resultados. Tendo em vista o caráter particular desta pesquisa, as conclusões deste trabalho não podem ser generalizadas diretamente para outros contextos e situações, mas devem ser entendidas como uma série de resultados de pesquisa que podem ser considerados para a elaboração de unidades didáticas e para a compreensão da forma como os alunos aprendem conceitos de física quântica.

O primeiro elemento a causar importante impacto nos resultados da unidade didática foi a escolha do modelo de unidade didática. Ao se optar por realizar uma oficina extracurricular e eletiva, obteve-se a formação de uma turma pequena (apenas 7 alunos que participaram de aulas, exceto a aula inaugural da qual participaram 10 estudantes) e bastante interessada e questionadora. Pelo fato de a turma ser pequena, foi possível aos professores oferecer um tratamento mais personalizado aos alunos. Nas aulas em que se trabalhou com o IVMZ houve durante quase todo tempo um professor acompanhando cada grupo.

Pelo fato de a oficina ser eletiva, apenas alunos que tinham interesse no assunto participaram das aulas; naturalmente, alunos interessados costumam ser mais participativos. Cabe perceber, no entanto, que a manutenção do interesse e participação dos alunos durante as aulas somente foi obtido pela realização de aulas em que se realizaram experimentos, com ampla participação dos estudantes e momentos descontraídos, em que os conteúdos foram desenvolvidos de forma apropriada para a aprendizagem e desenvolvimento dos participantes.

O modelo da oficina trouxe também alguns efeitos indesejáveis. O principal deles foi que a oficina não era a prioridade dos estudantes, o que colaborou para um número relativamente elevado de faltas. Bruno foi o único aluno que participou de todas as aulas da oficina; Artur e Gustavo faltaram uma aula; Daniel e Elisa faltaram duas aulas e Carlos e Fabio faltaram três aulas. Em uma unidade didática composta por sete aulas, faltar duas ou mais vezes faz muita diferença, especialmente porque as faltas ocorreram entre a 2ª e a 6ª aulas nas quais se concentrou o estudo da dualidade onda-partícula. Deve-se levar em conta que os alunos justificaram a maioria das faltas por terem de realizar outras atividades escolares no horário, como trabalhos em grupo e estudos para provas. Esta não prioridade já era esperada e foi o principal motivo para que não fossem propostos trabalhos ou tarefas para casa, uma vez que os alunos já recebem uma grande carga de trabalhos e estudos das matérias obrigatórias.

O segundo elemento a se considerar nos resultados obtidos é o papel das ferramentas de mediação no desenvolvimento dos estudantes. Nesta unidade didática as ferramentas de mediação analisadas foram o IVMZ e os roteiros entregues aos estudantes para a manipulação do mesmo. Diversas outras ferramentas, tais como vídeos, apresentações de *slides* e experimentos não são o foco deste trabalho, ainda que tenham desempenhado importante papel ao longo da oficina.

Em todos os grupos analisados, o uso do IVMZ mostrou-se fundamental para a expansão da zona de desenvolvimento proximal dos envolvidos. Os principais elementos da simulação que a tornaram fundamental no desenvolvimento dos conhecimentos dos estudantes sobre a dualidade onda-partícula foram: a formação de padrões com e sem interferência nos anteparos, a representação dos elementos do aparato experimental, a possibilidade de passar do regime clássico para o regime quântico com a mudança do laser para a emissão de fótons individuais, a caracterização da chegada de fótons individuais nos anteparos e a possibilidade de colocação de detectores nos braços do interferômetro. A visualização de todas essas características do interferômetro foi fundamental para o posterior avanço no domínio dos estudantes sobre o conceito de dualidade onda-partícula. Esta importância é evidenciada em diversos dos trechos destacados na análise dos resultados em que os alunos discutem sobre a formação de diferentes padrões no anteparo ou tentam prever os resultados da simulação a partir dos elementos da mesma. É importante ressaltar que o IVMZ sozinho não promove a aprendizagem, ele precisa ser acompanhado de explicações e questionamentos envolvendo um parceiro mais capaz, em geral, um professor.

Os roteiros também se mostraram extremamente importantes na expansão da zona de desenvolvimento proximal dos estudantes. No entanto, cada grupo utilizou os roteiros de maneira diferente. Os roteiros tinham por objetivo organizar a ação dos grupos indicando e ordenando as tarefas, propiciar uma autonomia relativa às duplas diminuindo a dependência das explicações do professor e promover a reflexão e o debate de questões relativas à dualidade onda-partícula entre os estudantes e entre os estudantes e o professor.

Todos os grupos utilizaram o roteiro de forma a organizar sua ação, no entanto, nos grupos de Carlos e Daniel e de Elisa e Gustavo foi necessária uma constante intervenção do professor para conduzi-los ao longo das tarefas previstas no roteiro. Nestas duplas também houve pouco debate entre os membros do grupo, com as discussões ocorrendo geralmente entre um dos estudantes e um dos professores. Nestes casos o roteiro não conseguiu promover a autonomia e as discussões entre os membros do grupo.

Na dupla formada por Artur e Bruno na 4ª aula e no trio formado por Artur, Bruno e Gustavo na 5ª aula, os alunos conseguiram realizar as atividades propostas pelo roteiro de forma bastante autônoma. Na maioria dos casos, eles realizavam as tarefas propostas e iniciavam as discussões das questões de forma independente. O professor fazia-se necessário para responder questões que os alunos não sabiam responder, trazer novos elementos para a discussão e sintetizar as principais ideias que deveriam ser guardadas em cada atividade.

O terceiro elemento a ser considerado é o papel desempenhado pelo professor enquanto parceiro mais capaz. Ainda que os roteiros trouxessem diversas indicações sobre o que os alunos deveriam observar e analisar, a intervenção do professor para explicar como os diversos elementos se relacionavam e trazer a explicação cientificamente aceita foi extremamente necessária em muitas situações ao longo das discussões de todas as duplas. Em alguns casos, os alunos encontraram a resposta correta, mas foi apenas com a confirmação do professor que eles passaram a confiar em suas explicações.

A análise de todos os estudantes que participaram das atividades com o IVMZ indica que houve desenvolvimento no domínio do conceito de dualidade onda-partícula. Este processo é mais evidente em Artur e Bruno que conseguiram aplicar o conceito para analisar diferentes propostas de simulações além das que haviam discutido com os professores. Para os outros participantes, este desenvolvimento se evidenciou na forma como interagiram com os professores e colegas durante as discussões propostas nos roteiros. Em relação a outros temas de física quântica abordados nas demais atividades também houve um aparente desenvolvimento, que é evidenciado na atenção dos estudantes ao longo das aulas e em suas participações ao longo das mesmas. Um problema desta unidade didática foi que os alunos receberam o texto de apoio apenas após ter sido finalizada a unidade didática. Em outras oportunidades, seria interessante entregar o texto durante o desenvolvimento da unidade didática e buscar integrá-lo às atividades desenvolvidas.

Durante todas as aulas os alunos mostraram-se interessados e motivados. A realização de experimentos durante as aulas e o trabalho com o roteiro e a simulação renderam momentos de maior interesse do que explicações orais e o uso de apresentações de *slides*. A visita aos laboratórios do Instituto de Física da UFRGS e a palestra com um dos professores da instituição caracterizou-se como um importante diferencial desta unidade didática, transformando-a em uma experiência que, com certeza, vai marcar os estudantes para toda a vida.

Esta unidade indica que é possível ensinar conceitos fundamentais de física quântica a alunos de Ensino Médio. Para a continuidade desta pesquisa, seria

interessante desenvolver unidades didáticas que enfoquem de forma aprofundada outros conceitos fundamentais e contraintuitivos da física quântica, como o emaranhamento, a não-localidade e experimentos de escolha demorada. Outro caminho que se poderia seguir seria buscar formas de adaptar esta unidade didática para o ensino de física quântica durante as aulas obrigatórias de física do Ensino Médio ou para outros contextos sociais, em especial para escolas públicas.

REFERÊNCIAS

- Anjos, R. M., Veiga, R., Carvalho, C., Sanches, N., Estellita, L., Zanuto, P., Queiroz, E., & Macario, K. (2008). Natural sources of radiation exposure and the teaching of radioecology. *Physics Education*, 43(4), 423-428. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/43/4/012>
- Arlego, M. J. F. (2008). Los fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela secundaria utilizando el concepto de integral de camino. *Revista Electrónica de Investigación em Educação en Ciências*, 4(1), 59-66. Disponível em http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-66662008000100006&lng=pt&nrm=iso&tlng=es
- Asikainen, M. A., & Hirvonen, P. E. (2009). A study of pre- and inservice physics teachers' understanding of photoelectric phenomenon as part of the development of a research-based quantum physics course. *American Journal of Physics*, 77(7), 658-666. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.3129093>
- Aspect, A. (2006). Preface. In Editor, *Quantum physics, a first encounter: interference, entanglement & reality* (pp. ix-xiv). Oxford: Oxford University Press.
- Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982a). Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, 49(25), 1804-1807. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804>
- Aspect, A., Grangier, P., & Roger, G. (1981). Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem. *Physical Review Letters*, 47(7), 460-463. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.47.460>
- Aspect, A., Grangier, P., & Roger, G. (1982b). Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities. *Physical Review Letters*, 49(2), 91-94. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.91>
- Auletta, G., Fortunato, M., & Parisi, G. (2009). *Quantum Mechanics*. New York: Cambridge University Press.
- Ayala Filho, Á. L. (2010). A construção de um perfil para o conceito de referencial em física e os obstáculos epistemológicos a aprendizagem da teoria da relatividade restrita. *Investigações em Ensino de Ciências*, 15(1), 155-179. Disponível em http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID232/v15_n1_a2010.pdf
- Bacciagaluppi, G. (2007). Probability, arrow of time and decoherence. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38(2), 439-456. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.shpsb.2006.04.007>
- Baily, C., & Finkelstein, N. D. (2010). Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 6(1), 010101.1-010101.11. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.010101>
- Bakhtin, M. M. (1981). *The dialogic imagination: four essays*. Austin: University of Texas Press.
- Bakhtin, M. M. (1997). *Estética da criação verbal* (2 ed.). São Paulo: Martins Fontes.

- Bakhtin, M. M. (1997) In Editor, *Estética da criação verbal* (pp. 261-306). São Paulo: Martins Fontes.
- Bakhtin, M. M. (2006). *Marxismo e filosofia da linguagem* (12 ed.). São Paulo: Hucitec.
- Bakhurst, D. (2007). Vygotsky's Demons. In H. Daniels, M. Cole, & J. V. Wertsch (Eds.), *The Cambridge companion to Vygotsky* (pp. 50-76). New York: Cambridge University Press.
- Barbero, G. J. F., Garay, I., & Villaseñor, E. J. S. (2008). Classical and quantum behavior of dynamical systems defined by functions of solvable Hamiltonians. *American Journal of Physics*, 76(2), 153-157. doi: 10.1119/1.2805234
- Barros, M. A., & Bastos, H. F. B. N. (2007). Investigando o uso do ciclo da experiência kellyana na compreensão do conceito de difração de elétrons. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 24(1), 26-49. Disponível em <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/download/1549/12757>
- Bateman, J., Nimmrichter, S., Hornberger, K., & Ulbricht, H. (2014). Near-field interferometry of a free-falling nanoparticle from a point-like source. *Nature Communications*, 5, 4788.1-4788.5. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms5788>
- Berk, L. E. (1986). Relationship of elementary school children's private speech to behavioral accompaniment to task, attention, and task performance. *Developmental Psychology*, 22(5), 671-680. doi: <http://dx.doi.org/10.1037/0012-1649.22.5.671>
- Betz, M., Lima, I., & Mussatto, G. (2009). Dualidade onda-partícula: um objeto de aprendizagem baseado no interferômetro de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 31(3), 3501.1-3501.8. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172009000300007&script=sci_arttext
- Blanco, F., La Rocca, P., Riggi, F., Akindinov, A., & Mal'kevich, D. (2008). Cosmic ray measurements by scintillators with metal resistor semiconductor avalanche photo diodes. *Physics Education*, 43(5), 536-539. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/43/5/013>
- Bloome, D., Carter, S. P., Christian, B. M., Otto, S., & Shuart-Faris, N. (2005). *Discourse Analysis & the Study of Classroom Language & Literacy Events: a Microethnographic Perspective*. Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Cardoso, S. O. O., & Dickman, A. G. (2012). Simulação computacional aliada à teoria da aprendizagem significativa: uma ferramenta para ensino e aprendizagem do efeito fotoelétrico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 29(Especial), 891-934. doi: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29nesp2p891>
- Carvalho Neto, R. A., Júnior, O. F., & Silva, J. L. P. B. (2009). Improving students' meaningful learning on the predictive nature of quantum mechanics. *Investigações em Ensino de Ciências*, 14(1), 65-81. Disponível em http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID207/v14_n1_a2009.pdf
- Castrillón, J., Freire Jr., O., & Rodríguez, B. (2014). Mecánica cuántica fundamental, una propuesta didáctica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36(1), 1-12. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172014000100023>

- Chaiklin, S. (2003). The Zone of Proximal Development in Vygotsky's analysis of learning and instruction. In A. Kozulin, B. Gindis, V. S. Ageyev, & S. M. Miller (Eds.), *Vygotsky's educational theory in cultural context* (pp. 39-64). New York: Cambridge University Press.
- Coelho, G. R., & Borges, O. (2010). O entendimento dos estudantes sobre a natureza da luz em um currículo recursivo. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27(1), 63-87. doi: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2010v27n1p63>
- Couder, Y., & Fort, E. (2006). Single-particle diffraction and interference at a macroscopic scale. *Physical Review Letters*, 97(15), 154101.1-154101.4. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.154101>
- Couder, Y., & Fort, E. (2012). Probabilities and trajectories in a classical wave-particle duality. *Journal of Physics: Conference Series*, 361, 012001.1-012001.9. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/361/1/012001>
- Davydov, A. Y. (2012). Wave-particle duality in classical mechanics. *Journal of Physics: Conference Series*, 361, 012029.1-012029.10. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/361/1/012029>
- de Corte, E., & Verschaffel, L. (2006). Mathematical thinking and learning. In K. A. Renninger, I. E. Sigel, W. Damon, & R. M. Lerner (Eds.), *Handbook of child psychology: child psychology in practice* (6 ed., Vol. 4, pp. 103-152). Hoboken: John Wiley & Sons.
- 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. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.12238>
- Dimitrova, T. L., & Weis, A. (2008). The wave-particle duality of light: a demonstration experiment. *American Journal of Physics*, 76(2), 137-142. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.2815364>
- Dimitrova, T. L., & Weis, A. (2010). Single photon quantum erasing: a demonstration experiment. *European Journal of Physics*, 31(3), 625-637. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/31/3/020>
- Dodd, J. N. (1983). The Compton effect-a classical treatment. *European Journal of Physics*, 4(4), 205-211. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/4/4/003>
- Duncan, R., & Tarulli, D. (2009). On the persistence of private speech: empirical and theoretical considerations. In A. Winsler, C. Fernyhough, & I. Montero (Eds.), *Private speech, executive functioning, and the development of verbal self-regulation* (pp. 176-187). Cambridge: Cambridge University Press.
- Duncan, R. M., & Cheyne, J. A. (2002). Private speech in young adults. Task difficulty, self-regulation, and psychological predication. *Cognitive Development*, 16(4), 889-906. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0885-2014\(01\)00069-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0885-2014(01)00069-7)
- Eddi, A., Fort, E., Moisy, F., & Couder, Y. (2009). Unpredictable tunneling of a classical wave-particle association. *Physical Review Letters*, 102(24), 240401.1-240401.4. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.240401>
- Eibenberger, S., Gerlich, S., Arndt, M., Mayor, M., & Tuxen, J. (2013). Matter-wave interference of particles selected from a molecular library with masses exceeding

- 10 000 amu. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(35), 14696-14700. doi: <http://dx.doi.org/10.1039/C3CP51500A>
- Fanaro, M. A., Arlego, M. J. F., & Otero, M. R. (2007). El método de caminos múltiples de Feynman como referência para introducir los conceptos fundamentales de la Mecánica Cuántica em la Escuela Secundária. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 24(2), 233-260. Disponível em <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/1090>
- Fanaro, M. A., Otero, M. R., & Arlego, M. J. F. (2009). Teaching the foundations of quantum mechanics in secondary school: A proposed conceptual structure. *Investigações em Ensino de Ciências*, 14(1), 37-64. doi: http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID205/v14_n1_a2009.pdf
- Fernyhough, C. (1996). The dialogic mind: a dialogic approach to the higher mental functions. *New Ideas in Psychology*, 14(1), 47-62. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0732-118X\(95\)00024-B](http://dx.doi.org/10.1016/0732-118X(95)00024-B)
- Frauenglass, M. H., & Diaz, R. M. (1985). Self-regulatory functions of children's private speech: a critical analysis of recent challenges to Vygotsky's theory. *Developmental Psychology*, 21(2), 357-364. doi: <http://dx.doi.org/10.1037/0012-1649.21.2.357>
- Galvez, E. J., Holbrow, C. H., Pysher, M. J., Martin, J. W., Courtemanche, N., Heilig, L., & Spencer, J. (2005). Interference with correlated photons: five quantum mechanics experiments for undergraduates. *American Journal of Physics*, 73(2), 127-140. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.1796811>
- Gee, J. P., & Green, J. L. (1998). Discourse analysis, learning, and social practice: a methodological study. *Review of Research in Education*, 23(1), 119-169. doi: <http://dx.doi.org/10.3102/0091732x023001119>
- Gianino, C. (2008). Energy levels and the de Broglie relationship for high school students. *Physics Education*, 43(4), 429-432. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/43/4/013>
- Gordon, M., & Gordon, G. (2010). Quantum computer games: quantum minesweeper. *Physics Education*, 45(4), 372-377. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/45/4/008>
- Gordon, M., & Gordon, G. (2012). Quantum computer games: Schrödinger cat and hounds. *Physics Education*, 47(3), 346-354. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/47/3/346>
- Grangier, P., Roger, G., & Aspect, A. (1986). Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interferences. *Europhysics Letters*, 1(4), 173-179. doi: <http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/1/4/004>
- Hadzidaki, P. (2008). 'Quantum mechanics' and 'scientific explanation': an explanatory strategy aiming at providing 'understanding'. *Science & Education*, 17(1), 49-73. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11191-006-9052-8>
- Hamilton, M. W. (2000). Phase shifts in multilayer dielectric beam splitters. *American Journal of Physics*, 68(2), 186-191. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.19393>

- Harris, D. M., Moukhtar, J., Fort, E., Couder, Y., & Bush, J. W. M. (2013). Wavelike statistics from pilot-wave dynamics in a circular corral. *Physical Review E*, 88(1), 011001.1-011001.5. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.88.011001>
- Henriksen, E. K., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C. W., Frågåt, T., & Bøe, Maria V. (2014). Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: challenges, opportunities and proposed approaches. *Physics Education*, 49(6), 678-684. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/49/6/678>
- Hicks, D. (2008). Contextual inquiries: a discourse-oriented study of classroom learning. In D. Hicks (Ed.), *Discourse, learning, and schooling* (pp. 104-141). New York: Cambridge University Press.
- Hoekzema, D., van den Berg, E., Schooten, G., & van Dijk, L. (2007). The particle/wave-in-a-box model in Dutch secondary schools. *Physics Education*, 42(4), 391-398. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/42/4/009>
- Hogan, D. M., & Tudge, J. R. H. (1999). Implications of Vygotsky's theory for peer learning. In A. M. O'Donnell & A. King (Eds.), *Cognitive perspectives on peer learning* (pp. 39-66). Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Holbrow, C. H., Galvez, E., & Parks, M. E. (2002). Photon quantum mechanics and beam splitters. *American Journal of Physics*, 70(3), 260-265. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.1432972>
- Holquist, M., & Emerson, C. (1981) In Editor, *the dialogic imagination: four essays* (pp. 423-434). Austin: University of Texas Press.
- Hornberger, K., Gerlich, S., Haslinger, P., Nimmrichter, S., & Arndt, M. (2012). Colloquium: quantum interference of clusters and molecules. *Reviews of Modern Physics*, 84(1), 157-173. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.84.157>
- Johansson, K. E., & Milstead, D. (2008). Uncertainty in the classroom—teaching quantum physics. *Physics Education*, 43(2), 173-179. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/43/2/006>
- Kapon, S., Ganiel, U., & Eylon, B. (2009). Scientific argumentation in public physics lectures: bringing contemporary physics into high-school teaching. *Physics Education*, 44(1), 33-38. doi: 10.1088/0031-9120/44/1/004
- Kiouranis, N. M. M., Sousa, A. R., & Filho, O. S. (2010). Alguns aspectos da transposição de uma sequência didática sobre o comportamento de partículas e ondas. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 9(1), 199-224. Disponível em http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen9/ART12_VOL9_N1.pdf
- Knijnik, G. (2002). Curriculum, culture and ethnomathematics: The practices of 'cubagem of wood' in the Brazilian Landless Movement. *Journal of Intercultural Studies*, 23(2), 149-165. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/07256860220151050>
- Knijnik, G. (2007). Brazilian peasant mathematics, school mathematics and adult education. *Adults Learning Mathematics*, 2(2), 54-62. Disponível em http://www.alm-online.net/images/ALM/journals/almij-volume2_2_sept2007.pdf

- Knijnik, G., Wanderer, F., & de Oliveira, C. J. (2005). Cultural differences, oral mathematics and calculators in a teacher training course of the Brazilian Landless Movement. *ZDM (Zentralblatt für Didaktik der Mathematik)*, 37(2), 101-108. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02655719>
- Kohnle, A., Bozhinova, I., Browne, D., Everitt, M., Fomins, A., Kok, P., Kulaitis, G., Prokopas, M., Raine, D., & Swinbank, E. (2014). A new introductory quantum mechanics curriculum. *European Journal of Physics*, 35(1), 015001. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/35/1/015001>
- Kohnle, A., Cassettari, D., Edwards, T. J., Ferguson, C., Gillies, A. D., Hooley, C. A., Korolkova, N., Llama, J., & Sinclair, B. D. (2012). A new multimedia resource for teaching quantum mechanics concepts. *American Journal of Physics*, 80(2), 148-153. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.3657800>
- Kohnle, A., Douglass, M., Edwards, T. J., Gillies, A. D., Hooley, C. A., & Sinclair, B. D. (2010). Developing and evaluating animations for teaching quantum mechanics concepts. *European Journal of Physics*, 31(6), 1441-1455. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/31/6/010>
- Kortemeyer, G., & Westfall, C. (2009). History of physics: outing the hidden curriculum? *American Journal of Physics*, 77(10), 875-881. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.3168974>
- Koschmann, T. (1999). *Toward a dialogic theory of learning: Bakhtin's contribution to understanding learning in settings of collaboration*. Paper presented at the Proceedings of the 1999 Conference on Computer Support for Collaborative Learning, Palo Alto.
- Kozulin, A. (2008). A literary model for psychology. In D. Hicks (Ed.), *Discourse, Learning, and Schooling* (pp. 145-164). New York: Cambridge University Press.
- Kwiat, P. G. (2009). One- and two-photon interference. In D. Greenberger, K. Hentschel, & F. Weinert (Eds.), *Compendium of Quantum Physics* (pp. 428-434). Heidelberg: Springer.
- Lamb Jr., W. E., & Scully, M. O. (1969) In Editor, *Polarisation, Matière et Rayonnement: Volume Jubilaire en l'Honneur d'Alfred Kastler* (pp. 363-369). Paris: Presses Universitaires de France.
- Lantolf, J. P. (2003). Intrapersonal communication and internalization in the second language classroom. In A. Kozulin, B. Gindis, V. S. Ageyev, & S. M. Miller (Eds.), *Vygotsky's educational theory in cultural context* (pp. 349-370). New York: Cambridge University Press.
- Lekoko, R. N., & Garegae, K. G. (2006). Intuitive mathematical Knowledge as an essential aspect of contemporary adult learning: a case of women street vendors in the city of Gaborone. *Literacy and Numeracy Studies*, 15(1), 61-77. doi: <http://dx.doi.org/10.5130/lms.v15i1.2027>
- Lemke, J. L. (1982). Talking physics. *Physics Education*, 17(6), 263. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/17/6/310>
- Lemke, J. L. (1990). *Talking Science: Language, Learning, and Values*. Norwood: Ablex Pub. Corp.

- Lemke, J. L. (1992). Intertextuality and educational research. *Linguistics and Education*, 4(3-4), 257-267. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0898-5898\(92\)90003-F](http://dx.doi.org/10.1016/0898-5898(92)90003-F)
- Lemke, J. L. (2005). Multiplying meaning: visual and verbal semiotics in scientific text. In J. R. Martin & R. Veel (Eds.), *Reading Science: Critical and Functional Perspectives on Discourses of Science* (pp. 87-113). London: Routledge.
- Malgieri, M., Onorato, P., & De Ambrosis, A. (2014). Teaching quantum physics by the sum over paths approach and GeoGebra simulations. *European Journal of Physics*, 35(5), 055024. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/35/5/055024>
- Mandel, L. (1976). The case for and against semiclassical radiation theory. In E. Wolf (Ed.), *Progress in Optics* (Vol. 13). Amsterdam: North-Holland.
- Matteucci, G., Ferrari, L., & Migliori, A. (2010). The Heisenberg uncertainty principle demonstrated with an electron diffraction experiment. *European Journal of Physics*, 31(5), 1287-1293. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/31/5/027>
- McKagan, S. B., Handley, W., Perkins, K. K., & Wieman, C. E. (2009). A research-based curriculum for teaching the photoelectric effect. *American Journal of Physics*, 77(1), 875-881. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.3168974>
- McKagan, S. B., Perkins, K. K., Dubson, M., Malley, C., Reid, S., LeMaster, R., & Wieman, C. E. (2008). Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 76(4&5), 406-417. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.2885199>
- Medeiros, M. d. A., & Lobato, A. C. (2010). Contextualizando a abordagem de radiações no ensino de química. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, 12(3), 65-84. Disponível em <http://www.portal.fae.ufmg.br/seer/index.php/ensaio/article/viewFile/523/516>
- Montenegro, R. L., & Pessoa Jr., O. (2002). Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7(2), 107-126. Disponível em http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID84/v7_n2_a2002.pdf
- Moreira, M. A., Hilger, T. R., & Präss, A. R. (2009). Representaciones sociales de la física y de la mecánica cuántica. *Revista de Enseñanza de la Física*, 22(1), 15-30. Disponível em <http://www.revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/8018/8873>
- Mortimer, E. F., Chagas, A. N., & Alvarenga, V. T. (1998). Linguagem científica versus linguagem comum nas respostas escritas de vestibulandos. *Investigações em Ensino de Ciências*, 3(1), 7-19. Disponível em http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID36/v3_n1_a1998.pdf
- Müller, R., & Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics*, 70(3), 200-209. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.1435346>
- Nashon, S., Nielsen, W., & Petrina, S. (2008). Whatever happened to STS? Pre-service physics teachers and the history of quantum mechanics. *Science & Education*, 17(4), 387-401. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11191-007-9085-7>

- O'Halloran, K. L. (1998). Classroom discourse in mathematics: a multisemiotic analysis. *Linguistics and Education*, 10(3), 359-388. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0898-5898\(99\)00013-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0898-5898(99)00013-3)
- O'Halloran, K. L. (2005). *Mathematical Discourse Language, Symbolism and Visual Images*. London: Continuum.
- Oon, P. T., & Subramaniam, R. (2009). The nature of light: I. A historical survey up to the pre-Planck era and implications for teaching. *Physics Education*, 44(4), 384-391. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/44/4/007>
- Ostermann, F., Cavalcanti, C. J. H., Prado, S. D., & Ricci, T. F. (2009). Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 8(3), 1094-1116. Disponível em http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen8/ART18_Vol8_N3.pdf
- Ostermann, F., & Moreira, M. A. (2000). Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa Física Moderna e Contemporânea no ensino médio. *Investigações em Ensino de Ciências (Online)*, 5(1), 23-48. Disponível em http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID57/v5_n1_a2000.pdf
- Ostermann, F., Prado, S. D., & Ricci, T. F. (2006). Desenvolvimento de um software para o ensino de fundamentos de Física Quântica. *Física na Escola*, 7(1), 22-25. Disponível em <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol7/Num1/v12a07.pdf>
- Ostermann, F., Prado, S. D., & Ricci, T. F. (2008). Investigando a aprendizagem de professores de física acerca do fenômeno da interferência quântica. *Ciência & Educação*, 14(1), 35-54. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-73132008000100003>
- Otero, M. R., Fanaro, M. Á., & Arlego, M. J. F. (2009). Investigación y desarrollo de propuestas didácticas para la enseñanza de la Física en la Escuela Secundaria: nociones Cuánticas. *Revista Electrónica de Investigación em Educación en Ciencias*, 4(1), 58-74. Disponível em http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-66662009000200006&script=sci_arttext
- Palop, J. I. F. (2009). A versatile applet to explore the wave behaviour of particles. *European Journal of Physics*, 30(4), 771-776. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/30/4/010>
- Paraskevopoulou, E., & Koliopoulos, D. (2011). Teaching the nature of science through the Millikan-Ehrenhaft dispute. *Science & Education*, 20(10), 943-960. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11191-010-9308-1>
- Park, E. J., & Light, G. (2009). Identifying Atomic Structure as a Threshold Concept: Student mental models and troublesomeness. *International Journal of Science Education*, 31(2), 233-258. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/09500690701675880>
- Paulo, I. J. C., & Moreira, M. A. (2011). O problema da linguagem e o ensino da mecânica quântica no nível médio. *Ciência & Educação*, 17(2), 421-434. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-73132011000200011>
- Pearson, B. J., & Jackson, D. P. (2010). A hands-on introduction to single photons and quantum mechanics for undergraduates. *American Journal of Physics*, 78(5), 471-484. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.3354986>

- Pereira, A. P., Cavalcanti, C. J. H., & Ostermann, F. (2009a). Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de Física. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 8(1), 72-92.
- Pereira, A. P., & Ostermann, F. (2009). Sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. *Investigações em Ensino de Ciências (Online)*, 14, 393-420. Disponível em http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID224/v14_n3_a2009.pdf
- Pereira, A. P., & Ostermann, F. (2012). A aproximação sociocultural à mente, de James V. Wertsch, e implicações para a educação em ciências. *Ciência & Educação*, 18, 23-39. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-73132012000100002>
- Pereira, A. P., Ostermann, F., & Cavalcanti, C. J. H. (2009b). On the use of a virtual Mach-Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. *Physics Education*, 44(3), 11. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/44/3/008>
- Pereira, A. P., Ostermann, F., & Cavalcanti, C. J. H. (2011). A ocorrência de ‘fala privada’ entre adultos: uma estratégia analítica para o estudo das funções intrapsicológicas no ensino de ciências. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, 13(1), 105-120. Disponível em <http://www.portal.fae.ufmg.br/seer/index.php/ensaio/article/view/281/588>
- Pereira, A. P., Ostermann, F., & Cavalcanti, C. J. H. (2012a). Um exemplo de “distribuição social da mente” em uma aula de física quântica. *Ciência & Educação*, 18(2), 257-270. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-73132012000200002>
- Pereira, A. P., Pessoa Jr., O., Cavalcanti, C. J. H., & Ostermann, F. (2012b). Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 29(Especial). doi: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29nesp2p831>
- Pereira, A. P., Pessoa Jr., O., Cavalcanti, C. J. H., & Ostermann, F. (2012c). Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 29(Especial), 831-863. doi: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29nesp2p831>
- Perrard, S., Labousse, M., Miskin, M., Fort, E., & Couder, Y. (2014). Self-organization into quantized eigenstates of a classical wave-driven particle. *Nature Communications*, 5, 3219.1-3219.8. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms4219>
- Pessoa Jr., O. (1997). Interferometria, Interpretação e Intuição: uma Introdução Conceitual à Física Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 19(1), 27-48.
- Pessoa Jr., O. (2003). *Conceitos de física quântica* (Vol. 1). São Paulo: Livraria da Física.
- Pfleegor, R. L., & Mandel, L. (1967). Interference effects at the single photon level. *Physics Letters A*, 24(13), 766-767. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0375-9601\(67\)90259-9](http://dx.doi.org/10.1016/0375-9601(67)90259-9)
- Piaget, J. (2012). *The language and thought of the child*. Mansfield: Martino Publishing.
- Pollack, G. L., & Stump, D. R. (2005). *Electromagnetism*. San Francisco: Higher Education Press.

- Ricci, T. F., Ostermann, F., & Prado, S. D. (2007). O tratamento clássico do interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29(1), 79-88. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172007000100014>
- Romero-Isart, O., Pflanzner, A. C., Blaser, F., Kaltenbaek, R., Kiesel, N., Aspelmeyer, M., & Cirac, J. I. (2011). Large quantum superpositions and interference of massive nanometer-sized objects. *Physical Review Letters*, 107(2), 020405.1-020405.4. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.020405>
- Rueckner, W., & Peidle, J. (2013). Young's double-slit experiment with single photons and quantum eraser. *American Journal of Physics*, 81(12), 951-958. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.4819882>
- Sales, G. L., Vasconcelos, F. H. L., Castro Filho, J. A., & Pequeno, M. C. (2008). Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(3), 3501.1-3501.13. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172008000300017&nrm=iso
- Sawyer, R. K., & Berson, S. (2004). Study group discourse: how external representations affect collaborative conversation. *Linguistics and Education*, 15(4), 387-412. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.linged.2005.03.002>
- Silva, A. C., & Almeida, M. J. P. M. (2011). Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 28(3). doi: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2011v28n3p624>
- Silva, L. F., & Assis, A. (2012). Física moderna no ensino médio: um experimento para abordar o efeito fotoelétrico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 29(2), 313-324. doi: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29n2p313>
- Silva Neto, J., Ostermann, F., & Prado, S. D. (2011). O tema da dualidade onda-partícula na educação profissional em radiologia médica a partir da simulação do interferômetro de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33(1), 1-10. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172011000100012>
- Silveira, F. L., & Peduzzi, L. O. Q. (2006). Três episódios de descoberta científica: da caricatura empirista a uma outra história. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 23(1), 27-55. Disponível em <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6289/5822>
- Singh, C. (2008a). Interactive learning tutorials on quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 76(4&5), 400-405. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.2837812>
- Singh, C. (2008b). Student understanding of quantum mechanics at the beginning of graduate instruction. *American Journal of Physics*, 76(3), 277-287. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.2825387>
- Solbes, J., & Sinarcas, V. (2010). Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias. *Revista de Enseñanza de la Física*, 23(1 y 2), 57-84. Disponível em <http://www.fceia.unr.edu.ar/fceia/ojs/index.php/revista/article/view/48/13>
- Souza, P. F. L., Bastos, H. F. B. N., Costa, E. B. d., & Nogueira, R. d. A. (2010). Pensamento transdisciplinar: uma abordagem para compreensão do princípio da

- dualidade da luz. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 32(2), 1-10. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172010000200011>
- Starkey, P., & Klein, A. (2008). Sociocultural influences on young children's mathematical knowledge. In O. N. Saracho & B. Spodek (Eds.), *Contemporary perspectives on mathematics in early childhood education* (pp. 253-276). Charlotte: IAP/Information Age Pub.
- Stetsenko, A., & Arievitch, I. (2002). Teaching, learning, and development: a post-vygotskian perspective *Learning for life in the 21st century* (pp. 84-96). Oxford: Blackwell Publishing.
- Strnad, J. (1986). The Compton effect-Schrodinger's treatment. *European Journal of Physics*, 7(4), 217-221. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/7/4/001>
- Voloshinov, V. N. (1981) In Editor, *Mikhail Bakhtine: le principe dialogique* (pp. 287-316). Paris: Seuil.
- Vygotsky, L. S. (1960). *Razvitie rysshikh psikhicheskikh funktsii [O desenvolvimento das funções mentais superiores]*. Moscou: Izdatel'stvo Akademii Pedagogicheskikh Nauk.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: the development of higher psychological processes* (M. Cole, V. John-Steiner, S. Scribner, & E. Souberman Eds. 2 ed.). London: Harvard University Press.
- Vygotsky, L. S. (1979). Consciousness as a problem in the psychology of behavior. *Soviet Psychology*, 17(4), 3-35. doi: <http://dx.doi.org/10.2753/RPO1061-040517043>
- Vygotsky, L. S. (2012). *Thought and language* (E. Hanfmann, G. Vakar, & A. Kozulin, Trans.). Cambridge: MIT Press.
- Wertsch, J. V. (1984). The Zone of Proximal Development: some conceptual issues. In B. Rogoff & J. V. Wertsch (Eds.), *Children's learning in the "Zone of Proximal Development"* (pp. 7-18). San Francisco: Jossey-Bass.
- Wertsch, J. V. (1985). *Vygotsky and the social formation of mind*. Cambridge: Harvard University Press.
- Wertsch, J. V. (1993). *Voices of the mind: a sociocultural approach to mediated action*. Cambridge: Harvard University Press.
- Wertsch, J. V. (1998). *Mind as Action*. New York: Oxford University Press.
- Wertsch, J. V. (2004). *Voices of collective remembering*. New York: Cambridge University Press.
- Wertsch, J. V. (2007). Mediation. In H. Daniels, M. Cole, & J. V. Wertsch (Eds.), *The Cambridge companion to Vygotsky* (pp. 178-192). New York: Cambridge University Press.
- Wertsch, J. V., & Kazak, S. (2005). Intersubjectivity through the mastery of semiotic means in teacher-student discourse. *Annual Report - Hokkaido University Research and Clinical Center for Child Development*, v. único(27), 1-12. Disponível em <http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/25364>

- Wickman, P.-O., & Östman, L. (2002). Learning as discourse change: A sociocultural mechanism. *Science Education*, 86(5), 601-623. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/sce.10036>
- Wuttiprom, S., Sharma, M. D., Johnston, I. D., Chitaree, R., & Soankwan, C. (2009). Development and use of a conceptual survey in introductory quantum physics. *International Journal of Science Education*, 31(5), 631-654. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/09500690701747226>
- Zeilinger, A. (1981). General properties of lossless beam splitters in interferometry. *American Journal of Physics*, 49(9), 882-883. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.12387>
- Zhu, G., & Singh, C. (2012). Surveying students' understanding of quantum mechanics in one spatial dimension. *American Journal of Physics*, 80(3), 252-259. doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.3677653>

APÊNDICES

APÊNDICE I: TABELAS COM OS TEMAS DE CADA ARTIGO DE CADA REVISTA ANALISADA NA REVISÃO DA LITERATURA

American Journal of Physics

Ano	T.R	Número	Física Genérico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	12	1			2,12	2			5,9	2	6,7,8,10	4			11	1			1,3,4	3
	14	2					5,,10,13	3	2,7,12	3			3,4,6,8	4			1	1	9,11,14	3
	13	3					1,7	2	5	1	8,,10	2			11,12	2	9,13	2	2,3,4,6	4
	13	4	13	1			5,11	2	1	1	2	1	6	1	10	1	4,7,9	3	3,8,12	3
	10	5					8	1	6	1	2,4,5,7,10	5			1	1	9	1	3	1
	15	6	12,14	2			3,5,6,8,9,10,15	7	1,2,7	3					4,13	2	11	1		
	14	7	8,12	2			4,13	2	5	1	1,14	2	3	1	9*,10,11	3	6,7	2	2	1
	16	8	5,12	2			10,11	2	14,15,16	3	1,3	2			6,8,9	3	7,13	2	2,4	2
	10	9	9	1			6,,10	2	5	1					1	1	2,3,4	3	7,8	2
	13	10	2	1			1	1	7,8,9,10,11,12	6					13	1			3,4,5,6	4
	10	11	10	1	1	1	3	1	4,5	2	8,9	2			7	1	2	1	6	1
	14	12					2,3,5	3	4,8	2	6,7	2			12	1	1,9,10,11	4	12,13	2
154	Total		10		3		26		26		20		6		17		20		26	

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total 2	Artigos3	Total 3	Artigos 4	Total 4	Artigos5	Total 5	Artigos 6	Total 6	Artigos7	Total 7	Artigos 8	Total 8	Artigos9	Total 9
2008	13	1	13	1			5,8,9	3	3,4	2	2	1			1,6,10*,11*	4	12	1	7	1
	12	2	11,13	2			3,4,5,12	4	1	1	2	1			6,7,8,9,10	4				
	12	3	9	1			3,4,10	3			2	1	1,11	2	8,12	2			5,6,7	3
	29	4	1,2,3,5,7,8,11,12,14,17,20,22,26	13	25	1	21,23,24	3	9,18	2	4,6,19,27,29	5			13,15,16,28*	4	10	1		
	0	5	Não houve																	
	12	6	7,8	2			10	1	6,9	2	5	1	2	1	1,11*,12	3			3,4	2
	13	7	12,13	2			2,4	2	1,5,6,7	4	8	1			9	1	10,11	2	3	1
	12	8							11	1	3,4,12	3	2	1	1,7*,10*	3			5,6,8,9	4
	15	9	14	1			2,13	2	9	1	6,11,15	3			1,7	2			3,4,5,8,10,12	6
	11	10	1	1			6,7,11	3			2	1			8,9*	2			3,4,5,10	4
	15	11	14,15	2			2,4,13	3	8,9	2	6,,10,11	3			5,7	2	12	1	1,3	2
	13	12	13	1			10	1			1,2,6,11	4			3*,4*,5*,7*	4			8,9,12	3
157	Total		26		1		25		15		24		4		31		5		26	

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2009	14	1	7	1			1,11,13	3	4,8	2	6,9,12	3			14	1	10	1	2,3,5	3
	14	2			9,12	2	3,4,7,8,14	5					13	1	5,6*	2			1,2,10,11	4
	14	3	14	1			11,12	2	8	1	5,13	2			9*,10*	2			1,2,3,4,6,7	6
	10	4					7	1	10	1	8	1	1,3	2	2,6*,9	3			4,5	2
	14	5			10	1	2,6	2	12,13	2	3,5,14	3					1,4,7,8,9,11	6		
	11	6					4	1			1,5,6	3	2	1	3*,7*,8*,9*	4	10	1	11	1
	11	7	1,6,8,9	4			5	1	3	1	4	1	10	1	11	1			2,7	2
	13	8					11	1	8	1	13	1	3	1	2*,4*,9*,10*,12*	5			1,5,6,7	4
	11	9	1	1			6,7,9	3			2,3,11	3					5	1	4,8,10	3
	8	10	7	1					8	1	6	1	3	1	1	1	4,5	2	2	1
	14	11	1	1			14	1			4,6,7,8	4			2,10*,,	2	3,13	2	5,9,11,12	4
	14	12	4,5	2			3,7,13	3	2,14	2	10	1	6	1	9*	1			1,8,11,12	4
	148	Total		11		3		23		11		23		8		22		13		34

Ano	T.R	Número	Física Genérico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos 2	Total 2	Artigos3	Total 3	Artigos4	Total 4	Artigos5	Total 5	Artigos 6	Total 6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total 8	Artigos9	Total 9
2010	16	1	4,7,9	3			5,14	2	1,3,13,15	4	6	1			10*,12*,16	3	2	1	8,11	2
	13	2	13	1			6,7,10	3			2	1	12	1	4*,8*	2	11	1	1,3,5,9	4
	13	3					1,8,9,11	4	13	1	2,4,12	3					10	1	3,5,6,7	4
	14	4	1	1			6,7	2	2,3,13	3	5	1			8*,9*,10*,12*	4	4	1	11,14	2
	15	5	1	1			6,8,14	3	13,15	2	2,7,11,12	4			4,10,	2			3,5,9	3
	17	6			4	1	6,8,13,17	4	7,11	2	5,12,15	3			14*	1	16	1	1,2,3,9,10	5
	17	7	13,16	2	5	1	6,14,17	3			7,8,9,10,11,12	6			1*,4*,15	3			2,3	2
	14	8					12,14	2	4,5,6	3	7	1	8	1	1,2*,3*,9*,10*,11*	6	13	1		
	12	9	1	1			8,9	2	5	1	3,12	2			7,10*,11*	3			2,4,6	3
	11	10	10	1			4,9	2	3	1	2,11	2	8	1	5,6*,7*	3	1	1		
	18	11	7,18	2			2,11,13,16,17	5	9,10,	2			4	1	1*,5*,15*	3			3,6,8,12,14,	5
	28	12	5	1			8,9,13,15,21,24	6	6,7,11,12,14	5	1,10,,25,26,27,28	6			16*,17*,18*,19*,20,23*	6	22	1	2,3,4	3
188	Total		13		2		38		24		30		4		36		8		33	

Ano	T.R	Número	Física Genérico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2011	17	1	17	1			13,14	2	2,9,10,	3	4,5	2	7,8,16	3	1*,3*,12*,15*	4	6	1	11	1
	12	2					3,6,10,11,12	5	8	1	9	1			2*,4*,5*,7,	4	1	1		
	12	3					6,9	2	4	1	7,12	2			3,5*,8*,10*,	4			1,2,11	3
	14	4	4,6	2			3,11,12,14	4	1	1	5,7	2			9*	1			2,8,10,13	4
	15	5					4,11	2			14,15	2			2*,3*,7*,8,12*,13*	6	1	1	5,6,9,10	4
	15	6					11	1	10	1	1,2,9,15	4			5,6*,7,8*,14*	5	4,13	2	3,12	2
	14	7					13	1	14	1	2,4,6	3			1*,7*,9*,10*,11*,12*	6			3,5,8	3
	13	8	1,3	2			4,7,8,10,11,12	6	2,5	2	6	1			9*,13*	2				
	11	9	2,5,11	3			3	1	8	1	4,7	2			6*,9,10	3			1	1
	14	10	11	1			6,7,8	3	1,3	2	2,4,13	3			12*,	1	10*	1	5,9,14	3
	14	11	6	1	5	1	4,10, 11,14	4	1,3,7,12	4	2	1	8,9	2	13*	1				
	10	12					5,6	2			1,2,8,9	4	7	1	3*,4*,10*	3				
161	Total		10		1		33		17		27		6		40		6		21	

Ano	T. R	Número	Física Genérico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos 2	Total 2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total 7	Artigos 8	Total 8	Artigos 9	Total 9
2012	13	1	13	1			1,4,5,6,11	5	3,8	2	2,7	2	10	1			9*	1	12	1
	9	2					2,8	2			7	1			1*,5*,6,9*	4	4*	1	3	1
	11	3	1	1			6,7	2	11	1			3	1	8*,9*,10	3	2	1	4,5	2
	13	4	1,5	2			7,8	2	2,4,6	3	3,11,12,13	4							9,10,	2
	13	5											1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	13						
	9	6	1	1	5	1	9	1	4	1	2,3	2	8	1	6*,7	2				
	11	7					6,11	2	9	1	2,3,4,5,10	5			1*,7*	2			8	1
	15	8			8	1			9	1	1,11,12	3	3	1	2*,10*,14*,16*	4	15	1	4,5,6,7	4
	12	9	11	1			4,5,6,7,12	5	2	1	3,10,	2	1	1	8*	1			9	1
	10	10	9	1			1,10,	2			3	1	7	1	6*	1	5,8	2	2,4	2
	13	11	9,12	2			1,6,7	3			8	1	5	1	10*,11*	2	3	1	2,4,13	3
8	12	8,9	2			6	1	1	1	5	1					3,4	2	7	1	
137	Total		11		2		25		11		22		20		19		9		18	

*Artigos a que se teve acesso apenas ao resumo.

T.R. – Total de artigos na revista

Caderno Brasileiro de Ensino de Física

Ano	T.R	Número	Física Genérico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	8	1			1,7	2	4	1			3,8	2	5,6	2	2	1				
	6	2	3,6	2			4	1	1	1	2	1			5	1				
	6	3					1	1			2	1	4	1			6	1	3,5	2
2008	9	1					1,6,7,8,9	5			2,3	2	5	1			4	1		
	8	2	4,6	2	7,8	2	3	1	1	1	5	1							2	1
	10	3	3,4,6,10	4	5,7	2	2	1	1	1	8,9	2								
2009	11	1	3,5,7,8,9	5	4,6	2			2,11	2	1	1	10	1						
	10	2					1,5	2	8	1	2,3,6	3					7,10	2	4,9	2
	10	3	5,10	2			3,8	2			1,2,4	3	6,7,9	3						
2010	7	1	5	1							7	1	1	1	3,6	2			2,4	2
	9	2	2,4,6	3			5,7	2			1,3,8	3							9	1
	10	3	5	1			6	1	2	1	4,8	2	1,10	2	3	1	7	1	9	1
	7	Especial 1											1,2,3,4,5,6,7	7						
	9	1	8,9	2	2	1	1,6	2							4	1	7	1	3,5	2
2011	11	2	1,3,4,11	4	6	1	10	1	7,8	2	9	1	5	1					2	1
	10	3	1,7	2			3,6	2			2,8,9	3			5	1	4	2		
2012	10	1	2	1	1	1	5,7	2					4,6,10	3			3	1	8,9	2
	11	2	3,10	2			2,6,11	3			4,5	2	8,9	2	7	1	1	1		
	10	3	3,4	2			1,7	2	2	1	5,9	2	6	1	10	1			8	1
	11	Especial 1	2,3,4,11	4			6,9,10	3			1,5,7,8	4								
	11	Especial 2	1,2,3,4,5,8,10	7					6	1	11	1			7,9	2				
	194	Total		44		11		32		11		35		25		11		10		15

Ciência e Educação

Ano	T.R	Numero	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Quântica		Física Moderna		Ótica	
			Artigos	Total	Artigos2	Total 2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total 5	Artigos 6	Total 6	Total 7	Total7 2	Artigos 8	Total 8	Artigos 9	Total 9
2007	8	1			1,2,3,4,5,6	6	8	1											7	1
	8	2			1,2,3,4,5,6,7	7					8	1								
	12	3	1	1	3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	10					2	1								
2008	11	1	1, 2	2	5,6,7,8,9,10,11,12	8					4	1			3	1				
	12	2			1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	12														
	15	3	1, 12	2	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,13,14,15	13														
2009	12	1	3	1	1,5,6,7,8,9,10,11,12	9			4	1	2	1								
	12	2	4	1	1,2,3,7,8,9,10,11,12	9											5	1	6	1
	15	3	5	1	2,3,4,8,9,10,11,12,13,14,15	11					1, 6	2			7	1				
2010	14	1	1	1	2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	12					15	1			3	1				
	15	2	3	1	1,2,4,6,7,8,9,10,11,12,13,15	12					5	1					14	1		
	14	3	1, 15	2	3,4,5,6,7,9,10,11,12,13,14	11					2	1			8	1				
2011	15	1	2	1	1,3,4,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15	13							5	1						
	14	2			1,2,3,4,5,6,7,8,9,12,13,14,15	13			10	1					11	1				
	15	3			1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,15	14							14	1						
2012	15	1	6	1	1,2,3,4,5,8,9,10,11,12,13,14,15	13	7	1												
	14	2	8	1	2,3,4,5,6,7,9,10,11,12,13,14,15	13								1	1					
	15	3	6	1	2,3,4,5,7,8,9,10,11,12,13,14,15	13					1	1								
	15	4	6, 7	2	1,2,3,4,5,8,9,10,11,12,13,14	12					15	1								
251	Total		18		211		2		2		11		2		6		2		2	

Cultural Studies of Science Education

Ano	T.R	Numero	Física Generico		Outros		Mecânica		Física Moderna	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos5	Total5	Artigos8	Total8
2007	6	1			1,2,3,4,5,6	6				
	6	2			1,2,3,4,5,6	6				
	4	3			1,2,3,4	4				
	6	4			1,2,3,4,5,6	6				
2008	7	1			1,2,3,4,5,6,7	7				
	4	2			1,2,3,4	4				
	5	3			1,2,3,4,5	5				
	5	4			1,2,3,4,5	5				
2009	3	1			1,2,3	3				
	3	2	2	1	1,3	2				
	5	3			1,2,3,4,5	5				
	8	4			1,2,6,7,8	5	3	1	4,5	2
2010	8	1			1,2,3,4,5,6,7,8	8				
	5	2			1,2,3,4,5	5				
	7	3	5	1	1,2,3,4,6,7	6				
	6	4			1,2,3,4,5,6	6				
2011	7	1			1,2,3,4,5,6,7	7				
	5	2			1,2,3,4,5	5				
	7	3			1,2,3,4,5,6,7	7				
	5	4	3	1	1,2,4,5	4				
2012	9	1			1,2,3,4,5,6,7,8,9	9				
	7	2			1,2,3,4,5,6,7	7				
	7	3	3	1	1,2,4,5,6,7	6				
	6	4			1,2,3,4,5,6	6				
	141	Total		4		134		1		2

Ensaio: Pesquisa e Educação em Ciências

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8
2007	9	1	7	1	1,2,3,4,5,6,8	7	9	1								
	10	2			1,2,5,6,7,8,9	7	4	1	3	2						
2008	9	1	5	1	1,2,3,4,6,7,8,9	8										
	9	2	1,3,5	3	4,6,7,8,9	5	2	1								
2009	9	1	5,9	2	1,2,3,4,7,8	6			6	1						
	9	2			1,2,3,4,5,6,7,8,9	9										
2010	9	1			1,2,4,5,6,7,8,9	8			3	1						
	9	2			1,3,5,6,7,8,9	7			2,4	2						
	9	3	4	1	1,2,3,6,7,8,9	7							5	1		
2011	9	1			1,2,3,4,5,6,8,9	8							7	1		
	9	2			1,3,4,5,6,7,8,9	8	2	1								
	9	3	2,7	2	1,3,4,5,6,8,9	7										
2012	9	1			1,2,3,4,6,7,8,9	8					5	1				
	10	2	1,9	2	2,3,4,5,6,7,8,10	8										
	13	3	10, 13	2	1,2,3,4,6,7,8,9,11,12	10			5	1						
	141	Total		14		113		4		7		1		2		0

Enseñanza de Las Ciencias

			Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
Ano	T.R	Número	Artigos	Total	Artigos2	Total 2	Artigos3	Total3	Artigos 4	Total 4	Artigos 5	Total 5	Artigos 6	Total 6	Artigos7	Total7	Artigos 8	Total 8	Artigos 9	Total 9
2007	9	1	7	1	1, 2,3,5,6,8,9	7					4	1								
	11	2	5,6	2	1,3,4,8,9,10	6					2	1			7	1			11	1
	10	3	5	1	1,2,4,7,8,10	6			6	1	3	1							9	1
2008	10	1			1,4,5,6,7,9	6					2	1	6	1	3, 8	2				
	9	2			1,4,5,7,8,9	6	2,3,6	3												
	11	3	10	1	1,2,3,4,6,8, 9,11	8	7	1											5	1
2009	10	1			1,2,3,4,5,6,7,9,10	9							8	1						
	11	2			1,2,3,4,5,6,7,8,10,11	10					9	1								
	11	3	3	1	1,2,4,5,6,7,9,10,11	9													8	1
2010	11	1			1,2,3,4,5,6,7,8,10,11	10													9	1
	11	2			1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	10									11	1				
	11	3			1,2,3,4,5,6,8,9,10,11	10	7	1												
2011	10	1	2	1	1,3,4,5,6,8,10	7	7	1			9	1								
	10	2	2	1	3,4,5,6,7,10	6	9	1					1	1	8	1				
	11	3	1	1	2,3,4,6,7,8,9,11	8	10	1			5	1								
2012	3	1	5, 7	2	1,2,4,6,8,9,10,11						3	1								
	2	2	8	1	1,2,3,4,5,6,7,10,11		9	1												
	15	3			1,2,3,4,5,7,8,9,11,12,13,14,	12			10	1									6,15	2
	176	Total		12		130		9		2		8		3		5		0		7

International Journal of Science Education

Ano	Volume	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas		
				Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9	
2007	29	5	1			1,2,3,4,5	5															
		5	2			1,2,3,4,5	5															
		5	3	3	1	1,4	2	5	1					2	1							
		10	4	6	1	1,2,3,4,5,9,10	7	7,8	2													
		5	5			4,5	2							1,2,	2					3	1	
		5	6			1,2,3,4,5	5															
		5	7			2,3,4,5	4					1	1									
		5	8			1,2,4,5	4	3	1													
		5	9	1	1	3,4,5	3					2	1									
		6	10			1,2,3,4,5,6	6															
		6	11	1	1	2,3,4,5,6	5															
		7	12			1,2,3,4,5,6,7	7															
		4	13			1,2,3,4	4															
		5	14			1,3,5	3								2	1			4	1		
		5	15			1,2,3,4,5	5															
		83	Total		4		67		4		0		2		4		0		1		1	

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2008	5	1	5	1	1,2,3,4	4														
	7	2			1,2,3,4,6,7	6							5	1						
	5	3	5	1	1,2,3,4,	4														
	5	4			1,2,3,4,5	5														
	7	5	3	1	1,2,4,5,6,7	6														
	5	6			1,2,3,4,5	5														
	6	7	2	1	3, 4, 5, 6	4									1	1				
	6	8			1, 2, 3, 4, 5, 6	6														
	6	9	1	1	2, 3, 4, 5, 6	5														
	7	10			1,2,3,4,5,6,7	7														
	5	11			1,2,3,5	4													4	1
	6	12			1,3,5,6	4			2	1									4	1
	6	13	6	1	1,2,3,4,5	5														
	5	14	4	1	1,2,3,5	4														
	4	15			2,3,4	3					1	1								
	85	Total		7		72		0		1		1		1		1		0		2

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2009	6	1	1	1	2,4,6	3					5	1							3	1
	6	2			2,3,5,6	4							1	1	4	1				
	8	3	3	1	1,2,4,6,7,8	6							5	1						
	6	4			1,2,3,4,5,6	6														
	5	5			1,3,4	3			5	1					2	1				
	5	6			1,4,5	3			3	1					2	1				
	5	7			1,4,5	3							2	1	3	1				
	7	8	4	1	1,2,5,7	4	3	1			6	1								
	7	9			1,3,4,6,7	5			2	1	5	1								
	6	10			1,2,3,4,5,6	6														
	6	11	3	1	1,2,6	3	5	1			4	1								
	5	12			2, 4,5	3			3	1			1	1						
	5	13			1, 3, 4,5	4			2	1										
	5	14			3,4,5	3					2	1							1	1
	6	15			1,2,3,6	4							5	1			4	1		
	5	16			1,2,3,5	4	4	1												
	5	17	5	1	2,3,4	3					1	1								
	6	18			1,3,4,5,6	5													2	1
104	Total		5		72		3		5		6		5		4		1		2	3

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2010	5	1			3,4,5	3							1,2	2						
	6	2	5	1	1,2,3,4,6	5														
	6	3			1,2,3,4,5,6	6														
	6	4			1,3,4,5,6	5													2	1
	6	5			1,2,4,5,6	5			3	1										
	6	6			1,2,3,5,6	5	4	1												
	5	7	2,5	2	1,3	2													4	1
	5	8			2,3,4	3			1	1									5	1
	7	9			1,2,4,5,6,7	6			3	1										
	6	10			1,3,4,5,6	5					2	1								
	5	11			2,3,4,5	4					1	1								
	6	12			2,4,5,6	4					3	1	1	1						
	6	13			1,4	2	2,6	2			3	1	5	1						
	6	14			2,3,5,6	4					1	1							4	1
	7	15			1,2,3,4,5,6,7	7														
	6	16			3,4,5,6	4			1	1	2	1								
	6	17			1,2,3,5	4	6	1	4	1										
	7	18			1,2,3,4,5,6,7	7														
107	Total		3		81		4		5		6		4		0		0			4

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2011	8	1			1,2,3,4,5,6,7,8	8														
	5	2			1,2,4,5	4					3	1								
	6	3			1,3,4,6	4							2	1	5	1				
	5	4			1,2,3,4,5	5														
	6	5	3,6	2	1,2,4,5	4														
	6	6			1,3,4,5,6	5	2	1												
	5	7	3	1	1,2,4,5	4														
	6	8	2	1	1,3,4,5,6	5														
	6	9			1,2,3,4,5,6	6														
	6	10			1,2,3,4,5,6	6														
	5	11			1,2,3,4,5	5														
	5	12			2,3,4	3	1	1						5	1					
	5	13			3,4	2			1,5	2	2	1								
	5	14			1,2,4,5	4								3	1					
	5	15			1,2,3,4,5	5														
	5	16			1,2,3,4,5	5														
	5	17			1,2,3,4,5	5														
	5	18			1,2,3,4,5	5														
99	Total		4		85		2		2		2		3		1		0		0	

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2012	6	1			1,2,3,4,5,6	6														
	7	2	7	1	1,2,3,5,6	5			4	1										
	6	3			1,2,3,4,5,6	6														
	6	4			1,2,4,5,6	5							3	1						
	7	5			1,3,4,5,6,7	6			2	1										
	6	6			1,2,3,4,5,6	6														
	7	7			1,2,3,4,5,6,7	7														
	7	8	5	1	1,2,4,7	4			6	1					3	1				
	7	9	6	1	3,4,5	4							1	1					2	1
	8	10			1,2,4,5,6,7,8	7			3	1										
	6	11			1,2,3,4,5,6	6														
	6	12			1,2,3,4,5,6	6														
	6	13			1,2,3,4,5,6	6														
	9	14	3	1	1,2,4,5,6,7,8,9	8														
	6	15			1,2,3,4,5,6	6														
	6	16	2	1	1,3,4,6	4											5	1		
	6	17			1,2,3,4,5,7	6	6													
	5	18			1,2,3,4,5	5														
117	Total		5		103		0		4		0		2		1		1		1	

Investigações em Ensino de Ciências

Ano	T.R	Número	Física Genérico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Física Quântica		Física Moderna		Ótica	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Total7	Total72	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	6	1	1,4	2	3,5,6	3	2	1												
	6	2	5	1	1,2,3,4,6	5														
	6	3	1,2,4	3	3,5,6	3														
2008	6	1	1	1	2,3,4,5	4			6	1										
	6	2	2,3	2	1,4,5,6	4														
	6	3	6	1	1,3,4,5	4					2	1								
2009	4	1	1	1	5,6	2							2	1	3,4	2				
	8	2			1,2,3,4,5,6,7,8	8														
	7	3	7	1	1,2,3,4,6,8	6								5	1					
2010	8	1			3,4,6,7,8	5					1,2	2					5	1		
	8	2			1,2,3,4,5,6,7,8	8														
	8	3	2,5	2	1,4,6,7,8	5	3	1												
2011	8	1			1,2,3,4,5,6,7,8	8														
	8	2	7	1	1,2,3,4,5,6,8	7														
	8	3	2	1	1,3,4,5,7,8	6													6	1
2012	12	1	1,5,8,9	4	2,3,4,6,7,10,11,12	8														
	12	2	3,6,7,10	4	1,2,4,5,8,9,11,12	8														
	9	3			1,2,3,4,5,6,7,8,9	9														
	136	Total		24		103		2		1		3		1		3		1		1

Physics Education

			Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica e Ondas	
Ano	T.R	Numero	Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Total62	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	25	1	4,19,21,25	4	1	1	8,20,22,23,24	5			2,5,9,11,17	5			3,12	2			6,7,10,13,14,15,16,18	8
	18	2	1	1			3,5,7,9,10,17,18	7	16	1	2, 11,12,14,15	5			8	1			4, 6,13	3
	17	3	6,8	2			1,3	2	5,-10,14,15,17	5	9	1	7	1	13	1			2,4,11,12,16	5
	17	4					3	1	2,13,17	3	5,9,10,11,12,16	6	4,7,8	3	15	1			1,6,14	3
	17	5					17	1	1,2,3,7,8,9	6	5,10,11,12,13,14,15,16,18	7	4,6	2					19	1
	18	6	1,5,17	3			3,4,13	3	2,11,15	3	14,16	2			6,18	2			7,8,9,10,12	5
2008	18	1	1,5,15,16	4			2,3,4	3	6	1	9,11,14	3	13	1	8,17	2			7,10,12,18	4
	19	2	1,6,15,16	4			3,4,19	3	14,18	2	5,7,8,9,10,11,12	7			13	1			2,17	2
	19	3	2,8,17	3			7,9,10,18	4			3,5,12,13,14,15,19	7							1,4,6,11,16	5
	19	4	14,16	2			1,13,15	3	4,7,8,9,10	5	2,6,11,12,19	5			3,17,18	3			5	1
	20	5	1,6,8,19	4			2,3,5,17	4			9,10,11,12,13	5	18	1	16,20x	2	14	1	4,7,15	3
	16	6	1,6,12	3					5,7,13,16	4	3,8,15	3	2,11,14	3	4,10x	2			9	1
2009	18	1	1,6,13	3			5,8,10	3	4,7	2	2,18	2			9,12,16	3			3,11,14,15,17	5
	18	2	1,2,3,8,17	5			4,7,18	3			10,11,14,16	4	15	1					5,6,9,12,13	5
	18	3	1,6	2			3,4,13,17	4			9,10,11,16	4	2,8	2	14,18	2			5,7,12,15	4
	18	4	1	1			11,17	2	5,18	2	10,14	2	3,6,7	3	12,13	2			2,4,8,9,15,16	6
	21	5	4,8,10,14,20	5			2,5	2	21	1	3,7,11,13,18	5	15	1	9,17,19	3	16	1	1,6,12	3
	18	6	1,6,13,14,15	5			3,4,8,10,11,12	6	16	1	2,5,9,17,18	5							7	1

Ano	T.R	Numero	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Física Quântica		Física Moderna		Ótica e Ondas	
			Artigos	Total	Artigos 2	Total 2	Artigos3	Total 3	Artigos4	Total 4	Artigos5	Total 5	Artigos 6	Total 6	Artigos 7	Total 7	Artigos 8	Total 8	Artigos9	Total 9
2010	18	1	6,7,17	3			8,9,10	3	2,3,11	3	4,13,15	3			1,14	2			5,12,16,18	4
	15	2	1,3,5,10	4			2,8,11	3	7	1	4,9	2	15	1					6,12,13,14	4
	16	3	11,13	2			3,14	2	1,5	2	2,9,12,15,16	5	6	1	10	1			4,7,8	3
	18	4					1,2,3,6,8,12,16	7	4,7	2	9,10,11,18	4	5	1	13,15	2			14,17	2
	18	5	2,13,18	3			14,16	2	3,,10	2	5,6,8,11,12,17	6	7	1					1,4,9,15	4
2011	16	6	16	1			1,2,10	3	5,6,12	3	3,7,8,11,13,15	6	14	1	4	1			9	1
	18	1	12,15	2			3,5,7,17,18	5	13	1	6,11,14	3	1,4	2	10	1			2,8,9,16	4
	20	2	3,,10,11	3			6	1	5,8	2	9,13,16,17,18	5	4	1					1,2,7,12,14,15,19,20	8
	24	3	7	1			4,5,10,14,20,22	6	9,17	2	1,2,11,16,24	5	19	1	8,12,18	3			3,6,13,15,21,23	6
	26	4	4,16,18,22,24,26	6			1,9,17	3	14	1	2,8,23,25	4	12	1	11,21	2			3,5,6,7,10,13,15,19,20	9
	26	5	18	1			1,4,9,15,21	5	7,8,10	3	3,19,20,26	4	5,16,25	3	12,14	2	2	1	6,11,13,17,22,23,24	7
20	6	5,15	2			2,4,20	3	3,6,8,16,19	5	11,12,14	3	13	1	9,,10	2			1,7,17,18	4	
2012	24	1	12,13,23	3			4,19	2	1,11,21	3	6,9,14	3	22,24	2	2,8,10	3			3,5,7,15,16,17,18,20	8
	18	2	8	1			4,15	2	14	1	3,6,9,12,18	5	1,2,5,16	4	13	1			7,,10,11,17	4
	20	3					14	1	16	1	1,2,6,7,10,13	6	4,11,20	3	5,17,19	3			3,8,9,12,15,18	6
	18	4	18	1			3,11,12,13	4			1,4,5,6,7,14,15	7			10,16,17	3			2,8,9	3
	22	5	5,8,16	3			4,9,18	3	2,12,20	3	1,3,17,22	4	15,21	2	13	1	11,14	2	6,7,10,19	4
	20	6	6,8,14,20	4			3,12,15,19	4	4,18	2	5,9,10,13,17	5	1,2,7	3					11,16	2
69 1	Total	Física Geral	91	Outros	1	E.M	115	T.M	73	Mecânica	158	Astro	46	MQ	54	FMC	5	Ótica/ondas	148	

Revista Brasileira de Ensino de Física

Ano	T.R	Numero	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	19	1	13,17	2	18	1	3,7,8,10	4	5,6	2	1,14	2			2,12	2	4,9,15	3	11,16,19	3
	16	2	10	1			8,9,12	3	3,5	2	7,14,15	3					1,2,4	3	6,11,13,16	4
	19	3	1,18	2	4,8,19	3	5,7	2			9,11,14	3	2	1	12	1	3,6,13,15	4	10,16,17	3
	22	4	4,6,7	3			13,18,21	3	1,2,3,16	4	10,17,20	3	19	1	9	1	5,8,14,15	4	11,12,22	3
2008	17	1			7	1	2,4,11,12,17	5	8,14	2	1,3,13	3	6, 10	2	9	1	16	1	5,15	2
	11	2			3,4,8	3	10, 11	2	1	1	2	1			6,7	2	9	1	5	1
	18	3	1	1	4	1	7, 8	2			2,3,6,9, 10,13,18	7			12, 17	2	5, 14	2	11,15,16	3
	15	4	12, 14, 15	3			6, 13	2	5	1	3, 7	2	8, 10	2	2, 11	2	1	1	4, 9	2
2009	13	1	5,7,8	3			12, 13	2			2, 9	2	1,3	2			6	1	4, 10, 11	3
	14	2	1	1	5	1	4, 8, 13	3	14	1	9	1			2,11	2			3,6, 7, 10,12	5
	15	3	6	1	3	1	9, 12	2	13, 14	2	1, 8, 10, 15	4	11	1	4, 7	2			2, 5	2
	17	4	11	1	9	1	3,5, 13	3			4,6, 10, 15, 16, 17	6	1, 12, 14	3	2	1	7, 8	2		

		Física Genérico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas		
2010	21	1	3, 6,19,21	4			7, 9, 11,16,17	5	8	1	1,12, 15, 20	4	2	1	4,14	2	5, 10	2	13,18	2
	15	2	9, 10	2			8	1	4	1	12, 14	2	1, 13	2	3, 5,6,11,15	5			2, 7	2
	15	3					9, 12	2	8	1	5, 6,	2			4, 10	2	2	1	1, 3, 7, 11,13,14, 15	7
	14	4	8, 9, 10,13	4	5, 14	2	2, 11	2			1, 7	2			6	1	3, 12	2	4	1
2011	24	1			3,8, 24	3	2, 5, 10, 14, 17	5	9	1	4, 6, 11, 16, 20, 21	6	13, 18	2	12, 19	2	23	1	1, 7, 15, 22	4
	18	2			3	1	2, 7	2	15	1	1, 6, 8, 9, 10, 12	6	11, 16	2	5, 13, 17, 18	4			4, 14	2
	20	3					11	1	17	1	10,13, 14, 16	4	2, 15, 20	3	6, 8, 9, 19	4	3	1	1, 4, 5, 7, 12, 18	6
	21	4	13, 14, 16	3	2	1	17, 18, 20	3			4, 5, 9	3	1, 21	2	3, 12, 19	3	15	1	6, 7, 8, 10, 11	5
2012	15	1	13, 14	2	8, 12, 15	3	7, 9	2	3, 6	2	1, 5	2	10	1	4, 11	2	2	1		
	17	2	2, 15	2	13	1	1, 5, 11, 16	4			7, 8, 10, 17	4	9	1			6, 12	2	3, 4, 14	3
	18	3	13	1			4, 8, 15	3	2, 10, 12	3	3, 14, 16, 17, 18	5			5, 11	2	6	1	1, 7, 9	3
	23	4	20	1	7, 15, 18	3	11, 13, 14, 17, 22	5	3, 12, 16	3	6, 8, 23	3			1, 4, 19	3	2	1	5, 9, 10, 21	4
417	Total		37		26		68		29		80		26		46		35		70	

Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	4	1	3	1	1	1					2	1	4	1				
	4	2			2,3,4	3							1	1				
	4	3			1,4	2					3	1					2	1
2008	6	1	4, 5	2	1,2,3,6	4												
	6	2	3	1	2, 4, 5, 6	4					1	1						
	6	3	3	1	1,2,4,5,6	5												
2009	7	1	4	1	1,2,5,6,7	5					3	1						
	6	2	4	1	1,3,5	3					2, 6	2						
	7	3			3,4,5,6,7	5									1	1	2	1
2010	8	1	3	1	1,2,4,5,6	5					8	1			7	1		
	7	2			1,2,3,4,7	5					6	1			5	1		
	7	3	3	1	1,2,4,5,6,7	6												
2011	10	1	5	1	1,2,3,6,7,9,10	7	8	1			4	1						
	10	2	7, 10	2	1,3,4,5,6,8,9	7											2	1
	10	3	9	1	1,2,3,4,5,6,7,8,10	9												
2012	10	1	2, 5,10	3	4,7,8,9	4			6	1							1, 3	2
	10	2			2,3,4,5,6,7,8,10	8	9	1						1	1			
	10	3			1,2,4,5,6,7,8,9,10	9							3	1				
	132	Total		16		92		2		1		9		3		4		5

Revista de Enseñanza de la Física

Ano	T.R	Número	Física Genérico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	9	1 e 2	1,7,9	3	5	1					3,6	2	2,4	2					8	1
2008	7	1	3,6	2							2,5	2					4	1	1,7	2
	7	2	2,5	2			3,7	2	6	1	1	1							4	1
2009	7	1	1,6	2	7	1	4	1					5	1	2,3	2				
	8	2	3,5,6,7	4			4	1	2	1	1	1			8	1				
2010	9	1 e2	1,3,6	3			5,9	2	2	1					4,8	2			7	1
2011	8	1	1,2,3,4,5,7	6					6	1	8	1								
	7	2	1,5,7	3			4	1	3	1	6	1							2	1
2012	8	1 e2	6,8	2	3	1	1,7	2			2,4	2							5	1
	70	Total		27		3		9		5		10		3		5		1		7

Revista Eletrônica de Ensino de las Ciencias

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Física Moderna		Ondas/ótica	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2006	11	1			1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	11												
	10	2	6	1	1,3,5,7,8,9,10	7					2	1					4	1
	9	3	4,7	2	1,3,5,6,8,9	6			2	1								
2007	13	1	3	1	2,4,7,9,10,11,12,13	8					1,8	2			5,6	2		
	13	2	9,11	2	1,2,4,5,6,7,8,10,12	9	13	1	3	1								
	14	3			1,3,4,5,6,7,9,10,11,13	10	8	1	2	1	12,14	2						
2008	13	1			1,3,4,5,6,8,9,12	8			2,7	2	10,11	2	13	1				
	12	2	2,5	2	1,3,4,7,10,11,12	7					8	1	9	1	6	1		
	13	3			1,2,3,4,6,7,9,11,13	9			8	1	10	1					5,12	2
2009	19	1	10,15	2	1,2,3,4,7,8,9,11,12,13,14,16,18,19	14	17	1							5	1	6	1
	19	2	19	1	2,3,4,6,7,8,9,10,11,12,13,15,16,17,18	15			14	1					1	1	5	1
	20	3	19	1	1,2,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,17,20	15							3	1	4,18	2	16	1
2010	15	1			1,2,3,4,5,6,7,8,9,11,13,14,15	13					10	1			12	1		
	10	2			2,3,5,7,8	5			1,6,9	3			10	1			4	1
	13	3	7,10	2	1,2,3,4,6,8,9,11,12,13	10	5	1										
2011	10	1			2,3,4,5,6,8,9	7			1	1	7,10	2						
	8	2			1,2,3,4,5,6,7,8	8												
	11	3			1,3,4,5,6,7,8,9,10	9			2,11	2								
2012	12	1	1,12	2	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	10												
	11	2	3	1	1,2,4,5,6,7,8,9,10,11	10												
	10	3			1,2,3,4,6,7,8,9,10	9							5	1				
	266	Total		17		200		4		13		11		5		8		6

Revista Eletrônica de Investigação em Educação em Ciências

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Quântica		Física Moderna		Ótica/Ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Total7	Total72	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	6	1	1,4	2	2,3,5,6	4														
	6	2			1,2,3,4,5,6	6														
2008	5	1			1,2,3,4,5	5								6	1					
	4	2			1,2,3	3	4	1												
2009	5	1			1,2,3,4,5	5								6	1					
	4	2			1,2,3,4	4														
2010	5	1			2,3,4,5	4			1	1										
	8	2	1,8	2	2,3,4,5,6,7	6														
2011	11	1	5,8	2	1,2,6,9,10,11	6	4	1			3,7	2								
	3	2	1,3	2	4	1								2	1					
2012	0	1			1,2,3,4,5,6															
	0	2	4,5		1,2,3,6,7															
	57	Total		8		44		2		1		2		0		3		0		0

Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias

Ano	T.R	Numero	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total 2	Artigos3	Total3	Artigos 4	Total 4	Artigos 5	Total 5	Artigos 6	Total 6	Artigos7	Total7	Artigos 8	Total 8	Artigos 9	Total 9
2007	11	1	6	1	3,4,5,8,9,10,11	7			2	1							1	1	7	1
	15	2			1,2,3,5,6,8,9,10,13	9	7,12	2	11,14,15	3	4	1								
	13	3			1,2,3,4,7,9,10,11,12	9	8	1	5	1	13	1	6	1						
2008	12	1			1,2,4,5,6,8,9,10	8	3	1			11,12	2			7	1				
	12	2			1,2,3,4,5,6,7,8,9,11,12	11					10	1								
	11	3	5	1	1,2,4,7,8,9,10	7	6	1					3	1					11	1
2009	11	1	6	1	1,2,3,4,5,7,8,11	8					9	1							10	1
	10	2			1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	10														
	13	3	4,8	2	1,2,3,5,7,10,11,12	8							6	1					9,13	2
2010	11	1	4,5,	2	1,2,3,6,7,8,10,11	8													9	1
	5	2			1,2,3,5	4	4	1												
	9	3	8	1	1,2,3,4,5,6,9	7													7	1
	18	Especial 1			1--18	18														
2011	11	1			1,2,3,6,7,8,9,10,11	9			5	1	4	1								
	9	2			1,3,4,6,7,8,9	7	2	1											5	1
	11	3			1,2,3,4,5,6,7,8,10,11	10					9	1								
	21	Especial 1			1,2,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19	12	5,6,7	3			4	1	20,21	2					3,8,9	3
2012	11	1			1,2,3,4,5,6,7,8,10	9			9	1									11	1
	10	2	4	1	1,2,3,5,7,8,9	7					6	1			10	1				
	9	3			3,4,5,6,8,9	6			1	1	7	1			2	1				
233	Total		9		174		10		8		11		5		3		1		12	

Science & Education

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	5	Issue 1	3	1	1, 5	2					2	1			4	1		
	4	Issue 2			1, 2, 3, 4	4												
	13	Issue 3 - 5	12	1	1, 2, 3, 5, 9, 10,13	7	6	1	4	1					7, 8	2	11	1
	9	Issue 7-8	2, 5	2	1, 3, 6, 9	4	8	1					7	1	4	1		
	3	Issue 9-10	6	1	2, 4, 5, 7						3	1					1	1
2008	6	Issue 1			1, 2, 5, 6	4			4	1					3	1		
	7	Issue 2-3	5	1	1,3,4,6	4	7	1			2	1						
	7	Issue 4	6	1	1, 2, 4, 5, 7	5									3	1		
	7	Issue 5			1,2,3,4,5,7	6					6	1						
	6	Issue 6			1,2,4,5,6	5									3	1		
	5	Issue 7	2	1	1	1					4	2					3	1
	14	Issue 8 - 9			1,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14	12	2	1							11	1		
10	Issue 10	6	1	1,2,3,4,5,7,8,9,10	9													
2009	10	Issue 1	1, 10	2	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	7					2	1						
	6	Issue 2			1, 2, 3, 4, 5, 6	6												
	14	Issue 3 - 4			1, 2,3, 4, 5, 6, 10, 11,13,14	10			7, 12	2	8	1					9	1
	6	Issue 5			1, 2, 6	3					5	1	3	1	4	1		
	14	Issue 6-7			1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11,12,13,14	13									6	1		
	7	Issue 8	1	1	2, 3, 4, 7	4					5	1					6	1
	11	Issue 9			1, 3, 5, 7, 8, 9, 10	7	11	1			2	1			6	1	4	1
5	Issue 10			1, 2, 3, 4	4									5	1			

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2010	7	Issue 1	3	1	1, 2, 4, 5, 7	5					6	1						
	5	Issue 2	2	1	1, 3, 4, 5	4												
	4	Issue 3	2	1	4	1					1, 3	2						
	9	Issue 4-5			1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	9												
	18	Issue 6-8			1 -- 18	18												
	7	Issue 9			1-- 7	7												
	6	Issue 10			2, 4, 5, 6	4					1, 3	2						
2011	5	Issue 1			1, 2	2					4	1	3, 5	2				
	3	Issue 2			1, 2, 3	3												
	7	Issue 3-4	2, 4, 7	3	1, 3, 5	3							6	1				
	6	Issue5-6			1, 2, 3, 4, 6	5							5	1				
	11	Issue 7-8	2, 4	2	1, 3, 6, 10, 11	5	5	1					9	1	7, 8	2		
	4	Issue 9			1, 2, 4	3			3	1								
	5	Issue 10	2	1	3, 5	2									1	1	4	1
2012	5	Issue 1			1,2	2			3	1	4	1	5	1				
	6	Issue 2	4, 5	2	1, 2	2	3	1			6	1						
	5	Issue 3			1, 4, 5	3							2	1	3	1		
	4	Issue 4	2	1	1, 3, 4	3												
	7	Issue 5	4	1	1, 2, 5, 7	4									6	1	3	1
	9	Issue 6	1	1	2, 3, 6	3	9	1			5	1	7	1	4	1	8	1
	4	Issue 7			1, 2, 3, 4	4												
	7	Issue 8	1	1	4, 5, 6, 7	4	3	1	2	1								
	5	Issue 9	1, 3	2	2	1					5	1					4	1
	13	Issue 10			1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	10									2, 4, 6	3		
331	Total	Física Geral	29	Outros	224	E.M	9	T.M	7	Mecânica	21	Astro	10	FMC	21	Ótica/ondas	10	

Science Education International

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	6	1			1,2,3,4,5,6	6														
	5	2			1,2,4,5	4						3	1							
	5	3	1,2	2	3,4,5	3														
	5	4			1,2,3,4	4			5	1										
2008	6	1			1,2,3,4,6	5						5	1							
	9	2			1,2,3,4,5,6,7,8,9	9														
	7	3			1,2,3,4,5,6,7	7														
	7	4			1,2,3,4,5,7	6					6	1								
2009	6	1 e 2			1,2,3,4,5,6	6														
2010	3	1			1,2,3	3														
	5	2			1,2,3,4,5	5														
	6	3			1,2,3,5,6	5								4	1					
	4	4			1,3,4	3					2	1								
2011	6	1			1,3,4,5,6	5								2	1					
	6	2			1,2,3,4,5,6	6														
	5	3			1,2,3,4,5	5														
	7	4			1,2,3,4,5,6,7	7														
2012	5	1			1,2,3,4,5	5														
	5	2			1,3,4,5	4			2	1										
	6	3			1,2,3,6	4						4	1						5	1
	6	4			1,2,3,4,5,6	6														
	120	Total		2		108		0		2		2		3		2		0		1

Science in Context

Ano	T.R	Numero	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	7	1			1,2,3,4,5,6,7	7														
	9	2			1,2,3,4,5,6,8,9	8										7	1			
	6	3			1,2,3,4,5,6	6														
	5	4			2,3,4,5	4				1	1									
2008	5	1			2,3,4,5	4				1	1									
	7	2			1,2,3,4,5,6,7	7														
	6	3	5,6	2	1,2,3,4	4														
	8	4			1,2,3,4,5,6,7,8	8														
2009	5	1			1,3,4,5	4													2	1
	5	2			1,2,3,4,5	5														
	9	3			1,2,3,4,5,6,7,8,9	9														
	4	4			1,2,4	3							3	1						
2010	5	1	3	1	1,4,5	3							2	1						
	3	2			1,2,3	3														
	5	3			1,2,3,4,5	5														
	5	4			1,2,3,4,5	5														
2011	4	1			1,2,3,4	4														
	7	2			1,2,3,4,5,6,7	7														
	5	3			3,4,5	3													1,2	2
	5	4			1,2,3,4,5	5														
2012	5	1			1,2,3,4,5	5														
	5	2			1,3,4	4										2	1			
	7	3			1,2,3,4,5,6,7	7														
	5	4			2,3,4	4							1	1						
137	Total		3		124		0		0		2		3		0		2		3	

Science Technology and Society

Ano	T.R	Número	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	7	1			1,2,4,5,6,7	6									3	1				
	4	2			1,3	2			4	1					2	1				
2008	5	1			1,2,3,4	4									5	1				
	9	2			1,2,3,4,5,6,7,8,9	9														
2009	7	1			1,2,3,4,5,6,7	7														
	8	2			1,2,3,4,5,6,7,8	8														
2010	7	1			1,3,4,5,6,7	6	2	1												
	10	2			1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	10														
2011	6	1			1,2,3,4,5,6	6														
	6	2			1,2,3,4,5,6	6														
	8	3			1,2,3,4,5,6,7,8	8														
2012	7	1			1,2,3,4,5,6	6									7	1				
	6	2			1,2,3,4,5,6	6														
	5	3			1,2,3,4,5	5														
95	Total		0		89		1		1		0		0		4		0		0	

Scientiae Studia

Ano	T.R	Numero	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna		Ótica/ondas	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8	Artigos9	Total9
2007	3	1			1,2,3,	3														
	3	2			2, 3	2			1	1										
	3	3			1,2,3	3														
	3	4			2	1								1	1			3	1	
2008	5	1			1,2,3,4,5	5														
	4	2			1,2,3,4	4														
	9	3			1,2,3,4,5,6,7,8,9,	9														
	4	4			1	1				2,3,4	3									
2009	5	1			1,2,3,4,5	5														
	7	2			1,2,3,4,5,6,7	7														
	4	3			1,2,3,4	4														
	5	4			1,2,3,4,5	5														
2010	5	1			1,2,3,4,5	5														
	5	2					2	1			4	1			3,5	2	1	1		
	4	3			3	1					4	1	1, 2	2						
	4	4			3,4	2					1,2	2								
2011	8	1			1,2,3,4,5,6,7,8	8														
	3	2			1,2,3	3														
	9	3			1,2,3,4,5,9	6					7	1			6, 8	2				
	6	4			1,2,3,4,5,6	6														
2012	7	1													1,2,3,4,5,6,7	7				
	6	2			1,2,3,4,5,6	6														
	7	3			1,2,4,5,6,7	6							3	1						
	8	4			2,3,4,5,6,7,8	7									1	1				
	6	Extra			1,2,3,4,5,6	6														
133	Total		0		105		1		1		8		3		13		1		1	

Studies in History and Philosophy of Modern Physics

Ano	T.R	Numero	Física Generico		Outros		Eletromagnetismo		Termodinâmica		Mecânica		Astronomia		Mecânica Quântica		Física Moderna	
			Artigos	Total	Artigos2	Total2	Artigos3	Total3	Artigos4	Total4	Artigos5	Total5	Artigos6	Total6	Artigos7	Total7	Artigos8	Total8
2007	9	1							3,4	2			5	1	1,6,7,8,9	5	2	1
	11	2													1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	11		
	10	3	5	1	10	1					1	1			2,3,4,6,7,8	6	9	1
	13	4	1	1					3, 5	2	4	1			2,6,7,8,9,10,11,12,13	9		
2008	6	1					4	1							1,2	2	3,5,6	3
	10	2							5	1	6	1			1,2,3,9,10	5	4,7,8	3
	8	3							1	1					4,5,6,7,8	5	2,3	2
	13	4							12, 13	2					1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	11		
2009	6	1					2	1					1	1	6	1	3,4,5	3
	7	2							7	1					1,4,5	3	2,3,6	3
	9	3	9	1	8	1					1	1			2,3,4,5	4	6,7	2
	12	4													1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	12		
2010	7	1					7	1							1,3,4,5,6	5	2	1
	4	2													1,2,3	3	4	1
	10	3							1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	10								
	6	4			4	1									1,2,3,5,6	5		
2011	9	1	3	1					6	1	8	1			2,4,5,7	4	1,9	2
	7	2													1,2,3,4,5,6,7	7		
	6	3							5	1					1,2,3	3	4,6	2
	7	4							3	1					1,2,4,5	4	6,7	2
2012	6	1													1,2,3,4,5	5	6	1
	8	2													1,2,4,5,6,7	6	3,8	2
	4	3													2,3,4	3	1	1
	5	4	4	1			3	1	2	1					1	1	5	1
193	Total		5		3		4		23		5		2		120		31	

APÊNDICE II – ROTEIRO DE TÓPICOS UTILIZADO NA PRIMEIRA AULA

Roteiro Projeto Quântica no Ensino Médio – Aula 1 - 15/10/2013

1 – Apresentação do projeto: quem eu sou, o que estou fazendo, quais as ideias principais do projeto, parceria UFRGS-Israelita, experiências na UFRGS.

Dinâmica da pesquisa, filmagem das aulas, sigilo sobre as identidades na apresentação dos resultados.

2 – Perguntas para buscar as ideias, expectativas e conhecimentos sobre quântica dos alunos. Expressar claramente a ideia que é importante que eles falem bastante apresentando suas ideias.

- a) Quais as expectativas que vocês têm para este projeto? Sobre o que vocês têm curiosidade?
- b) Vocês já ouviram falar sobre mecânica quântica? O quê vocês sabem sobre o assunto? Quais as coisas mais importantes da quântica? Conhecem coisas estranhas sobre mecânica Quântica?
- c) Perguntar sobre alguns conceitos importantes de quântica:
 - a. Princípio da incerteza
 - b. Dualidade onda partícula
 - c. Quantizações – carga (não é da mecânica quântica) – comprimento de onda, momento linear,
 - d. O que é a luz, o que é o elétron
 - e. Modelos atômicos
- d. Pré-requisitos para a compreensão da quântica;
 - a. Propriedade de partículas
 - b. Propriedades de ondas.

APÊNDICE III – APRESENTAÇÃO DE SLIDES PARA AS AULAS 2, 3 E 4.

Unidade de Física e Tecnologia




Unidade de Física e Tecnologia

“...notável antecipação de explicação quântica do século XX: os ‘estados de fácil transmissão e fácil reflexão’ correspondem às probabilidades transitórias de teoria quântica.”

ALLCHEN 2004.


“Newton construiu uma teoria simultaneamente corpuscular e mecânica para a luz. Embora seus primeiros experimentos o levassem para uma teoria corpuscular consistente, como veremos a seguir, seus experimentos de interferência obrigam a introduzir também um caráter ondulatório para a luz.”

SABRA 1981, pp. 341-2.





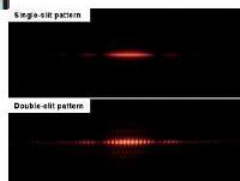

Unidade de Física e Tecnologia




http://www.youtube.com/watch?v=AKGQCL_6s

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-interference>

Siga o padrão



Double-slit pattern



Unidade de Física e Tecnologia

As equações de Maxwell são um grupo de equações diferenciais parciais que, juntamente com a lei de Lorentz, compõe a base do eletromagnetismo clássico no qual está embodado toda a óptica clássica. O desenvolvimento das equações de Maxwell, o entendimento do eletromagnetismo, contribuíram significativamente para toda uma revolução tecnológica iniciada no final do século XIX e continuada durante as décadas seguintes.

wikipedia

As equações de Maxwell

Maxwell selecionou entre todas as relações conhecidas do eletromagnetismo está aquela época um conjunto de quatro leis. Como as equações que Maxwell criou para representar as quatro leis utilizam conceitos de matemática avançada, não vamos apresentá-las na forma simbólica, apenas descritivas.

I. Lei de Gauss para o campo elétrico
O fluxo do campo elétrico através de uma superfície fechada no vácuo é igual à soma das cargas internas à superfície dividida pela permissividade elétrica do vácuo.

II. Lei de Gauss para o campo magnético
O fluxo do campo magnético através de uma superfície fechada é nulo. As linhas de campo magnético não têm origem nem fim.

III. Lei de Ampère generalizada
Uma corrente elétrica de intensidade I e/ou a variação do fluxo do campo elétrico através de uma linha fechada é igual ao fluxo do campo magnético através de uma superfície limitada por essa linha. Em outros palavras, um campo magnético pode ser criado tanto por uma corrente elétrica como pela variação do fluxo de um campo elétrico.

IV. Lei de Faraday
A variação do fluxo do campo magnético gera um campo elétrico ou uma força eletromotriz induzida. É a Lei de Faraday, com o sinal negativo da Lei de Lenz.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$


$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{e}_j + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

*Foto extraída do livro Física de Alberto Gaspar, Vol. III



Unidade de Física e Tecnologia

“...isso foi um ato de desespero, eu tinha que chegar a estes resultados a qualquer custo, mas eu encaratei como uma hipótese puramente formal, e não lhe dei nenhuma atenção.”

M. Planck


$$E = h \cdot f$$

“De fato, parecia que as observações da “radiação de corpo negro”, fotoluminescência, produção de raios catódicos por luz ultravioleta e outros fenômenos associados à emissão ou transformação de luz podem ser mais facilmente entendidas se admitíssemos que a energia da luz é distribuída de forma descontínua no espaço. De acordo com a hipótese aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido por uma fonte pontual, a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de quantas de energia, localizadas em pontos do espaço que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais.”



A. Einstein

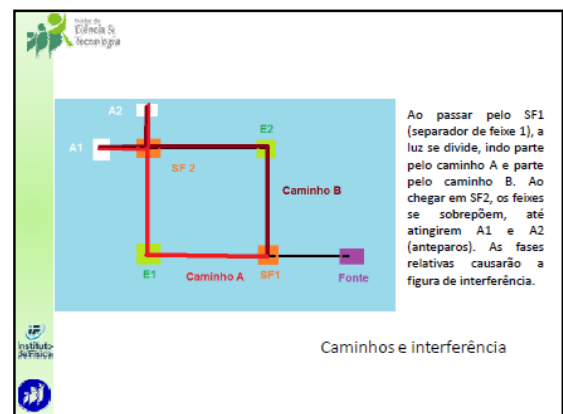
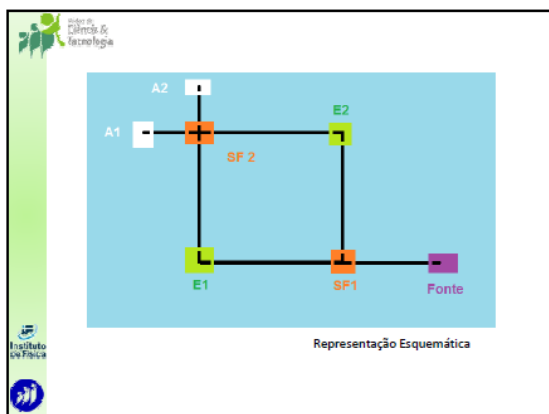
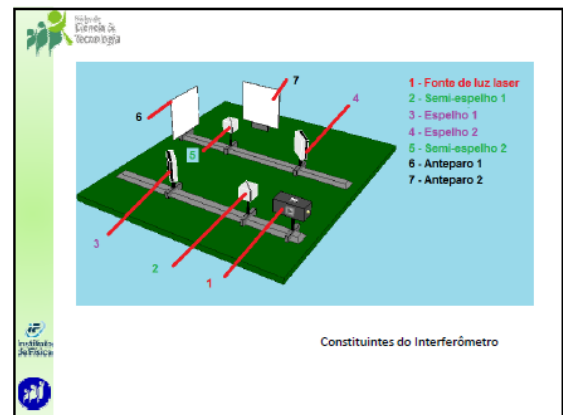
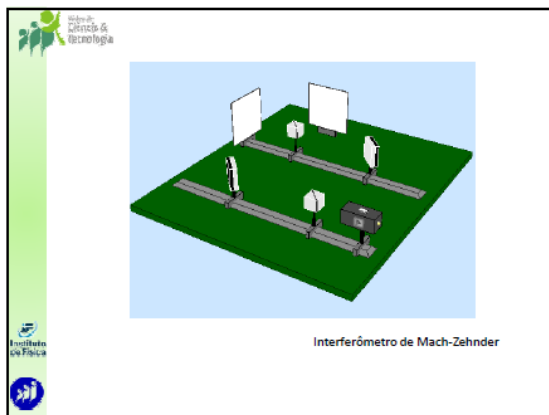
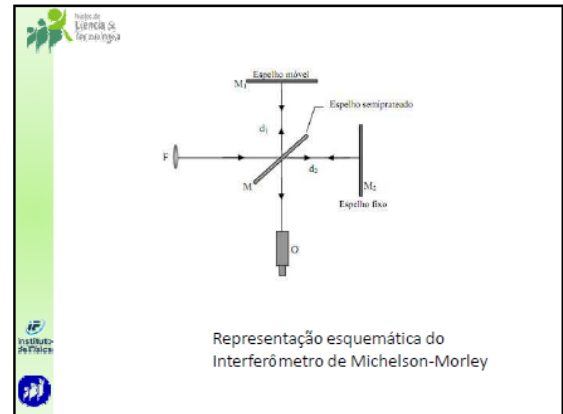
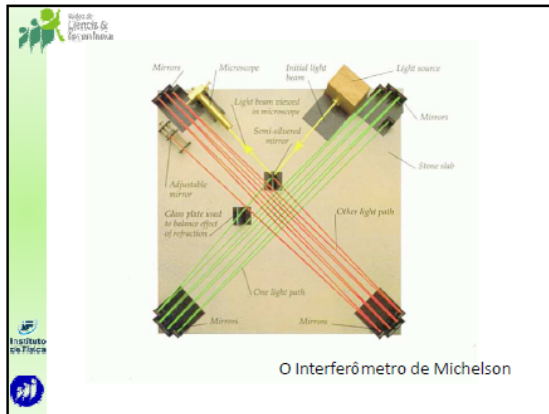
$$E_f = \phi + E_c$$


Em 1905, para explicar o efeito fotoelétrico Einstein usou uma idéia similar a de Newton, segundo a qual, ao invés de pensarmos na luz como uma onda, deveríamos imaginá-la constituída de corpúsculos, denominados fótons. Com o sucesso da explicação do efeito fotoelétrico, ficou provado que a luz tem um caráter dualista. Dependendo das circunstâncias, poderia ser vista como onda (apresentando, por ex. fenômeno de interferência e de difração), ou como partícula (apresentando o efeito fotoelétrico).

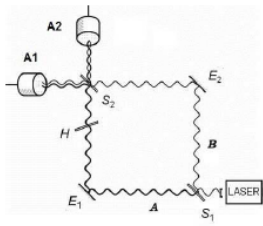


Unidade de Física e Tecnologia














Interferência no centro dos anteparos





Referências:

- ALLCHIN, Douglas. Pseudohistory and Pseudoscience. *Science & Education* 13: 179-195, 2004.
- SABRA, A. I. *Theories of light from Descartes to Newton*. London: Cambridge University Press, 1981.
- ANO MIRACULOSO DE EINSTEIN, O
- AUTOBIOGRAFIA CIENTIFICA E OUTROS ENSAIOS, PLANCK, MAX
- CURSO DE FISICA BASICA, OPTICA, RELATIVIDADE, FISICA QUANTICA, NUSSENZVEIG, H MOYSES



Roteiro para utilização do interferômetro Virtual de Mach-Zehnder I

Nesta aula, exploraremos algumas características do Interferômetro virtual de Mach Zehnder. Diversos conceitos de física quântica serão estudados ao longo das aulas. O primeiro conceito que passaremos a discutir será a **dualidade onda-partícula**.

Para qualquer objeto de estudo, podemos nos perguntar: ele comporta-se como uma onda ou como uma partícula? Neste interferômetro estaremos interessados no comportamento da luz. Antes de tudo, é preciso ter claro como as ondas e as partículas se comportam. Nas palavras de Pessoa Jr.(1997).

“Para a Física Clássica uma partícula pode ser imaginada como uma bolinha bem pequena que se locomove pelo espaço e que em condições normais não se divide. Além dessa indivisibilidade, uma partícula clássica também se caracteriza por estar a cada instante em uma posição bem definida e com uma velocidade precisa. Com o passar do tempo, a partícula descreve uma trajetória bem definida, que pode ser visualizada como uma curva contínua no espaço.”

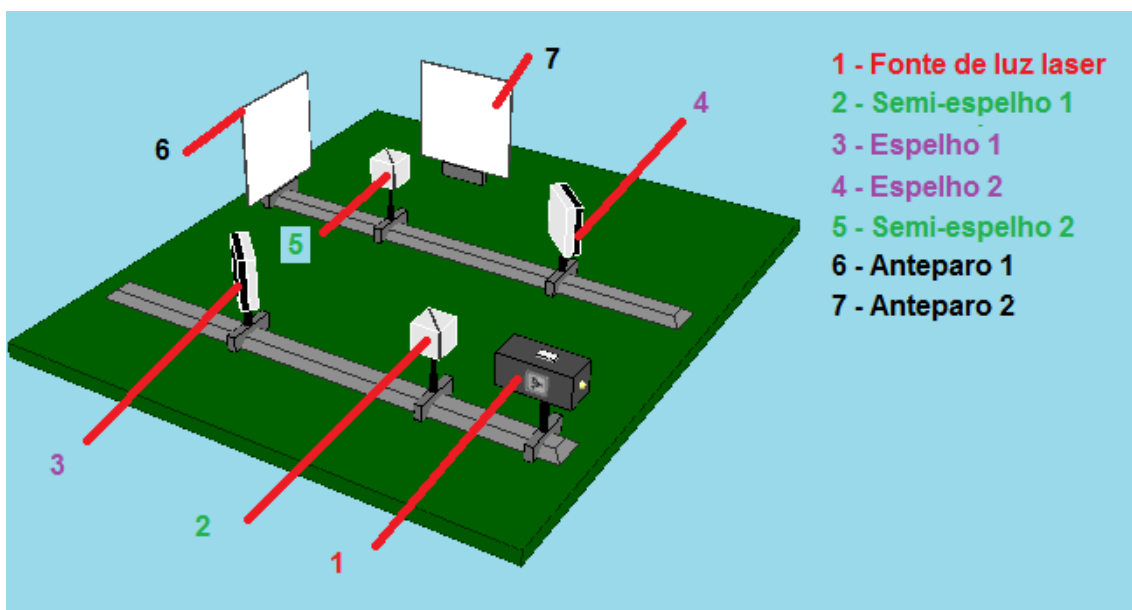
“Uma onda, por outro lado, é concebida pela Física Clássica como uma excitação que se propaga em um meio, como a superfície da água, e que tem a característica de se espalhar no espaço. O que se propaga com a onda é a energia, que se identifica com o movimento oscilatório das partículas do meio. Como esse movimento das partículas pode ser tão tênue quanto se queira, a amplitude da onda pode ser dividida o quanto se queira, pelo menos em teoria. Nesse sentido, as ondas são contínuas, ao contrário das partículas que são discretas (atômicas). Além disso, ondas circulares claramente não descrevem uma trajetória do tipo definido para corpúsculos. Elas são espalhadas no espaço, sem se localizar em um ponto bem definido. Além de serem contínuas e espalhadas, as ondas exibem uma série de fenômenos típicos como a interferência.”

Classicamente, a luz era considerada uma onda. Os estudos de Huygens, Young e Maxwell apontaram fortemente nesta direção. No início do século XX, alguns efeitos, como a radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico, só conseguiram ser explicados a partir da visão da luz como composta de pequenas unidades indivisíveis de energia (chamadas fótons). Surgiu então a pergunta: afinal, a luz se comporta como uma partícula ou como uma onda? Para auxiliar esta discussão, será utilizado o interferômetro virtual Mach-Zehnder (IVMZ). Assim, mãos à obra.

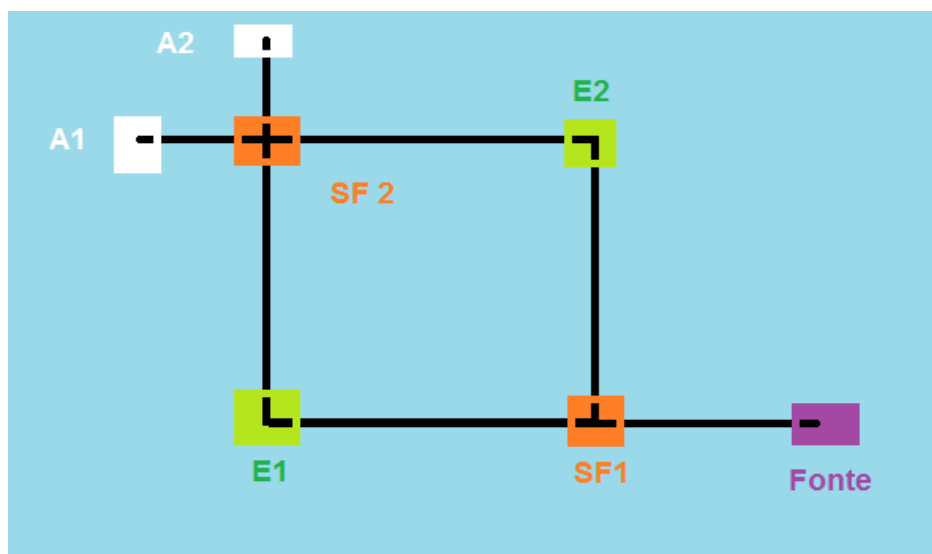
O Funcionamento do Interferômetro de Mach-Zehnder

O interferômetro de Mach-Zehnder foi proposto de maneira independente nos anos de 1891 e 1892 por Ludwig Zehnder e Ludwig Mach. Este interferômetro tem diversas utilizações dentro da física e da engenharia. Ele pode ser utilizado, por exemplo, no estudo do índice de refração de certos materiais.

O aparato é composto por uma fonte, dois espelhos semirrefletores, dois espelhos planos e dois anteparos, como mostra a figura.

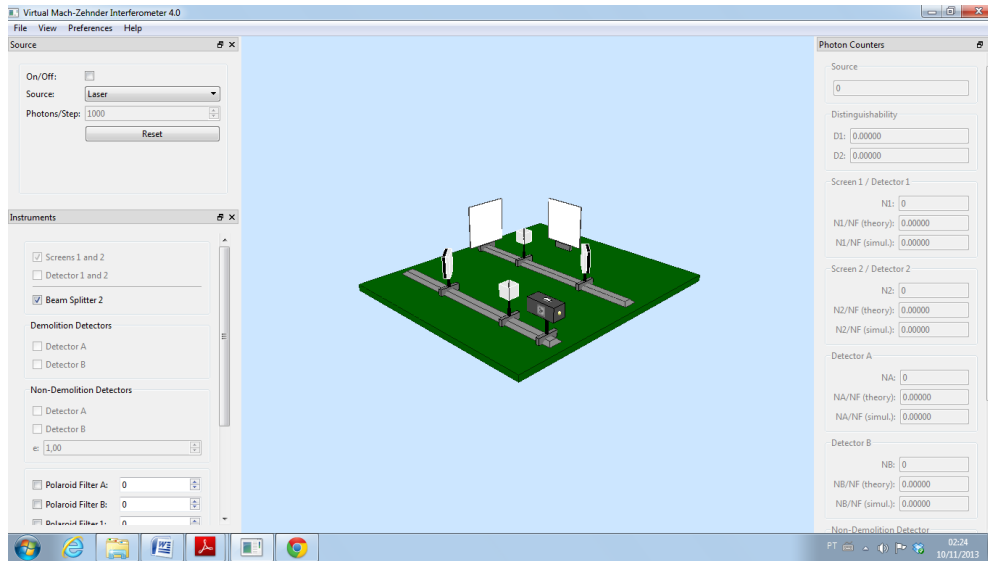


Pode-se fazer uma representação esquemática do interferômetro:



1. O Mach Zehnder em regime clássico

A. Abra o aplicativo do IVMZ, a seguinte tela aparecerá:



- B. Selecione em source (Fonte) a opção laser (Canto superior esquerdo)
- C. Ligue o aparelho (aperte o quadrado ao lado de On/Off, também no canto superior esquerdo)
- D. Observe.

Perguntas:

- 1) O que você vê nos anteparos?
- 2) As imagens nos dois anteparos são iguais? Se forem diferentes, quais as diferenças? (Utilize o scroll do mouse para aproximar e afastar a imagem)
- 3) Explique por que as imagens nos anteparos ficam desta forma.

E. Aperte na caixa de seleção à esquerda de Beam Splitter 2 (Semi-espelho 2), retirando o segundo separador de feixes.

Perguntas:

- 1) O que você vê nos anteparos?
- 2) As imagens nos dois anteparos são iguais? Se forem diferentes, quais as diferenças?
- 3) Explique por que as imagens nos anteparos ficam desta forma.
- 4) As imagens com e sem o segundo separador de feixes são bastante diferentes. Explique estas diferenças. (Tente utilizar termos como interferência, diferença de caminho e diferença de fase.)

2. Mach Zehnder em Regime quântico

- A. Desligue o interferômetro clicando ao lado de On/Off
- B. Coloque novamente o segundo semi-espelho (selecione a caixa ao lado de Beam Splitter 2)
- C. Selecione em Source (Fonte) a opção Single Photons (Fótons únicos).
- D. Aperte na caixa de seleção de Photons/Step e escreva 1. Isto significa que a cada etapa sairá apenas 1 fóton .
- E. Ligue o interferômetro.
- F. Prepare-se, esta experiência demorará alguns minutos. Enquanto isto, gostaríamos que vocês discutissem algumas questões:
 - a. Perceba que uma luz vermelha pisca nos anteparos. Ela indica onde cada fóton que é emitido pela fonte chega.
 - b. Qual imagem você espera ver nos anteparos? Por quê?
 - c. O padrão que você espera será ondulatório ou de partícula?
 - d. Quais características deste experimento fazem com que você acredite que surgirá este padrão?
 - e. Quais características deste experimento poderiam lhe indicar o contrário?
 - f. Olhe novamente para o experimento, você já consegue decidir quais imagens estão se formando em cada anteparo? Como você explica a imagem formada?
- G. Desligue o experimento.

3. Mach-Zehnder em regime quântico II

- A. Selecione Photons/ Step e escreva 1000.
- B. Em Non-Demolition Detector, selecione o detector A. Este detector permite detectar o fóton no caminho A, sem impedir que o mesmo continue. Sempre que o fóton passa pelo detector A, este detecta sua passagem.
- C. Ligue o aparelho.
- D. Qual imagem que você observa? Que tipo de imagem é esta, tipicamente ondulatória ou de partícula?
- E. Como você explica esta imagem?
- F. Qual a diferença da montagem experimental deste caso para o anterior? Como você utilizaria esta diferença para explicar a diferença entre as imagens?
- G. O que sabemos sobre o fóton nesta montagem que não sabíamos no primeiro caso?
- H. Desligue o experimento.

4. Extra : probabilidades:

- a. No canto direito, há um contador de fótons, vamos observar os valores contados:
 - 1) Em Source, contam-se quantos fótons foram emitidos.
 - 2) Em **Screen 1/Detector 1** aparecem três retângulos. O primeiro conta quantos fótons atingiram o Anteparo 1. Abaixo, apresenta-se, pela teoria a razão entre os fótons que atingiram o anteparo 1 e o número total emitido. O terceiro retângulo apresenta a razão obtida neste experimento específico.
 - 3) Em **Screen 2/Detector 2** aparecem três retângulos. O primeiro conta quantos fótons atingiram o Anteparo 2. Abaixo, apresenta-se, pela teoria a razão entre os fótons que atingiram o anteparo 2 e o número total emitido. O terceiro retângulo apresenta a razão obtida neste experimento específico.
 - 4) Some o número de fótons que atingiram o anteparo 1 e o anteparo 2 e verifique se o total corresponde ao número de fótons emitidos.
 - 5) A razão teórica e a razão experimental entre o número de fótons em cada anteparo e o número de fótons emitidos são diferentes. Como você explica isto. O que este resultado significa?
 - 6) Descendo a barra da direita, verifica-se um contador de fótons que passam pelo detector de não demolição (non-demolition detector). Você espera alguma relação entre o número de fótons contados no detector e o número de fótons que atingem algum dos anteparos?

Roteiro II - Novas possibilidades com o interferômetro de Mach-Zehnder.

1. Relembramos um pouco do funcionamento do interferômetro visto na aula anterior:

- 1) Abra o programa do Interferômetro Virtual de Mach- Zehnder
- 2) Escolha como Fonte (Source) a opção Single Photons (Fótons únicos)
- 3) Em Photons/ Step, selecione 1000.
- 4) Ligue o interferômetro
 - a. Qual imagem que você observa nos anteparos? Que tipo de imagem é esta, tipicamente ondulatória ou de partícula?
 - b. As imagens nos anteparos 1 e 2 são iguais ou diferentes? Explique.
 - c. Como você explica esta imagem?
- 5) Desligue o interferômetro.
- 6) Selecione em non-demolition detector a opção Detector A. Aparecerá um aparelho que contará o número de fótons que passam por aquele ponto do experimento.
- 7) Ligue o interferômetro
 - a. Qual imagem que você observa? Que tipo de imagem é esta, tipicamente ondulatória ou de partícula?
 - b. Como você explica esta imagem?
 - c. Qual a diferença entre a imagem observada nesta experiência em relação à anterior? Como você explica esta diferença?

2. Substituindo as telas por detectores:

- 1) Desligue o interferômetro
- 2) Logo abaixo de Instruments, selecione Detector 1 and 2. Isto substituirá os anteparos por detectores e alterará a fonte para uma fonte puntual.
- 3) Retire o Detector A (Em non-demolition detector)
- 4) Aperte Reset. (Verifique se no canto direito, abaixo de Source aparece o número 0)
- 5) Ligue o interferômetro
- 6) Espere alguns segundos e desligue o interferômetro
 - a) Qual o número que aparece abaixo de Source (Fonte)
 - b) Qual é o primeiro número que aparece abaixo de Screen 1/ Detector 1? Qual é o primeiro número que aparece abaixo de Screen 2/ Detector 2?
 - c) Como você explica este resultado? Qual relação você consegue fazer com os experimentos anteriores? Neste caso, o resultado pode ser melhor explicado com um modelo corpuscular ou ondulatório para o fóton?
- 7) Aperte o botão Reset.
- 8) Escolha em **Non-demolition detector** a opção **detector A**

9) Ligue o interferômetro

10) Espere alguns instantes e desligue o interferômetro.

a) Qual o número que aparece abaixo de Source (Fonte)

b) Qual é o primeiro número que aparece abaixo de Screen 1/ Detector 1?
Qual é o primeiro número que aparece abaixo de Screen 2/ Detector 2?

c) Como você explica este resultado? Qual relação você consegue fazer com os experimentos anteriores? Neste caso, o resultado pode ser melhor explicado com um modelo corpuscular ou ondulatório para o fóton?

d) Qual a diferença entre este experimento e o experimento anterior?
Como esta diferença interferiu no resultado da experiência?

3. Mudando as características do experimento:

1) Desligue o experimento e aperte o botão Reset

2) Desça a barra de **Instruments**, até chegar em duas caixa R1 e R2. Ambas devem estar com o índice 0,5. Nesta etapa, mudaremos o índice de R1.

Os índices R1 e R2 indicam percentual de luz é refletido nos espelhos 1 e 2, respectivamente. O índice 0,5 indica que metade da intensidade da luz incidente é refletida. Mudar o índice para 0,8, por exemplo, caracteriza-se por fazer com que 80% da luz incidente seja refletida.

3) Mantendo o índice em 0,5 ligue o experimento. Espere alguns segundo e desligue.

a) Quantos fótons atingiram o detector 1? E o detector 2?

b) Qual o percentual de fótons que atingiram o detector 1? (veja em **Screen 1/ Detector 1** e observe a janela **N1/NF (simul)**). E o detector 2?

4) Mude o índice de R1 para 1 e mantenha R2 inalterado. Ligue o experimento. Espere alguns segundos e desligue:

a) Quantos fótons atingiram o detector 1? E o detector 2?

b) Qual o percentual de fótons que atingiram o detector 1? (veja em **Screen 1/ Detector 1** e observe a janela **N1/NF (simul)**). E o detector 2?

c) Explique a diferença entre os resultados deste experimento com o resultado do anterior. Busque retomar conceitos já trabalhados em outras experiências.

5) Mude o índice de R1 para 0,8 e mantenha R2 inalterado.

a) Antes de ligar o experimento, discuta com seu colega qual o comportamento que vocês esperam dos fótons neste caso. Tente usar argumentos baseado no que você já sabe sobre a dualidade onda partícula.

b) Vocês esperam que sejam detectados fótons no detector 1? E no detector 2? Em qual detector vocês esperam encontrar mais fótons? Qual o percentual que vocês esperam encontrar em cada detector?

6) Ligue o experimento. Espere alguns segundos e desligue:

- a) Quantos fótons atingiram o detector 1? E o detector 2? Quais os percentuais no detector 1? E no detector 2?
- b) Como vocês podem explicar este comportamento?
- 7) Repita os procedimentos (5) e (6), alterando R1 para 0,9.
- a) Quantos fótons atingiram o detector 1? E o detector 2? Quais os percentuais no detector 1? E no detector 2?
- b) Como vocês podem explicar este comportamento?
- 8) Repita o procedimento (7), respondendo as questões (a) e (b) deste item, alterando R1 para os seguintes valores: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4.
- c) Descreva a mudança no percentual de fótons detectados nos detectores 1 e 2, em função da mudança do índice de reflexão do espelho 1.
- d) O que estes experimentos indicam sobre o comportamento dos fótons? Como podemos pensar a questão da interferência, relacionando-a com a informação disponível sobre o caminho dos fótons?
- 9) Coloque o detector de não demolição A (non-demolition detector) e repita os procedimentos realizados em (8).
- a) Qual o percentual de fótons que chegam ao detector 1? E ao detector 2? Mudar os valores de R1 alterou este percentual? Como você explica isto?
- 10) Altere os valores R2, mantendo R1 = 0,5 (Retire o detector de não demolição).
- a) Qual o comportamento obtido para os seguintes valores de R2: 0; 0,1; 0,3; 0,5. Explique estes resultados.
- 11) Sinta-se livre para testar valores de R1 e R2. Utilize novas combinações entre os valores e tente explicar os resultados.
- Sugestões:
- R1= 0, R2 =1
- R1 = 0,1 ; R2 =0,1 (Realize esta experiência com e sem detector de não demolição)
- R1=0,1; R2= 0,9
- 12) Substitua os detectores 1 e 2 por anteparos (telas) e observem as figuras que são formadas ao alterar-se o índice de reflexão R1.
- a) O que você percebe nas figuras? O que elas indicam? Elas se tornam diferentes ao mudar-se o valor de R1? (Faça R1 = (0; 0,1;0,3;0,5))


4. Detectores não demolição “defeituosos”

- 1) Desligue o interferômetro e aperte Reset.
- 2) Volte aos valores $R_1 = 0,5$ e $R_2 = 0,5$. Coloque novamente os detectores 1 e 2.
- 3) Coloque o detector de não demolição A


Logo abaixo da janela onde seleciona-se a colocação do detector de não demolição, há uma janela onde está escrito **e:**. Esta janela indica a eficiência do detector. O valor 1, indica que todos os fótons que chegarem ao detector serão detectados. O valor 0, indica que nenhum dos fótons que chegar ao detector será encontrado. Valores intermediários indicam situações intermediárias.

- 4) Usando os valores de **e:** (1; 0,9; 0,8; 0,6; 0,4; 0), realize o experimento e responda em cada caso às seguintes questões:
 - a) Qual o percentual de fótons detectados no detector 1 em cada caso?
 - b) Qual o percentual de fótons detectados no detector 2 em cada caso?
 - c) A partir dos seus conhecimentos sobre a dualidade onda-partícula, como você explica este resultado?

APÊNDICE V – APRESENTAÇÃO DE SLIDES USADA NA AULA 6



Instituto de Física
 Israelita



"Nossas conversas frequentemente prosseguiram até bem depois da meia-noite. Apesar de esforços prolongados por vários meses, não chegamos a uma conclusão satisfatória. Ficamos cansados e tensos. Em fevereiro de 1927, Bohr resolveu ir esquiar na Noruega. Fiquei contente por permanecer em Copenhague, onde poderia pensar nesses problemas desesperadoramente complexos sem ser perturbado. Concentrei meus esforços na representação matemática da trajetória do elétron na câmara de nuvem, e logo percebi que os obstáculos diante de mim eram mesmo insuperáveis. Comecei a me indagar se não estávamos fazendo o tipo errado de pergunta o tempo todo. Mas, onde teríamos errado?"

"Deve ter sido depois da meia-noite, certa madrugada, que de repente me lembrei de minha conversa com Einstein e, em especial, de sua afirmação: "É a teoria que decide o que podemos observar." Imediatamente, convenci-me de que a chave da porta que se vinha mantendo fechada por tanto tempo deveria ser procurada ali mesmo. Resolvi fazer uma caminhada noturna pelo parque Følsted para pensar melhor na afirmação de Einstein.

Na verdade, tudo o que víamos na câmara de nuvem eram gotículas de água isoladas, elas mesmas muito maiores que o elétron. As perguntas corretas, portanto, seriam: pode a mecânica quântica representar o fato de que um elétron se encontra aproximadamente (ou seja, com uma certa imprecisão) num determinado lugar e se move aproximadamente (de novo, com uma certa imprecisão) com determinada velocidade? Podemos tornar essas aproximações tão estreitas que elas não provoquem dificuldades experimentais?"

"Após meu retorno ao Instituto, um breve cálculo mostrou que de fato era possível representar matematicamente essas situações, e que as aproximações eram rígidas pelo que depois viria a ser chamado "princípio da incerteza" da mecânica quântica: o produto das incertezas dos valores medidos da posição e do momento (isto é, o produto da massa pela velocidade) não pode ser inferior à constante de Planck, ou um quantum de ação."

Werner Karl Heisenberg – A PARTE E O TODO

Observando uma partícula quântica

$\lambda_{\text{at}} = 10^{-10} \text{ m}$
 átomo = 10^{-10} m
 próton = 10^{-15} m
 elétron = 10^{-17} m

1ª ideia, reduzir o comprimento de onda.
 1ª consequência: aumento no momento linear $\rightarrow p = \frac{h}{\lambda}$

Resultado: **Não determino a posição da partícula, mas perdo a informação do momento!!**

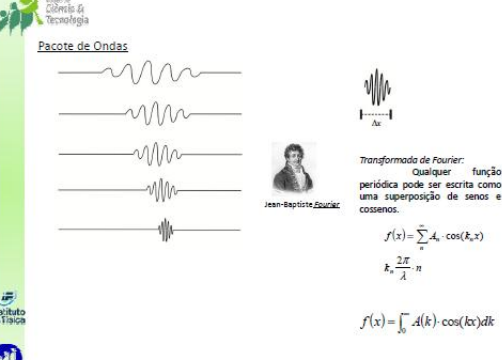
Princípio da Incerteza

O princípio da incerteza de Heisenberg consiste num enunciado da mecânica quântica, formulado inicialmente em 1927 por Werner Heisenberg, impondo restrições à precisão com que se podem efetuar medidas simultâneas de uma classe de pares de observáveis em nível subatômico.

$\Delta x_1 \cdot \Delta p_1 \geq \frac{\hbar}{2}$
 $\Delta x_2 \cdot \Delta p_2 \geq \frac{\hbar}{2}$
 $\Delta x_3 \cdot \Delta p_3 \geq \frac{\hbar}{2}$
 $\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$

Três dimensões espaciais

Pacote de Ondas




Transformada de Fourier: Qualquer função periódica pode ser escrita como uma superposição de senos e cossenos.


$f(x) = \sum_n A_n \cos(k_n x)$
 $k_n = \frac{2\pi}{\lambda} n$
 $f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(k) \cos(kx) dk$

Jean-Baptiste Fourier


Resumo Dualidade Onda-Partícula

Classicamente, a luz era vista como uma onda, enquanto átomos, moléculas e objetos macroscópicos como apresentando o comportamento de partículas.

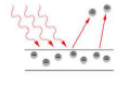




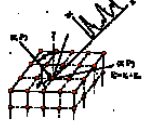
A partir de 1900, diversos fenômenos só conseguiram ser explicados, a partir da hipótese de que em certas condições a luz se comporta como uma partícula e elétrons, átomos e moléculas se comportam como ondas.




Radiação do Corpo Negro




Efeito Fotoelétrico




Difração de elétron







Para explicar de maneira completa estes fenômenos, era necessária uma teoria geral que previsse corretamente estes resultados (tanto ondulatórios quanto corpusculares).

A **mecânica ondulatória de Schrodinger**, a **mecânica matricial** e o **princípio da incerteza de Heisenberg**, marcam o início da mecânica quântica como teoria bem estruturada.









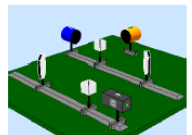
Resultados

- 1 - Não se pode dizer que fótons ou elétrons sejam partículas ou ondas. Alguns autores utilizam o termo **objeto quântico**, para se referir ao comportamento observado de fótons, elétrons, prótons átomos e até mesmo moléculas.
- 2 - Os objetos quânticos podem, dependendo da situação apresentar comportamento de partícula, de onda, ou, até mesmo, parcialmente de onda e parcialmente de partícula.
- 3 - No Interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ), o caráter ondulatório ou corpuscular apresentado pelos fótons depende da informação disponível sobre o caminho utilizado pelo fóton.

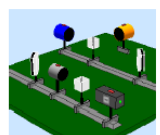





Dualidade e probabilidades no IMZ




Interferômetro com interferência
Comportamento Ondulatório



Interferômetro sem interferência
Comportamento de Partícula







Probabilidades

	Caso com interferência	Caso sem Interferência
Probabilidade detector 1	$P(1) = (R_1 \times T_1) + (T_1 \times R_2) + \sqrt{(R_1 \times T_1 \times R_2 \times T_2)}$	$P(1) = R_1 \times T_2 + T_1 \times R_2$
Probabilidade detector 2	$P(2) = T_1 \times T_2 + R_1 \times R_2 - \sqrt{(R_1 \times T_1 \times R_2 \times T_2)}$	$P(2) = T_1 \times T_2 + R_1 \times R_2$


Observação: $R_1 + T_1 = R_2 + T_2 = 1$





Exemplos

Semi 1		Semi 2		Com Interferência		Sem Interferência	
R1	T1	R2	T2	P1	P2	P1	P2
0,00	1,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
0,10	0,90	0,50	0,50	0,80	0,20	0,50	0,50
0,20	0,80	0,50	0,50	0,90	0,10	0,50	0,50
0,30	0,70	0,70	0,30	1,00	0,00	0,58	0,42
0,40	0,60	0,40	0,60	0,96	0,04	0,48	0,52
0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	0,00	0,50	0,50
0,60	0,40	0,40	0,60	1,00	0,00	0,52	0,48
0,70	0,30	0,70	0,30	0,84	0,16	0,42	0,58
0,80	0,20	0,50	0,50	0,90	0,10	0,50	0,50
0,90	0,10	0,50	0,50	0,80	0,20	0,50	0,50
1,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50



APÊNDICE VI – TEXTO DE APOIO PARA A OFICINA

FÍSICA QUÂNTICA

No início do século XX, duas novas teorias na área da Física mudaram completamente o modo como vemos o mundo. A Física Quântica e a teoria da Relatividade (Geral e Restrita) de Einstein possibilitaram muitos avanços na Física. Microcomputadores, celulares e satélites são apenas as partes mais visíveis desta revolução.

Diversos aspectos da teoria quântica são altamente contraintuitivos. Sua ascensão ocorreu no momento em que as teorias clássicas não conseguiam dar conta de certos fenômenos. Suas previsões e resultados inesperados causavam não apenas espanto, mas também resistência dentro do meio científico.

“Deus não joga dados com o Universo” - **Albert Einstein**, duvidando do caráter probabilístico da mecânica quântica.

“Foi um ato de desespero... eu estava pronto para sacrificar quaisquer das minhas convicções prévias sobre a Física.” – **Max Planck**, referindo-se a sua proposta de quantização da energia para resolver o problema da radiação do corpo negro.

Para compreender a física quântica e o que há de tão inesperado nela, precisamos viajar rapidamente pela física clássica e perceber como esta compreendia diversos fenômenos que adquirem novos significados a partir da teoria quântica. A física clássica pode ser dividida em quatro grandes áreas: a Mecânica, a Ondulatória, o Eletromagnetismo e a Termodinâmica (mais exatamente a Mecânica Estatística – por questões didáticas, consideraremos a Termodinâmica). Algumas características de interesse destas teorias serão apresentadas a seguir.

MECÂNICA

A mecânica é o ramo da física que busca descrever o movimento dos corpos e suas causas. Classicamente, as leis que regem o movimento dos corpos pode ser sintetizada nas 3 leis de Newton:

1ª Lei de Newton:

Lei da inércia: Todo corpo permanece com velocidade constante a menos que seja obrigado a mudar seu estado de movimento pela ação de forças.

Cabe perceber que um corpo com velocidade constante realiza um **MRU**, movimento retilíneo uniforme, e que um caso particular desta situação ocorre quando o corpo tem velocidade 0 (está parado). Esta lei também serve para definir o que são **referenciais inerciais**.



2ª Lei de Newton

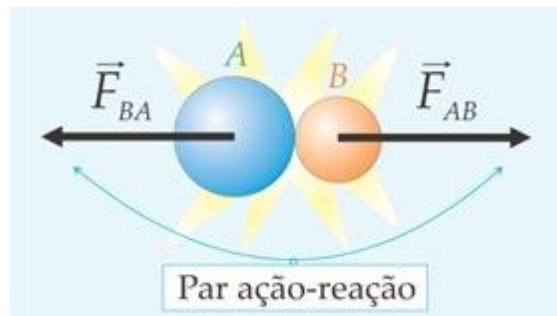
Princípio Fundamental da dinâmica: Quando um corpo está submetido a uma força resultante não nula, este sofrerá uma aceleração que dependerá da massa do corpo.

$$F_r = m \cdot a$$

Esta lei traz consigo a definição de massa inercial para **Isaac Newton**: uma constante de proporcionalidade entre a força que um corpo sofre e a aceleração que este apresenta.

3ª Lei de Newton

Ação e Reação: Para toda ação (Força) existe uma reação (outra Força) de mesma direção e intensidade, mas em sentidos opostos.



Cabe perceber que sempre que um corpo A exerce uma força sobre um corpo B, o corpo B exerce esta mesma força em módulo e direção (mas com sentido contrário) sobre o corpo A.

Características importantes:

A mecânica clássica é uma teoria determinista: conhecendo-se a posição e a velocidade iniciais dos corpos, assim como as forças que sobre eles agem, podem-se determinar as novas posições e velocidades dos corpos em qualquer instante de tempo.

As leis da mecânica se propunham válidas para o movimento de quaisquer corpos com massa. Quando for tratada a dualidade onda-partícula, o comportamento esperado classicamente de uma partícula será o previsto nestas três leis de Newton.



Movimento das bolas em um jogo de bilhar, o comportamento das bolas de bilhar corresponde ao comportamento esperado das "partículas".

Para a física Clássica, o tempo é uma grandeza absoluta: para qualquer observador em qualquer referencial, o tempo deve transcorrer da mesma forma. Ao medir o intervalo de tempo entre dois eventos, quaisquer dois observadores concordarão com o tempo transcorrido entre estes eventos. Analogamente, o espaço é também absoluto: dois observadores sempre concordarão, por exemplo, na medida do comprimento de quaisquer objetos.

A causa das forças não é tratada por estas leis. Forças elétricas e magnéticas, por exemplo, serão explicadas pela teoria Eletromagnética. Outros resultados importantes encontrados a partir da mecânica são os teoremas de conservação da energia (E), da quantidade de movimento linear (p) e da quantidade de movimento angular (L) no universo.

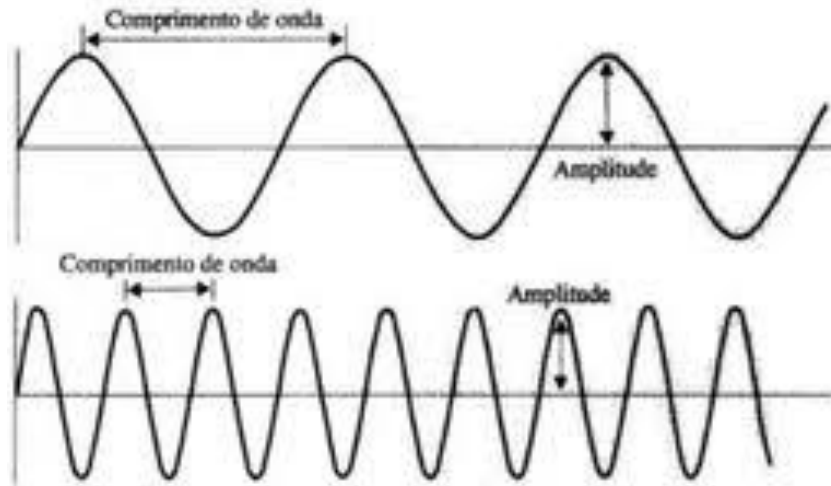
ONDULATÓRIA

A ondulatória caracteriza-se pelo estudo das ondas. *Ondas são perturbações em um meio que se propagam no espaço, transportando energia sem transportar massa*³⁵. São exemplos de onda: o som, as ondas do mar e a luz.



³⁵ Em certas ocasiões, tais como ondas de choque de uma explosão, pode ocorrer deslocamento de matéria. Mesmo ondas na água podem transportar um pouco de matéria.

As ondas apresentam algumas características importantes, tais como comprimento de onda (λ), frequência (f) e amplitude. Pode-se representar uma onda a partir da imagem abaixo. Esta representação será importante para a compreensão do fenômeno da interferência.



Diversos fenômenos ondulatórios são interessantes para a compreensão do comportamento esperado das ondas:

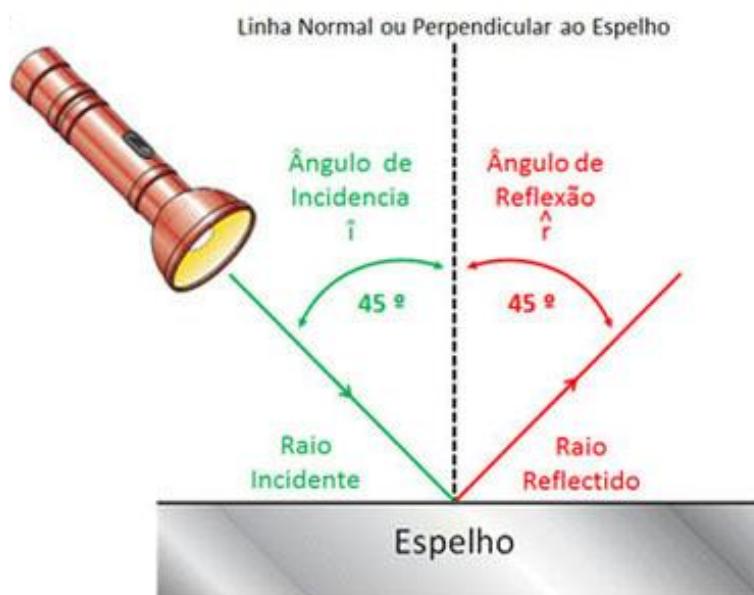
Reflexão

Quando uma onda chega à interface de separação entre dois meios (ar e água, por exemplo) a onda pode retornar ao meio que estava antes. Este fenômeno chama-se reflexão.



A reflexão obedece às seguintes leis:

O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão em relação à Normal; o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão apresentam-se em lados opostos da Normal; o raio incidente, o raio refletido e a Normal situam-se no mesmo plano.



Refração

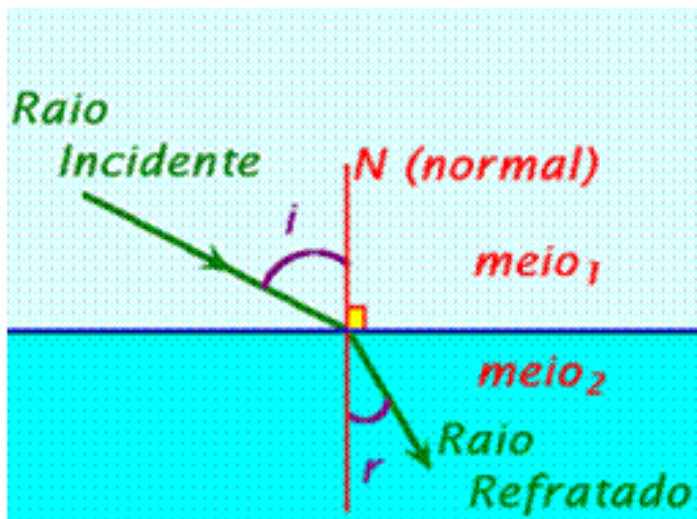
Quando uma onda chega à superfície de separação entre dois meios e penetra no segundo, chamamos este fenômeno de refração. Na mudança de meio, ocorre uma mudança na velocidade e na direção de propagação da onda³⁶.



Vemos uma descontinuidade na colher, pois a luz ao sair da água muda de direção, causando a impressão de que o cabo da colher está em outra posição.

³⁶ Se a incidência for normal (direção perpendicular à superfície de separação entre os dois meios) apenas a velocidade muda. Por isso, a refração deve ser encarada como mudança de velocidade de uma onda quando as propriedades físicas do meio no qual ela se propaga mudam.

A refração também obedece a determinadas leis, chamadas leis da refração. Pela figura abaixo, temos:

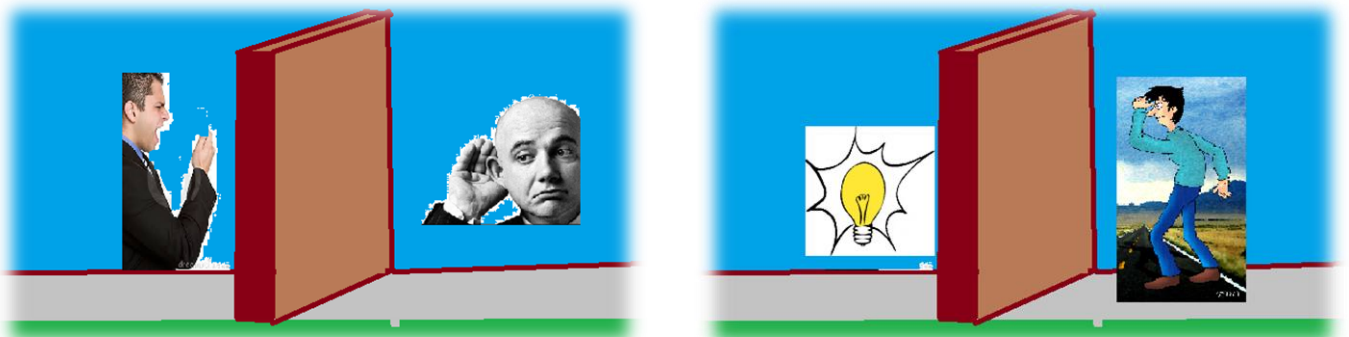


$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{v_i}{v_r}$$

Difração

A difração surge quando as ondas têm de contornar obstáculos, o que provoca mudanças em suas propriedades e que normalmente leva à formação de um padrão de interferência. Quanto maior o comprimento de onda, maiores são os obstáculos que as ondas podem contornar no sentido de produzir efeitos de difração observáveis. Este fenômeno permite que consigamos sinais de rádio e celular em locais que não formam uma linha reta e desimpedida com a fonte do sinal.

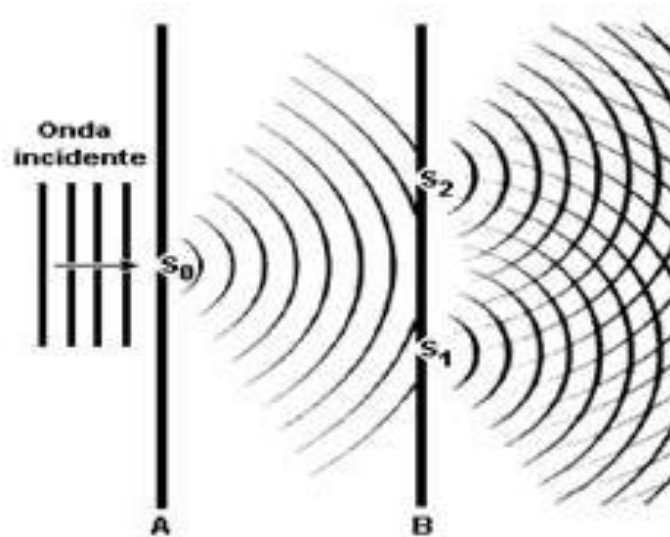
Imaginemos duas situações: uma pessoa falando atrás de uma parede e uma lâmpada acesa atrás de uma parede, como mostram as figuras:



No caso da fala, a pessoa que está do outro lado da parede conseguirá escutar o que está sendo dito, pois o som tem um comprimento de onda suficientemente grande

para contornar o muro. No caso da Lâmpada, a pessoa que está atrás do muro não conseguirá ver a lâmpada, pois o comprimento de onda da luz é muito pequeno e não consegue contornar obstáculos do tamanho de um muro.

A figura abaixo mostra o que ocorre com uma onda ao passar por um obstáculo:

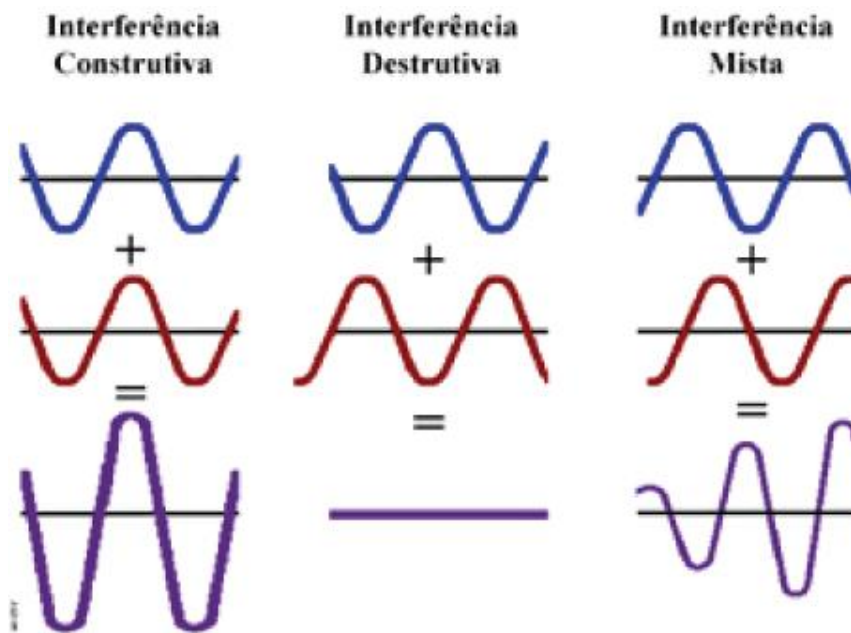


Após passar pelo obstáculo, a onda comporta-se como uma nova fonte que transmite a onda para todas as direções. Este fenômeno pode ser observado tanto no obstáculo A, como no obstáculo B.



Interferência

A interferência ocorre quando duas ou mais ondas de características semelhantes se sobrepõem mesmo espaço e ao mesmo tempo. Dependendo **da fase relativa** entre as ondas, a intensidade da onda resultante pode ser aumentada ou diminuída. O fenômeno da interferência pode ser observado quando estamos escutando uma estação de rádio e em certos locais o som se torna um ruído (em geral isto ocorre devido à interferência, há outros motivos dependendo da situação).



Interferência entre duas ondas; no primeiro caso as ondas estão em fase; no segundo caso as ondas estão fora de fase e no terceiro ocorre uma situação intermediária.

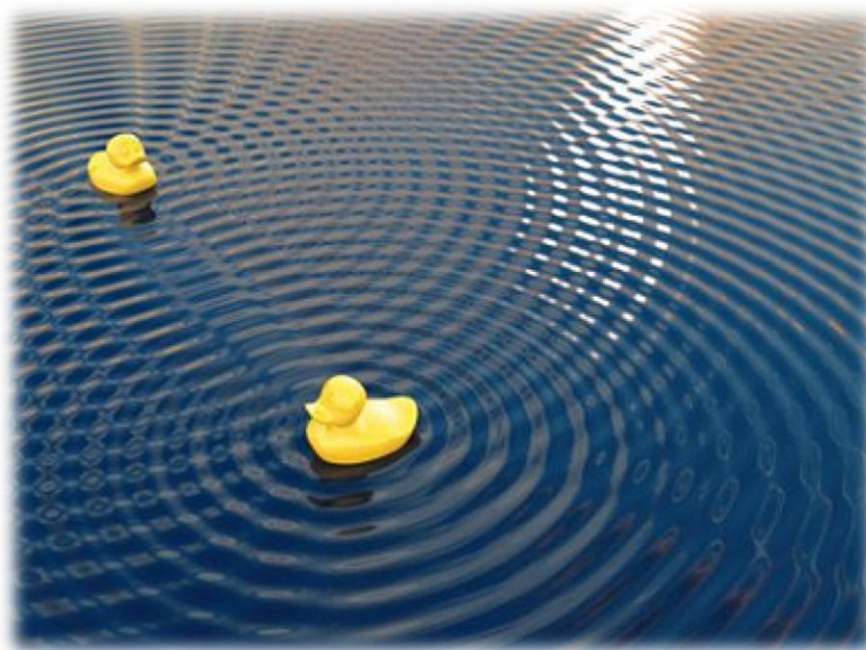


Figura de interferência de ondas na água. Padrão com máximos e mínimos

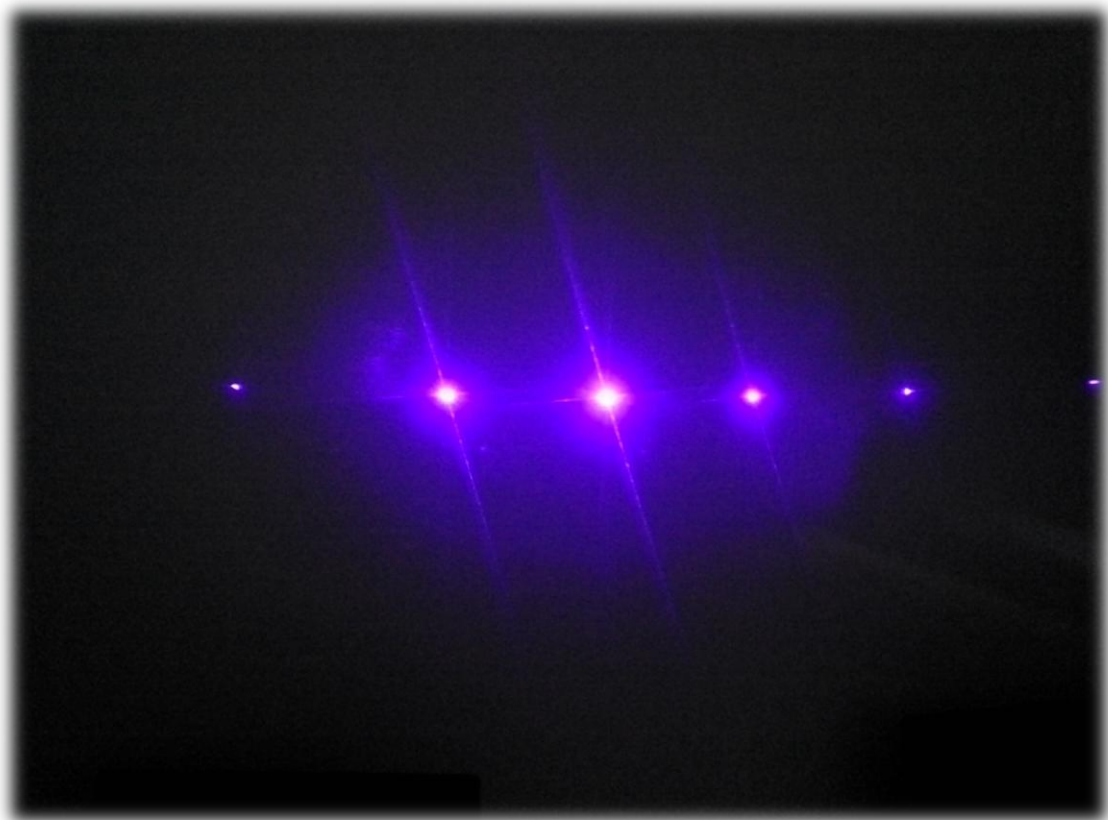


Imagem de interferência com laser que passa através de uma rede de difração

Observações importantes

Na perspectiva clássica, as ondas são caracterizadas como contínuas. Isto significa que estas poderiam ser “divididas” indefinidamente e nunca se obteria a unidade básica da qual são formadas. Além disso, na perspectiva teórica do final do século XIX e início do XX, as ondas precisariam de um meio material para se propagar: o som pode se propagar em meios sólidos líquidos e gasosos, mas não se propaga no espaço sideral, pois se trata de um meio demasiadamente rarefeito. Nesta visão, a luz e as demais ondas eletromagnéticas também deveriam se propagar em um determinado meio no espaço, o éter.

Uma característica que diferenciava de forma definitiva as ondas das partículas eram a interferência e a difração, fenômenos tipicamente de caráter ondulatório. Se duas partículas fossem ocupar o mesmo espaço ao mesmo tempo, elas deveriam colidir seguindo depois cada uma em uma nova direção e com uma nova velocidade, determinadas pelas leis de Newton. Assim, partículas não poderiam sofrer interferência ou difração. Por outro lado, cabe perceber que não se poderia alterar a velocidade de

propagação de uma onda em um determinado meio pela aplicação de uma força. Esta é determinada pelo tipo de onda, as propriedades físicas do meio de propagação e sua frequência.

Todas as características das ondas apresentadas acima podem ser determinadas matematicamente a partir da manipulação da **equação de onda**, de alguns princípios físicos, como o da **conservação de energia** e das condições de contorno.

Equação da onda: o comportamento de uma onda pode ser determinado a partir desta equação.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u$$

ELETROMAGNETISMO

Nos últimos duzentos anos, o modo de vida da humanidade transformou-se completamente. Dentre os diversos fatores históricos sociais e culturais que contribuíram para esta revolução, destaca-se a melhor compreensão dos fenômenos elétricos e magnéticos e suas aplicações tecnológicas; imagine viver em um mundo sem usar fontes de energia elétrica.

Fenômenos elétricos e magnéticos são conhecidos desde a antiguidade. A bússola foi inventada na China há cerca de dois mil anos. Todo o conhecimento sobre eletromagnetismo pode ser sintetizado nas equações de Maxwell e na lei da força de Lorentz. O desenvolvimento da teoria eletromagnética, no entanto, contou com a contribuição de diversos cientistas, tais como Luigi Galvani, Alessandro Volta, Michael Faraday, André-Marie Ampère, Heinrich Hertz e Georg Ohm³⁷.

Equações de Maxwell

*1 - Lei de Gauss para a eletricidade*³⁸

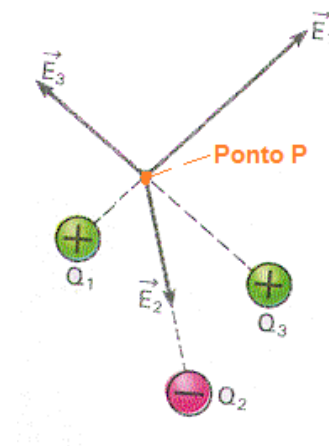
$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{int}}{\epsilon_0}$$

³⁷ Foram selecionados alguns nomes famosos e que estão homenageados em alguma unidade de medida (Volt, Ampère, Farad, Hertz e Ohm) ou produto (pilhas galvânicas).

³⁸As Equações de Maxwell estão apresentadas na forma integral e para o vácuo.

Para compreender o eletromagnetismo, podemos partir de alguns conhecimentos que temos sobre **cargas elétricas**. Teoricamente são postulados dois tipos de cargas elétricas: **positiva** e **negativa**. Cargas de sinais iguais se repelem, enquanto cargas de sinais opostos se atraem. A força de atração entre as cargas depende da quantidade de carga envolvida e da distância entre as cargas (aumenta com o aumento da quantidade de cargas e diminui com o aumento da distância).

Como, no entanto, duas cargas distantes uma da outra poderiam interagir? Para responder a esta pergunta, os físicos criaram o conceito de **Campo**. Assim, uma carga elétrica cria um **campo elétrico** que se estende pelo espaço e, ao interagir com uma segunda carga a uma certa distância, é esse campo que transmite uma força sobre esta segunda carga. O campo elétrico de uma carga é diferente em cada ponto do espaço, dependendo também da quantidade de carga que o gera e da posição relativa entre a carga e o ponto.



Campos elétricos de três cargas no Ponto P. Cada carga tem um campo diferente associado. Pode-se determinar um campo elétrico total, somando vetorialmente a contribuição de cada carga.

2 - Lei de Gauss para o Magnetismo

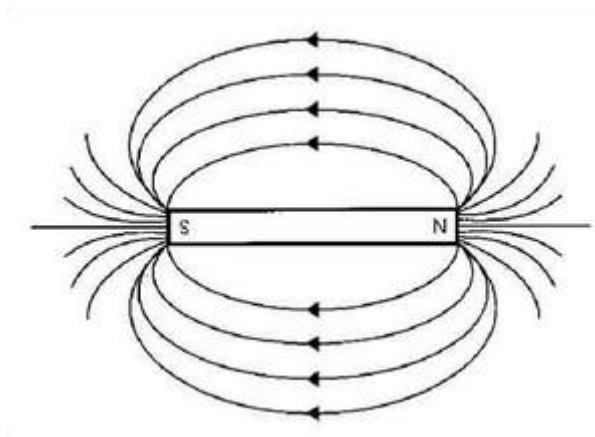
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

3 - Lei Ampère Maxwell

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{enc}$$

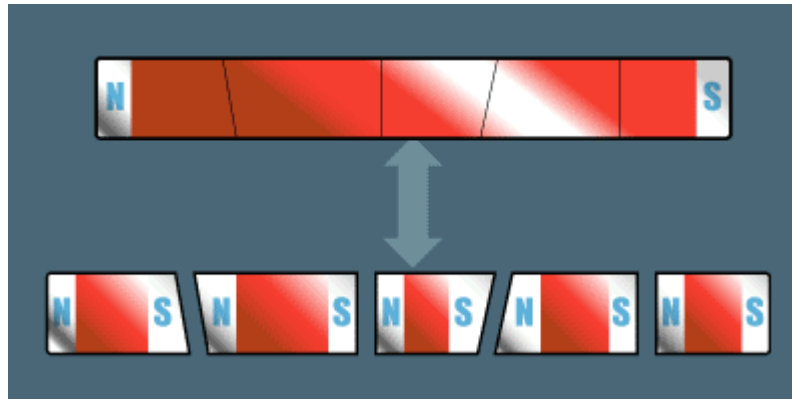
Os fenômenos magnéticos ocorrem principalmente devido ao **movimento das cargas elétricas**. Assim, cargas elétricas em movimento podem ser pensadas como fontes primordiais dos **campos magnéticos**. Os campos magnéticos exercem forças em outras cargas elétricas em movimento. Todos os materiais são formados por átomos que contém cargas elétricas positivas e negativas. Estas cargas elétricas não ficam fixas, mas se movimentam. Quando o movimento destas cargas é aleatório, os campos magnéticos gerados pelas diversas cargas acabam se anulando. No entanto, quando em presença de um campo magnético externo alguns tipos de alinhamento entre os movimentos das cargas dentro do objeto se estabelecem, ou seja, os objetos materiais apresentam propriedades magnéticas. Alguns desses objetos podem ser classificados como **ímãs**, que possuem propriedades magnéticas permanentes.

As características dos campos magnéticos nas extremidades de um ímã faz com que este acabe atraindo ou repelindo outros ímãs. Assim, constatou-se a existência de dois polos em um ímã que foram denominados **polo norte** e **polo sul**. Novamente, polos opostos se atraem e polos iguais se repelem. Cabe perceber que não existem polos magnéticos isolados. Qualquer objeto que tenha um polo norte, deve apresentar um polo sul. Quebrar um ímã gera novos ímãs, cada um com os dois polos.



Um ímã, seus polos e linhas³⁹ que indicam a direção e o sentido do campo magnético em diversas posições ao redor do ímã.

³⁹ Os campos elétrico e magnético são invisíveis. As linhas servem apenas para indicar algumas características deste campo.



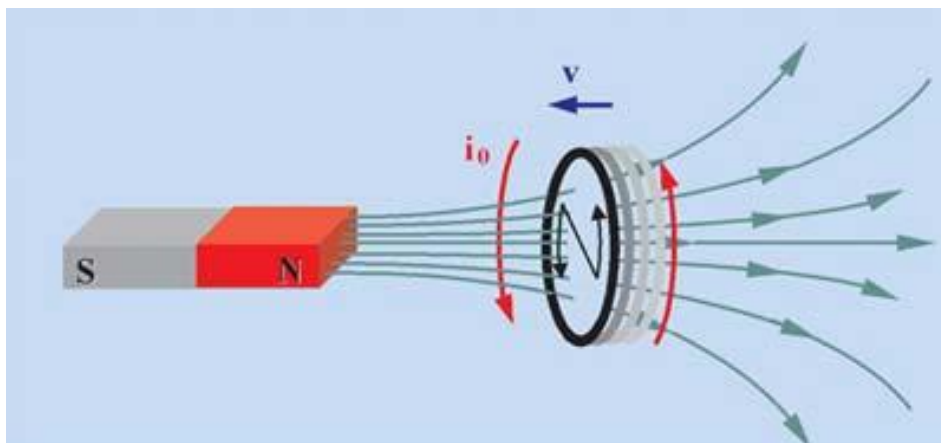
O que ocorre quando quebra-se um ímã em partes menores

4 – Lei de Faraday

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

A lei de Faraday trata sobre a possibilidade de criar-se uma corrente elétrica em um circuito fechado, a partir da manipulação de certas características magnéticas. Esta lei é fundamental para compreender-se o funcionamento de usinas elétricas, sejam elas hidrelétricas, eólicas, ou térmicas.

Pode-se analisar o campo magnético que atravessa uma determinada área. Esta grandeza é chamada de **fluxo magnético**. Quando o fluxo magnético dentro da área delimitada por um circuito varia no tempo, é induzida uma **corrente elétrica** neste.



Ao aproximar o anel do ímã, aumenta-se o fluxo magnético que atravessa o anel, induzindo uma corrente elétrica neste.

Ondas Eletromagnéticas

Uma manipulação das equações do eletromagnetismo gera as seguintes equações:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

Estas equações são similares a equação da onda apresentada na seção Ondulatória, onde \vec{E} e \vec{B} fazem, respectivamente, o papel de u . Além disto, ela indica que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo vale:

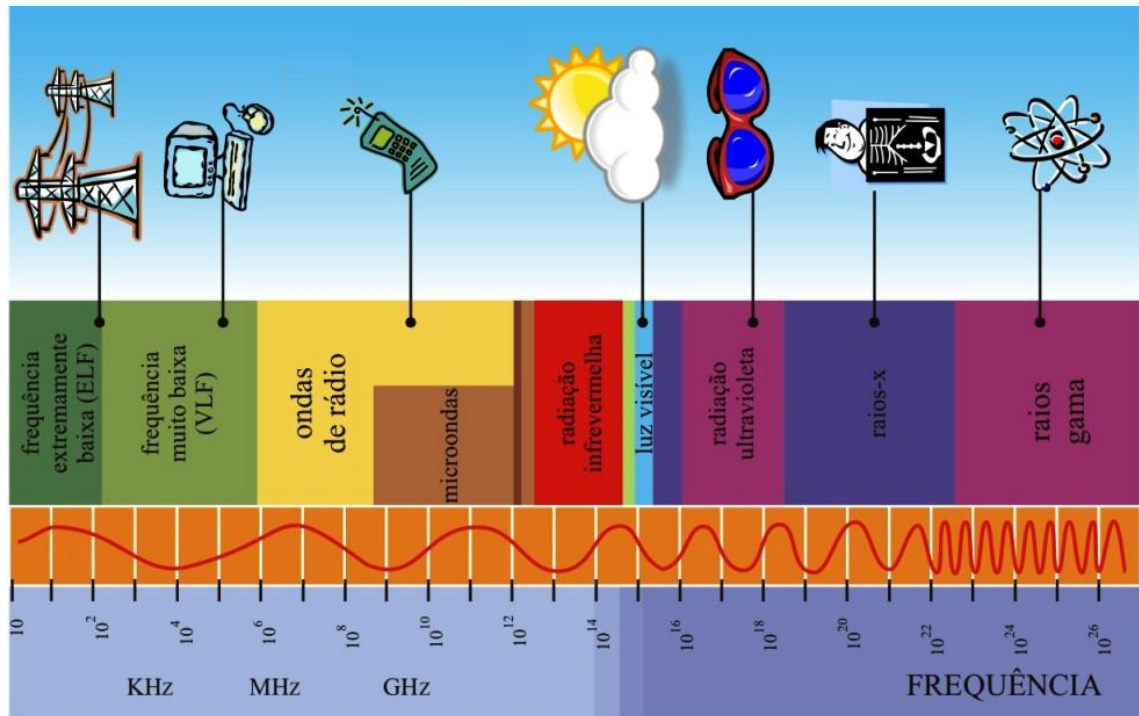
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

Essas equações preveem, entre outras coisas, que cargas elétricas oscilantes geram ondas eletromagnéticas⁴⁰. Maxwell chegou a esta conclusão pela análise das equações do eletromagnetismo e Hertz conseguiu observá-las alguns anos depois⁴¹.

Diferentes oscilações das cargas elétricas produzem ondas com frequências diferentes. Ondas eletromagnéticas de variadas frequências são importantíssimas em nosso dia-a-dia. A figura abaixo mostra o espectro de frequências das ondas eletromagnéticas e os nomes que estas recebem.

⁴⁰ Na verdade, pode-se mostrar que basta as cargas estarem aceleradas para emitirem radiação eletromagnética (que é constituída classicamente por superposição de ondas eletromagnéticas).

⁴¹ As ondas eletromagnéticas que Hertz produziu não eram visíveis, mas o fenômeno que ele observou estava de acordo com os resultados de Maxwell.



A constatação de que a luz era uma das muitas formas de radiação do espectro eletromagnético parecia determinar definitivamente que a luz era uma onda e comportava-se como tal. A disputa se a luz era composta de ondas ou partículas parecia ter chegado ao fim⁴². Há mais de 200 anos, Huygens e Newton haviam se colocado em lados opostos desta arena. No fim do século XIX, tudo indicava que Newton havia sido derrotado por nocaute.

A VELHA FÍSICA QUÂNTICA

O ano de 1900 é considerado por muitos, o marco fundamental da Física Quântica. Neste ano, Max Planck propôs, ainda que de maneira relutante, a quantização das ondas eletromagnéticas (da luz, por exemplo). Durante o primeiro quarto do século XX diversos fenômenos e experimentos apontavam para a possibilidade de a luz se comportar como partícula e as partículas se comportarem como ondas. Nesta seção discutiremos três destes experimentos: a radiação do corpo negro, o efeito fotoelétrico e o átomo de Bohr.

⁴² Esta disputa entre a natureza corpuscular ou ondulatória da luz remonta à época de Newton. As experiências de Young, em especial a da dupla fenda foram importantes na defesa da luz como onda.

Radiação do Corpo Negro

Todos os objetos emitem radiação eletromagnética. Sejam eles, pessoas, estrelas, sushis ou palitos de dente. Além disso, quando em um espaço com outros objetos, estes também absorvem e emitem radiação eletromagnética.

Pode-se afirmar que, de um modo geral, quanto maior a temperatura de um corpo, maior a quantidade de radiação eletromagnética⁴³ emitida por ele. Em um sistema fechado, onde estão presentes diversos objetos a diferentes temperaturas, os objetos com maior temperatura tendem a emitir mais radiação do que absorvem (diminuindo sua temperatura), enquanto os que têm menor temperatura tendem a absorver mais do que emitem (aumentando sua temperatura). Isso ocorre até que o equilíbrio é alcançado e todos os corpos atinjam a mesma temperatura, situação na qual todos emitem e absorvem a mesma quantidade de energia sob forma de radiação. A maioria dos objetos que vemos em nosso cotidiano emite radiação eletromagnética em frequências que não são visíveis ao olho humano (infravermelho). Desta forma, só podemos observá-los devido à luz que refletem de objetos que emitem luz visível (lâmpadas, velas, Sol).

É importante introduzir o conceito de *corpo negro*, que é um objeto idealizado. Ele tem a propriedade de absorver toda a radiação que nele incide (não reflete nada) e a forma como emite radiação depende apenas de sua temperatura. Não existem corpos negros ideais; porém, algumas características das lâmpadas incandescentes, do Sol e das estrelas podem ser estudadas a partir do modelo de corpo negro com boa precisão.



Metais em grandes temperaturas tornam-se incandescentes.

O modelo clássico para a radiação do corpo negro previa que este deveria emitir mais radiação nos menores comprimentos de onda (ou seja, maiores frequências). Os

⁴³ Esta pode ser quantificada pela energia total emitida pelo corpo sob forma de radiação eletromagnética.

resultados experimentais mostraram que isto não ocorria. Esta diferença entre os dados experimentais e o modelo, ficou conhecida como catástrofe do ultravioleta.

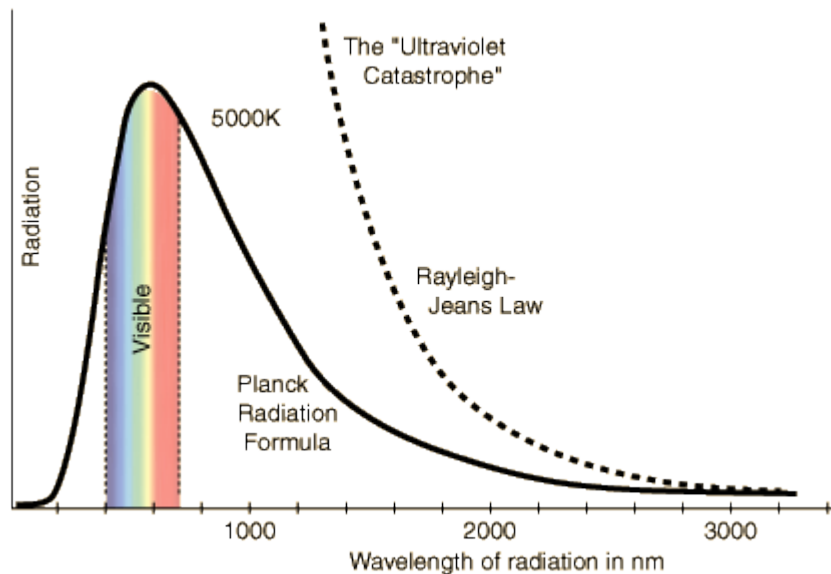


Gráfico da intensidade da radiação em função do comprimento de onda para um corpo a temperatura de 5000K. O modelo de Rayleigh-Jeans obtém resultados muito errados para comprimentos de onda pequenos.

No ano de 1900, Max Planck estudou o problema da radiação de corpo negro e propôs, como forma de resolvê-lo, que a radiação eletromagnética deveria ser emitida de forma quantizada, de modo que cada quantum tivesse uma determinada energia, dada pela relação:

$$E = h \cdot f$$

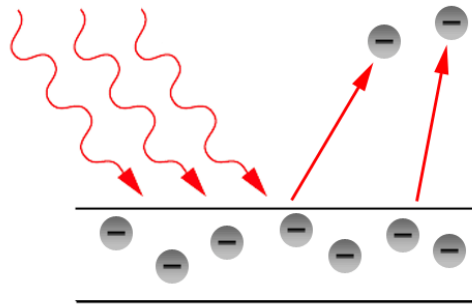
Sua fórmula relaciona a energia (E), com a frequência (f) de um quantum de radiação. O “h” é uma constante de proporcionalidade que vale $6,67 \times 10^{-34}$ J.s em unidades do sistema internacional (S.I). Em homenagem a seu criador, esta constante recebeu o nome de Constante de Planck e apresentará um valor inestimável ao longo do desenvolvimento da física quântica.

Efeito Fotoelétrico

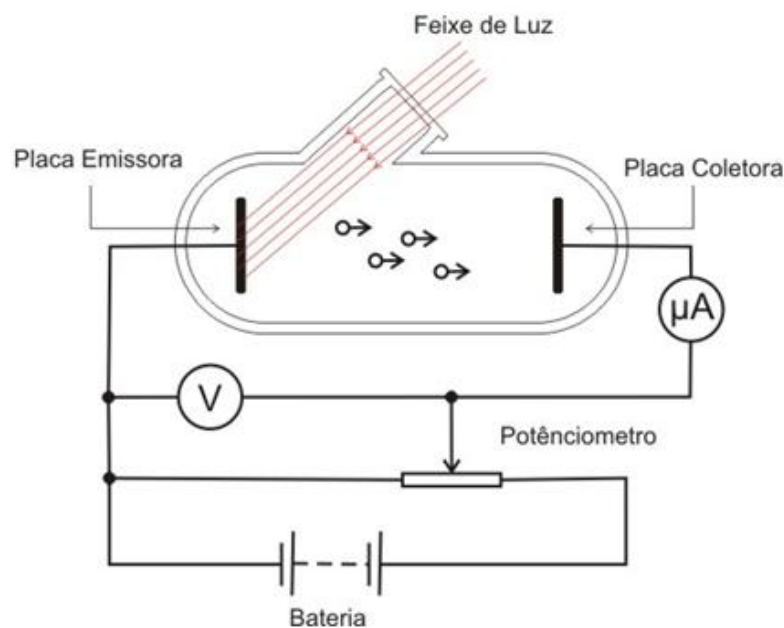
O efeito fotoelétrico foi percebido, pela primeira vez, por Heinrich Hertz, entre os anos de 1886 e 1887. Ele percebeu que a descarga elétrica entre dois eletrodos era facilitada ao se fazer incidir luz ultravioleta sobre um deles.

Pode-se entender o efeito fotoelétrico da seguinte maneira: ao incidir luz sobre um material, existe a possibilidade de que este libere elétrons de sua superfície. Para se tentar compreender este efeito tanto clássica, quanto quanticamente é preciso ter em

mente que (1) a luz transporta energia e (2) a emissão de elétrons de um material demanda energia; quanto maior a energia de ligação dos elétrons com o material, maior será a energia necessária para arrancá-los (lembrando das aulas de química, arrancar elétrons de metais alcalinos ou alcalino-terrosos demanda menos energia do que de não metais).



Efeito Fotoelétrico: a luz incidente arranca elétrons do material.



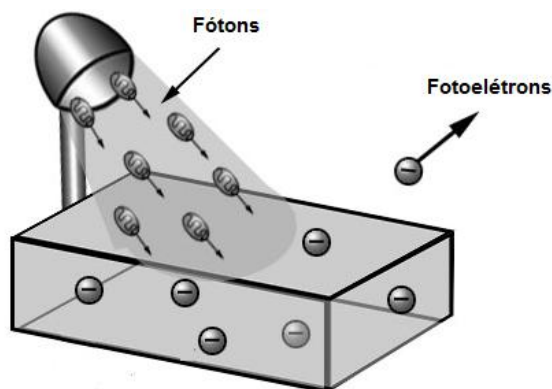
Experimento para estudo das características do efeito fotoelétrico.

De acordo com o modelo clássico para a luz, a energia da radiação incidente dependia apenas da intensidade desta. Assim, a cor (frequência) da luz incidente não deveria interferir no resultado da experiência. Além disto, imaginava-se que os elétrons fossem armazenando energia à medida que a luz incidisse no material. Isto implicava que deveria existir um tempo (que dependeria da intensidade da radiação) entre o momento da incidência do feixe de luz no material e a emissão de elétrons.

Os resultados experimentais mostraram que existia uma frequência mínima para a ocorrência do efeito fotoelétrico (esta frequência variava de material para material). Feixes de luz com frequência inferior a esta frequência mínima não provocavam o efeito fotoelétrico, mesmo que a intensidade da luz incidente fosse aumentada. Feixes de luz com frequência maior do que a frequência mínima provocavam o efeito fotoelétrico, mesmo que a intensidade da luz incidente fosse muito pequena. Outro resultado importante, era que a energia cinética máxima dos elétrons emitidos dependia apenas da frequência da luz incidente.

Para explicar estes resultados, Albert Einstein propôs um modelo corpuscular para a luz, baseado na quantização da energia da luz proposta por Max Planck. Neste modelo, a luz é formada por pequenos quanta de energia (atualmente conhecidos como fótons). A ocorrência do efeito fotoelétrico depende do resultado da “colisão” entre um fóton e um elétron. Se o fóton tem energia suficiente, o elétron é arrancado. Utilizando a equação proposta por Plank, $E = h \cdot f$, pode-se chegar na seguinte condição para a ocorrência do efeito fotoelétrico, $h \cdot f \geq \phi$, onde ϕ corresponde a energia de ligação entre o elétron e o material estudado (também chamada de **função trabalho**). Para calcular a energia cinética máxima dos elétrons emitidos, utiliza-se a relação:

$$h \cdot f = \phi + E_{c \max}$$



Modelo do efeito fotoelétrico, os fótons interagem 1 a 1 com os elétrons.

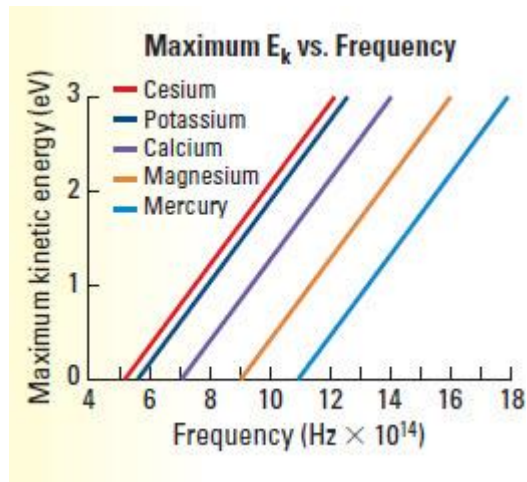
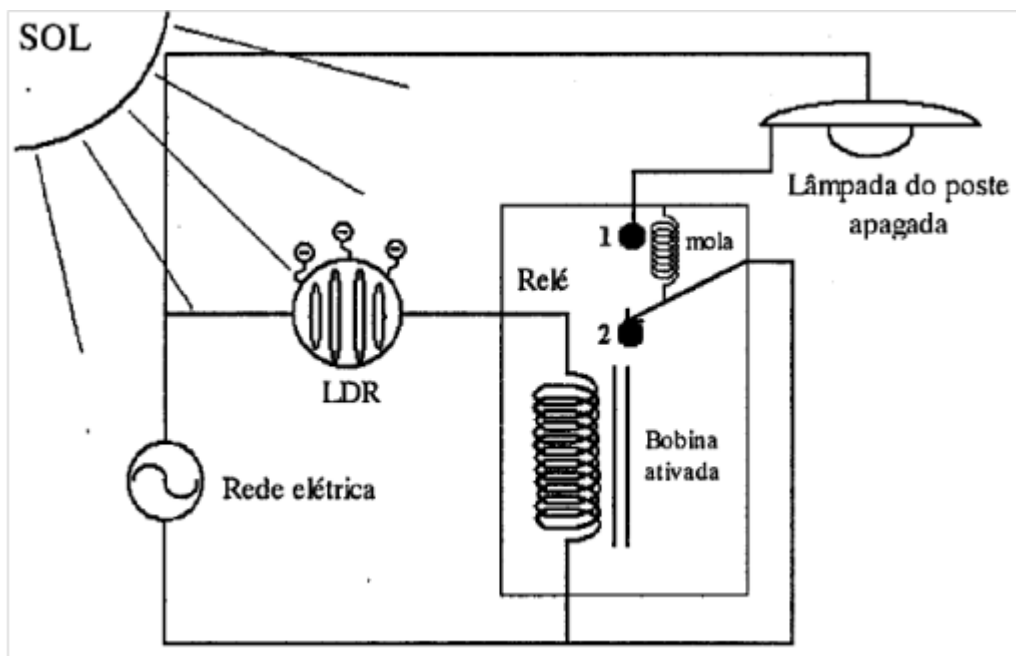
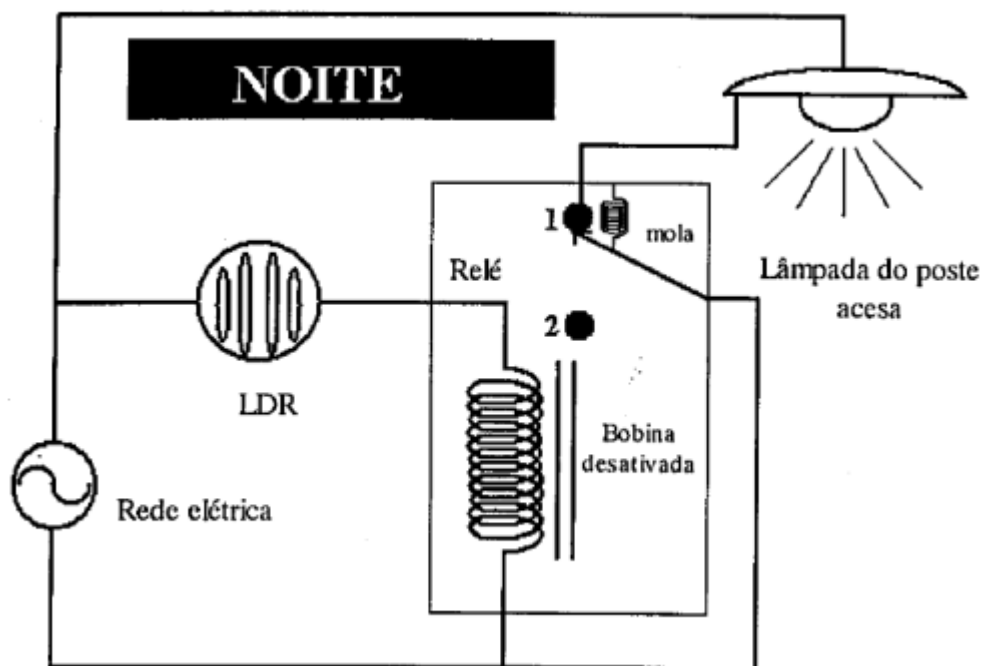


Gráfico que relaciona a frequência da luz incidente com a energia cinética máxima dos elétrons emitidos. Cada reta caracteriza um metal distinto. O início das retas indica a frequência mínima para a ocorrência do efeito.

O efeito fotoelétrico é amplamente utilizado como parte do funcionamento de diversos equipamentos. A iluminação pública (como garantir que as lâmpadas liguem somente à noite?), portas automáticas e sensores de presença são alguns exemplos de sistemas que utilizam o efeito fotoelétrico. Albert Einstein recebeu o prêmio Nobel no ano de 1921, devido às suas importantes contribuições à física teórica e, em especial, à sua contribuição na compreensão do efeito fotoelétrico.



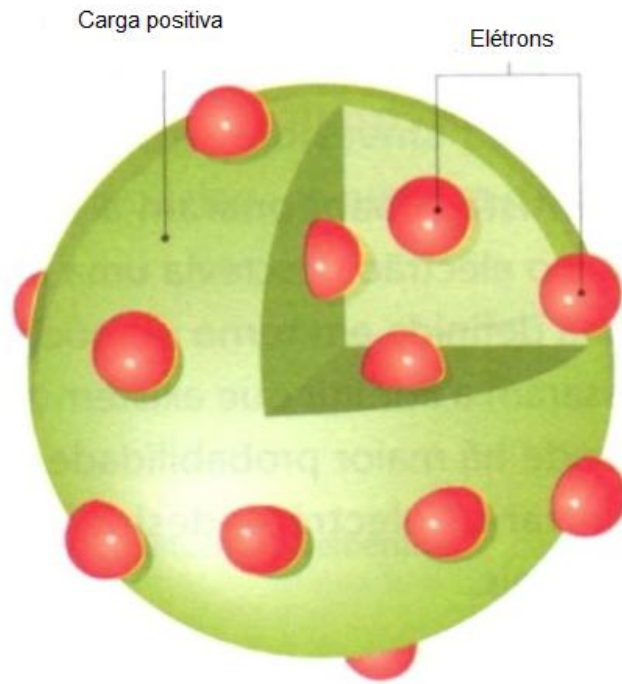


Circuito de iluminação pública. Durante o dia, o circuito permanece aberto, mantendo a luz desligada. À noite, o circuito fecha, ligando a luz. O LDR é um diodo cuja resistência varia dependendo da incidência de luz. A corrente que passa por ele é maior durante o dia do que à noite.

Átomo de Bohr

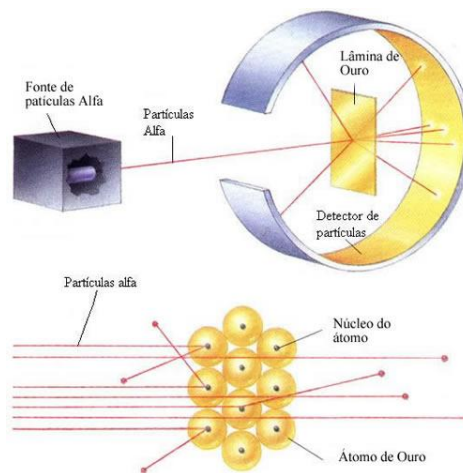
Desde a antiguidade, a humanidade busca compreender quais são os constituintes básicos da matéria. No século XVII, Robert Boyle definiu um **elemento químico** como sendo uma substância simples que não pode ser obtida da mistura de outras substâncias. Dalton, em 1803, propôs que os elementos químicos deveriam ser compostos por átomos destes elementos; existindo um átomo diferente para cada elemento. Já conhecendo as proporções nas quais os átomos se misturam, foi possível calcular a massa relativa destes átomos. Para Dalton, os átomos seriam pequenas bolas maciças, homogêneas e indestrutíveis. Seu modelo atômico ficou conhecido como “bola de bilhar”.

A primeira evidência experimental da existência do elétron, em 1897, fez com que Thomson propusesse um novo modelo para o átomo, uma vez que este deveria conter cargas elétricas positivas e negativas. Neste modelo, o átomo seria como um “pudim de passas”; os elétrons seriam pequenas bolinhas com carga negativa que estariam distribuídas em uma esfera de carga negativa.



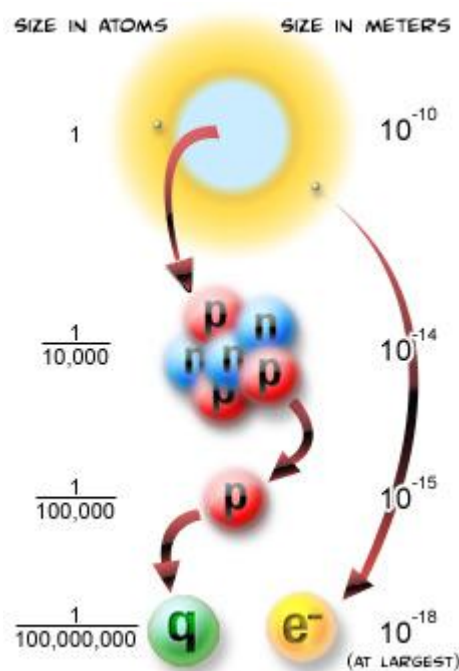
Modelo atômico de Thomson

Em 1911, Ernest Rutherford fez uma experiência de espalhamento de partículas α em uma folha de ouro. Pelo modelo de Thomson, todas as partículas deveriam atravessar a folha sofrendo uma pequena mudança de trajetória. Com o experimento, foi percebido que algumas partículas sofriam grandes mudanças na trajetória e, em certos casos, chegavam a retornar. Observar estes resultados foi para Rutherford, como dar um tiro de espingarda em uma folha de papel e este retornar. Assim, para explicar este resultado ele propôs que o átomo deveria ser composto de um pequeno núcleo e, ao redor, ficariam os elétrons.



Experiência de Rutherford: espalhamento de partículas α por uma folha de ouro

Os resultados de Rutherford dão forte suporte a um modelo teórico que assume que os átomos possuem um núcleo com carga positiva, possibilitando ainda estimar o tamanho aproximado deste núcleo. O núcleo de um átomo tem um tamanho aproximadamente 10.000 vezes menor do que o átomo completo. Isto significa que se o núcleo de um átomo tivesse a dimensão de uma bola de tênis (6,5 cm de diâmetro), os elétrons se distribuiriam em um espaço maior do que um estádio de futebol. O modelo atômico de Rutherford ficou conhecido como “sistema solar”, em que o núcleo representaria o Sol, enquanto os elétrons representariam os planetas que o circundam.

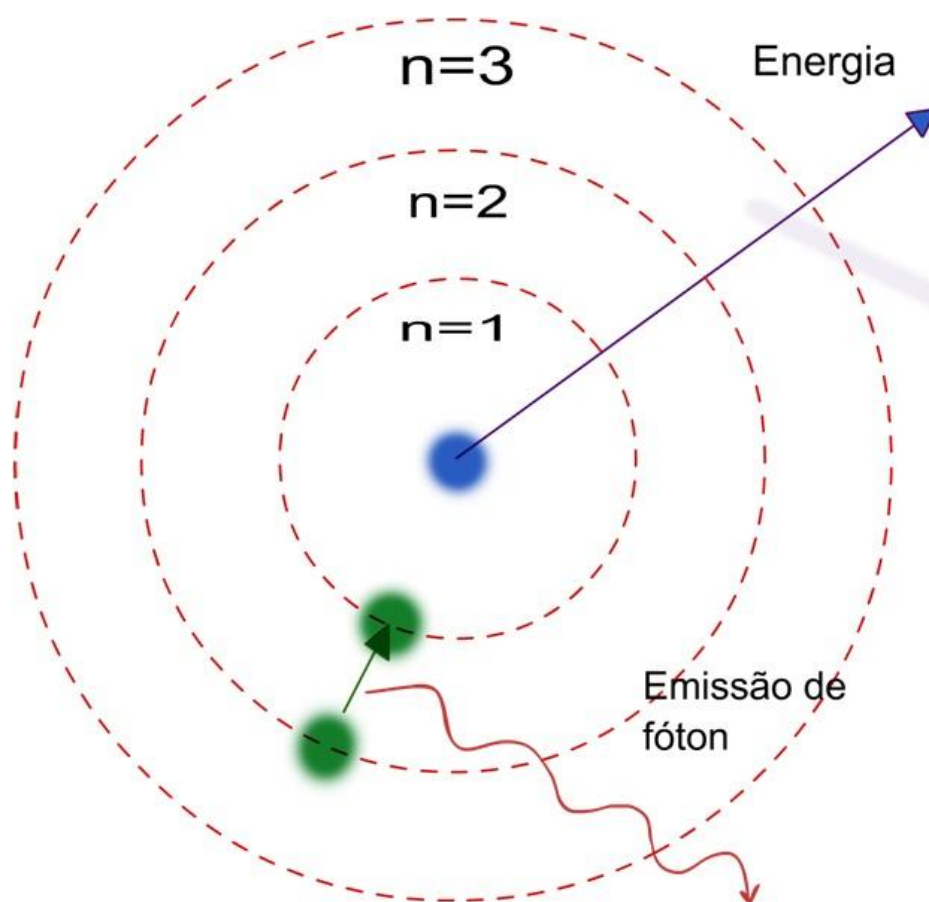


Escala de tamanhos; átomo, núcleo, próton, elétron.

O modelo atômico de Rutherford é, para a física clássica, simplesmente impossível. Qualquer situação de movimento dos elétrons em torno do núcleo exige que estes sejam acelerados. De acordo com as leis do eletromagnetismo clássico, cargas elétricas aceleradas emitem radiação e, portanto a energia dos elétrons deveria diminuir rapidamente até que estes caíssem sobre o núcleo. Desta forma, o tempo de vida de qualquer átomo deveria ser muito curto, o que não se verificava experimentalmente.

Para resolver parte deste problema, Bohr propôs que existiriam apenas algumas órbitas permitidas aos elétrons. Cada órbita teria uma energia bem definida e um elétron só poderia passar de uma órbita para outra se este recebesse uma quantidade

determinada de energia e fosse consequentemente para uma órbita de maior energia. Do contrário, deveria liberar energia fosse ir para uma órbita de menor energia. A energia recebida ou liberada deveria ter o valor exato necessário para o salto do elétron de uma órbita para outra.

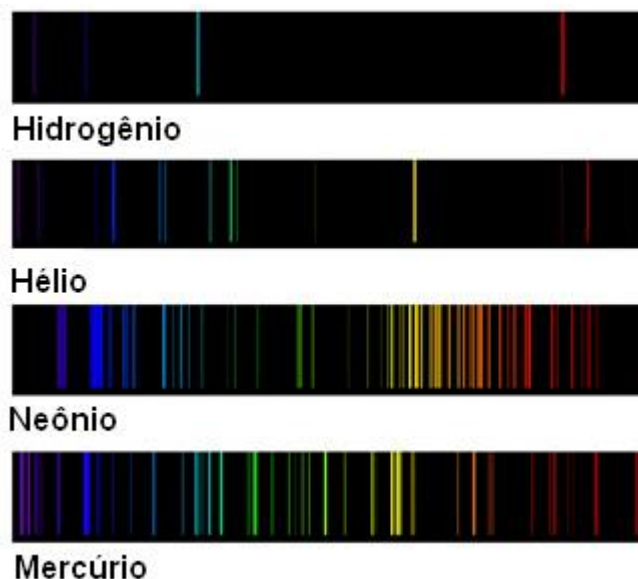


Modelo do átomo de Bohr. Cada órbita tem uma energia bem definida. Quanto mais afastada do núcleo, maior a energia. Em verde, observa-se que quando um elétron salta de uma órbita de maior energia para outra de menor energia ele emite um fóton (energia)

O modelo atômico de Bohr ajudou também na compreensão de outra questão que inquietava os físicos: os espectros de emissão e absorção dos elementos químicos⁴⁴. Especialmente a partir dos anos 1800, muitos estudos vinham sendo conduzidos na tentativa de compreender quais radiações eletromagnéticas (luzes) que diferentes elementos emitem e porquê. O modelo atômico de Bohr fornecia uma base para entender esse fenômeno. As linhas do espectro de emissão correspondiam às energias dos fótons que os elétrons podiam emitir ao passar de uma camada para outra. Ao

⁴⁴ O modelo funciona para átomos de um elétron, ou seja, hidrogênio e outros ionizados até que reste apenas um elétron. No entanto, pode ser usado como base para modelar níveis de energia de alguns átomos mais complexos (por exemplo, para explicar o espectro de raio X de alguns elementos).

aplicar sua teoria ao átomo de Hidrogênio, os resultados teóricos mostraram-se condizentes com os experimentos.



Espectros de emissão de diferentes elementos. Cabe lembrar, que além do espectro visível, os elementos também emitem radiações invisíveis, como infravermelho.

A NOVA FÍSICA QUÂNTICA

Os cientistas que propuseram teorias para explicar os experimentos da chamada “Velha Física Quântica” trouxeram importantes contribuições para a compreensão física do mundo. No entanto, suas teorias não conseguiam responder diversas questões: em que situações a luz se comporta como partícula e em quais como onda; como os elétrons orbitam o núcleo atômico sem cair sobre o mesmo ou por que as órbitas seriam quantizadas. Para respondê-las de forma consistente, foi necessário o desenvolvimento de uma nova teoria com premissas que rompem com a concepção de mundo proveniente da Física Clássica.

Essa teoria serviria de base para muitas das tecnologias que estavam por vir. Ela não seria apenas mais uma teoria da física, ela estava prestes a mudar completamente o modo como vemos o mundo.

Para compreender os fundamentos da teoria quântica, serão apresentadas nas próximas linhas e páginas algumas das principais mudanças que esta teoria causou na forma como precisamos compreender os fenômenos envolvendo entidades muito (muito mesmo!) pequenas.

Dualidade Onda-Partícula

Na física clássica, a separação entre fenômenos ondulatórios e corpusculares era clara. Átomos, moléculas, bicicletas e flautas doces (Assim como qualquer objeto com massa) apresentam comportamento corpuscular (Posição e Velocidade bem definidos – e portanto trajetórias bem definidas, colisões, etc). A luz e as demais ondas eletromagnéticas apresentam comportamento ondulatório (refração, difração, interferência, localização não definida – ondas se propagam por todo o espaço). Alguns experimentos nos princípios da física quântica mostraram que esta separação não poderia perdurar; no efeito fotoelétrico a luz se comporta como partícula e na difração de elétrons os elétrons se comportam como ondas.

Na nova física quântica, evita-se utilizar os termos onda e partícula para descrever elétrons, fótons, átomos ou outros objetos de estudo. Uma nomenclatura interessante é chamá-los de **objetos quânticos**. Assim, o objeto quântico fóton, comporta-se como uma onda ao realizar-se o experimento da dupla fenda de Young (que forma um padrão de interferência em um anteparo), mas este mesmo objeto quântico comporta-se como partícula ao colidir com uma placa de metal arrancando um elétron da mesma (Efeito Fotoelétrico).

As coisas se tornam ainda mais estranhas, quando observamos que estes objetos podem apresentar, em certas situações, um comportamento que é parcialmente corpuscular e parcialmente ondulatório (nunca totalmente corpuscular e totalmente ondulatório ao mesmo tempo) (esta característica será aprofundada no estudo do interferômetro de Mach-Zehnder).

LIGHT IS A
WAVE!

O que é a luz, afinal?

Determinismo X Probabilidades

Na física clássica, ao se determinar um objeto de estudo, se são conhecidas as condições iniciais deste objeto, assim como todas as interações que este objeto sofre pela proximidade com outros corpos (Forças gravitacionais, elétricas, ...), pode se determinar com certeza a trajetória que este objeto descreverá, como varia sua velocidade ao longo do tempo, assim como outras características de interesse.

As equações utilizadas na descrição dos Movimentos Retilíneos Uniformemente Variados são um exemplo:

$$X_f = X_i + v_i \cdot t + \frac{at^2}{2}$$

$$v_f = v_i + a \cdot t$$

A primeira equação descreve a posição do móvel em qualquer instante de tempo, enquanto a segunda equação descreve a velocidade do mesmo em qualquer instante também.

No estudo de objetos quânticos, a determinação da posição, do momento linear e de outras características passa a ser um processo probabilístico. Se um cientista decidir medir a posição de um elétron em um átomo de hidrogênio, por exemplo, ele não pode afirmar antes da medida qual a posição do elétron: o que ele sabe é que existem regiões que este elétron pode ocupar, cada uma com uma probabilidade diferente.

O comportamento quântico torna-se ainda mais bizarro pelo fato de que não apenas o cientista não consegue determinar de antemão a posição do elétron, como o

comportamento observado do átomo é consistente com o esperado se o elétron estivesse **distribuído** em torno do núcleo. Em outras palavras, ele se comporta como se ocupasse todas as posições possíveis ao mesmo tempo (até o momento da medição, quando ele passa a ser localizado).

















	s (l=0)	p (l=1)	d (l=2)	f (l=3)
n=1	 m=0			
n=2	 m=0	 m=-1 m=0 m=1		
n=3	 m=0	 m=-1 m=0 m=1	 m=-2 m=-1 m=0 m=1 m=2	
n=4	 m=0	 m=-1 m=0 m=1	 m=-2 m=-1 m=0 m=1 m=2	 m=-3 m=-2 m=-1 m=0 m=1 m=2 m=3
n=5	 m=0	 m=-1 m=0 m=1	 m=-2 m=-1 m=0 m=1 m=2	...
n=6	 m=0	 m=-1 m=0 m=1
n=7	 m=0

Ilustração dos orbitais eletrônicos; indicam a região em que o elétron pode ser encontrado, conhecidos os números quânticos que o representam

Ao incidir luz sobre um divisor de feixe⁴⁵, observa-se que parte da luz é transmitida e parte da luz é refletida. Ao tratarmos de um fóton único, não se pode esperar que parte do fóton seja transmitida e parte do fóton seja refletida. Ao colocarmos medidores para determinar se o fóton foi refletido ou transmitido, haverá certa probabilidade de encontrá-lo em cada situação. Ou o fóton é completamente transmitido ou completamente refletido. O comportamento mais bizarro ocorre, no entanto, quando não é colocado nenhum instrumento que possa determinar se ele foi refletido ou transmitido; neste caso o fóton comporta-se *como se* tivesse sido transmitido e refletido.

⁴⁵ Dispositivo óptico que reflete uma porção da energia da onda e transmite a porção restante (supondo o caso ideal em que ele não absorve parte dessa energia).

As características da física quântica apresentadas neste texto são apenas uma introdução a uma série de outras características que serão estudadas e apresentadas em outros textos.