

UM LEVANTAMENTO DO APRENDIZADO DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA EM CURSOS DE GRADUAÇÃO

A SURVEY OF WAVE-PARTICLE DUALITY LEARNING AT A UNIVERSITY COURSE

***Bruna Graziela Garcia Potenza¹, Pablo Teruo Siguematsu, Maria Regina Dubeux Kawamura, Maria José Bechara**

Instituto de Física – Universidade de São Paulo

Resumo

Neste trabalho é apresentado um levantamento do ensino e do aprendizado da dualidade onda-partícula, um tema central na construção da física quântica, de alunos recém aprovados em disciplinas introdutórias de Física Moderna dos cursos de licenciatura e bacharelado do Instituto de Física da USP. O diagnóstico do processo de ensino-aprendizagem estudado permitiu a compreensão dos limites do aprendizado do tema em uma primeira apresentação, e indica tipos de intervenções com possibilidades de um aprendizado significativo.

Palavras-chave: Ensino-aprendizagem, Física Moderna na graduação, Formação de professores.

Abstract

This work presents a survey of teaching and learning process of wave-particle duality, which is a central theme in the construction of quantum Physics, of students who had already passed through the introductory course of Modern Physics at the Institute of Physics of the University of São Paulo, Brazil. The diagnostic of the teaching-learning process permits the comprehension of the limits of learning the subject in a first presentation and indicates types of interventions with a potential meaningful learning.

Keywords: Learning-teaching, Modern Physics, Teacher's formation.

Introdução

Um estudo sobre o ensino-aprendizagem de conceitos centrais de física quântica, como a dualidade da radiação eletromagnética e das partículas da matéria, nas disciplinas introdutórias de Física Moderna e contemporânea, é importante, no ensino superior, por várias razões. A primeira delas é conhecer o ensino e a efetiva aprendizagem destes conceitos pela sua relevância científica, e por ser o arcabouço de todo o conhecimento gerado nas ciências físicas a partir do século XX. No caso

¹ E-mail: bruna.potenza@usp.br

dos graduados em Física é indispensável que conheçam os fundamentos de Física quântica em condições de entender o mundo através deste arcabouço, e de acompanhar e/ou participar da evolução da ciência e da tecnologia a ela associada. Para os graduados no bacharelado, que vão trabalhar em pesquisa ou em desenvolvimento de novas tecnologias, esses conceitos básicos são indispensáveis para uma compreensão da ciência e suas aplicações para além do formalismo matemático e/ou da experimentação do seu trabalho específico. Aos graduados da Licenciatura, que vão ensinar ou divulgar as ciências físicas, é indispensável uma base sólida neste conhecimento básico para compreender o mundo natural e tecnológico, segundo a visão das ciências naturais. Esta base é indispensável para em seu trabalho futuro, adequar tais conhecimentos para serem compartilhados com cidadãos em geral, contribuindo para uma formação científica que permita também às pessoas que não trabalhem com ciências, uma melhor compreensão do mundo, e a tomada de decisões em questões de sua vida e da sociedade que envolva as ciências físicas.

Como tem sido exaustivamente repetido, a Física Moderna não é ainda tratada nos níveis fundamental e médio do ensino de forma minimamente satisfatória (Ostermann, 2002), embora já tenha presença demarcada nos livros didáticos de ensino médio mais recentes. É nosso entendimento que, a insegurança dos professores e divulgadores de ciências em seu conhecimento no assunto, é o mais importante fator desta situação. Assim, aprofundar o ensino-aprendizado desse conceito no ensino superior pode trazer importantes contribuições para a superação dos problemas enfrentados nos demais níveis de ensino.

Com esta visão o presente trabalho configura-se como um diagnóstico de um processo de ensino-aprendizagem acerca do tema, permitindo a compreensão dos limites desse processo, e de mudanças eventualmente necessárias.

O trabalho apresenta um levantamento realizado em 2007, acerca do aprendizado do conceito da dualidade onda-partícula de por 76 alunos recém aprovados nas disciplinas Física Moderna I e Física V, introdutórias da Física Quântica nos cursos de licenciatura e bacharelado, respectivamente, no Instituto de Física da USP. Estes dois cursos são diferenciados desde o ingresso do aluno na instituição por possuírem diferentes objetivos e, no que concerne às disciplinas citadas, apesar de possuírem ementas praticamente idênticas, sua abordagem leva em conta o perfil do profissional que se quer formar.

Este levantamento insere-se em um projeto mais amplo que busca também a produção de material didático auxiliar e de atividades sobre o tema para um ensino significativo. E por isto inclui, além de conhecimentos acerca da dualidade, aqui apresentado, aspectos que julgamos importantes no processo do ensino-aprendizagem como: materiais didáticos utilizados, os temas e enfoques deles nas disciplinas, as percepções dos estudantes sobre o seu aprendizado conceitual e formal. Estes outros elementos foram utilizados na análise do aprendizado, mas não estão detalhados no presente trabalho.

Na avaliação do conhecimento focamos na significação do conceito da dualidade onda-partícula, em que “entes físicos” ela existe, bem como na descrição de um fenômeno físico que sugira o caráter corpuscular no caso da radiação eletromagnética, e diversas formas de representação desse fenômeno.

Apesar de ter sido intensificada nas últimas décadas a preocupação com o aprendizado dos temas de Física Moderna no Ensino Médio, nos parece que ela fica

mais restrita à formação de professores já no exercício da profissão, sem maiores investigações sobre o aprendizado nos cursos de graduação que formam os professores. Uma revisão bibliográfica do início da década (Greca e Moreira, 2001), aponta neste sentido, uma vez que há apenas dois projetos de pesquisa sobre cursos de graduação, sendo que apenas um se refere a graduandos em Física (Johnston, Crawford e Fletcher, 1998), e este tem por objetivo o entendimento de modelos mentais usados pelos alunos em temas da Física Moderna, com questões e análises de diferente natureza das apresentadas nesse trabalho.

Metodologia

O levantamento do conhecimento sobre a dualidade onda-partícula por parte dos estudantes foi feito, em 2007, através de um questionário respondido voluntariamente por 76 alunos aprovados nas disciplinas mencionadas, a maioria deles tendo concluído aquelas disciplinas no semestre imediatamente anterior à aplicação do questionário.

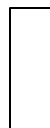
O questionário foi estruturado em 4 blocos diferentes em termos do que se pretendia investigar. O primeiro bloco tratava dos materiais didáticos efetivamente utilizados nas disciplinas e das avaliações e percepções dos alunos em relação ao próprio aprendizado nelas.

O levantamento dos temas que os alunos consideraram mais relevantes no enfoque dado à disciplina era o objetivo do segundo bloco, e foi proposto na seguinte forma: *Enumere o que você aprendeu de mais relevante, em termos de conceitos, fenômenos, idéias, técnicas, etc.*

O terceiro bloco, incluindo quatro (4) questões, visava avaliar o entendimento no tema dualidade onda-partícula, central nesse trabalho:

1. *Se você tivesse que explicar aos alunos ingressantes no curso, em poucas linhas, o que a Física entende por dualidade onda-partícula, o que diria?*

2. *Represente um fenômeno da interação da radiação eletromagnética com a matéria na qual se mostre o caráter de partícula da radiação, à sua escolha, deixando claro: quem interage com a matéria, se há alguma modificação na estrutura dela, e quem sai da matéria após a interação.*



Matéria

3. *Escreva a equação de conservação de energia do fenômeno esquematizado na figura acima, do ponto de vista da física quântica, sem deixar de mencionar os termos de energia que foram desprezados por serem pequenos, se este for o caso.*

4. *Partindo dos conceitos de física clássica, como se explicaria, ou por que não se explicaria o fenômeno que você escolheu?*

Havia ainda um espaço para que os estudantes sugerissem mudanças nas disciplinas, que pode ser considerado como um quarto bloco.

O presente trabalho foca nos resultados do segundo e terceiro blocos, ainda que incluindo na análise possíveis subsídios fornecidos pelos demais. Ou seja, ele

trata dos temas considerados relevantes pelos alunos e da avaliação de seu aprendizado acerca do caráter dual da radiação eletromagnética e da matéria.

Ainda que complementar, os resultados do bloco inicial (Potenza e Bechara, 2008) mostraram que os alunos, em sua totalidade, utilizaram pelo menos um livro texto na disciplina cursada, a quase a totalidade trabalhou nas questões propostas pelos docentes, e grande parte tinha avaliação positiva da disciplina. De modo geral, avaliaram a disciplina (através de notas) mais útil do que agradável, e a utilidade era apontada em relação aos seus objetivos pessoais, principalmente de continuidade do curso e/ou profissionais futuros. Também os estudantes deram nota mais alta à contribuição da disciplina no aspecto conceitual do que no formal de sua formação.

O levantamento dos temas relevantes é analisado em conjunto com o aprendizado no tema porque entendemos haver uma relação direta entre o que se aprende de um tema com a relevância dada a ele.

Na avaliação do conhecimento sobre o tema busca-se diferentes aspectos: a capacidade de sintetizar o conceito em poucas palavras (questão 1) e o entendimento de um fenômeno, de escolha do estudante, olhado em diversas facetas, associado ao aspecto corpuscular da radiação eletromagnética em sua interação com a matéria. Em relação ao fenômeno físico, avaliamos: a representação esquemática do processo básico da interação (questão 2); a quantificação ou formalização em termos da equação da conservação de energia no processo (questão 3), e o discernimento em relação à necessária mudança na concepção clássica da física para descrever o fenômeno escolhido pelo estudante (questão 4). A escolha do fenômeno pelos estudantes visava ser indicativa do processo de ensino-aprendizado.

Apresentaremos, inicialmente, os resultados do levantamento dos temas relevantes (2º. bloco) e a seguir os resultados de cada uma das quatro questões do terceiro bloco (conhecimento no tema da dualidade), juntamente com uma correlação entre os resultados das questões deste bloco.

Cabe ressaltar que os resultados e análises apresentados englobam todos os estudantes, apesar de reconhecermos distinções entre os objetivos dos cursos de bacharelado e licenciatura em Física, e de haver carga horária de aulas distinta nas disciplinas (os alunos da licenciatura têm quatro aulas semanais de 50 minutos, e os bacharelados, 06 aulas). Algumas diferenças aparecem em análise mais detalhada (Potenza e Bechara, 2008), e serão citadas na apresentação dos resultados.

Resultados

O levantamento dos temas considerados relevantes para os alunos depois de cursarem as disciplinas (2º. bloco) foi feito em aberto, mas explicitamente sugere alguns aspectos: conceitos, fenômenos, idéias, técnicas, etc., e tinha por objetivo captar as abordagens dadas e/ou assimiladas pelos estudantes.

Em nossa análise, identificamos os vários aspectos explicitados nas repostas, definindo categorias (de síntese) de forma a expressar os termos usados pelos próprios estudantes. Por se tratar de uma questão discursiva há variação na quantidade dos diferentes aspectos apontados por cada aluno. Por isso, os gráficos não estão apresentados em termos de percentual de alunos, mas do número de vezes que ocorreram as citações.

Dos 76 estudantes que responderam ao questionário, apenas 06, 8% do total de alunos, deixaram essa questão em branco, o que nos leva a classificar a questão como de boa receptividade entre os alunos. A dualidade onda-partícula é o conceito que aparece em maior número, de acordo com o apresentado na Figura 1, o que corresponde a aproximadamente 26% do total, superando conceitos como a quantização e o Princípio de Incerteza. Mas por outro lado é um percentual pequeno de estudantes que entende ser este um conceito central da Física Moderna.

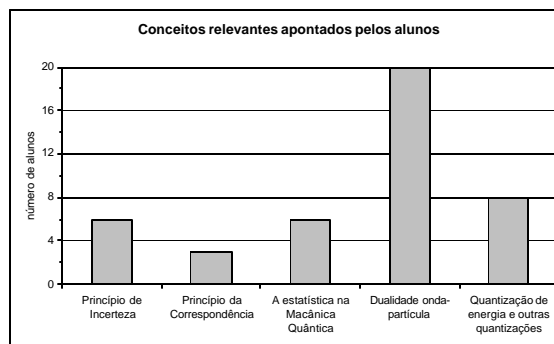


Figura 1- Conceitos relevantes das disciplinas segundo os estudantes.

Entre os fenômenos apontados pelos alunos como mais relevantes, quantificados na Figura 2, por outro lado, praticamente todos são apresentados nos textos/disciplinas como evidência da existência de fótons na radiação eletromagnética, ou seja, do caráter dual da radiação eletromagnética, proposta por Einstein. Mesmo a radiação de corpo negro na formulação de Planck, que é introduzida no início da disciplina como a primeira quantização na Física, é retomada como evidência do caráter corpuscular da radiação em alguns textos e, na abordagem de alguns docentes.

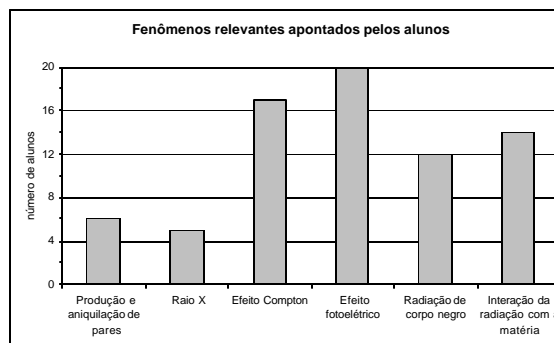


Figura 2- Fenômenos relevantes das disciplinas segundo os estudantes.

Dentre as respostas percebemos três padrões sobre o que classificamos como “idéias” relevantes: “Modelo de Matéria”, com 4 citações; “Mudança de Paradigma” com 12, e “Modelos Atômicos” com 9. Houve um grupo grande de estudantes, 29 (38%), que citou “Aplicações da Equação de Schroedinger”, que classificamos como “técnicas” relevantes. Uma resposta que ficou claramente diferenciado entre os alunos de licenciatura e de bacharelado foi a citação da “técnica” feita quase que na totalidade pelos estudantes de bacharelado.

Há, entretanto, citações de aspectos muito específicos e com enorme dispersão, e por isto não constam da figura que apresenta os dados com mais de

três citações. O que denota dificuldade do estudante na percepção do que é mais geral e fundamental dentre tudo

o que lhe foi apresentado.

As respostas sobre relevância podem estar em sintonia com as abordagens nas disciplinas. Em entrevistas, três docentes que ministraram uma ou as duas disciplinas nos últimos semestres, quando perguntados sobre suas ênfases na ementa, responderam da seguinte forma: um disse que dá igual ênfase a todos os conteúdos da ementa (que explicaria muitas citações de temas específicos, de forma difusa); um segundo afirmou que trata dos temas da ementa visando mostrar a estrutura da matéria, o caráter dual da radiação e da matéria e as diversas quantizações (que explicaria os “conceitos” e as “idéias” apontadas como relevantes); e um terceiro citou ênfase nas aplicações da equação de Schrodinger (que daria conta das citações de “técnicas” relevantes). Em particular este último ministrou a disciplina apenas para estudantes do bacharelado.

Em relação ao conhecimento no tema dualidade onda-partícula (3º bloco), a capacidade de síntese do conceito foi feita através de uma explicação simples para estudantes ingressantes nos cursos de Física (questão 2). A expectativa é que conceituassem que os “entes” do universo físico, radiação (onda) eletromagnética e a partículas da matéria, têm caráter de onda e de partícula. E que complementassem dizendo da complementaridade deste caráter duplo, no sentido que não se mostram ambos, a onda e a partícula, em um mesmo experimento.

A grande maioria dos 76 estudantes (65-88%) aderiu à questão, com apenas 9(12%) respostas em branco, como mostra a Figura 3. Um total de 11(14%) alunos deu respostas incorretas, e 56(74%) estudantes deram algum tipo de explicação correta.

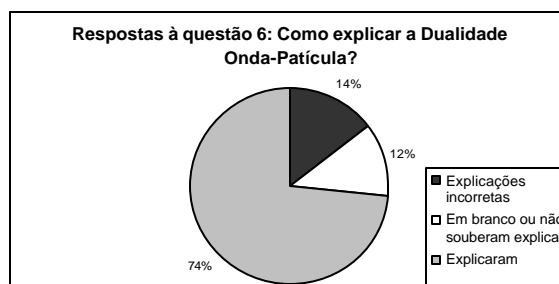


Figura 3 - Classificação das respostas cerca da Dualidade Onda-Partícula

As respostas dos alunos foram analisadas em termos da citação de cada um dos dois aspectos: a conceituação do caráter dual, e a natureza complementar da dualidade. E como as respostas nem sempre explicitaram a dualidade como característica de ambas, radiação eletromagnética e partículas de matéria, elas foram separadas nas que mencionaram explicitamente ambas, ou apenas a radiação eletromagnética, ou apenas as partículas de matéria.

Entre as respostas classificadas como incorretas há algumas (poucas) que nos pareceu conceituarem a dualidade no sentido inverso ao da complementaridade, como por exemplo: (FV26) “O fato de partículas fundamentais se comportarem como partículas e onda ao mesmo tempo”; e outras tantas parecem entender a dualidade não como característica da radiação, revelada em observação específica, mas das medidas em si, como a fala: (FV6) “Quando utilizamos métodos de medição por

partículas, vemos partículas. Se utilizamos métodos de onda, vemos ondas”. Estes exemplos são ilustrativos de duas coisas: como a clareza de idéias e a precisão nas palavras são necessárias para se expressar adequadamente um conceito em Física, e das dificuldades na classificação de algumas respostas, que podem dar margem ao entendimento diferente do que o aluno quis expressar, pelo uso de linguagem frouxa.

Em relação à conceituação da dualidade onda-partícula obtivemos os resultados mostrados na figura 4.

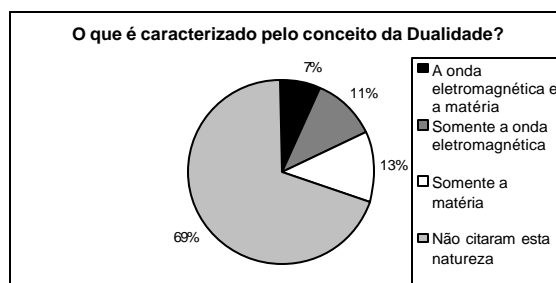


Figura 4 - Caracterização da Dualidade Onda-Partícula

Dentre os 56 alunos que explicaram a dualidade, 17 (31%) a conceituaram no sentido definido acima como correto, mas apenas 4 (7%) atribuíram o caráter dual tanto à radiação quanto às partículas de matéria. A grande maioria, 39 alunos (69%), não se arriscou a expressar esta conceituação em uma frase.

Uma resposta ilustrativa da conceituação citando exclusivamente as partículas da matéria é a seguinte: (FM23) “podemos considerar a matéria como onda ou partícula dependendo do que estamos analisando, como interferência e difração (ondas), ou colisões (matéria)”. No grupo dos que citam o caráter dual explicitando apenas a radiação eletromagnética, uma frase ilustrativa é a seguinte: (FV23) “A dualidade onda-partícula é uma característica intrínseca das ondas eletromagnéticas, que dependendo do experimento realizado podem assumir o caráter de onda ou de partícula.”

A grande maioria dos estudantes explicaria aos colegas ingressantes o caráter dual através do princípio de complementaridade, como mostra a Figura 5.

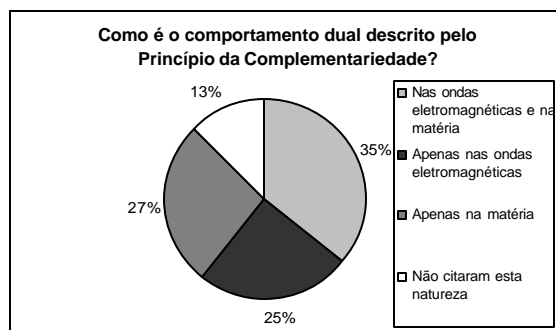


Figura 5 - A complementaridade do caráter dual

A maioria dos estudantes (20 alunos - 35%) explicou corretamente o sentido complementar, ou seja, um ente pode apresentar um caráter corpuscular em alguns eventos físicos e caráter ondulatório em outros, jamais mostrando ambos na mesma medida, e explicitaram que a dualidade existe na radiação eletromagnética e nas partículas da matéria. Outros 29 alunos (52%) também explicaram de forma correta a complementaridade do caráter dual: 15 deles (27%) atribuíram a dualidade,

explicitamente, apenas às partículas de matéria, e 14 estudantes (25%) apenas à radiação eletromagnética.

Da correlação dos resultados apresentados nas figuras 4 e 5 se conclui que 10 alunos (18% de 56) responderam corretamente tanto a conceituação quanto o aspecto complementar, mas apenas 3 dentre eles (4% do total) explicitaram estar a dualidade presente em ambas: radiação eletromagnética e partículas de matéria.

O fato dos resultados indicarem que os estudantes estão mais seguros para falarem na complementaridade do que na conceituação da dualidade, pode ser atribuída a dificuldades em contradizer a visão clássica, na qual um ente que tem caráter ondulatório não pode ter o corpuscular, pois são de diferentes naturezas. Nas palavras de Pessoa (2003, p.2), “Dizer simplesmente que ‘uma coisa (sem parte) é (ao mesmo tempo) partícula e onda’ é uma contradição lógica.”

Observe-se que o incômodo com tal contradição é expressa por algumas falas de alunos, nem sempre muito claras, como por exemplo (FV1): “Na verdade chegamos ao limite em que esses termos, por se aproximarem do que é absorvido pelos sentidos, não são adequados ao que são essas partículas. Elas não são nem uma coisa nem outra.” O estudante se referia ao caráter dual das partículas subatômicas.

Quando se avaliou a habilidade em representar um fenômeno físico que mostrasse o caráter corpuscular da radiação eletromagnética na sua interação com a matéria (questão 2), houve uma considerável queda na adesão dos estudantes: 22 deles (29%) deixaram a questão em branco.

Não podemos concluir de forma definitiva se a ausência de respostas indica nenhum conhecimento no assunto, dificuldade em identificar o que sabe do tema por estar sendo proposto de forma diferente do que lhes foi apresentado, se é insegurança que promove a fuga de questões com nítido caráter avaliativo, ou ainda se é consequência de natural queda na adesão às questões finais de um questionário com várias questões. Possivelmente é um pouco de tudo isto. Mas há evidências de algumas destas possibilidades, como apontaremos no que segue.

A escolha dos fenômenos se distribuiu de acordo com o mostrado na Figura 6.

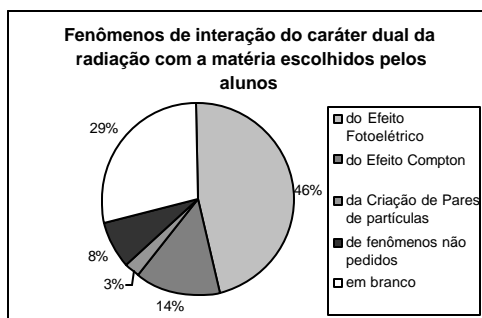


Figura 6 - Fenômenos de interação da radiação com a matéria que evidenciam o caráter corpuscular da radiação.

O fenômeno mais esquematizado foi o Efeito Fotoelétrico (35 alunos - 46% do total), seguido muito de longe pelo Efeito Compton (6 alunos - 14%). O que está classificado na figura 6 como “fenômenos não pedidos” (8%) foram representações de fenômenos que não mostram o caráter corpuscular da radiação.

É importante observar que o efeito fotoelétrico é tratado nos livros textos de forma mais enfática que os demais processos, e possivelmente, em consequência deste fato, haja por parte dos docentes uma abordagem mais extensa a ele. De fato a análise das listas de questões sugeridas pelos docentes nos últimos cinco semestres mostra um maior número de questões referentes a este processo do que aos demais. Possivelmente esta ênfase de textos/docentes é responsável pela preferência dos estudantes na escolha do processo. Observe-se que a criação de pares de partículas, mais nitidamente imprevisível no contexto clássico, foi escolhida por apenas 3% dos estudantes.

Dentre os alunos que representaram algum processo (54 – 71%), 43 (57% dos 76) o fizeram corretamente e 11 (15% dos 76) o fizeram incorretamente, como mostrado pela figura 7. Os erros mais comuns foram: a representação do pico Compton (com mudança de frequência do fóton) sem o elétron emitido, ou de processos perfeitamente descritas pelo caráter ondulatório da radiação, como a reflexão e a refração da luz, por exemplo. Há ainda a já citada representação de fenômenos que não foram solicitados, como a interação de partícula (com massa) com a matéria. Um fenômeno representado foi a produção de fótons (raios X) por desaceleração de elétrons energéticos interagindo com a matéria, que é apresentado na disciplina como mais uma evidência do caráter corpuscular da radiação por ter um comprimento de onda limite no espectro emitido. Esta é mais uma evidência de que alguns estudantes não diferenciam com clareza os vários processos físicos apresentados nas disciplinas, e o que eles pretendiam mostrar sobre a natureza física.

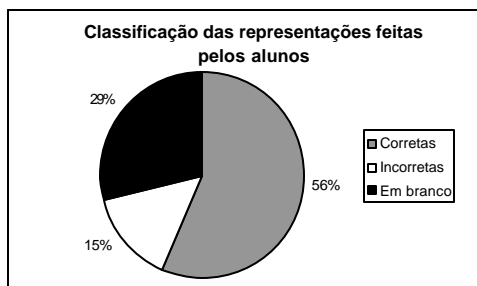


Figura 7- Classificação das representações pela sua correção.

A quantificação do processo através da equação de conservação de energia (questão 3) não foi feita por 47% do total de alunos, mostrando um crescimento de quase 20% de defecção em relação à questão anterior. Por outro lado 7% responderam corretamente, 28% das respostas estavam parcialmente corretas e 15% dos estudantes escreveram a equação incorretamente (Figura 8).

A categoria parcialmente correta merece um comentário específico, porque se tais respostas forem consideradas corretas, eleva para 35% o total de corretas; se consideradas erradas, deixa o alarmante índice de 47% de respostas incorretas.

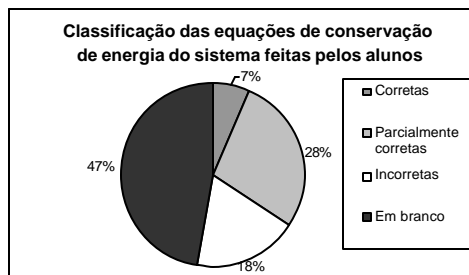


Figura 8- Classificação da conservação de energia pela sua correção.

Como dito anteriormente, nossa avaliação focava no entendimento dos estudantes, e por isto foi pedida a *equação de conservação de energia do fenômeno esquematizado*, o que não é novidade para os estudantes no caso de partículas clássicas, *sem deixar de mencionar os termos de energia que foram desprezados por serem pequenos, se este for o caso*. Com tal redação não há dúvidas que se esperava a conservação da energia no caso geral do processo escolhido, e não em alguma situação particular.

No entanto, um número relativamente grande de estudantes (28% do total) escreveu a chamada equação de Einstein do efeito fotoelétrico, em uma de duas formas comumente apresentadas nos textos: $h\nu = eV_0 + \phi$ ou $h\nu = T_e + \phi$, como a expressão da conservação de energia do processo esquematizado.

No entanto esta equação não só é válida para os poucos elétrons com energia de ligação mínima no material (função trabalho ϕ), e que por isto saem com a energia cinética máxima. Consequentemente promovem o recuo da rede (ainda que essa energia cinética seja desprezível frente à do elétron) para absorver parte do momento linear do fóton, de modo a garantir a conservação de momento linear na “colisão”. Conservação de energia e momento linear na colisão de uma partícula com outra ou com “algo” pesado é trabalhado em disciplinas de mecânica clássica, desde o ensino médio. Mas nenhum dos estudantes que adotou a equação de Einstein citou a existência a desprezível energia de recuo da rede.

Do ponto de vista de entendimento, escrever a equação de Einstein como conservação de energia é tão errado quanto outras assim classificadas. No entanto, analisar essa equação tão extensivamente adotada é revelador do processo de ensino-aprendizagem, daí o destaque a ela.

Na maior parte dos livros didáticos a equação de Einstein aparece com destaque, talvez também por razões históricas, mas por dar resposta ao fato de haver um potencial de corte (retardador de elétrons) na curva experimental de corrente fotoelétrica versus o potencial entre o emissor e o coletor de elétrons. O gráfico da corrente fotoelétrica versus o potencial entre emissor e coletor é mostrado nos textos para evidenciar a impossibilidade de explicação quando se adota o feixe como onda eletromagnética. Paradoxalmente esta mesma curva só pode ter a forma que tem, se os elétrons emitidos tiverem energias cinéticas diferentes entre si, e muitos alunos não se deram conta disto, como mostra a adoção da equação de Einstein como a conservação de energia do processo.

Optamos por classificar a resposta como parcialmente correta por considerarmos que mostra um aprendizado coerente com o ensino fortemente embasado, quando não exclusivamente, na manipulação/destaque de equações,

sem ênfases ou sequer considerações sobre a física que representam. E este tipo de abordagem não é característica do ensino do tema.

O aprendizado é parte de um processo e se dá de acordo com o ensino, uma vez que o conhecimento dos estudantes, mesmo na graduação, é ainda fortemente influenciado pelo enfoque dos docentes e dos livros textos.

Na avaliação do discernimento sobre a necessidade da concepção dual, em contraposição à visão clássica, foi feita através do pedido de explicações e “não-explicações” na Física Clássica dos fenômenos representados (questão 4). Esperávamos, evidentemente, as “não explicações”, uma vez que o fenômeno representado era de interação que mostrasse o caráter dual da radiação, ou seja, a existência do (novo) aspecto fotônico.

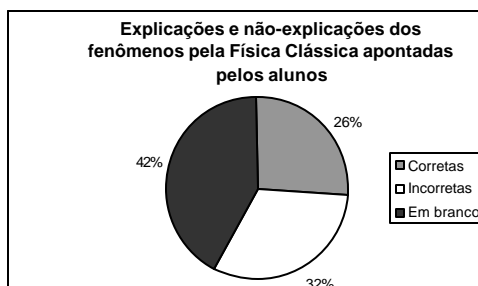


Figura 9- Explicações e “não-explicações” dos fenômenos representados no contexto da Física Clássica.

O que constatamos (figura 9) foi 42% de respostas em branco, uma pequena redução em relação à questão anterior que pedia a equação matemática da conservação de energia (47% em branco).

Nas respostas classificadas como incorretas o mais freqüente eram afirmações “óbvias”, portanto vazias, como por exemplo: (FM8) “Para se explicar é necessário adotar a luz como partícula, o que não é possível adotar na Física Clássica”, e respostas contraditórias: (FV30) “Pela física clássica, o efeito Compton é explicado por colisões elásticas dos fótons com os núcleos da matéria”.

Dentre as explicações corretas os aspectos mais citados no caso do efeito fotoelétrico foram: a existência de um potencial (retardador) de corte da corrente fotoelétrica, e de uma freqüência limite (inferior) para ter corrente independente da intensidade da radiação incidente, e o fato da corrente ser emitida rapidamente (que parece instantaneamente), contrariamente às previsões clássicas. Novamente citam corretamente o resultado do potencial de corte, mesmo havendo evidências de não terem entendido o significado dele, o que corrobora a interpretação de que os alunos sabem escrever as equações muito manipuladas, e citar resultados bem destacados, mas têm um precário entendimento do significado deles.

Conclusões

Os resultados do presente trabalho, ainda que parciais e preliminares, evidenciam as dificuldades de compreensão das novas idéias da Física nos cursos de nível superior. São dificuldades que parecem advir mais de razões cognitivas do que da proposição das disciplinas ou atuação de seus docentes.

Este é um tema novo aos estudantes, abstrato e que muda um paradigma já estabelecido, e nem sempre bem entendido, o que exige tempo para reflexão, e maior vivência. Qualquer mudança cultural precisa de vivência para acontecer. Daí a existência de limites no nível do aprendizado do tema em uma primeira apresentação. Esta característica não é restrita ao caráter dual da radiação e da matéria, mas existe em muitas concepções da Física Moderna e contemporânea.

Por outro lado, foram evidenciadas também algumas características do processo do ensino-aprendizado, que não são inerentes ao tema dualidade, mas são comuns no ensino universitário.

Os estudantes sentem maior conforto para tratar de questões “menos objetivas”, entendidas como as que não exigem esquemas ou equações, talvez porque entendam que nelas se possa dizer qualquer coisa, sem que se configure desconhecimento ou erro.

Nas questões “nitidamente conceituais”, como as que pedem expressões de idéias em palavras, eles mostram dificuldades em usar linguagem precisa, e de focar nos aspectos relevantes, sem misturá-los com os acessórios, como é exigência das ciências naturais. Um outro aspecto evidente, em parte relacionado com o anterior, é que as explicações, esquemas e equações são feitos de forma muito semelhante às apresentadas nos livros e material das disciplinas, mesmo quando a questão está em contexto e/ou condições diferentes. Até na definição do que foi relevante na disciplina, e na escolha do processo a ser representado, houve uma correlação com o número de páginas dos textos e de exercícios propostos. Em particular, não pareceu adequado o nível da apropriação dos aspectos mais gerais, e da relação dele com processos e situações específicas tratadas nas disciplinas.

É esperada na graduação uma formação que torne seus egressos autodidatas, ou seja, em condições de identificar quais questões são relevantes, resolver um problema novo a partir de busca, seleção e articulação autônoma de informações a ele relacionado, e de reflexão e trabalho sobre elas, seja individualmente seja em trabalho em grupo. Mas este estágio de formação só será atingido se os cursos trabalharem visando tal competência.

Mas o aprendizado efetivo, particularmente em temas novos e abstratos, não se dá apenas com trabalho repetitivo, mas em um ensino com intervenções que efetivamente coloquem o estudante diante de suas concepções/entendimento de uma situação apresentada. Assim poderão perceber as diferenças entre suas concepções e as das ciências naturais contemporâneas, permitindo que diminuam suas lacunas na concepção clássica, e se apropriem das novas idéias. Também um trabalho maior sobre aplicações “palpáveis” nas ciências e nas tecnologias que tenham relação com as concepções tratadas, podem facilitar a compreensão destas idéias novas e abstratas.

Os resultados deste trabalho motivaram uma investigação, em andamento, relativa a atividades sobre o tema, com material didático adequado, que trabalham o que caracteriza o movimento/interação de ondas e de partículas, articulando o contexto clássico com o da dualidade.

Referências

- GRECA, I.M. & MOREIRA, Marco A. Uma revisão sobre estudos relativos ao ensino de mecânica quântica introdutória. *Investigações em ensino de ciências*, Porto Alegre, v. 6, n.1, mar.2001. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>.
- PESSOA Júnior, Osvaldo. Conceitos de Física Quântica. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.
- JOHSTON, I. D., CRAWFORD, K., FLETCHER, P. R. Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, London, v.20, n.4, p.427-446, Apr. /May 1998.
- OSTERMANN, F. e MOREIRA, M. A. *Uma revisão bibliográfica sobre a Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio*. Investigações em Ensino de Ciências, vol.7, n.1, 2002
- POTENZA, Bruna G. G.; BECHARA, Maria José, *Material didático para o ensino de tópicos de Física Moderna em disciplinas de graduação em Física*. Relatório de Atividades, 2008.

Os Autores Bruna Graziela Garcia Potenza e Pablo Teruo Siguematsu realizaram o trabalho como bolsistas de iniciação científica do programa Ensinar com Pesquisa da Pró-Reitoria da USP