

Pensamento transdisciplinar: uma abordagem para compreensão do princípio da dualidade da luz

(Transdisciplinary thinking: an approach to understand the principle of light's duality)

Paulo Fernando Lima Souza¹, Heloisa Flora Brasil Nóbrega Bastos²,
Ernande Barbosa da Costa³ e Romildo de Albuquerque Nogueira⁴

¹*Departamento de Educação, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil*

²*Unidade Acadêmica de Garanhuns, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil*

³*Departamento de Física, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil*

⁴*Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil*

Recebido em 17/7/2009; Revisado em 3/12/2009; Aceito em 25/1/2010; Publicado em 17/1/2011

O objetivo deste trabalho foi investigar, numa turma de alunos de Licenciatura em Física, se o Pensamento Transdisciplinar pode contribuir para a compreensão do princípio da dualidade da luz. A metodologia empregada foi o ciclo da experiência de Kelly, que teve a perspectiva de engajar os alunos em um processo de aprendizagem, com o auxílio de três experimentos didáticos: a cuba de onda, a dupla fenda de Young e o radiômetro de Crookes. A partir desses experimentos foi possível motivar uma discussão sobre as propriedades ondulatórias e corpusculares da luz. Uma oficina sobre a Transdisciplinaridade foi também realizada com o intuito de discutir a lógica do terceiro incluído, uma lógica que se adéqua ao fato da luz se comportar como onda e como partícula. As análises dos dados permitiram as seguintes conclusões: (i) as concepções prévias dos estudantes de Licenciatura em Física acerca do princípio da dualidade da luz eram desprovidas de uma lógica que respaldasse tal princípio e (ii) os três experimentos propostos e a oficina sobre a Transdisciplinaridade, realizadas durante o ciclo da experiência Kellyana, contribuíram para que os estudantes tivessem uma maior compreensão do princípio da dualidade da luz.

Palavras-chave: transdisciplinaridade, princípio da dualidade da luz, experimentos didáticos, ciclo da experiência kellyana.

The objective of this work was to investigate if transdisciplinarity can contribute to the understanding of the wave-particle duality principle. The investigation was conducted with students from a physics teaching course. The methodology used was Kelly's experience cycle, in which the objective was to involve the students in a learning process through three experiments: the wave tank; Young's experiment and Crookes' radiometer. Based on these three experiments it was possible to motivate a discussion about wave-particle duality. A transdisciplinary didactic workshop was conducted aiming to promote a discussion about third included logic, an adequate logic to be applied to wave-particle duality. Data analysis allowed the following conclusions: (i) the previous concepts of these students about the wave-particle duality principle had no logic to support this principle; (ii) the three experiments and the transdisciplinary workshop conducted during Kelly's experience cycle contributed for a better understanding of the wave-particle duality principle.

Keywords: transdisciplinarity, wave-particle duality principle, didactic experiments, Kelly's experience cycle.

1. Introdução

Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM) de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias [1] propõem que as escolhas sobre o que ensinar se devem pautar na seleção de conteúdos e de temas relevantes que contemplem o mundo natural, social, político e econômico. Assim, o ensino de física deve ser ministrado, objetivando uma melhor compreensão

do mundo, visando à formação do educando como cidadão. Dentro dessa visão, os estudantes do Ensino Médio deverão estar aptos a compreender os conceitos científicos que respaldam as tecnologias envolvidas na construção de equipamentos eletroeletrônicos, sensores e outros. Diante dessa realidade, é importante que a física moderna seja ministrada no Ensino Médio e faça parte do conteúdo do ENEM (Exame Nacional do Ensino Médio), vestibulares e outros exames de admissão

⁴E-mail: ran.pe@terra.com.br.

ao ensino superior ou técnico, no qual a física seja um requisito, o que atualmente já vem ocorrendo em várias universidades brasileiras.

Um dos tópicos ensinados na física moderna é o princípio da dualidade da luz, o qual afirma que a luz possui uma natureza dual, comportando-se, em alguns fenômenos, como uma onda e, em outros, como partícula [2]. No entanto, a lógica, tão utilizada no nosso cotidiano, é inadequada para explicar o princípio da dualidade da luz, pois se respalda na exclusão, na lógica binária, segundo a qual a luz deveria comportar-se ou como uma onda, ou como uma partícula [3]. A Transdisciplinaridade, através da **lógica do terceiro incluído** [4], envolve uma lógica diferente da lógica aristotélica e, por isso, é possível que possa trazer contribuição na compreensão do princípio da dualidade da luz.

Neste trabalho serão investigadas as concepções de estudantes do 8º período do curso de Licenciatura em Física da UFRPE acerca do princípio da dualidade da luz e quais as dificuldades verificadas na compreensão desse princípio, para buscar superá-las. Espera-se que uma nova visão da realidade, baseada na complexidade, nos diferentes níveis de Realidade e na lógica do terceiro incluído, possa contribuir significativamente para a compreensão do princípio da dualidade da luz. Para tanto, levantamos a seguinte questão de pesquisa: Como o Pensamento Transdisciplinar pode auxiliar na compreensão do princípio da dualidade da luz?

A fim de responder à questão proposta foi realizada uma intervenção didática [5], usando uma abordagem com três experimentos que contemplam o comportamento da luz, como onda e como partícula: a cuba de onda; a dupla fenda de Young e o radiômetro de Crookes ou moinho de luz. Além desses experimentos, foi realizada uma Oficina Transdisciplinar visando à discussão de textos sobre o Pensamento Transdisciplinar e seus pilares.

Os objetivos deste trabalho foram: 1) investigar as concepções dos estudantes sobre o princípio da dualidade da luz; 2) verificar a evolução conceitual do grupo de educandos, ao longo do processo da intervenção didática, acerca deste princípio e 3) analisar uma possível contribuição do uso do Pensamento Transdisciplinar na compreensão do princípio da dualidade da luz.

Para entender como os estudantes elaboram suas construções conceituais sobre o princípio da dualidade onda-partícula, foi usado como estratégia da pesquisa o ciclo da experiência de George Kelly. Esse ciclo é formado por cinco etapas, que foram aplicadas durante o processo de intervenção (ver metodologia).

Segundo Kelly, a experiência vivenciada é indispensável na formação de construtos (ver metodologia), quando diz que “à medida que as antecipações ou hipóteses de uma pessoa são sucessivamente revisadas, seu sistema de eventos se modifica. Reconstrói” [6,

p. 133]. Segundo o Corolário da Experiência, para que ocorra uma experiência, são necessárias 5 etapas, que formam o ciclo da experiência: **antecipação, investimento, encontro, confirmação ou desconfirmação e revisão construtiva**.

Os sujeitos desta pesquisa foram envolvidos e desafiados a interagir e a discutir as bases do Pensamento Transdisciplinar e as três práticas experimentais, permitindo assim, que houvesse subsídios para analisar a evolução conceitual e a compreensão dos estudantes sobre o princípio da dualidade da luz.

2. Os três pilares da Transdisciplinaridade

A Transdisciplinaridade está apoiada em três pilares: a **lógica do terceiro incluído**, os **diferentes níveis de Realidade** e a **complexidade** [4].

Interpretar a luz como onda e partícula é de fato contraditório quando **utilizamos** a lógica clássica ou aristotélica [4]. Essa lógica é baseada em três axiomas:

1. o axioma da identidade: A é A;
2. o axioma da não-contradição: A não é não-A;
3. o axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T (T de ‘terceiro incluído’) que é ao mesmo tempo A e não-A.

Se nos apropriarmos da lógica clássica chegamos à conclusão de que os pares de contraditórios (luz-onda e luz-partícula), colocados em evidência pela física quântica, são mutuamente excluídos, pois não podemos afirmar, ao mesmo tempo, a validade de um objeto e seu contraditório: A e não-A. “A perplexidade provocada por essa situação é bem compreensível: não podemos afirmar, se estivermos em nosso juízo perfeito, que a noite é o dia, o preto é o branco, a vida é a morte” [4, p. 36]. A mecânica quântica trouxe no seu desenvolvimento a necessidade de uma nova lógica, chamada de lógica ‘quântica’. O surgimento dessas novas lógicas deveu-se à necessidade de resolver os paradoxos mal resolvidos pela mecânica quântica e tentar, na medida do possível, chegar a uma lógica que pudesse se adequar aos princípios quânticos. Essas novas lógicas quânticas foram construídas introduzindo-se um princípio de não contradição com vários valores de verdade no lugar do par binário (A, não-A).

Para Nicolescu [4], a compreensão do axioma do terceiro incluído – há um terceiro termo T que é, ao mesmo tempo, A e não-A - torna-se compreensível somente quando a noção de **‘níveis de realidade’** é introduzida. Os diferentes níveis de Realidade dizem respeito aos diversos níveis nos quais o universo se organiza e pode ser observado, tais como o nível nuclear, o nível quântico, o nível macroscópico etc. É importante compreender que as leis físicas que regem os fenômenos naturais diferem nesses diferentes níveis de Realidade. Por exemplo, dois prótons tanto podem se atrair como se repelir dependendo do nível de realidade no qual

o fenômeno é observado. No nível macroscópico dois prótons se repeliriam, regidos por forças coulombianas, porém ao nível nuclear sofreriam atração, devido à presença das forças fortes. Então a pergunta: dois prótons se atraem ou se repelem? Teria como resposta: depende do nível de Realidade. Portanto, se permanecermos num único nível de Realidade, o fenômeno da dualidade da luz aparecerá como um conflito entre dois elementos contraditórios (ex.: luz-onda (A) e luz-corpúsculo (não-A)). O terceiro incluído, o estado T, é exercido em outro nível de Realidade, quando aquilo que surge como desunido (luz-onda ou luz-corpúsculo) está, de fato, unido (quantum – luz-onda e luz-corpúsculo) e o que parece contraditório é percebido como não contraditório [7].

A **lógica do terceiro incluído** é não contraditória, no sentido de que o axioma da não contradição é perfeitamente respeitado, com a condição de que as noções de “verdadeiro” e “falso” sejam alargadas, de tal modo que as regras de implicação lógica digam respeito não mais a dois termos (A e não-A), mas a três termos (A, não-A e T), coexistindo no mesmo momento do tempo [4, p. 40].

A lógica do terceiro incluído é uma lógica formal, da mesma forma que qualquer outra lógica formal, suas regras traduzem-se por um formalismo matemático coerente [4]. Ela não elimina a lógica do terceiro excluído, apenas limita seu domínio de validade.

A **complexidade** é uma abordagem que permite analisar os problemas da natureza de maneira sistêmica, evitando a fragmentação da realidade. O pensamento complexo configura uma nova visão de mundo, que aceita e procura compreender as mudanças permanentes do real e não pretende negar a contradição à multiplicidade, à aleatoriedade e à incerteza, e sim, conviver com elas [8]. “A **complexidade** é o resultado natural da complementaridade entre a ordem e a desordem e mostra que uma não se reduz à outra nem ambas se resolvem numa síntese, elas convivem como pólos antagônicos e mutuamente alimentadores” [9, p. 88]. Como ressalta Morin [10] os momentos nos quais não se pode superar as contradições, vencer os antagonismos, ou seja, ultrapassar os paradoxos, aí é que está a complexidade.

Espera-se que a Transdisciplinaridade, com os seus três pilares: a complexidade, a lógica do terceiro incluído e os diferentes níveis de Realidade possa contribuir para a compreensão do princípio da dualidade da luz.

3. Metodologia: o ciclo da experiência de Kelly

A Teoria dos Construtos Pessoais (TCP) de Kelly tem como noções principais a ideia de construtos pessoais e o ciclo da experiência [11]. Para Kelly, o homem analisa o mundo através de seus construtos pessoais. Portanto,

entende-se por construto uma representação sobre eventos ou acontecimentos. Assim, o conceito da dualidade da luz, nessa visão, é formado por um conjunto de construtos, tais como onda, partícula, difração, reflexão, efeito fotoelétrico e outros. Contudo, cada construto tem um “locus” de atuação; a cada momento, o sistema de construtos de uma pessoa varia em função de sua permeabilidade (admissão ou não de novos elementos). É interessante observar que o conceito da dualidade da luz de cada estudante deve ampliar quando ele percebe a necessidade de uma nova lógica para o seu real entendimento e compreende através da realização de experimentos os fenômenos que evidenciam essa dualidade. A experiência é considerada, na TCP, como resultado das sucessivas construções e reconstruções da pessoa, ou seja, das mudanças do sistema de construtos operado pelo indivíduo durante um determinado processo. Dessa maneira, o sistema de construção de um indivíduo varia quando ele sucessivamente constrói réplicas de eventos [12], ou seja, as pessoas ajustam sua compreensão às realidades à medida que ocorrem suas experiências. Para Kelly, a aprendizagem é essa mudança no sistema de construtos, que corresponde à experiência, que ocorre segundo um ciclo com os seguintes momentos: **antecipação, investimento, encontro, confirmação ou desconfirmação e revisão construtiva**. Esse ciclo é denominado ciclo da experiência de Kelly.

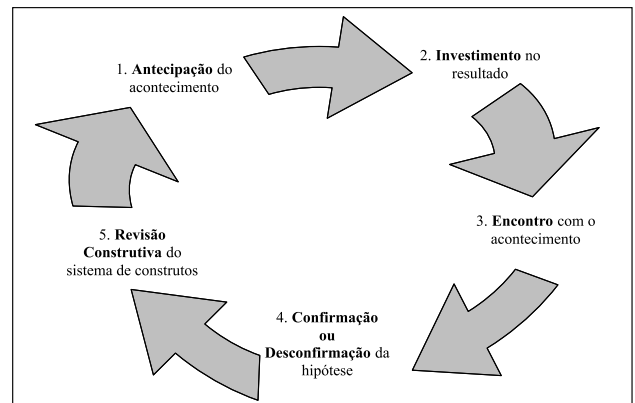


Figura 1 - As cinco etapas do ciclo da experiência. Fonte: Ref. [12, p. 428].

A TCP explica o que ocorreu durante a vivência do ciclo da experiência [12]. Os eventos são antecipados de modo que o indivíduo passa por cinco etapas.

A nossa metodologia foi construída a partir de ciclo da experiência de Kelly, em que a etapa da **antecipação** foi realizada desde o momento em que os alunos foram convidados para participarem da pesquisa. Dessa forma, os alunos, nessa etapa, responderam ao questionário de pesquisa, cujas perguntas são apresentadas a seguir: **1.** *O que caracteriza o princípio da dualidade da luz?* **2.** *Pensar que a luz pode comportar-se de forma dual é razoável? Justifique sua resposta.* **3.** *A lógica aristotélica se baseia nos*

seguintes axiomas: 1. O axioma da identidade: $A \text{ é } A$ (Ferro é Ferro); 2. O axioma da não-contradição: $A \text{ não é não-}A$ (Madeira não é Ferro); 3. O axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T , que ao mesmo tempo seja A e não- A (não existe nada que seja Madeira e Ferro). Esta lógica pode ser aplicada ao princípio da dualidade da luz? Justifique sua resposta. 4. A natureza pode ser regida por uma lógica complexa não aristotélica que leva em consideração diferentes níveis de Realidade, de maneira que exista um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não- A . Uma lógica desse tipo poderia ser aplicada ao princípio da dualidade da luz? Justifique sua resposta.

Na segunda etapa, o **investimento**, foi lido um texto elaborado pelo pesquisador sobre o princípio da dualidade e a Transdisciplinaridade (Apêndice 1) e aplicado um segundo questionário de sondagem, cujas perguntas são mostradas a seguir: 1. Na sua concepção, a luz pode ser ao mesmo tempo onda e partícula? Justifique sua resposta. 2. O princípio da dualidade da luz pode ser compreendido com o auxílio do Pensamento Transdisciplinar? Justifique sua resposta. 3. A lógica do terceiro incluído é mais adequada que a lógica do terceiro excluído para compreensão do princípio da dualidade da luz? Justifique sua resposta.

Após essa etapa, foi iniciado o **encontro**, no qual foram desenvolvidas três abordagens experimentais e uma oficina Transdisciplinar, sendo que, cada intervenção didática foi vivenciada de acordo com o ciclo da experiência (Figura 1). Participaram 8 (oito) alunos da turma. Entretanto, apenas 3 (três) participaram integralmente de todo o ciclo da experiência. Nessa etapa, foram realizados três experimentos e a oficina sobre a Transdisciplinaridade. O primeiro experimento foi o da **cuba de onda**, que consiste num tanque de água rasa no qual dois martelinhos geram ondas planas na superfície da água. Essas ondas se desviam na borda de um obstáculo e produzem ondas semicirculares, quando passam por um orifício pequeno, confeccionado num papelão colocado no interior da cuba. Esse experimento permitiu mostrar os fenômenos da interferência e da difração em ondas mecânicas. A seguir foi apresentado um software, conhecido como “wave-interference” [13], abordando o mesmo tema, que permitiu motivar uma discussão sobre os fenômenos envolvidos e, por fim, os alunos responderam à seguinte questão aberta sobre o experimento: **“Sua forma de conceber o conceito vivenciado mudou em quê após o experimento?”**

Um segundo experimento foi o da **dupla fenda de Young**, que consiste em deixar que a luz visível se difrate através de duas fendas, produzindo bandas numa tela. As bandas formadas, ou padrões de interferência, mostram regiões claras e escuras, que correspondem aos pontos de interferências construtivas e destrutivas, respectivamente [14]. O objetivo desse experimento foi analisar o comportamento ondulatório de uma onda luminosa (laser), no que diz respeito aos

fenômenos de difração e de interferência. Novamente, o software “wave-interference” foi usado para iniciar uma discussão sobre os fenômenos envolvidos e, por fim, foi solicitado que os alunos respondessem à mesma questão aberta do experimento anterior.

Posteriormente, foi realizado o terceiro experimento, o **radiômetro de Crookes**, que consiste em quatro hélices presas em braços que podem girar em torno de um ponto vertical com atrito muito pequeno. Todo o mecanismo é encapsulado em um invólucro de vidro, do qual o ar é parcialmente evacuado por uma bomba. As hélices têm tons claros (prateado) e escuros (preto) dispostas alternadamente. Elas começam a girar, enquanto a luz de qualquer natureza (solar, artificial) incide em sua superfície [15]. O objetivo desse experimento foi analisar o efeito de colisões de quanta de luz, produzidas por meio do radiômetro de pressão, entender o momento linear e explicar o funcionamento do moinho de luz [16]. É interessante observar que apesar de ter sido usado para motivar uma discussão sobre as propriedades corpusculares da luz o funcionamento do radiômetro está associado às propriedades do gás e não da radiação. Desta maneira não importa se o comportamento é ondulatório ou corpuscular, pois a verdadeira razão para o funcionamento do radiômetro são as forças exercidas pelo gás sobre as bordas das hélices [16].

Após a realização do experimento, um vídeo chamado de “Dr. Quantum” [17], abordando o mesmo tema, foi usado para motivar a discussão sobre os fenômenos envolvidos e, por fim, a mesma questão dos experimentos anteriores foi proposta aos alunos.

Por fim, foi realizada a **oficina transdisciplinar**, que foi iniciada com uma palestra a respeito do Pensamento Transdisciplinar, abordando questões como: a disciplinaridade, transdisciplinaridade e seus pilares, operadores de ligação do pensamento complexo (a ideia de emergência; a ideia de circularidade; o operador hologramático e operador dialógico), como também os axiomas da lógica clássica. Em seguida, foi promovido um debate sobre o tema abordado, mediado pelo pesquisador. Ao término da oficina foi apresentado, para o grupo de alunos, um *software* conhecido como “wave-interference”, que apresenta o comportamento ondulatório para uma onda luminosa e mecânica, descrevendo os fenômenos da difração e da interferência, e um vídeo – “Dr. Quantum”, que apresenta o fenômeno da difração e da interferência para elétrons (partículas), ao passarem pela dupla fenda de Young, sugere um comportamento ondulatório dos elétrons. O objetivo dessa oficina transdisciplinar foi discutir as bases do Pensamento Transdisciplinar e seus pilares, na possibilidade de contribuir para a compreensão do princípio da dualidade da luz.

A quarta etapa, da **confirmação** ou **desconfirmação**, ocorreu quando os alunos, diante do *encontro*, puderam confrontar suas concepções com o novo conhecimento, com as novas descobertas que fizeram

a partir da oficina transdisciplinar. Nessa etapa, foram registradas num protocolo (anotadas) as concepções dos alunos sobre a dualidade e a transdisciplinaridade. A quinta etapa, da **revisão construtiva**, foi contemplada com a aplicação do mesmo questionário aplicado na etapa da **antecipação**, agora, com o objetivo de investigar se os alunos fizeram uma *revisão construtiva* sobre o princípio da dualidade da luz e sobre a Transdisciplinaridade.

4. Resultados e discussões

4.1. Análise comparativa da evolução conceitual a respeito do princípio da dualidade da luz

Essa etapa tem o propósito de comparar as concepções dos alunos antes (*antecipação*) e após (*revisão construtiva*) a realização do ciclo da experiência de Kelly.

Na sua resposta (quadro comparativo n° 1), o **aluno A**, na etapa da *antecipação*, relatou a importância de vários cientistas no desenvolvimento das ideias que levaram à dualidade e descreveu o experimento da dupla fenda de Young, com o objetivo de mostrar o comportamento ondulatório da luz. Cita, equivocadamente, que a experiência de Young também podia mostrar o caráter corpuscular da luz, tendo em vista, que relatou já ter assistido ao vídeo “Dr. Quantum”, confundindo a representação de feixe de elétrons com onda luminosa. Portanto, o aluno centrou sua res-

posta prévia em experiências físicas, como é esperado nos períodos finais do curso de física. Na etapa da *revisão construtiva*, ou seja, após vivenciar o ciclo da experiência de Kelly, o aluno A focou sua resposta em aspectos da Transdisciplinaridade, apesar de não ter respondido adequadamente à pergunta.

Na resposta do **aluno B** (quadro comparativo n° 1), durante a *antecipação*, percebe-se ter sido ele objetivo ao caracterizar a dualidade da luz. Após a vivência do ciclo da experiência, na *revisão construtiva*, demonstrou que, na etapa do *encontro*, os experimentos didáticos (a cuba de onda, a dupla fenda de Young e o radiômetro de Crookes) lhe permitiram apropriar-se de conceitos físicos, que foram importantes para a construção do conceito que envolve o princípio da dualidade, construindo relações entre os conceitos discutidos nos dois primeiros experimentos didáticos, que estão ligados ao movimento ondulatório, em particular, aos fenômenos da difração e da interferência, enquanto no terceiro experimento, que está ligado à teoria corpuscular da luz, associou fótons ao moinho de luz.

O **aluno C** (ver quadro comparativo n° 1), tanto na *antecipação* como na *revisão construtiva*, manteve a mesma ideia, não se aprofundando em sua resposta e nem fazendo referência às questões debatidas durante a vivência do ciclo da experiência de Kelly. Permaneceu com um discurso objetivo, direto, não agregando à conceituação do princípio da dualidade, as novas aprendizagens adquiridas durante o ciclo da experiência.

Quadro Comparativo n° 1.

01. O que caracteriza o princípio da dualidade da luz?		
Respostas dos alunos	Etapa da antecipação (1° questionário)	Etapa da revisão construtiva (2° questionário)
A	Esta dúvida em relação à natureza da luz se dá porque ora se comporta como onda e ora se comporta como se fosse matéria. Este fenômeno que descreve sobre a luz, vem sendo estudado há vários anos pelos maiores físicos tais como: Maxwell, Lorentz, Newton, Einstein. Com a realização de alguns experimentos no início do século a ciência começou a observar que a luz apresentava propriedades, isto é, ficou caracterizado pelo experimento de dupla fenda, onde constataram o fenômeno de interferência, logo a luz poderia ser considerada uma onda, mas incrivelmente os cientistas observaram também que quando colocado um “sensor” para determinar por onde passava a luz nas duas fendas a luz passava a se comportar como partículas. Era o que se apresentava no anteparo colocado através das fendas.	A principal característica desse princípio é o fato dele obedecer a uma lógica não aristotélica, onde existem vários níveis de Realidade, onde a luz pode se comportar de formas diferentes, ela pode ser onda, como também pode ser partícula. Esta é a lógica do terceiro incluído.
B	É o fato de que a luz pode ser considerada tanto onda como partícula.	O princípio da dualidade é caracterizado pelo fato de que a luz pode se comportar como onda, apresentando efeito de difração e de interferência, e como partícula, onde a luz emite fótons (partícula) como foi observado no experimento radiômetro de Crookes.
C	É o fato de a luz ter um comportamento de onda e partícula, ou seja, além das propriedades ondulatórias, a luz se comporta de maneira discreta, pois sua energia é quantizada.	O fato que a luz apresenta um comportamento ondulatório, ou seja, a luz possui características ondulatórias e ao mesmo tempo a luz apresenta-se de maneira corpuscular, ou seja, descontínua, a luz ora se comporta como onda ora como partícula.

Quadro Comparativo nº 2

02. Pensar que a luz pode comportar-se de forma dual é razoável? Justifique sua resposta.		
Respostas dos alunos	Etapa da antecipação (1º questionário)	Etapa da revisão construtiva (2º questionário)
A	Sim. Que com a chegada da física moderna, onde se estuda objetos com dimensões atômicas e também com altas velocidades. Nesta área se comprovou através de experimentos (indutivismo ingênuo) que a luz realmente se comporta ora como luz ora como partícula.	Sim. Pois, com as novas ideias da física quântica, percebeu-se que a realidade tem níveis, é justamente neste aspecto onde o comportamento da luz se apóia. Numa realidade macroscópica a luz pode se comportar como onda; Já numa realidade microscópica ela também pode comporta-se como onda, mas também existirá a possibilidade de comporta-se como partícula. Esta nova visão sobre a realidade afasta-se da visão mecanicista (aristotélica), indo para uma nova visão de enxergar o mundo.
B	Sim. Que se tomarmos a luz como uma onda, ou seja, essa onda possui características e propriedades ondulatórias e se admitirmos que ao mesmo tempo ela é formada por quantas de luz, quer dizer, como sendo discreta. Então o fato dela se comportar de maneira dual é razoável. Pois, estaríamos nos baseando nessa teoria, a dos quantas de luz (energia quantizada).	Sim. Pois como dito acima a luz quando incide sobre um obstáculo, ela “se curva” para ultrapassá-lo surgindo aí uma característica de onda a difração. E ao observar um anteparo vemos que existem pontos de máximos e mínimos que é característica de onda também, a interferência, e vimos que ela também se comporta como partícula, que faz mover as pás do radiômetro de Crookes.
C	Sim. Se tomarmos a luz com características e propriedades ondulatórias e se admitimos que ela fosse formada por quantas de luz, quer dizer, como sendo discreta. Então o fato dela se comportar de maneira dual é razoável.	Segundo a lógica aristotélica não. Mas, segundo a lógica do terceiro incluído sim. Pois segundo está lógica um elemento A pode ser ao mesmo tempo A e não-A, ou seja, a luz pode ser onda e ao mesmo tempo partícula. E na lógica do terceiro incluído não é contraditória afirmar que um elemento A pode ser também um elemento não-A.

O **aluno A** (quadro comparativo nº 2) apresenta um discurso mais consistente, após a vivência do ciclo da experiência de Kelly, pois, comparando sua resposta da etapa da *antecipação* com a da *revisão construtiva*, observamos que ele propõe migrar de “uma visão mecanicista para uma nova visão de mundo” e faz também referência na sua fala aos diferentes níveis de Realidade necessários para compreender a dualidade da luz. É interessante observar que na visão do aluno os termos Mecanicista e Aristotélico são sinônimos e na verdade não são, o primeiro diz respeito ao pensamento Newtoniano (relação causa-efeito) e o segundo refere-se a lógica do terceiro excluído, proposta por Aristóteles. A despeito disso, pode-se observar que o aluno incorporou ao seu discurso a noção de níveis de Realidade e propõe uma nova visão de mundo para interpretar a dualidade da luz.

Com relação ao **aluno B**, na etapa da *antecipação*, ele fundamenta sua resposta na teoria, para depois se apoiar na experimentação, enquanto estudante de licenciatura em física. Na *revisão construtiva*, fundamenta sua resposta a partir dos experimentos vivenciados durante a etapa do *encontro*. Podemos observar que, nesta questão, esse aluno não fez referência aos pilares da Transdisciplinaridade, nem mesmo à lógica que respalda tal princípio.

O **aluno C**, na etapa da *antecipação* apresentou uma resposta que não fazia referência à lógica. Porém,

na *revisão construtiva*, houve uma significativa mudança, pois ele se apropriou dos pilares da Transdisciplinaridade, dos diferentes níveis de Realidade e lógica do terceiro incluído para fundamentar sua resposta, reconhecendo a existência de uma lógica que fundamenta a dualidade da luz.

A resposta do **aluno A** (quadro comparativo nº 3), na etapa de *antecipação*, faz referência aos conteúdos aprendidos no seu curso de física. Na *revisão construtiva*, mais uma vez observamos sua apropriação de conceitos referentes à Transdisciplinaridade, pois faz uso deles para justificar sua resposta.

O **aluno B** (quadro comparativo nº 3), na etapa de *antecipação*, responde de forma objetiva, mas, pensando ainda de maneira conservadora. Na *revisão construtiva*, sua resposta é bem elaborada e baseada em princípios da Transdisciplinaridade, demonstrando uma posição crítica, reflexiva, com relação ao princípio da dualidade da luz.

O **aluno C** (quadro comparativo nº 3), desde a etapa de *antecipação*, já faz uma reflexão aprofundada sobre a lógica aristotélica e a necessidade de abandoná-la, para ser possível compreender o princípio da dualidade. Na *revisão construtiva*, ele responde mais uma vez de forma bem elaborada e com clareza, baseando-se na lógica, na inadequação da lógica. O aluno parte do princípio de que a dualidade é “verdadeira” e como tal, a lógica aristotélica é inadequada.

Quadro Comparativo n° 3.

03. A lógica aristotélica se baseia nos seguintes axiomas: 1. O axioma da identidade: $A \text{ é } A$ (Ferro é Ferro); 2. O axioma da não-contradição: $A \text{ não é não-}A$ (Madeira não é Ferro); 3. O axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T , que ao mesmo tempo seja A e não- A (não existe nada que seja Madeira e Ferro). Esta lógica pode ser aplicada ao princípio da dualidade da luz? Justifique sua resposta.

Respostas dos alunos	Etapa da antecipação (1° questionário)	Etapa da revisão construtiva (2° questionário)
A	Não. Esta visão se aplica muito bem ao mecanismo newtoniano da lei física que perduraram vários séculos. Mas com a chegada da eletrodinâmica de Maxwell, a teoria eletrônica de Lorentz, a troca da relatividade o que antes era considerado absoluto como o tempo o espaço, agora já não mais o era o tempo, o espaço tornaram-se relativo.	Não. Esta visão do terceiro excluído nunca poderia ser aplicada ao princípio da dualidade da luz, pois, a luz ora se comporta como onda, ora como partícula (ora é A e ora é não- A). Logo não cabe no princípio da dualidade da luz esta visão. O que poderia justificar estas novas ideias seria a lógica do terceiro incluído.
B	Não. Pois o princípio da dualidade fala exatamente o inverso. Se seguisse esta lógica então a luz sendo uma onda não poderia ser também uma partícula e vice-versa.	Não. Pois, o princípio da dualidade da luz se baseia exatamente no contrário, ou seja, existe sim uma coisa que pode ser A e não- A , que pode ser onda e partícula, no caso a luz. Dependendo de como eu quero lhe observar ela será onda ou partícula, pois ela apresenta comportamento de ambas as coisas.
C	Não. Pois se não existe um termo que ao mesmo tempo seja A e não- A então a dualidade da luz seria uma ideia falsa. Por isso, para admitir o princípio da dualidade da luz, teremos que abandonar esta lógica para o caso da luz.	Não. Pois a luz se comportaria segundo este axioma de maneira contraditória, ou seja, segundo a lógica, a luz não pode ser partícula e ao mesmo tempo onda. Pois, o terceiro axioma aristotélico que é o axioma do terceiro excluído, afirma que um determinado elemento não pode ser A e ao mesmo tempo não- A .

A seguir serão interpretadas as respostas dadas pelos alunos no Quadro comparativo n° 4.

Quadro Comparativo n° 4.

04. A natureza pode ser regida por uma lógica complexa não aristotélica que leva em consideração diferentes níveis de realidade, de maneira que exista um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não- A . Uma lógica desse tipo poderia ser aplicada ao princípio da dualidade da luz? Justifique sua resposta.

Respostas dos alunos	Etapa da antecipação (1° questionário)	Etapa da revisão construtiva (2° questionário)
A	Sim. Com as ideias inovadoras de Einstein sobre os fenômenos Físicos, com a criação da teoria da relatividade restrita e geral, os físicos começaram a ter uma visão não mais mecanicista, deixando de lado o indutivismo. Podendo desta forma fazer especulações, criações livre que poderão num futuro mais próximo serem comprovadas através de experimentos práticos. Inclusive esta nova lógica de existir um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não- A .	Sim. Esta nova lógica do terceiro incluído se encaixa muito bem ao princípio da dualidade da luz. Pois A é A , e A pode ser não- A , como acontece com a luz, ora é onda (A) e em outro momento é não- A (partícula).
B	Sim. A natureza é composta de várias partículas (moléculas) que interagem entre si formando novas partículas, e essas novas partículas podem ter características das duas moléculas que se interagem. A luz no caso depende da maneira que queremos tratá-la pode ser onda e/ou partícula.	Sim. Essa lógica rege o “mundo natural” em certos níveis de Realidade, e é exatamente a essência do princípio da dualidade da luz, pois ela é onda e também partícula.
C	Não respondeu a questão, apesar de na questão anterior ter feito uma boa reflexão sobre a necessidade de uma nova lógica. O aluno sugeriu a necessidade de uma nova lógica para que ele pudesse aceitar o princípio da dualidade da luz.	Sim. Esta lógica dá fundamento para o fato de que a luz se comporta ora como onda e ora como partícula, ou seja, não seria contraditório dizer que a luz é onda e ao mesmo tempo é partícula, pois existe um terceiro termo (T) sendo ao mesmo tempo A e não- A .

O **aluno A**, na etapa da *antecipação*, justificou sua resposta, tomando como base as ideias da física contemporânea, considerando como algo esperado e possível a lógica do terceiro incluído (sendo comprovada no futuro, não sendo uma lógica que fundamenta tal princípio no presente). Porém, na sua resposta, fica evidente que o aluno não se apropriou, de fato, dessa lógica para justificar o princípio da dualidade. Na etapa

da *revisão construtiva*, ele ampliou sua compreensão, observando o quanto a lógica do terceiro incluído se encaixa perfeitamente para explicar o princípio da dualidade da luz.

O **aluno B**, na etapa da *antecipação*, iniciou uma reflexão sobre o universo microscópico, de forma desconexa, não concluiu sua resposta e nem fez relação com a pergunta em questão. Na etapa da *revisão construtiva*,

demonstrou apropriação de um dos pilares da transdisciplinaridade, os diferentes níveis de Realidade, sendo isso a “essência” para o princípio da dualidade, apresentando desse modo um crescimento cognitivo na direção de uma compreensão lógica do princípio da dualidade.

O **aluno C**, durante a etapa da *antecipação*, deixou a questão em branco, porém, após a vivência do ciclo da experiência de Kelly, demonstrou uma compreensão sobre o princípio da dualidade da luz e respondeu de maneira objetiva e clara, usando os elementos da lógica do terceiro incluído.

5. Conclusões

A análise qualitativa dos dados revelou que os alunos envolvidos na pesquisa demonstraram ter conhecimentos prévios sobre o princípio da dualidade da luz. Todos afirmaram, antes da intervenção didática, que o princípio da dualidade diz respeito ao fato da luz se comportar como onda e partícula, porém não demonstraram perceber que, por trás dessa realidade, existe a necessidade de uma nova lógica, não aristotélica, para respaldar esse princípio. É interessante observar que os alunos pesquisados estão de acordo com o princípio da dualidade, mesmo sabendo inexistir um experimento no qual possa se observar simultaneamente a luz como onda e como partícula, ou seja, o real fenômeno da dualidade onda-partícula. Após a intervenção didática, através da realização do ciclo da experiência de Kelly, com os alunos A, B e C que participaram de todo o processo, foi observado que todos os três incorporaram no seu discurso a necessidade de uma nova lógica, não aristotélica, que permitisse o axioma do terceiro incluído para se adequar ao princípio da dualidade. É interessante observar que os alunos A e B na etapa de antecipação já tinham uma concepção prévia que a lógica não aristotélica se adequava ao princípio da dualidade.

A seguir, realizaremos um relato do processo de cada um dos alunos investigados durante o processo do Ciclo de Kelly.

Com relação ao **aluno A**, observamos que, no início da nossa pesquisa, suas concepções estavam baseadas em experiências físicas, fazendo referência aos conteúdos aprendidos no seu curso, tomando como base as ideias da física contemporânea. Isso já era esperado para um aluno nos últimos anos do curso de Licenciatura em Física. Após a vivência do ciclo da experiência de Kelly, focou sua resposta não mais apenas em aspectos físicos, mas também em aspectos da Transdisciplinaridade, apresentando uma evolução conceitual em seu discurso, ao apropriar-se de conceitos referentes aos pilares da Transdisciplinaridade (níveis de Realidade, lógica do terceiro incluído) para justificar suas respostas, ampliando assim sua compreensão. Esse aluno salientou que a lógica do terceiro incluído se encaixa perfeitamente ao princípio da dualidade da luz.

Com relação ao **aluno B**, percebemos que, no início do ciclo da experiência de Kelly, ele não cogitava a possibilidade da existência de uma lógica que respaldasse o princípio da dualidade e, da mesma forma que o **aluno A**, fundamentou sua resposta na teoria aprendida no curso de Licenciatura em Física. Respondeu aos instrumentos de investigação usados de maneira objetiva, mas sem nenhuma referência às dificuldades em se ajustar o princípio da dualidade e a lógica aristotélica. Entretanto, após a vivência do ciclo da experiência, as respostas foram bem fundamentadas, tanto do ponto de vista físico como lógico, demonstrando desse modo que tanto os experimentos quanto a oficina Transdisciplinar permitiram que o aluno B se apropriasse tanto das bases que envolvem o princípio da dualidade da luz como da lógica do terceiro incluído.

No que diz respeito ao **aluno C**, no início da pesquisa, apresentava um discurso que não era claro em suas respostas e sem maiores aprofundamentos sobre o princípio da dualidade. Porém, observamos que, ao longo do ciclo da experiência de Kelly, ele fez uma reflexão sobre a lógica aristotélica a necessidade de abandoná-la para que fosse possível a compreensão do princípio da dualidade. Isso sugere uma evolução conceitual.

Percebemos que os três alunos evoluíram. Porém, como o ponto de partida de cada um não era o mesmo, já se esperava que as mudanças ocorridas fossem diferentes, corroborando o que explicita o Corolário da Individualidade de Kelly: “As pessoas se diferenciam umas das outras nas construções de eventos” [11, p. 2].

As nossas conclusões estão de acordo com a TCP, quando menciona, com relação ao Corolário da Experiência, que quanto maior for o número de Revisões Construtivas realizadas de um mesmo acontecimento, maior será a variação no sistema de construção da pessoa. Portanto, se fosse repetido todo o ciclo da experiência com os mesmos três experimentos didáticos e a oficina Transdisciplinar, certamente obteríamos uma maior ampliação dos sistemas de construtos dos alunos.

Embora todos os alunos da pesquisa já tivessem conhecimentos prévios sobre o princípio da dualidade, por haverem estudado as disciplinas de Física Geral e Experimental IV e Física Moderna, após as intervenções didáticas, percebeu-se que eles evoluíram de forma significativa, ampliando suas concepções conceituais a respeito do princípio da dualidade da luz e da lógica do terceiro incluído, que respalda esse princípio.

É bastante compreensível que, após a leitura dos textos, debates e discussões sobre o pensamento Transdisciplinar e seus pilares, os estudantes comecem a refletir, compreendendo melhor a dualidade onda-partícula, assim como a necessidade de uma nova lógica. A pesquisa evidenciou a existência de um *déficit* nas disciplinas do curso de Licenciatura em Física com relação aos fundamentos lógicos dos princípios físicos, tal como o da lógica do terceiro incluído, que possibilita a com-

preensão adequada do princípio da dualidade da luz. Questionamos, então, como futuros professores podem despertar o pensamento crítico em seus futuros alunos se não desenvolveram sua própria criticidade?

Percebemos que todos os alunos sabiam da natureza dual da luz, aceitavam essa natureza, mas não observavam que a dualidade não se “encaixava” com a lógica a que estavam acostumados para respaldar seus conhecimentos: a lógica aristotélica. Eles só notaram que existia algo a mais, no decorrer da nossa pesquisa, quando foram “apresentados” à Transdisciplinaridade e a seus pilares, quando então puderam compreender a necessidade de uma nova lógica, descartando a lógica anterior, a aristotélica, para melhor entender o princípio da dualidade da luz.

É interessante observar que os alunos tiveram em sua formação acadêmica um processo de aprendizagem tradicional. No entanto, para compreensão adequada do princípio da dualidade é necessária uma mudança nos fundamentos lógicos que respaldam a física. Por conseguinte, estamos diante de duas “forças” que se opõem: “a tradição” e “a inovação”. Entre as duas, temos o ciclo da experiência de Kelly, promovendo as transformações e a mediação do pesquisador, para colaborar nessa construção. Observamos não ser “fácil” aceitar ou entender a necessidade de uma nova lógica, mas a intervenção didática ajudou nesse aspecto, evidenciando o quanto é importante a atuação do professor.

Com relação à pergunta de pesquisa: Como o Pensamento Transdisciplinar pode auxiliar na compreensão do princípio da dualidade da luz?, foi possível concluir que: (i) **as concepções prévias dos estudantes da Licenciatura em Física da UFRPE acerca do princípio da dualidade da luz eram desprovidas de uma lógica que respaldasse tal princípio** e (ii) **os experimentos didáticos propostos e a oficina sobre a Transdisciplinaridade, realizadas durante o ciclo da experiência Kellyana, puderam contribuir para que os estudantes tivessem uma maior compreensão do princípio da dualidade da luz.**

Por isso, deixamos como sugestão a introdução das bases do Pensamento Transdisciplinar nos cursos de formação inicial em Licenciatura em Física, considerando que tal pensamento poderia contribuir, de forma significativa, para que os alunos pudessem superar a lógica aristotélica, dentro de uma visão mais ampla sobre o princípio da dualidade, compreendendo sua dimensão complexa e o contexto que envolve os universos macro e micro com seus diferentes níveis de realidade.

Apêndice: um texto introdutório sobre o princípio da dualidade da luz e o Pensamento Transdisciplinar

Princípio da dualidade da luz

Newton (1642-1727) defendia a hipótese de que a luz era constituída de corpúsculos. No entanto, como algumas propriedades óticas não puderam ser explicadas com o uso da teoria corpuscular, a teoria ondulatória, proposta por Huygens (1629-1695), mostrou-se mais adequada para descrever a propagação luminosa. Apesar disso, a autoridade científica de Newton fez prevalecer sua teoria por mais de um século, e assim somente em 1801, a experiência da fenda dupla, realizada por Thomas Young (1773-1829) trouxe evidências experimentais para a teoria ondulatória da luz de Huygens. A experiência de Young mostrou que a luz sofria difração e interferência, que são características tipicamente ondulatórias. Anos após, em 1905, para explicar o efeito fotoelétrico Einstein usou uma ideia similar à de Newton, segundo a qual, ao invés de pensarmos na luz como uma onda, deveríamos imaginá-la constituída de corpúsculos, denominados fótons. Desse modo com a explicação do efeito fotoelétrico, ficou compreensível que a luz tem um caráter dualístico e dependendo das circunstâncias, poderia ser vista como onda (p.ex. o fenômeno da interferência e da difração), ou como partícula (p. ex. o efeito fotoelétrico e o espalhamento Compton).

A teoria da natureza ondulatória da luz pode não explicar o efeito fotoelétrico, mas permite compreender os fenômenos de interferência e difração da luz uma vez que o mesmo raio de luz pode difratar ao redor de um obstáculo e daí, incidir na superfície de um metal, provocando a emissão de fotoelétrons.

Considerando que a luz demonstrava ter propriedades ondulatórias e corpusculares, seria natural perguntar se a matéria (por ex., os elétrons e os prótons) também apresentava tais características. Em 1924, o estudante francês de física, Louis de Broglie, sugeriu essa ideia em sua tese de doutorado. Seu trabalho foi altamente especulativo, uma vez que, naquele tempo, ainda não havia evidências sobre o caráter ondulatório da matéria. De Broglie propôs a hipótese de que a matéria também se comporta como onda. Assim, não só a luz se comporta como partícula, porém as partículas também podem se comportar como ondas.

Já em 1927, C.J. Davisson e L.H. Germer realizaram uma experiência na qual se observava a difração e a interferência de ondas de elétrons, quando estudavam o espalhamento de elétrons, utilizando um alvo de níquel, nos laboratórios da Bell Telephone Co. Por fim, após as experiências realizadas por Davisson e Germer, verificaram que o comprimento de onda desse resultado concordava com o da equação de Louis de Broglie.

Outra experiência no mesmo ano 1927, realizada por

G.P. Thomson (filho de J.J. Thomson), trabalhando na Universidade de Aberdeen, na Escócia, confirmou o comprimento de onda de Louis de Broglie, usando um raio X e elétrons passando, através de uma chapa (folha) de alumínio. Ao término da experiência, os comprimentos de onda dos elétrons medidos concordavam com os previstos pelo modelo de Louis de Broglie.

Pensamento Transdisciplinar

Segundo Basarab Nicolescu [4], os três pilares da Transdisciplinaridade são a complexidade, os diferentes níveis de Realidade e a lógica do terceiro incluído. Os níveis de Realidade e a lógica do terceiro incluído são de fundamental importância na compreensão do princípio da dualidade da luz.

Lógica (lógica do terceiro excluído) e a lógica do terceiro incluído

A lógica aristotélica é baseada em três axiomas:

1. O axioma da identidade: A é A ;
2. O axioma da não contradição: A não é não- A ;
3. O axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T (T de 'terceiro incluído') que é ao mesmo tempo A e não- A .

Com base nesta lógica, se a luz é onda então a luz não pode ser partícula e não existe a possibilidade da luz ser ao mesmo tempo onda e partícula (terceiro excluído). Desta forma, a lógica não é adequada para entender o princípio da dualidade da luz.

Para compreender o princípio da dualidade da luz é requerida uma nova lógica não aristotélica, denominada de lógica do terceiro incluído, que considera a existência de diferentes níveis de Realidade. Nesta lógica, é introduzido um terceiro termo T (terceiro incluído) que é ao mesmo tempo A e não- A , ou seja, no caso da luz que ela seja onda (A) ou corpúsculo (não onda / não- A) em um nível de Realidade (macrofísico) e num outro nível de Realidade (microfísico/quântico) seja um quantum (onda-corpúsculo/ A e não- A).

Leia mais

- F. Capra, *A Teia da Vida: Uma Nova Compreensão dos Sistemas Vivos* (Cultrix, São Paulo, 1997).
- B. Nicolescu, *O Manifesto da Transdisciplinaridade* (Triom, São Paulo, 2005).
- P.A. Tipler, *Física* (Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1984), v. 1b.
- P.A. Tipler e G. Mosca *Física Para Cientista e Engenheiros. Física Moderna: Mecânica Quântica,*

Relatividade e a Estrutura da Matéria (LTC, Rio de Janeiro. 2006), v. 3.

Referências

- [1] Brasil, *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias* (MEC/SEMTEC, Brasília, 1999).
- [2] P.A. Tipler e G. Mosca, *Física para Cientistas e Engenheiros. Física Moderna: Mecânica Quântica, Relatividade e a Estrutura da Matéria* (LTC, Rio de Janeiro, 2006), v. 3.
- [3] R. Barthem, *A Luz* (Livraria da Física e Sociedade Brasileira de Física, São Paulo, 2005), 1ª ed.
- [4] B. Nicolescu, *O Manifesto da Transdisciplinaridade* (Triom, São Paulo, 2005).
- [5] B.A. Rosito, in: *Construtivismo e Ensino de Ciências: Reflexões Epistemológicas e Metodológicas*, organizado por R. Moraes (Edipucrus, Porto Alegre, 2000), p. 195-230.
- [6] M.A. Moreira, *Teorias de Aprendizagem* (EPU, São Paulo, 1999).
- [7] H. Badescu, *Stéphane Lupasco: O Homem e a Obra* (Triom, São Paulo, 2001).
- [8] D.S. Tronca, *Transdisciplinaridade em Edgar Morin* (Educus, Caxias do Sul, 2006).
- [9] H. Mariotti, *As Paixões do Ego: Complexidade, Política e Solidariedade* (Palas Athena, São Paulo, 2002).
- [10] E. Morin, *Introdução ao Pensamento Complexo* (Sulina, Porto Alegre, 2006).
- [11] H.F.B.N. Bastos, *A Teoria do Construto Pessoal* (Departamento de Educação da UFRPE, Recife, 1998).
- [12] S.C. Cloninger, *Teorias da Personalidade* (Martins Fontes, São Paulo, 1999).
- [13] University of Colorado of Boulder, Interactive simulations, disponível em http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Wave_Interference, acesso em 4/4/2008.
- [14] P.A. Tipler, *Física* (Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1984), v. 1b, 2ª ed.
- [15] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física* (Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1995), v. 4, 4ª ed.
- [16] N. Studart, *Física na Escola* 8(1), 1 (2007)
- [17] *Quem Somos Nós?* Direção: William Arntz, Betsy Chasse e Mark Vicente. Intérpretes. Marlee Matlin, Elaine Hendrix, Barry Newman; (Playart Pictures, 2005). 1 DVD (150 min).