

## **Tradição de pesquisa quântica: uma interpretação na perspectiva da epistemologia de Larry Laudan**

**Fernanda Ostermann, Cláudio J. de H. Cavalcanti, Trieste Freire Ricci e Sandra D. Prado**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Física. Porto Alegre. Brasil.  
E-mails: [fernanda.ostermann@ufrgs.br](mailto:fernanda.ostermann@ufrgs.br); [claudio.cavalcanti@ufrgs.br](mailto:claudio.cavalcanti@ufrgs.br); [ricci@if.ufrgs.br](mailto:ricci@if.ufrgs.br)  
[prado@if.ufrgs.br](mailto:prado@if.ufrgs.br)

**Resumo:** Neste trabalho apresentamos os conceitos centrais da epistemologia de Larry Laudan e analisamos a Física Quântica como um exemplo de tradição de pesquisa – unidade de análise proposta por sua metodologia. Apesar de representar uma visão de ciência bastante frutífera nesse início de século, as idéias de Laudan ainda têm pouco impacto na pesquisa em ensino de física. A contribuição deste artigo também se constitui na exploração de um exemplo de uma tradição na física pouco aprofundada em sua obra, mas de grande apelo didático em disciplinas de história e epistemologia da física em cursos de formação de professores.

**Palavras-chave:** epistemologia, Larry Laudan, Física Quântica, formação de professores.

**Title:** Quantum research tradition: an interpretation in the perspective of Larry Laudan's epistemology.

**Abstract:** In this paper the central concepts of the epistemology of Larry Laudan and the analysis of some aspects of Quantum Physics as an example of a research tradition - analysis unit proposed by its methodology – are presented. Although Laudan represents an influential and important vision of science in the beginning of this century, his ideas still have little impact in the physics teaching research. This paper also contributes with examples of tradition in physics that are not very explored in his work, but of great didactics appeal in courses of physics history and physics epistemology for teacher's education.

**Keywords:** epistemology, Larry Laudan, Quantum Physics, teacher education.

### **Introdução**

Larry Laudan graduou-se em física pela Universidade de Kansas em 1962, tendo obtido seu Ph.D em filosofia pela Universidade de Princeton em 1965. Atualmente, é pesquisador sênior no "Instituto de las Investigaciones Filosóficas" da Universidade Autónoma Nacional do México (UNAM). Foi o fundador do departamento de história e filosofia da ciência da Universidade de

Pittsburgh e também lecionou na "University College London", na Universidade de Cambridge e nas universidades do Hawaii, de Illinois, de Melbourne, de Minnesota e de Rochester. Seus obras principais são *Progress and Its Problems* (University of California Press and Routledge, 1977); *Science and Hypothesis* (D. Reidel, 1981); *Science and Values* (University of California Press, 1984); *Science and Relativism* (University of Chicago Press, 1990) e *Beyond Positivism and Relativism* (Westview Press, 1996). Essas obras foram traduzidas para o chinês, francês, italiano, japonês, russo e espanhol. Em "*Progress and Its Problems*", Laudan apresenta sua epistemologia como um resgate da racionalidade da ciência, tratando deliberadamente de evitar alguns dos pressupostos-chave que produziram o que ele chama de "colapso da análise tradicional". Suas idéias evoluem a partir do impacto produzido pelas obras de Thomas Kuhn (1978) e Imre Lakatos (1989), que, para ele, representaram o abandono, como causa perdida, da racionalidade da ciência ou uma pequena variação na análise tradicional ("sofisticação" do modelo popperiano), respectivamente. Laudan também contesta as pretensões da epistemologia cientificista em aspectos cruciais, como o do realismo epistemológico e o da vinculação do progresso com o alcance da verdade (Pesa e Ostermann, 2002; Cupani, 1994).

Neste trabalho apresentamos os conceitos centrais da epistemologia de Larry Laudan (1984, 1986, 1990) a fim de explorar uma teoria do conhecimento científico ainda pouco investigada na área de pesquisa em ensino de física, mas bastante frutífera nesse início de século (Guridi *et al*, 2006; Cárdenas e Lozano, 2001). Analisamos também a Física Quântica como um exemplo de tradição de pesquisa – unidade de análise proposta por Laudan. Embora a Física Quântica seja considerada um dos pilares da física do século XX, paradigmática como teoria científica, Laudan pouco a explorou como exemplo de episódio histórico, o que ilustraria muito bem sua metodologia de pesquisa. É nesta direção - de um melhor entendimento de sua epistemologia - que o presente artigo busca também contribuir.

### **A epistemologia de Laudan e a educação em ciências**

Este trabalho é parte integrante de um projeto de pesquisa intitulado "A pesquisa em ensino de física no desenvolvimento do conhecimento profissional de professores", que entre outros objetivos, visa dar continuidade à produção de materiais didáticos inovadores, em particular no que se refere à interface entre a epistemologia e a física moderna e contemporânea, a serem utilizados no âmbito da formação inicial e continuada de professores de física e a serem incorporados no ambiente virtual InterAge (Rezende e Ostermann, 2004). Em particular, desenvolveu-se um estudo que teve como objetivo analisar interações discursivas online em um fórum de discussão que fez parte de uma atividade a distância viabilizada pelo referido ambiente virtual, na disciplina de Epistemologia e Ensino de Física de um curso de mestrado profissional em ensino de Física (Rezende e Ostermann, 2006). A atividade a distância ocorreu no final do primeiro semestre de 2005 e compreendeu a discussão de um problema da prática pedagógica do professor de Física que deveria ser

solucionado por meio do planejamento de uma unidade de ensino para o nível médio, fundamentada na epistemologia. Para tal, os professores contaram com os textos lidos ao longo da disciplina, outros textos disponibilizados no ambiente virtual e com a interação on-line em um fórum de discussão com a participação da professora da disciplina no papel de mediadora. O objetivo das intervenções da mediadora no fórum de discussão foi, de um modo geral, estimular reflexões e entendimentos dos principais conceitos da epistemologia de Larry Laudan a partir da leitura de textos sobre esse conteúdo e de um questionário composto por cinco perguntas abertas sobre as idéias deste autor, previamente entregue aos alunos. Em um dado momento, a mediadora provocou seus alunos com o seguinte questionamento: *Vocês já tomaram um exemplo na Física que possa ser entendido a partir do conceito de tradição de pesquisa de Laudan?* Foi possível perceber, então, que os enunciados dos alunos, em termos do conteúdo, ao longo do fórum, seguiram uma trajetória que partiu dos conceitos da sua epistemologia, mas que, dificilmente, avançou na direção da aplicação desta epistemologia a exemplos concretos na Física. Este resultado corrobora a relevância de se investir na preparação de materiais, tais como o texto aqui apresentado, que busquem integrar epistemologias contemporâneas a episódios da história da Física, contribuindo para que se estabeleça uma fundamentação epistemológica no ensino de conceitos científicos. Por outro lado, a temática da Filosofia e História da Ciência na pesquisa em educação em ciências tem se revelado de fundamental importância para a compreensão das concepções de ciência de alunos e professores e em que medida visões de senso comum representam obstáculos no entendimento do conhecimento físico (Guridi *et al*, 2006; Pesa e Ostermann, 2002; Ostermann e Prado, 2005). Contrapor tais visões com filosofias da ciência contemporâneas, que permitam leituras mais atuais da gênese do conhecimento científico, é uma forma de propiciar não só um melhor entendimento das teorias como também problematizar a visão hegemônica positivista da ciência na comunidade científica e no contexto escolar.

### **Idéias centrais da epistemologia de Laudan e a Física Quântica como exemplo**

A frase que pode resumir a epistemologia de Laudan é "A ciência é, em essência, uma atividade de resolução de problemas" (Laudan, 1986, p. 39). Sua perspectiva epistemológica considera que não há uma diferença fundamental entre a ciência e outras formas de produção intelectual. Ele, basicamente, propõe duas teses (op. cit. p. 42):

Tese 1: A primeira, e essencial, prova de fogo para uma teoria é se ela proporciona respostas aceitáveis a perguntas relevantes; em outras palavras, se ela proporciona soluções satisfatórias para problemas importantes.

Tese 2: Para avaliar os méritos das teorias, é mais importante perguntar se elas constituem soluções adequadas a problemas relevantes do que se as mesmas são "verdadeiras", se estão "corroboradas", "bem confirmadas", ou se

são justificáveis de qualquer outro modo no âmbito da epistemologia dominante no contexto histórico do momento.

Para Laudan, a dialética básica da ciência estaria no contraponto entre os problemas desafiantes e as teorias adequadas. Ao ampliar a esfera dos tipos de problemas existentes, Laudan propõe uma taxionomia que distingue, basicamente, problemas empíricos de problemas conceituais. Os problemas empíricos são definidos como “qualquer coisa acerca do mundo natural que nos surpreende como estranha ou que necessita de uma explicação; não necessitam descrever com precisão um estado de coisas real, o que se requer é que alguém pense que é um estado de coisas real (Laudan, 1986, p. 43). Perguntar-se como e por que os corpos caem em direção ao centro da Terra com uma regularidade assombrosa é um bom exemplo de problema empírico (tanto para Aristóteles, como para Galileu e Newton). O mesmo pode-se dizer acerca do fato de que o calor flui espontaneamente sempre de corpos a temperaturas maiores para aqueles a temperaturas menores. Trata-se de um problema empírico que os físicos da segunda metade do século XVIII tentavam resolver postulando a existência de um fluido imperceptível (o calórico) que fluiria dos corpos “mais quentes” para os “mais frios”. Para eles, portanto, era importante obter evidências da existência real do calórico. No decorrer do desenvolvimento científico, entretanto, a teoria do calórico foi abandonada e o problema da existência real do fluido calórico deixaria de ser considerado como “um estado de coisas real”. Ademais, para considerar algo como problema empírico, temos que sentir que “pode-se ganhar um prêmio ao solucioná-lo”. Os problemas acerca do mundo se diferenciam dos fatos que seriam “enunciados verdadeiros sobre o mundo”, na medida em que há muitos fatos que não suscitam problemas empíricos porque são desconhecidos, já que os problemas empíricos são dependentes da época. Já os fatos são considerados atemporais. Inclusive, fatos conhecidos podem não constituir problemas empíricos, pois há a necessidade de se reconhecer sua relevância em um dado momento histórico (esta idéia está vinculada à “possibilidade do prêmio na sua solução”). Por exemplo, em 1859, Gustav Kirchhoff provou que a energia emitida por um corpo negro dependia exclusivamente da temperatura do corpo e da frequência da energia emitida, através de uma função então desconhecida. Em 1879, Josef Stefan propôs, com base em dados experimentais, que essa energia seria proporcional à quarta potência da temperatura absoluta. Essa mesma conclusão foi obtida por Ludwig Boltzmann em 1884, por meio de considerações teóricas, usando a Termodinâmica e a Teoria Eletromagnética de Maxwell. O resultado – hoje conhecido como a lei de Stefan-Boltzmann - ainda não completava adequadamente o resultado obtido teoricamente por Kirchhoff, visto que não relacionava a energia emitida pelo corpo negro com a frequência ou o comprimento de onda da radiação que transportava consigo tal energia. Em 1900 e 1905, respectivamente, Rayleigh e Jeans encontraram uma solução para o problema que estava em concordância com as observações experimentais na faixa de grandes comprimentos de onda (ou de baixas frequências), mas que divergia dos dados experimentais para comprimentos de onda pequenos (altas frequências, na região do ultravioleta). Em 1896, Wilhelm Wien conseguiu deduzir uma lei

consistente com a realidade na faixa de pequenos comprimentos de onda, mas que não era válida para comprimentos de onda na região do infravermelho longínquo (grandes comprimentos de onda). Na virada do século XIX para o XX, a questão da obtenção teórica do espectro da radiação de corpo negro constituía um problema empírico da maior relevância para os físicos em geral, e, em particular, para os especialistas em Termodinâmica.

Numa tentativa de encontrar uma função matemática que se ajustasse aos dados experimentais, em 1900, Max Planck deu um passo sem precedentes na história da física. Considerando o caso de uma cavidade com paredes internas refletoras, ele propôs que as trocas de energia entre os diversos modos de vibração das ondas eletromagnéticas estacionárias, que se formam dentro da cavidade, e as paredes da mesma fosse sempre um múltiplo inteiro de um determinado valor mínimo de energia – o quantum de energia – que dependia linearmente da frequência da onda. Por este trabalho, Planck ganhou o Prêmio Nobel de física em 1918.

A história da solução do problema empírico da radiação de corpo negro mostra como a Física Quântica, em seus primórdios, já foi capaz de mostrar-se como uma atividade de resolução de problemas, proporcionando soluções aceitáveis para problemas importantes, mas que não foram vinculadas, naquele momento, à verdade (ou falsidade) da teoria. Em particular, Max Planck duvidou da solução encontrada por ele para o problema da radiação do corpo negro.

Outros exemplos de problemas empíricos que decorrem dos quanta propostos por Planck podem ser encontrados na história da física, tais como: (a) a predição teórica da existência da antimatéria, que levou ao desenvolvimento de experimentos para a detecção de uma série de partículas elementares (por ex. neutrino, pósitron, quark *top*) (b) o fenômeno da radioatividade, que levou ao desenvolvimento de tecnologias de geração de energia elétrica a partir do núcleo atômico; (c) a pesquisa de materiais supercondutores com o desenvolvimento da supercondutividade; (d) o fenômeno de interação da radiação com matéria, culminando na invenção do LASER e na interação de ondas de rádio com núcleos de hidrogênio, que nos permite obter imagens por ressonância magnética nuclear.

### **Tipos de problemas empíricos**

Segundo Laudan há três tipos de problemas empíricos (Laudan, 1986, p. 46).

1. *Problemas não resolvidos*: aqueles que não foram resolvidos adequadamente por nenhuma teoria.

A dificuldade experimental para a detecção do gráviton, por exemplo, constitui um problema empírico ainda não resolvido para a física de partículas (área da física fundamentada na mecânica quântica). Há uma forte analogia, tanto do ponto de vista teórico como experimental, entre o fóton e o gráviton. As partículas “mensageiras” ou intermediadoras das forças eletromagnéticas

são os fótons virtuais, mas evidentemente detectamos fótons reais na forma de radiação eletromagnética (clássica). Do mesmo modo, uma vez que a gravidade tem um raio de ação infinito, o gráviton deve ser uma partícula sem massa, possível de comprovação experimental através da captação de ondas gravitacionais (clássicas). As ondas gravitacionais são muito mais fracas que as ondas eletromagnéticas, pois a força da gravidade por unidade de massa é muito menos intensa do que a força eletromagnética por unidade de carga. Sua detecção é muito importante, pois elas permitiriam a verificação de predições fundamentais da teoria da Relatividade Geral, por exemplo. Os grávitons são, no entanto, muito difíceis de serem observadas devido à sua fraca interação com a matéria. Ainda nesse contexto de teoria de campos, os bósons de Higgs, partículas previstas pelo Modelo Padrão também se constituem em outro problema empírico da maior importância. A massa de cada uma dessas partículas resulta da influência de um campo universal associado a um bóson de Higgs, que está sempre presente, mesmo no vácuo absoluto. A detecção dos bósons de Higgs – problema empírico atualmente muito relevante – está, portanto, diretamente relacionada ao problema da determinação das massas de corpos.

Outros problemas empíricos de menor relevância, pelo menos aparentemente, acabaram se mostrando cruciais para o desenvolvimento de novas tecnologias. Um exemplo disto é a rápida perda de coerência na superposição de estados quânticos em limite macroscópico. Experimentos recentes (Bjork *et al*, 2004) tentam quantificar as escalas (ou “os graus”) de algumas superposições quânticas macroscópicas.

*2. Problemas resolvidos:* aqueles problemas que *já* foram resolvidos satisfatoriamente no âmbito de alguma teoria existente.

Nesta classe, não faltariam exemplos de problemas empíricos resolvidos pela Física Quântica. Em 1905, Einstein elaborou uma teoria para o efeito fotoelétrico. Elétrons de certos metais ou semicondutores são ejetados pela superfície do material iluminado por radiação eletromagnética. A teoria eletromagnética da luz fornecia resultados que divergiam dos resultados experimentais levando Einstein a propor uma teoria que usasse o quantum de luz de Planck para solucionar o problema. A teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico supõe a troca de quantum de energia entre o material e a radiação. Einstein recebeu o Prêmio Nobel em 1921 por este trabalho.

Em 1913, Niels Bohr escreveu um artigo revolucionário acerca do átomo de hidrogênio. O modelo de Bohr explicava a estabilidade do átomo e suas linhas espectrais em termos de órbitas estacionárias e da quantização espacial. Bohr ganhou o Prêmio Nobel de física em 1922 por ter resolvido este problema empírico - o da estabilidade do átomo.

*3. Problemas anômalos:* aqueles que uma determinada teoria conhecida não consegue resolver, mas que são resolvidos por uma ou mais teorias alternativas.

Nessa classe de problemas temos dificuldade de exemplificar com a Física Quântica, uma vez que não existem teorias alternativas que resolvam problemas não solucionados por ela.

É consenso entre os cientistas que a Física Quântica e a teoria da relatividade geral são as teorias mais fundamentais da física contemporânea, e que elas formam a base sobre a qual outras teorias contemporâneas são formuladas. A teoria quântica explica todos os fenômenos conhecidos até o momento com alto grau de precisão, e nenhuma teoria alternativa rivaliza com ela em prestígio e sucesso dentro da comunidade científica, a não ser como pequenas variantes de seu próprio núcleo.

Para Laudan, umas das características distintivas do progresso científico é a transformação de problemas anômalos e não resolvidos em problemas resolvidos. Devemos indagar, portanto, no caso de todas e cada uma das teorias, quantos problemas elas resolvem e quantas anomalias elas enfrentam. Essa questão se converte em uma das ferramentas fundamentais para a avaliação comparativa das teorias científicas.

Quanto ao *status* de problema não resolvido, Laudan destaca que os problemas não resolvidos somente se tornam autênticos problemas quando deixam de ser problemas não resolvidos (op. cit. p.47). Isto se deve, por exemplo, a resultados experimentais que são difíceis de reproduzir ou a instrumentos de medida que não são confiáveis. Portanto, esse tipo de problema tem um *status* ambíguo (op. cit. p.48), uma vez que sua não solução pode ser relacionada à limitação tecnológica da época. Por exemplo, durante quase um século, o problema de se buscar evidências da existência dos átomos não se configurava como um problema relevante, tendo em vista a ascensão renitente da concepção atômica da matéria quase ao final do século XIX. Como entre 1815 e 1880, os atomistas e os anti-atomistas coexistiam como comunidades científicas, o problema de buscar corroboração para a existência de átomos e moléculas não se configurava ainda como um problema de grande *status*.

Quanto aos problemas resolvidos, Laudan assinala que, a fim de determinar se uma dada teoria ou modelo resolve um problema específico, é irrelevante se ela é verdadeira ou falsa. Por exemplo, o modelo atômico de Bohr, por algum tempo, parecia resolver o problema da estabilidade do átomo de hidrogênio, apesar do modelo se mostrar insatisfatório após o advento da “nova” Física Quântica, ou seja, a mecânica quântica.

Freqüentemente ocorre a não permanência das soluções, o que pode ser constatado na explicação semiclássica fornecida pelos primeiros modelos atômicos, ou na explicação quântica para o mesmo problema empírico (o da estabilidade atômica, por exemplo). Além disso, os critérios de aceitação das soluções dos problemas evoluem ao longo do tempo, não sendo transculturais ou atemporais.

Quanto aos problemas anômalos, Laudan considera que o aparecimento de uma anomalia suscita dúvidas acerca da teoria que a revela, mas isso não necessariamente implica o seu abandono. Por exemplo, segundo Lakatos

(1989), o modelo atômico de Bohr triunfa apesar de tratar-se de um “remendo” semiquântico. Laudan, por outro lado, defende que não importa tanto quantas anomalias gera uma dada teoria, mas sim a relevância cognitiva que essas anomalias concretas possuem. Estas estariam relacionadas ao grau de discrepância entre o resultado experimental observado e a previsão teórica obtida ou à sua antiguidade e à sua resistência em ser solucionada pela teoria considerada. A avaliação da relevância dos problemas empíricos é uma questão cognitiva racional, pois, para Laudan, a importância da resolução de problemas empíricos (tanto aqueles já resolvidos como os anômalos) não é a mesma em todos os casos, uma vez que alguns deles são de muito maior importância do que outros. Por exemplo, quando ocorre a valorização de um problema por sua solução ou a diminuição de sua importância por sua dissolução. A avaliação da importância de um problema ou de uma anomalia concreta requer também o conhecimento das diversas teorias do domínio e o conhecimento sobre se essas teorias tiveram êxito ou não ao propor soluções. Se um problema não resolvido por uma teoria T1 também não é resolvido por todas as outras teorias do domínio, então esse problema não pode pesar muito na avaliação de T1. Se, ao contrário, T1 não o resolve, mas há outra teoria rival que o faz, então o problema constitui uma efetiva anomalia para T1.

### **Problemas conceituais**

Distanciando-se dos filósofos empiristas, Laudan propõe uma nova categoria de problemas, os chamados problemas conceituais (definidos como aqueles apresentados por uma teoria), argumentando que a capacidade das várias teorias rivais na resolução de problemas empíricos pode ser praticamente equivalente (op. cit. p.80). Por exemplo, segundo o autor, a disputa entre atomistas e anti-atomistas (durante o período de 1815 e 1880) representa um período histórico de controvérsia científica no qual o apoio empírico a cada uma das teorias citadas era essencialmente o mesmo. O início do desenvolvimento da Física Quântica está relacionado, entre outros aspectos, à “vitória” dos atomistas no final do século XIX.

### **Tipos de problemas conceituais**

1. *Problemas internos*: quando uma teoria é logicamente inconsistente e, portanto, autocontraditória. Neste caso, surgem ambigüidades ou circularidades conceituais no âmbito da teoria. Por exemplo, seguindo a interpretação ortodoxa da Física Quântica (doutrina de Copenhague), temos inconsistência na explicação da dualidade onda-partícula, pois um padrão de interferência em tela (fenômeno ondulatório) é incoerente com as detecções de partículas individuais na mesma tela, que são de caráter indubitavelmente puntiforme, o que caracterizaria um fenômeno corpuscular (Pessoa Jr, 2003; Ostermann e Prado, 2005, Ostermann *et al*, 2006).

Nesse aspecto, a teoria quântica é de difícil compreensão. Há uma dificuldade interna nela para explicar o problema da dualidade onda-partícula e o processo de medida, que envolve o decorrente colapso da função de onda

durante a medição. O conceito de partícula envolve um ente dotado de posição e velocidade bem especificadas, enquanto o conceito de onda envolve uma entidade não-localizada no espaço. Classicamente, um fenômeno pode ser ondulatório ou corpuscular, mas essas duas características têm significados lingüísticos antagônicos e, portanto, não deveriam revelar-se simultaneamente. Na Física Quântica, embora o comportamento simultâneo de onda e de partícula nunca seja detectado, precisamos de ambos os conceitos para descrever a dinâmica do mundo microscópico através da mecânica quântica. Objetos quânticos ora apresentam comportamento típico de ondas, ora de partículas, mas eles sempre são detectados como corpúsculos. A corrente ortodoxa da Física Quântica é omissa quanto ao que está acontecendo enquanto nenhuma medida é realizada.

*2. Problemas externos:* quando uma teoria é logicamente inconsistente com outra teoria aceita. Quanto às fontes de problemas conceituais externos, Laudan destaca (1986, p. 88) basicamente três tipos de dificuldades:

*Dificuldades intracientíficas:* quando teorias científicas de diferentes domínios estão em contradição. São conhecidas as incompatibilidades entre a Física Quântica e a relatividade geral (RG). A Física Quântica opera no domínio das escalas microscópicas (átomos e partículas subatômicas), enquanto que a RG atua na escala de massas planetárias, galácticas, etc. Um exemplo de problema é o do buraco negro, um objeto extremamente massivo e relativamente pequeno, cuja descrição quântica não é coerente com a relativística. Uma outra dificuldade da unificação dessas teorias advém da maneira diferente como a massa é tratada em cada uma delas. Pela relação de incerteza posição-momentum de Heisenberg, uma partícula confinada em uma região muito pequena do espaço, poderá criar uma certa quantidade de energia muito grande. Em escalas de tempos relativamente muito curtos, a relação de incerteza de energia-tempo prevê a criação de partículas muito massivas, fato este nunca observado.

*Dificuldades normativas:* quando uma teoria científica está em conflito com teorias metodológicas da comunidade científica. No caso da Física Quântica, muitas disputas se centram sobre questões metodológicas: coexistem várias interpretações epistemológicas acerca de seus fundamentos (Pessoa Jr, 2003; Ostermann e Prado, 2005; Bunge, 2003). Entre as interpretações mais conhecidas estão a da escola de Copenhague (dualista-positivista), as de diferentes vertentes realistas (variáveis ocultas, ondulatória) e, mais recentemente, a chamada interpretação dos "muitos mundos". Essas várias interpretações alternativas da Física Quântica não podem ser distinguidas através de experimentos. Se tal fosse possível, elas não seriam novas interpretações, mas sim novas teorias.

*Dificuldades relativas à visão de mundo:* quando uma teoria científica está em conflito com algum componente da visão de mundo dominante. Na maior parte dos casos, como resultado das tensões entre a ciência, por um lado, e a teologia, a filosofia e a sociologia, por outro. Ao final da década de 20 do século XX, o surgimento da Física Quântica encontrou pronta e rápida

aceitação entre os muitos intelectuais que estavam convencidos de que já não se podia confiar nas rígidas categorias causais da física clássica. Por outro lado, há dissonâncias entre a MQ e nossas crenças filosóficas acerca da causalidade, mudança, substância e “realidade”.

Ao propor um modelo centrado na resolução de problemas, Laudan, em síntese, enfatiza (op. cit. p.100) que o problema – empírico ou conceitual – a ser resolvido é a unidade básica de progresso científico. O objetivo da ciência, portanto, seria o de ampliar ao máximo a esfera de problemas empíricos resolvidos e, ao mesmo tempo, reduzir ao mínimo o âmbito de problemas anômalos e conceituais.

Outro conceito importante na epistemologia de Laudan é o de efetividade global de uma teoria na resolução de problemas. Esta se determina avaliando o número e a importância dos problemas empíricos que a teoria resolve, e “subtraindo” o número e a importância das anomalias e problemas conceituais que a teoria gera. Há progresso se, e somente se, a sucessão de teorias científicas em um domínio mostra um grau crescente de efetividade na resolução de problemas. Quando modificamos uma teoria ou a substituímos por outra, a mudança é progressiva se, e somente se, a versão posterior resolve os problemas com mais eficácia do que sua predecessora (op. cit. p.102). No caso da Física Quântica, apesar das divergências epistemológicas e de seus problemas conceituais, sua evolução deu origem a novas áreas da física (física nuclear, física de partículas, cromodinâmica quântica, estado sólido) e suas rupturas com o mundo clássico (não-causalidade, não-localidade) continuam gerando progresso científico e filosófico.

### **Tradição de pesquisa**

A unidade de análise adotada por Laudan (1986, p. 104) é a tradição de pesquisa. Algumas características de uma tradição de pesquisa são as seguintes:

As tradições de pesquisa têm um certo número de teorias específicas que a exemplificam e a constituem parcialmente: algumas delas são teorias contemporâneas, outras serão sucessoras temporais de teorias anteriores. No caso da Física Quântica, sua constituição está baseada em postulados e em suas diferentes formulações (matricial, ondulatória, de Dirac).

Toda tradição de pesquisa evidencia determinados compromissos metafísicos e metodológicos que, como conjunto, individualizam a tradição de pesquisa e a distinguem das outras. Como compromissos metafísicos para a Física Quântica, temos seu objeto de estudo, o mundo microscópico, e seu formalismo, bem como seus métodos matemáticos, que são parte de seus compromissos metodológicos.

Cada tradição de pesquisa (diferentemente das teorias específicas) discorre através de um certo número de formulações diferentes, pormenorizadas, e tem, geralmente, uma história que se estende ao longo de um considerável período de tempo. (Ao contrário, as teorias têm, freqüentemente, uma vida

curta.) Se considerarmos a tradição de pesquisa quântica, englobando tanto a “velha” como a “nova” teoria da Física Quântica, claramente verificaríamos uma evolução desde modelos presos à física clássica até os que representam uma verdadeira ruptura com o mundo macroscópico.

Uma tradição de pesquisa é, portanto, um conjunto de afirmações e negações de caráter ontológico (objetos de indagação) e metodológico (métodos de indagação), constituindo um conjunto de pressupostos gerais acerca das entidades e dos processos de um âmbito de estudo, e acerca dos métodos apropriados que devem ser utilizados para investigar os problemas e para construir as teorias do domínio. A tradição de pesquisa quântica tem êxito quando, por intermédio de suas teorias componentes, fornece as soluções adequadas para um conjunto crescente de problemas, empíricos e/ou conceituais.

De acordo com Laudan, a evolução das tradições de pesquisa ocorre quando há modificação em alguma de suas teorias específicas subordinadas, ou quando há uma mudança em alguns de seus elementos nucleares mais básicos. Neste ponto, Laudan assume novamente uma posição contrária a de Lakatos (1989), que considerou o núcleo firme de um programa de pesquisa como irrefutável por decisão provisória. Para Laudan, o conjunto de elementos irrefutáveis de uma tradição de pesquisa varia com o tempo. Laudan vê uma integração das tradições de pesquisa (e não um monismo teórico como propôs Kuhn) ao defender que um cientista pode trabalhar consistentemente em mais de uma tradição de pesquisa (op. cit. p.141). A co-existência de tradições de pesquisa rivais é a regra, não a exceção. Um período histórico que ilustra esse pluralismo teórico é o da gênese da Física Quântica, quando, apesar das inconsistências, os cientistas trabalhavam em mais de uma tradição de pesquisa (por exemplo, eletromagnetismo e mecânica newtoniana).

Laudan pode ser considerado o último racionalista do século XX ao argumentar em favor da existência de critérios racionais para a escolha de tradições de pesquisa (racionalismo epistemológico). Na avaliação das tradições de pesquisa, sua progressividade envolveria um aspecto retrospectivo de avaliação – o progresso geral (determinado pela comparação de sua efetividade na resolução de problemas dos conjuntos de teorias que constituem sua versão mais antiga com a dos que constituem sua versão mais recente) - e um aspecto prospectivo de avaliação que seria uma taxa de progresso, identificada por suas mudanças na adequação momentânea durante um período de tempo específico. Neste ponto, Laudan assume novamente uma posição contrária a de Lakatos (1989), que considerou o núcleo firme de um programa de pesquisa como irrefutável por decisão provisória. Para Laudan, o conjunto de elementos irrefutáveis de uma tradição de pesquisa varia com o tempo. Em relação aos contextos nos quais são avaliadas as tradições de pesquisa, Laudan destaca o contexto da aceitação, no qual os cientistas decidem aceitar uma tradição de pesquisa entre um grupo de tradições de pesquisa rivais, isto é, decidem considerá-la como verdadeira. Como eles fazem tal escolha? Segundo Laudan, trata-se de uma escolha racional: eles escolhem a tradição de pesquisa mais adequada para resolver problemas de

interesse. A escolha de uma tradição de pesquisa entre suas rivais é uma escolha progressiva (e, portanto, racional), na medida em que a tradição de pesquisa escolhida resolve mais problemas do que suas rivais (Laudan, 1986, p. 148). Quanto ao contexto de utilização, Laudan argumenta que os cientistas podem ter boas razões para trabalhar em uma tradição de pesquisa que não aceitam (em geral, é o que ocorre com tradições de pesquisa novas). São muitos os motivos específicos para seguir uma tradição de pesquisa e estão ligados ao que, na comunidade científica, chama-se de “promessa” ou “fecundidade” (op. cit. p.151). É sempre racional seguir qualquer tradição de pesquisa que tenha uma taxa de progresso mais elevada do que suas rivais (mesmo que seu progresso geral acumulado seja menor). No caso da Física Quântica, a célebre frase “Feche os olhos e calcule”, significa que o triunfo de uma teoria na solução de problemas pode ser considerado mais importante do que sua veracidade. Ou seja, os físicos podem trabalhar em uma tradição de pesquisa que não aceitam.

Laudan faz a seguinte caracterização geral das mudanças científicas (Laudan, 1986, p. 160):

1. A adequação ou a eficácia das várias teorias depende da quantidade de problemas empíricos importantes que cada qual resolve, e da quantidade de problemas conceituais e anomalias graves que ela gera. A aceitação dessas teorias está em conexão tanto com sua eficácia quanto com a aceitação de sua tradição de pesquisa associada.
2. A aceitação de uma tradição de pesquisa, por sua vez, está determinada pela eficácia de suas teorias para resolver problemas.
3. A promessa, ou possibilidade de utilização racional de uma tradição de pesquisa está determinada pelo progresso geral ou pela taxa de progresso exibida por ela.
4. A aceitação, o rechaço, a utilização e a não utilização constituem as grandes atitudes cognitivas que os cientistas podem adotar legitimamente com respeito às tradições de pesquisa (e suas teorias constitutivas). A determinação da veracidade ou da falsidade é irrelevante para a aceitação ou viabilidade das teorias e das tradições de pesquisa.
5. Todas as avaliações das teorias e das tradições de pesquisa têm de ser realizadas em um contexto comparativo. O que importa não é quão efetiva ou progressiva é uma tradição de pesquisa de forma absoluta, mas que eficácia ou caráter progressivo ela apresenta em comparação com suas rivais.

Podemos exemplificar essas afirmações dentro do contexto histórico do desenvolvimento da teoria da radiação do corpo negro, em especial, com relação à idéia do quantum de energia. No final o século XIX, buscava-se por uma expressão que descrevesse corretamente o comportamento da densidade de energia espectral  $r(l, T)$  - uma função da temperatura e do comprimento

de onda. Em 1896, Wien demonstra sua famosa *lei do deslocamento* (que leva seu nome – lei do deslocamento de Wien). Essa lei estabelecia que a densidade de energia é dada por

$$r(l, T) = \frac{f(lT)}{l^5},$$

onde  $f(lT)$  é uma função, ainda por determinar, cuja variável é o produto do comprimento de onda  $l$  pela temperatura absoluta  $T$ . Ao se plotar os dados experimentais de Otto Lummer (1860-1925) e de Ernst Pringsheim (1859-1917), colocando-se o produto  $l^5 r(l, T)$  no eixo das ordenadas, e o produto  $lT$  no eixo das abscissas, percebe-se que, para qualquer temperatura absoluta, todos os grupos de dados caem na mesma curva: a função  $f(lT)$ . No entanto, não havia como desenvolver, a partir da termodinâmica clássica ou do eletromagnetismo de Maxwell, argumentação teórica que permitisse encontrar a forma funcional de  $f(lT)$ . Além disso, em 1900, Lummer e Pringsheim e Rubens e Kurlbaum, independentemente, conseguem determinar experimentalmente o espectro de radiação térmica em comprimentos de onda grandes (infravermelho longínquo), concluindo que a fórmula de Wien não é válida nessa região do espectro. Nesse ponto, tratava-se de um problema empírico de altíssima importância, uma vez que ainda não havia uma teoria satisfatória para prever o espectro da radiação térmica.

Em 1900, é feita uma primeira tentativa de estabelecer uma teoria para a radiação de corpo negro: a teoria de Lord Rayleigh (John William Strutt, 1842-1919), completada em 1905 por James Jeans (1877-1946), sendo considerada uma teoria *clássica* da radiação térmica. Como o modelo teórico que mais se aproxima do idealizado corpo negro era o da radiação dentro de uma cavidade, foi esse o ponto de partida. Rayleigh e Jeans consideraram que a cavidade fosse constituída por osciladores microscópicos que absorviam e emitiam ondas eletromagnéticas. Com isso, eles calcularam o número de ondas estacionárias em uma faixa estreita de frequências, entre  $n$  e  $n + dn$ , que são permitidos em uma cavidade de volume  $V$ . Essa quantidade, que foi calculada corretamente por eles, deveria ser multiplicada pela energia média de cada oscilador que, segundo a mecânica estatística clássica, era dada pelo teorema da equipartição:  $(1/2)k_B T$  para cada grau de liberdade. Dividindo-se o resultado pelo volume da cavidade, obtinha-se uma expressão para a densidade de energia espectral da radiação de corpo negro. Como já citado, essa primeira tentativa de estabelecer uma teoria para o fenômeno resultou em fracasso na faixa de altas frequências. Logo, havia problemas em sua formulação.

Em dezembro de 1900, Max Planck deduz uma expressão correta para a densidade de energia espectral da radiação térmica. Nos limites apropriados, pode-se mostrar que a lei obtida por Planck contém as leis obtidas por Rayleigh-Jeans e Wien, mostrando-se, portanto, mais geral. Mas, para isso, Planck foi impelido a fazer uma hipótese surpreendente: que a energia dos

osciladores não variava continuamente, mas de forma discreta. A energia de cada oscilador seria proporcional à frequência de oscilação do mesmo, e a constante de proporcionalidade foi determinada, sendo hoje conhecida como a constante de Planck. Existiria um quantum de energia, portanto, e a energia total dos osciladores deveria ser um múltiplo inteiro desse quantum. Apesar de descrever muito bem o espectro da radiação de corpo negro, a proposta de Planck introduziu uma anomalia considerável do ponto de vista da física clássica.

Apesar do sucesso da hipótese de Planck na explicação da radiação térmica de corpo negro, o quantum de energia só despertou interesse da comunidade científica a partir de 1905, com a publicação do famoso artigo de Einstein sobre o efeito fotoelétrico. Em 1906, novamente supondo a existência dos quanta de energia, Einstein conseguiu calcular o calor específico dos sólidos para uma variação ampla de temperatura, incluindo temperaturas baixas. Convém lembrar que o comportamento do calor específico dos sólidos a baixas temperaturas não pode ser explicado pela física clássica. Este trabalho e o trabalho sobre o efeito fotoelétrico contribuíram em muito para que a idéia do quantum de energia fosse finalmente aceita. Posteriormente, em 1913, o holandês Peter Debye (1884-1966) trabalhou nesse mesmo assunto, obtendo resultados mais precisos do que os de Einstein para temperaturas muito baixas, onde a teoria de Einstein não estava em boa concordância com resultados experimentais. Como Einstein, Debye supôs que os átomos constituintes dos sólidos são osciladores cuja energia é quantizada, mas, diferentemente de Einstein, ele supôs corretamente que esses átomos não são osciladores independentes, e sim acoplados. A idéia do quantum novamente desfrutava de inegável sucesso. No mesmo ano que Debye propôs sua teoria, Bohr propõe um modelo atômico que reproduz satisfatoriamente o espectro de emissão de átomos hidrogenóides (átomos com um elétron – hélio uma vez ionizado ou o próprio hidrogênio, por exemplo). Embora a idéia do quantum de energia fosse uma grave anomalia para a física clássica, ela acabou triunfando. Esse triunfo não se deu apenas com um sucesso inicial da teoria de Planck, mas com uma cadeia de sucessos, a partir dali. Isso exemplifica bem as afirmações 1 e 2, de Laudan, a respeito das tradições de pesquisa. A afirmação 3 relaciona a promessa de utilização racional de uma tradição de pesquisa com a taxa de progresso exibida por ela. Claramente, a aceitação da idéia do quantum de energia aumentou muito entre a comunidade científica após Planck ter sido bem sucedido, com sua proposta, em explicar o espectro da radiação térmica emitida por um corpo negro. Entretanto, foi necessário que outras propostas teóricas fossem bem sucedidas em explicar outros fenômenos não explicados pela física clássica, envolvendo o quantum de energia, para que a comunidade científica em geral se interessasse cada vez mais pelo assunto e aceitasse essa idéia, constituindo assim o início da tradição de pesquisa quântica.

A afirmação 4 pode ser ilustrada pelo modelo atômico de Bohr para átomos hidrogenóides. Através de quatro postulados, ele conseguiu deduzir a fórmula de Rydberg para os comprimentos de onda das raias do espectro do átomo de

hidrogênio, que havia sido obtida empiricamente por volta de 1890. Seus postulados eram basicamente os seguintes:

1. *Um elétron em um átomo se move em uma órbita circular em torno do núcleo, sob a ação da atração coulombiana (entre núcleo e elétron) e obedecendo parcialmente as leis da mecânica clássica;*
2. *Ao invés de uma infinidade de órbitas possíveis de acordo com a mecânica clássica, só é permitido ao elétron mover-se em uma órbita para a qual o momentum angular eletrônico seja um múltiplo inteiro da constante de Planck dividida por  $2h$ ;*
3. *Apesar do fato de estar constantemente acelerado, um elétron que se mova em uma órbita "permitida" não irradia energia eletromagnética - como previsto pelo eletromagnetismo clássico - e mantém constante sua energia total (órbita estável);*
4. *A radiação eletromagnética é emitida se um elétron, que inicialmente se move em uma órbita de energia total  $E_i$ , muda descontinuamente seu movimento para uma órbita de energia total  $E_f$ . A frequência da radiação emitida nesta transição é igual à variação de energia total do átomo,  $E_f - E_i$ , dividida pela constante de Planck.*

Esse modelo atômico parece insatisfatório, pois lhe falta certa consistência. É muito difícil aceitar como válido, por exemplo, o terceiro postulado, que está em desacordo completo com o que é previsto pela teoria eletromagnética de Maxwell. Apesar disso, o modelo teve um sucesso impressionante por prever com excelente precisão os comprimentos de onda das raias espectrais das séries de Lyman, de Brackett e de Pfund para o átomo de hidrogênio que, na época, ainda sequer haviam sido observadas. No entanto, além de exibir tais inconsistências, o modelo de Bohr falhava clamorosamente para átomos não hidrogenóides como o Hélio neutro, por exemplo. Apesar de ser mais parecido a um remendo semi-clássico dos modelos atômicos da época, do que uma nova teoria bem fundamentada, o modelo de Bohr foi muito bem sucedido.

A afirmação 5 não encontra um exemplo desse período histórico. Não havia outra teoria que rivalizasse em sucesso com sua hipótese de quantização da energia. Sabe-se que Planck, durante anos, trabalhou no sentido de deduzir a lei que leva seu nome sem usar tal idéia, um indício de que ele próprio teve dificuldade em lidar com ela. Planck não teve sucesso neste intuito.

Para Laudan, a revolução científica não é a categoria básica para o tratamento da evolução da ciência. O debate sobre os fundamentos conceituais de qualquer tradição de pesquisa é um processo historicamente contínuo. Esse ponto é também bastante evidente na Física Quântica, uma vez que, atualmente, cresce o número de cientistas que se debruçam sobre problemas de seus fundamentos (Bjork *et al*, 2004).

Revoluções científicas para Laudan são produzidas quando uma tradição de pesquisa, até então desconhecida ou ignorada pelos cientistas de uma dada área, alcança um grau de desenvolvimento tal que os mesmos cientistas se

sentem obrigados a levá-la seriamente em consideração como aspirante à sua lealdade ou à de seus colegas. Em uma dada revolução, é possível comparar objetiva e racionalmente as tradições de pesquisa rivais (a incomensurabilidade não leva à irracionalidade), a partir de dois argumentos: do ponto de vista da resolução de problemas, e do progresso. Do ponto de vista da resolução de problemas, é possível mostrar que teorias explicativas rivais podem se referir a um mesmo problema. Como já citado, no início do século XX, teorias semiclássicas vinculadas à velha Física Quântica davam conta, até certo ponto, de vários problemas atômicos. Do ponto de vista do progresso (caso em que não se poderia decidir se as teorias rivais tratam do mesmo problema), por outro lado, a partir da determinação da efetividade das tradições de pesquisa, poderíamos construir algo como uma graduação progressiva de todas as tradições de pesquisa em um dado momento. Seria, então, possível comparar a progressividade de tradições de pesquisa diferentes, inclusive se elas fossem totalmente incomensuráveis.

### **O modelo de rede triádica**

Laudan (1984) critica os modelos hierárquicos e holísticos da epistemologia da ciência, tais como o modelo de Kuhn (1978), que procuram explicar as mudanças científicas a partir da ênfase no efeito que as mudanças de compromissos com as teorias têm sobre os compromissos metodológicos, os objetivos e as metas de pesquisa. Nesse modelo, as mudanças nos compromissos com as teorias científicas centrais seriam condição suficiente para que se produzissem mudanças em todos os elementos da atividade científica, em particular, nos compromissos metodológicos e nos objetivos da investigação. Segundo Laudan (1984), tal visão da mudança científica é imperfeita por várias razões. À luz da história da ciência, as mudanças científicas são mais graduais e menos holísticas. As mudanças nas teorias usadas, nos métodos empregados e nos objetivos definidos ocorrem, com frequência, em períodos mutuamente excludentes. Assim, mesmo que ocorra uma mudança metodológica, não se produz uma mudança imediata nas teorias ou nos objetivos.

As diferentes formulações que surgiram no âmbito da nova Física Quântica (mecânica matricial de Heisenberg, mecânica ondulatória de Schrödinger, formulação de Dirac) representam, em certo sentido, mudanças metodológicas, mas que não produziram uma nova teoria ou uma reformulação nos seus objetivos (Ostermann e Ricci, 2005). Os diferentes *pictures* da Física Quântica, como o de Heisenberg (operador evolução temporal afeta os observáveis) ou Schrödinger (operador evolução temporal afeta os vetores do espaço *ket*) se mostram equivalentes, no sentido que são apenas diferentes abordagens. Assim, ambas constituem metodologias levemente distintas, sem que se produza uma mudança na teoria ou nos objetivos. A formulação de Feynman é considerada uma abordagem distinta da Física Quântica (mais do que um simples *picture*), e se fundamenta em integrais de caminho. Mesmo assim, se mostra equivalente tanto ao *picture* de Schrödinger quanto ao de Heisenberg. Esse tipo de abordagem se mostra mais

adequada, porém, na teoria quântica de campos e na mecânica estatística (por exemplo, no estudo de fenômenos críticos). Fica claro, entretanto, que todas essas diferentes abordagens não causam descontinuidades nos objetivos ou na própria teoria, mesmo usando métodos às vezes bem distintos entre si.

A Teoria das Supercordas, por sua vez, não pode ser considerada como uma formulação alternativa da Física Quântica ou da Teoria Quântica de Campos, e sim, uma teoria nova, baseada nelas. Ela insere mudanças metodológicas que se refletiram em mudanças na teoria e também nos objetivos. Problemas que aparecem na Teoria Quântica de Campos, principalmente no que se refere a uma formulação de uma teoria quântica da gravitação, parecem não ser problemas nessa nova formulação. Isso torna a Teoria de Supercordas uma potencial candidata a se tornar uma teoria quântica da gravitação, introduzindo elementos novos na Teoria Quântica de Campos. (As partículas elementares seriam vistas como harmônicos que surgem em cordas quânticas e relativísticas, com tensão fixa, o que não é previsto em nenhuma formulação da Física Quântica). O preço dessa formulação promissora é que o espaço-tempo não seria 4-dimensional e surgem as famosas dimensões extras, outro aspecto novo na teoria. Isso não pode ser entendido como uma violação do conceito de rede triádica, pois pode-se imaginar a teoria das Supercordas, que vem no sentido de refinar profundamente a Teoria Quântica de Campos, como uma teoria rival desta, segundo Laudan. A primeira tem sucesso em resolver problemas que a segunda não. A Teoria das Supercordas não tem como objetivo apenas a descrição do mundo microscópico, de seus objetos quânticos e interação entre eles, passando a ter um papel mais amplo, que é de *unificação*, através da formulação de uma teoria quântica para a gravitação, o que não é contemplado pela teoria quântica de campos.

Os modelos holísticos não enfatizam suficientemente o papel que os objetivos e a metodologia desempenham na descoberta de anomalias que levam a mudanças de paradigmas. A importância que instrumentos, estratégias e tecnologias têm sobre o desenvolvimento de anomalias e de mudanças nas ciências não é devidamente considerada. Consideremos, por exemplo, a possibilidade que temos hoje de implementar muitos dos experimentos de pensamento concebidos no período de formulação da MQ. Um exemplo importante é a possibilidade de se trabalhar em regime monofotônico, como em um interferômetro de Mach-Zehnder (Pessoa Jr, 2003; Ostermann *et al*, 2006) para verificar a previsão da mecânica ondulatória, por meio da interpretação de Copenhague, de que um fóton interfere consigo mesmo em experimentos de interferometria.

Os modelos holísticos também não consideram que mudanças nos objetivos da investigação científica, às vezes desencadeadas por circunstâncias de caráter social, podem acelerar a descoberta de novos resultados anômalos. Neste sentido, é importante reconhecer o papel que os fatores sociais têm nas atividades das instituições de pesquisa. O desenvolvimento da corrida espacial e da física nuclear e de partículas durante as décadas de 1950 e 60, por exemplo, como decorrência da guerra fria, gerou novas tecnologias que permitiram, nas décadas seguintes, mudanças significativas e rápidas na

tradição de pesquisa da astrofísica e da cosmologia, bem com na tradição de pesquisa da física de partículas, mudanças essas que provavelmente não teriam ocorrido com tal velocidade não fossem as gigantescas somas de investimentos governamentais feitos com base em decisões políticas, e não meramente científicas. O desenvolvimento de toda uma tradição de pesquisa pode ser redirecionado e acelerado pelo contexto histórico, como vemos nos exemplos, através de decisões políticas que acabam por alterar os fins e os objetivos científicos, enquanto outras tradições de pesquisa seguem se desenvolvendo em um ritmo muito menor.

Laudan (1984) propõe um modelo epistemológico que busca superar essas dificuldades – um modelo reticular, não hierárquico. Ele postula três níveis de compromisso para os cientistas, nenhum dos quais desfruta de *status* privilegiado frente aos outros dois:

- Os compromissos com as teorias;
- Os compromissos com as metodologias;
- Os compromissos com os fins e objetivos da ciência.

O autor assinala que o modelo reticular se difere do hierárquico, fundamentalmente, na insistência de que há um processo complexo de ajuste e justificativa mútuos que ocorre entre todos os níveis de compromissos científicos. Demandas axiológicas, metodológicas e factuais estão, inevitavelmente, interconectadas em relações de mútua dependência. Não podemos considerar nenhum desses níveis como privilegiado, primário ou mais fundamental do que os outros. Em uma aproximação hierárquica, a ordem hierárquica deve dar lugar a um princípio nivelador que enfatiza os padrões de dependência mútua entre estes vários níveis (op.cit).

Laudan sustenta que a produção do conhecimento pode ser representada como uma *rede triádica*, na qual:

- Os objetivos justificam a metodologia e devem se harmonizar com as teorias;
- Os métodos justificam as teorias e mostram sua factibilidade nos objetivos;
- As teorias restringem as metodologias e se harmonizam com os objetivos.

De acordo com o modelo de rede triádica (figura 1), as mudanças científicas são mais fragmentadas. É possível que uma comunidade científica altere seus compromissos com a teoria, mesmo mantendo seus compromissos com os métodos, fins e objetivos do esquema teórico prévio. Segundo Laudan, um aspecto crítico de se centrar toda a ênfase epistemológica nas teorias é que, assim, se reforça a imagem de desenvolvimento científico como um conjunto de mudanças caprichosas e irracionais, deixando-se de lado questões perfeitamente racionais e razoáveis que também contribuíram e contribuem para as mudanças nas ciências. Ele assinala que uma seqüência de mudanças de opinião que parece perfeitamente racional quando descrita minuciosamente,

pode parecer uma mudança fundamental e ininteligível na visão de mundo, quando apresentada com menor detalhamento.

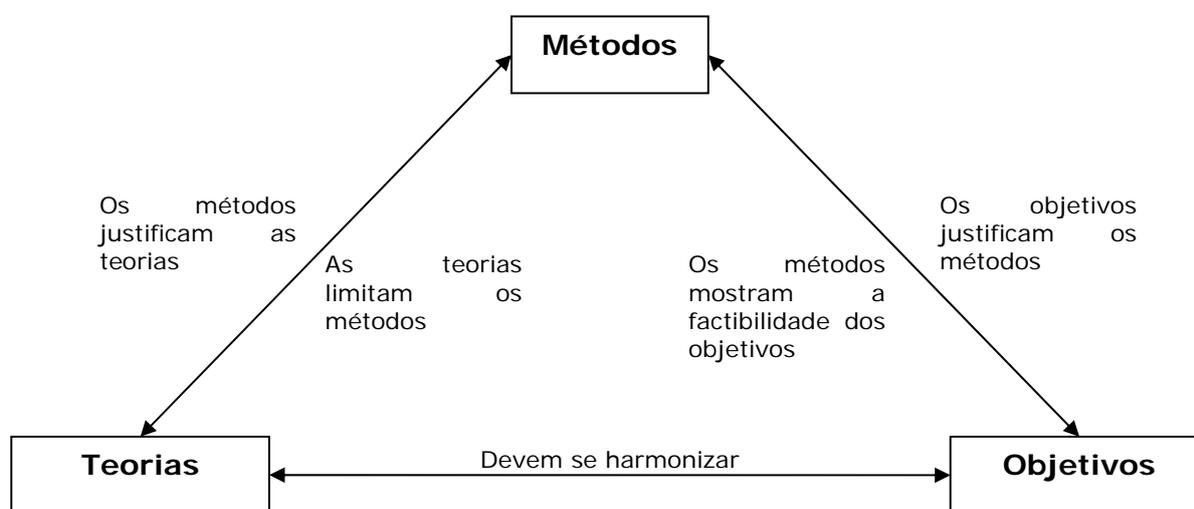


Figura 1.- Modelo esquemático da rede triádica.

### Considerações finais

Em síntese, a epistemologia de Laudan é uma das últimas leituras racionalistas do desenvolvimento científico na virada do século XX para o XXI, que, contestando a visão cientificista, representa uma contribuição significativa para a filosofia da ciência e para o ensino de física neste início de milênio. Uma leitura da Física Quântica à luz de sua epistemologia permite perceber que, apesar das divergências epistemológicas e de seus problemas conceituais, sua evolução abriu novas áreas na física (nuclear, de partículas, cromodinâmica quântica, estado sólido etc) e suas rupturas com o mundo clássico (não-causalidade, não-localidade etc) continuam gerando progresso científico e filosófico.

Esperamos que este texto possa contribuir para um melhor entendimento da epistemologia de Laudan, estimulando sua discussão em cursos de formação de professores, na medida em que este autor não explorou de maneira mais profunda episódios históricos que exemplificassem conceitos centrais de sua construção teórica. No âmbito do ensino de ciências, é consenso que não é só preciso aprender conceitos científicos, mas também aprender sobre sua construção (Matthews, 1990; Silveira e Ostermann, 2002). Em particular, na formação inicial e continuada de professores, é crucial que se busque uma abordagem mais conceitual e qualitativa da Física Quântica. Ao contrário de ser uma desvalorização para essa formação, esse tipo de ensino requer do professor profundo conhecimento do conteúdo. Além disso, possíveis transposições didáticas para o ensino médio dependem fortemente de uma sólida formação conceitual, que só poderá ser construída se fundamentada em discussões epistemológicas e ontológicas. O conceitual e o epistemológico estão completamente imbricados quando perguntamos, por exemplo, o que a

Física Quântica poderia significar para nossa visão de mundo. A conceituação de objetos quânticos só pode ser feita à luz de uma postura filosófica que, se não estiver explicitada, pode levar a visões ingênuas e acríticas ou à idéia de que só é possível uma dada visão de ciência (Ostermann e Prado, 2005). Do ponto de vista da pesquisa em educação em ciências, a idéia é que este texto venha incrementar o conjunto de materiais didáticos sobre história e epistemologia da Física cuja implementação seja objeto de estudo no âmbito dos processos formativos.

### Referências bibliográficas

Bjork, G. *et al.* (2004). A size criterion for macroscopic superposition states. *Journal of Optical B*, 6, 429-436.

Bunge, M. (2003) Twenty-five years of Quantum Physics: from Pythagoras to us, and from subjectivism to realism. *Science & Education*, 12, 445-466.

Cárdenas, M. e Lozano, R.S. (2001) Estudio de un diseño didáctico en un curso destinado a la formación de profesores de física básica. *Enseñanza de las Ciencias*, 19, 171-179.

Cupani, A. (1994) A filosofia da ciência de Larry Laudan e a crítica do "positivismo". *Manuscrito*, XVII, 91-143.

Guridi, V.; Salinas, J. e Villani, A. (2006) Contribuciones de la epistemología de Laudan para la comprensión de concepciones epistemológicas sustentadas por estudiantes secundarios de física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 11, 1-18.

Kuhn, T. (1978). *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva.

Lakatos, I. (1989). *La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid: Alianza.

Laudan, L. (1984). *Sciences and Values*, Berkeley: Univ. Of California Press.

Laudan, L. (1986). *El progreso y sus problemas*. Madrid: Encuentro.

Laudan, L. (1990). *La ciencia y el relativismo*. Madrid: Alianza.

Matthews, M. (1990). History, philosophy and science teaching: what can be done in an undergraduate course? *Studies in Philosophy and Education*, 10, 93-98.

Ostermann, F. e Prado, S.D. (2005). Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27, 193-203.

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

Ostermann, F. e Ricci, T. (2005). Conceitos de Física Quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 22, 09 - 35.

Pesa, M. e Ostermann, F. (2002). La ciencia como actividad de resolución de problemas: la epistemología de Larry Laudan y algunos aportes para las investigaciones educativas en ciencias. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. 19,84-99.

Pessoa Jr., O. (2003). *Conceitos de Física Quântica*. São Paulo: Livraria da Física.

Rezende, F. e Ostermann, F. (2004). Formação de professores de Física no ambiente virtual InterAge: um exemplo voltado para a introdução da FMC no ensino médio. *A Física na Escola*, 5, 15–19.

Rezende, F. e Ostermann, F. (2006). Interações discursivas on-line sobre Epistemologia entre professores de Física: uma análise pautada em princípios do referencial sociocultural. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciências*, 5, 505-521.

Silveira, F.L. da e Ostermann, F. (2002). A insustentabilidade da proposta indutivista de "descobrir a lei a partir de resultados experimentais". *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. 19, 07-27.