

Produtos e Materiais Didáticos

Controvérsia ação a distância/ação mediada: abordagens didáticas para o ensino das interações físicas*

(Mediated action and action at a distance controversy: didactic approaches to the physical interaction teaching)

Marcos Correa da Silva e Sonia Krapas¹

Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 2/3/2007; Aceito em 9/5/2007

A natureza dos fenômenos gravitacionais, elétricos e magnéticos é intrigante, visto que apresenta a possibilidade de um corpo agir sobre outro mesmo sem contato direto. Muitos cientistas se questionaram acerca de um mecanismo que possibilitasse a transmissão da ação. Neste trabalho apresenta-se um breve relato sobre a controvérsia histórica ação a distância versus ação mediada, em especial, no período que vai de Faraday a Einstein. Resultados da análise de livros didáticos que tratam das interações físicas revelaram um uso polissêmico do termo campo. Com o objetivo de minimizar essa polissemia, sugerem-se algumas possibilidades de abordagem didática para o ensino das interações físicas. Discute-se as interações como uma ação mediada pelo campo recorrendo à dicotomia de ação mediada e ação a distância, com base na controvérsia histórica e sem base nessa controvérsia bem como as interações físicas como uma ação a distância, com a introdução do conceito de campo e sem o uso de campo.

Palavras-chave: campo, ação a distância, ação mediada, história da física abordagens didáticas.

The nature of gravitational, electric and magnetic phenomena is amazing because it shows the possibility that a body acts upon another one with no direct contact. Many scientists were intrigued about a mechanism that enables such an action transmission. This paper presents a brief report of the historical controversy about action at a distance *vs.* mediated action especially in the period from Faraday to Einstein. Results from the analysis of textbooks which discuss physical interactions reveal the polysemic use of the term "field". Attempting to minimize this polysemy, some possibilities of didactical approach to the teaching of the physical interactions are presented. One considers the physical interaction as a mediated action through field, regarding the importance of the dichotomy action at a distance and mediated action based on the historical controversy and without appealing to this controversy; on the other hand, one considers the physical interaction as action at a distance, with the introduction of the concept of field and with no use of this concept.

Keywords: field, mediated action/ action at distance controversy, didactic approaches.

1. Introdução

Muitos fenômenos naturais são descritos por meio de interações que se estabelecem entre corpos que não estão em contato. Os fenômenos gravitacionais, elétricos e magnéticos constituem parte fundamental no estudo da física e, certamente, suas naturezas são intrigantes, visto que demonstram a possibilidade de um corpo agir sobre outro corpo com o qual não mantém contato direto. Há alguma espécie de vínculo que permite a transmissão da força? Essa pergunta - talvez uma possibilidade frutífera para se iniciar o ensino das interações físicas - foi, com certeza, a motivação para o trabalho de

grandes personagens da história da ciência como Maxwell, por exemplo. São dele as seguintes palavras:

Devo convidá-los a reexaminar o passado e voltar sua atenção para uma questão que tem sido trazida à baila de tempos em tempos desde que os homens começaram a pensar.

A questão refere-se à transmissão da força. Sabe-se que dois corpos separados por uma certa distância exercem influência mútua sobre os movimentos um do outro. Dependerá esta ação da existência de uma ter-

*Trabalho originalmente apresentado no XVII Simpósio Nacional de Ensino de Física, São Luis, MA, 2007, sob o título *Subsídios para a elaboração de propostas didáticas para o ensino das interações físicas baseado na controvérsia ação a distância/ação mediada.*

¹E-mail: sonia@if.uff.br.

ceira coisa, um agente de transmissão que ocupa o espaço entre os corpos, ou será que os corpos agem uns sobre os outros imediatamente, sem a intervenção de nada mais? [1, p. 274].

O texto de Maxwell aponta para as duas possíveis respostas à pergunta de como a força é transmitida entre corpos afastados entre si. Ou essa transmissão ocorre através de um mediador, que segundo Maxwell seria o meio circundante aos corpos que interagem, ou essa ação se transmite a distância sem a necessidade de existência de qualquer mediador, ou seja, sem a participação do meio. A ação mediada leva ao conceito de campo. A ação independente do meio é chamada de ação a distância. Essas duas perspectivas podem ser usadas para dar conta dos fenômenos de interação física²; suas diferenças são de caráter ontológico. Elas fundam uma controvérsia na história da ciência, controvérsia que, pode-se dizer, segue até os dias atuais [2].

O estudo dessa controvérsia ao longo da história tem sido de grande valor para repensar o ensino das interações físicas [3-6]. Avaliar como o livro didático - principal, senão única, fonte de consulta de estudantes e professores - se apropria desse estudo também tem sido considerado [7-9]. No que diz respeito ao conceito de campo, o estudo de livros didáticos mostrou que ele é apresentado com uma indesejável multiplicidade de sentidos, multiplicidade esta advinda de uma falta de definição dos autores quanto à perspectiva adotada: ação mediada ou ação a distância [10].

Justifica-se, portanto, a necessidade de se identificar não uma, mas algumas abordagens didáticas para o ensino das interações físicas. Objetiva-se com isso, abrir um leque de possibilidades para a escolha do professor, auxiliando-o na rejeição de certos manuais, como também numa utilização crítica de outros. Vale acrescentar que essas abordagens não se constituem em propostas didáticas acabadas, mas subsídios para a elaboração das mesmas.

2. A controvérsia ação a distância vs. ação mediada

Vários são os trabalhos que contribuíram para a breve história da controvérsia que é apresentada a seguir. Além dos textos originais, se destaca principalmente o trabalho de Nersessian [11] e ainda os de Abrantes [12], Berkson [13], Cushing [14], Martins [15] e Whittaker [16].

É conhecida a importância atribuída ao trabalho realizado por Newton. A chamada síntese newtoniana foi determinante para o desenvolvimento das ciências naturais nos séculos subsequentes. A elaboração da

lei da gravitação universal, que estabelece que todos os corpos no universo sofrem atrações mútuas provocadas por suas massas gravitacionais, permitiu unificar dois mundos antes separados: o mundo dos céus, dos fenômenos astronômicos, morada de Deus, e o mundo terrestre, imperfeito e corruptível, palco de mudanças e morada dos homens. Com sua lei, Newton dá à queda de um corpo na superfície do nosso planeta a mesma explicação que aquela dada ao movimento da Lua. A mesma força como causa de fenômenos tão diversos. De repente, a natureza se torna mais simples, de melhor compreensão pela mente humana; tudo se resume a forças de atração e repulsão que se manifestam entre corpos afastados entre si. Para Newton, ter uma lei matemática capaz de estabelecer os parâmetros relevantes, mensuráveis dessa força, é mais importante do que o conhecimento de sua causa, que permaneceria oculta aos sentidos. Daí nasce sua concepção acerca dos fenômenos naturais chamada de ação a distância, segundo a qual as interações físicas ocorrem de forma instantânea e sem a intervenção do meio circunjacente aos corpos em interação ou de qualquer outro agente intermediário. Sem o recurso a hipóteses relativas à causa da gravidade, Newton concebe uma lei, cujo poder de previsão e abrangência o levou a conquistar lugar de destaque na comunidade científica, influenciando diversos programas de pesquisa em diferentes áreas da ciência nos séculos subsequentes. Nomes como os de Coulomb, Ampère e Weber vão se apropriar do programa newtoniano para estabelecer suas teorias sobre os fenômenos eletromagnéticos. A par disso, é no domínio do eletromagnetismo que nasce o conceito de campo, que se situa numa perspectiva que opõe à ação a distância.

Após o experimento realizado por Oersted, fundador do eletromagnetismo, vários pesquisadores, além do próprio Oersted, se debruçaram sobre o problema da transmissão da força magnética desde o fio percorrido por uma corrente até a agulha magnética da bússola. Um desses foi Faraday, que considerava a alternativa da ação a distância uma especulação provavelmente incorreta. Alguns fatores associados à ação a distância eram rejeitados por ele: sua instantaneidade, pois para ele a transmissão da força ocorre com velocidade finita; e o fato de a ação acontecer ao longo da linha reta que une os centros dos corpos, pois seus experimentos com indução magnética, que usavam limalha de ferro, sugeriam que o espaço ao redor do ímã ficava preenchido por linhas curvas, as quais atravessavam o próprio ímã. Esse experimento evidenciava o aspecto curvo da transmissão da força e, ao mesmo tempo, sugeria a importância do meio na descrição do fenômeno eletromagnético.

As especulações de Faraday quanto à participação do meio na transmissão da força e a idéia da realidade

²Diferentemente do que ocorre na linguagem corrente, estamos reservando o termo ação a distância apenas quando associado à perspectiva teórica que se opõe à ação mediada. Assim, expressões tais como “fenômenos de ação a distância” são substituídas por “fenômenos de interação física”.

das linhas de força como agentes transmissores das interações inspiraram Maxwell em suas pesquisas sobre os fenômenos eletromagnéticos. Buscando dar corpo matemático às idéias de Faraday, Maxwell chega a modelos mecânicos para o éter, substância diversa da matéria comum, que deveria preencher o espaço circunjacente aos corpos e ser responsável pela transmissão das forças nas interações físicas. Maxwell chegou ao que se chama Teoria do Campo Eletromagnético, atribuindo aos processos que ocorrem no éter a razão dos fenômenos eletromagnéticos. Vale ressaltar que, apesar de muitos considerarem que a origem do conceito encontra-se em Faraday, não é possível localizar esse termo em sua obra. Consoante com isso, em *The Oxford English Dictionary* [17], Maxwell - além de Tyndall no reduto da calorimetria e Watson e Burbury no reduto da eletricidade e magnetismo - é o nome que aparece no verbete campo. É importante destacar ainda o significado que Maxwell atribuía ao termo campo. Campo não era uma grandeza física, mas sim a região onde ocorrem os processos físicos do eletromagnetismo. Em seu terceiro artigo sobre os fenômenos eletromagnéticos, *A dynamical theory of electromagnetic field*, de 1864, ao desenvolver suas idéias sobre campo e suas concepções sobre o éter, ele torna claro o que entende por campo: “O campo eletromagnético é aquela parte do espaço que contém e envolve corpos em condições elétricas ou magnéticas” [18, p. 527]. Em seu famoso *Tratado*, Maxwell mantém a definição: “O campo elétrico é a porção do espaço na vizinhança dos corpos eletrificados, considerado com referência aos fenômenos elétricos” [19, p. 47].

A existência de uma substância especial que preencheria o espaço era uma idéia aceita pelos partidários da teoria ondulatória da luz, que consideravam o éter (luminífero) como um meio de suporte para a propagação das ondas luminosas. Analisando a propagação de perturbações eletromagnéticas através do éter (eletromagnético), Maxwell chega a um valor para a velocidade de propagação dessas perturbações próximo à velocidade da luz. Essa descoberta sugere inicialmente uma identidade entre o éter luminífero e o eletromagnético, ou seja, a luz e as perturbações eletromagnéticas teriam o mesmo suporte de propagação. Porém, mais do que igualdade entre os meios, as equações do campo eletromagnético de Maxwell, além de realizar uma síntese de todos os fenômenos eletromagnéticos conhecidos, sugeriam uma natureza eletromagnética à luz, sugestão concretizada por Hertz anos depois.

A detecção das ondas eletromagnéticas por Hertz confirma a existência do éter como meio de propagação dessas ondas e transferem para ao reduto do eletromagnetismo as questões próprias da óptica: Como os corpos se movem em relação ao éter? Qual a relação entre éter e matéria?

Buscando respostas a essas perguntas, algumas teorias para o éter foram elaboradas, merecendo destaque duas deles: éter em repouso em relação à Terra, como supunha Fresnel, ou sendo arrastado pelos corpos, como defendia Stokes. Ao se contraporem, esses modelos estimularam a realização do famoso experimento de Michelson-Morley. Seguindo sugestões dadas por Maxwell e Lorentz, eles construíram um aparato capaz de realizar uma experiência interferencial com a qual se poderiam detectar efeitos de segunda ordem (v^2/c^2) que evidenciariam o movimento dos corpos em relação ao éter. Baseada na teoria de Fresnel, a experiência apresentou um resultado que parecia advogar a favor da teoria rival de Stokes.³ A esse respeito, Lorentz pergunta [20, p. 7]: “Dever-se-á, com base neste resultado, aceitar que o éter toma parte no movimento da Terra e, deste modo, que a teoria da aberração de Stokes é a teoria correta?”.

Lorentz negou-se a crer nessa teoria, dadas as dificuldades de sua explicação para o fenômeno de aberração. Propõe então uma hipótese, considerada apenas um artifício matemático, para salvar a teoria de Fresnel do fracasso experimental: a mudança na dimensão dos corpos em movimento, a sua famosa hipótese da contração, necessária para garantir a invariância das equações de Maxwell.

Lorentz parece nunca ter se preocupado em demonstrar a estrutura intrínseca do éter; sua principal hipótese era de que o éter encontrava-se em repouso absoluto em relação às estrelas fixas. Lorentz não via a origem das ações eletromagnéticas nos movimentos entre as partes do éter. O éter apenas servia como meio de suporte e transmissão das forças entre as partículas carregadas da matéria, os íons. Segundo Nersessian [11, p. 100], “Lorentz fez uma separação clara entre o éter e a matéria, que o levou a um claro entendimento de ‘campo’ e ‘carga’”. O éter pensado por Lorentz preenche todos os espaços, inclusive os intermoleculares. O éter age sobre os íons, mas não há reação mecânica dos íons sobre o éter. Isto é necessário para manter a imobilidade do éter. Continuando, Nersessian afirma [11, p. 104]: “Assim, para Lorentz, o campo eletromagnético é um estado de um sistema mecânico não-newtoniano”.

Seguindo-se a história, chega-se à teoria da relatividade especial de Einstein, uma das etapas mais importantes da controvérsia. Na formulação do eletromagnetismo de Lorentz, o éter era um referencial em repouso em relação às estrelas fixas, referencial a partir do qual se poderia medir velocidades absolutas [21]. Einstein nega a existência desse referencial privilegiado: para ele, a relatividade dos sistemas de coordenadas com respeito às leis da mecânica, também deveria prevalecer na óptica e no eletromagnetismo, ou seja, as leis da física são as mesmas para qualquer referencial inercial. Isso o leva afirmar que “A introdução de um ‘éter luminífero’

³Daí se entende a expressão “resultado negativo”, comumente referida a essa experiência: nega a teoria no reduto da qual a experiência foi elaborada. Nada que ver com negar o éter.

revelar-se-á supérflua...” [22, p. 48].

Apesar de não dar importância ao éter, Einstein não abre mão da mediação nas interações físicas, pois não há instantaneidade. Esse agente mediador é o campo. Apartado do éter (matéria sutil), campo (sem ser matéria) foi elevado à outra categoria ontológica, a par com a matéria [11, p. 134]: é dotado de propriedades dinâmicas como energia e momento, é capaz de interagir com a matéria na transmissão das ações, podendo inclusive se propagar de um ponto a outro do espaço com velocidade finita. Retomemos a questão levantada por Maxwell [1, p. 274]: “Sabe-se que dois corpos separados por uma certa distância exercem influência mútua sobre os movimentos um do outro. Dependerá esta ação da existência de uma terceira coisa, um agente de transmissão que ocupa o espaço entre os corpos (...)”, Esse terceiro elemento, na teoria clássica do campo [23], é o campo.

3. Abordagens didáticas para o ensino das interações físicas

Para identificar abordagens didáticas para o ensino das interações físicas, nos baseamos em trabalhos anteriores, nos quais são analisados livros didáticos. Inicialmente com a intenção de saber em que medida os autores exploram a questão da transmissão da força entre corpos em interação, procurando identificar referências à controversia ação a distância/ ação mediada [7], a investigação apontou para as múltiplas atribuições dadas ao termo campo [10]:

- campo é região: “Chamaremos sempre de *campo elétrico* a região em que as partículas eletricamente carregadas sofrem a ação de força ou adquirem energia devido à sua carga elétrica” [24, p. 34.];
- campo é um vetor: “A direção e o sentido do vetor campo elétrico em um ponto são, por definição, dados pela direção e sentido da força que atua em uma carga de prova *positiva* colocada naquele ponto” [25, p. 56];
- campo é alteração do espaço: “O campo é entendido, na física, como uma propriedade do espaço: a presença da Terra altera o espaço, e essa alteração é o campo” [26, p. 117-118];
- campo como curvatura do espaço: “Vem Einstein e cria uma outra teoria, na qual “o campo gravitacional de um astro é ‘explicado’ pela propriedade que a matéria possui, de curvar o espaço.” [27, p. 252];
- campo armazena energia: “Aprendemos que o campo elétrico é uma espécie de armazém de estocagem de energia.” [28, p. 381];

- campo interage com partículas, media a interação entre elas: “O campo magnético terrestre [...] interage com o vento solar - partículas carregadas oriundas do Sol” [24, p. 181]; “há um ‘agente intermediário’ nas interações, e esse agente é o campo” [26, p. 118];
- campo se propaga, é suporte para a propagação de energia: “o campo elétrico, assim como a luz, se propaga no vácuo” [24, p. 36], “a energia pode ser transportada a grandes distâncias por um campo elétrico” [28, p. 381];
- campo preenche o espaço: “Da mesma forma como o espaço ao redor de um planeta ou de outros corpos maciços está preenchido por um campo gravitacional, o espaço ao redor de cada corpo eletricamente carregado está também preenchido por um *campo elétrico* - uma espécie de aura que se estende através do espaço” [28, p. 380-381].

Não é difícil ver que, do ponto de vista do aprendiz, tal multiplicidade de significados - presente em maior ou menor grau em todos os livros analisados - ao contrário de esclarecer, causa confusão. Diante de tal grau de polissemia, resta ao estudante a aceitação do conceito de campo por argumento de autoridade.

Na Ref. [10] entendemos que a multiplicidade de sentidos é advinda de uma falta de definição dos autores quanto à perspectiva adotada: ação mediada ou ação a distância. No caso de se tomar a perspectiva da ação mediada segundo Maxwell, campo é uma região do espaço. Então, que sentido tem a afirmação de que campo - uma região do espaço segundo Maxwell - se propaga no espaço? Como pode uma coisa imaterial - como uma região - atuar sobre uma partícula carregada, armazenar energia? Se a perspectiva é a da ação a distância - o termo campo não deveria aparecer, mas é possível se definir campo algebricamente como um vetor -, as mesmas perguntas caberiam.

Entendemos também que muitos dos significados atribuídos pelos manuais se inserem na perspectiva da teoria da relatividade especial, que se caracteriza, no reduto da controversia em pauta, como uma ação mediada. Mas esse mediador é uma entidade abstrata, a qual tem as propriedades de matéria sem o sê-lo. Como enfrentar então o problema de se abordar no ensino médio as interações físicas de forma responsável, isto é, sem significados obscuros, evitando formas passivas de aprendizagem, despertando o espírito crítico do estudante e ampliando sua compreensão sobre a própria ciência? Uma solução é tomar a história da ciência como fio condutor para o ensino do campo, explicitando o contexto capaz de sustentar as várias atribuições do termo campo. Outra solução é evitar tais meandros históricos e ensinar as interações físicas, introduzindo o conceito de campo de forma meramente matemática

(ação a distância), ou enfrentando a abstração que lhe é inerente (ação mediada). Uma solução mais radical seria abordar as interações físicas sem lançar mão do conceito de campo (ação a distância). Consideramos que essas soluções são preferíveis a se continuar usando o termo campo de forma indiscriminada, o que contribui para a sua naturalização e sua encapsulação. A seguir detalhamos, apresentando prós e contras, essas quatro abordagens didáticas.

3.1. Interações físicas como uma ação mediada pelo campo com recurso à dicotomia⁴ ação mediada/ação a distância, localizada no reduto de uma controvérsia histórica

Ensinar um conceito físico usando como recurso a história da ciência não é uma tarefa fácil, mas certamente gratificante. Potencialidades e limitações foram exaustivamente examinadas por diversos autores, dentre os quais se destaca Matthews [29]. Como já apontado na introdução, no caso da controvérsia em pauta, muito se tem feito nesta direção.

A capacitação do professor no que diz respeito ao desenvolvimento histórico do conceito deve ser considerada. Sabe-se que o principal recurso do professor na preparação de suas atividades didáticas é o livro didático. No entanto, os manuais didáticos não são o veículo mais apropriado para se conhecer o desenrolar histórico. Segundo Kuhn [30], estes “dissimulam inevitavelmente não só o papel desempenhado, mas também a própria existência das revoluções científicas que os produziram”. Portanto, há que se estar muito atento ao tipo de história exposta nesses materiais [31].

No caso em pauta, fica claro que há incompreensões históricas no que diz respeito à controvérsia. Ação a distância é freqüentemente expressa como um fenômeno e não como uma perspectiva em oposição à ação mediada. Gaspar justifica a criação do conceito de campo “pela necessidade de explicar o fenômeno da ação a distância” [24, p. 31]. O problema da instantaneidade da ação é abordado [24, p. 36; 32, p. 78], porém sem referência à controvérsia. Na única menção encontrada nos manuais, essa controvérsia aparece timidamente, fora do corpo do texto:

O conceito de campo está intimamente relacionado a uma mudança radical no modo de encarar as interações entre os corpos. Elas não são mais vistas como uma *ação a distância, direta e instantânea* (grifo nosso), entre duas massas, dois ímãs ou duas cargas elétricas: há um ‘agente intermediário’ nas interações, e esse agente é o campo [26, p. 118].

Outros conhecimentos acerca da história da ciência podem ajudar. Em Maxwell há *campo*, entendido como espaço, e *intensidade resultante eletromotriz*, grandeza que com o tempo adquire o mesmo nome: campo [10]. Daí a necessária distinção feita por Gaspar entre *campo* e *vetor campo* [24, p. 34]. É fácil entender a confusão apontada por Gaspar: uma coisa é associar um campo a grandezas como velocidade e temperatura; a outra é associar um campo a uma grandeza denominada campo. Explicitar essa distinção é importante, faltou, no entanto, um alerta para o fato de que, na linguagem usual dos físicos, o mesmo termo - campo - é usado indiscriminadamente com os dois sentidos. Na verdade, é justamente isso que ocorre na continuidade do texto de Gaspar: a distinção inicial é abandonada; há uma adesão à polissemia usual.

A limitação de tempo imposta pelas grades curriculares, tanto da rede pública como da privada, deve ser pesada na escolha de uma abordagem didática a partir da história da ciência. Com cargas horárias reduzidas e cronograma apertado, muitas vezes ditado por exames vestibulares, é difícil para os professores instituir uma maneira de ensinar física que vá além de simples notas teóricas. No caso em pauta, a demanda de tempo não é pequena. A história do conceito de campo é errática: nasce da controvérsia da ação contígua versus ação a distância; é sustentado pela introdução do éter como meio que suporta a propagação da ação; sobrevive à derrocada do éter; e adquire novos significados na física atual. Ao enfatizar a história da ciência, poderia se correr o risco de transformar disciplinas introdutórias de física em estudos sobre a evolução dos conceitos da física. Por outro lado, a inclusão da teoria da relatividade especial nessa abordagem também a coloca no reduto da física moderna e contemporânea no ensino médio que constitui, como afirmam Ostermann e Moreira citando Stefanel [33, *apud* 1998], um “movimento de reformulação curricular [que] apenas se inicia e muitas pesquisas serão necessárias ainda para que possamos entender melhor esta complexa problemática”. Uma saída é desenvolver tal abordagem na forma de projetos extra curriculares, no moldes ditados pela Pedagogia de Projetos.⁵

A motivação dos alunos é outro problema. O investimento intelectual para acompanhar essa história não é pequeno. Coloca-se o éter, para a seguir retirá-lo; consideram-se as razões de sua retirada; coloca-se outra coisa no lugar, o campo; dão-se razões para a sua introdução, que não são tão difíceis, uma vez que é de domínio público o limite da velocidade da luz. Difícil é compreender a natureza dessa outra entidade: tem propriedade de matéria sem ser matéria.

Mas é possível apontar para os lucros advindos

⁴Ao longo do artigo se distinguem dois termos: dicotomia, que se refere à oposição de conceitos, e controvérsia, que diz respeito ao debate regular no reduto de uma comunidade.

⁵Redescoberta nos últimos anos, a pedagogia de projetos foi tema de mesa redonda no último SNEF: Pedagogia de Projetos na Escola.

desse investimento. Estudar a evolução de um conceito expõe a ciência a um olhar mais humano - portanto, mais falho -, que mostra suas idas e vindas, suas contradições, disputas e incertezas. Expõe o conceito a uma análise crítica, desnudando alguns caminhos da ciência na busca do conhecimento, caminhos que mostram que é possível que duas concepções sobre o mesmo tema coexistirem e se desenvolverem. A ciência admite a pluralidade teórica. A história da controvérsia, em particular, dá uma boa dimensão da complexidade do fazer científico, da liberdade reinante nos processos de criação (coloca éter, retira éter, coloca campo), das dificuldades em se suportar abstrações e obscuridades (éter, campo), vivências estas tão raras no reduto - simplificador - da escola.

O ensino baseado na história da ciência pode contribuir ainda mais para o processo de humanização da ciência ao promover a aproximação da ciência com o senso comum. Na análise histórica, vimos que o conceito de campo surgiu - e se mantém até hoje - na perspectiva da ação mediada. Comparada à ação a distância, essa forma de pensar as interações parece “natural”, por ser facilitada pela adaptação cotidiana à experiência de transmissão de força por contato, ou, como querem alguns [34], pelo seu caráter inato. A transmissão da ação ao meio, e sua correspondente propagação de parte a parte, de forma contígua e com velocidade finita, é a noção mais natural de transmissão de força. Despertar a atenção dos estudantes para a transmissão de uma ação entre corpos afastados no espaço e fazê-los refletir sobre os possíveis mecanismos dessa transmissão abre caminho para a discussão histórica da controvérsia. Ao pensarem no problema da transmissão da força, os alunos poderão se deparar com uma realidade subjacente ao fenômeno - um terreno fértil para hipóteses -, que muito provavelmente envolverá argumentos de contigüidade. Por essa razão, é interessante iniciar o ensino de campo pela controvérsia da ação mediada *vs.* a ação a distância. Ao se explorar as concepções dos estudantes quanto à transmissão da ação, é possível introduzir essa contraposição de idéias o que, sem dúvida, constitui um excelente instrumento de discussão sobre um tema tão instigante como a natureza da interação física.

Desenvolver a concepção de ação mediada a partir de Faraday, passando por Maxwell, Lorentz e Einstein, como sugerido na pesquisa histórica relatada nesse trabalho, seguramente não é uma tarefa que possa ser executada no ensino médio com os pormenores expostos aqui. No entanto, é possível ao professor disparar uma discussão das ontologias de transmissão das ações, a partir das idéias que os estudantes manifestarem sobre o problema da interação física. No Apêndice encontra-se, a título de sugestão, um questionário de sondagem inicial capaz de promover tal discussão. Bar e Zinn [35] sugerem questionário equivalente. As perguntas dizem respeito a situações nas quais corpos que se encontram

a uma certa distância entre si trocam algum tipo de informação. Para atingir aprendizes iniciantes, ao mesmo tempo em que se explora diversos tipos de troca, foram idealizadas situações da vida cotidiana: atração gravitacional, com troca de ondas gravitacionais (grávitons); ação magnética, com troca de ondas eletromagnéticas (fótons); uso de controles remotos, com troca de ondas eletromagnéticas (fótons). Além disso, deu-se ênfase em fenômenos relacionados às percepções humanas: olfato, com troca de partículas; audição, com troca de ondas mecânicas; visão e tato, com troca de ondas eletromagnéticas (fótons).

3.2. Interações físicas como uma ação à distância, com a introdução do conceito de campo

É possível ensinar campo sem recurso à história da ciência. É apenas necessário tomar certos cuidados. Sua finalidade descritiva e matemática deve ser explicitada. Deve ser encarado como um ente matemático que descreve o espaço circundante aos corpos que o produzem, sem que se ouse garantir-lhe nenhuma ontologia. Essa é a abordagem adotada por antigos manuais, tais como os de Adolphe Ganot [36] e de Nerval de Gouvêa [37] adotados no Colégio Pedro II, e livros atuais que têm o estilo de “apostilas” [38].

A justificativa para a introdução do campo é reduzir a *interação entre* dois corpos, caracterizada pela grandeza vetorial força, pela *ação de* um corpo, caracterizada pela grandeza vetorial campo. A entidade matemática representa a *ação* de um corpo (carga, massa, imã, condutor percorrido por corrente) sobre outro corpo - de valor unitário - eventualmente colocado em um ponto qualquer do espaço circundante ao mesmo.

Com essa definição, não há interesse em saber como a ação se propaga de um corpo a outro, ou seja, se é instantânea ou retardada, propagando-se por um meio material ou intermediada pela entidade física campo, tal como concebida pela física moderna. Esse ente matemático não é o agente físico que intermedeia as ações entre os corpos e que se propaga no espaço com velocidade finita. O raciocínio subjacente ao cálculo do campo não permite divagações sobre a natureza da transmissão da ação. Não cabem expressões como, por exemplo, “O campo magnético terrestre [...] interage com o vento solar - partículas carregadas oriundas do Sol” [24, p. 181].

Um problema relativo a esse tipo de ensino vem do campo ser uma grandeza aparentada da força, o que obriga os estudantes a fazer a distinção entre elas, coisa nem sempre muito fácil. A solução é dar ênfase ao fato de que o vetor campo é uma grandeza que é associada a cada ponto do espaço, é função de ponto, tal como a temperatura, a velocidade num fluido; daí se poder falar em campo de temperatura, campo de velocidade.

3.3. Interações físicas como uma ação a distância, sem a introdução do conceito de campo

Sem dúvida alguma esta abordagem é bastante polêmica. A sugestão é não ensinar campo, não utilizar a idéia de uma ação mediada para transmissão da força. Esta alternativa leva de imediato a alguns problemas. Primeiro, um problema curricular: o ensino do conceito de campo faz parte da ementa curricular da disciplina física para o ensino médio; nenhum livro didático, escola ou exame vestibular o exclui de seu programa. Em segundo lugar, a idéia de campo assumiu nos dias atuais tamanha importância, que seu uso generalizou-se (inclusive fora das salas de aula), ou naturalizou-se, sendo, portanto, difícil justificar a sua não inclusão nos programas escolares. Por último, temos a vulgarização das ondas eletromagnéticas - presentes no funcionamento de vários aparatos tecnológicos característicos de nosso tempo -, identificadas com a propagação dos campos elétrico e magnético.

Quando contrapomos perspectivas como as da ação a distância e ação por contato, surgem questionamentos interessantes. Sobre a ação a distância, podemos nos perguntar como a matéria pode agir onde ela não está. Quanto à ação por contato, ela exige necessariamente a definição de um mediador, que, na física atual, é especificamente o campo. A ação é transmitida ao campo que, por sua vez, a transmite por contato a um outro corpo. Do ponto de vista do senso comum - ou classicamente - essa idéia é bastante incômoda: campo é um ente não material, mas que age sobre a matéria, num processo em que sustentamos sua existência a partir dos efeitos observáveis de sua suposta ação. É uma explicação baseada na criação de algo que nunca poderá ser apreendido pelos sentidos. Bem, a ciência trabalha com construções teóricas que se propõem a explicar a realidade, ou que tentam se aproximar do real. É possível, então, conviver com a construção teórica que nos fala de uma entidade não material, mediadora das ações entre os corpos.

No entanto, a questão que está sendo levada em conta é a possibilidade de se ensinar interações físicas no âmbito do ensino médio (que hoje em dia está universalizado). Daí ser interessante se fazer uma escolha, que se insere no âmbito da epistemologia, de qual será o ponto de partida para se entender as interações físicas: a criação de uma entidade mediadora abstrata ou a compreensão dos fenômenos apenas através das entidades observáveis, cujas características mensuráveis, seriam, por exemplo, a massa e a distância quando falamos da interação gravitacional, ou a carga e a distância, quando se trata do fenômeno elétrico.

Segundo Assis [2], a ação a distância oferece uma visão mais simples dos fenômenos. Mas como justificar que é mais simples se o "natural" é, tal como foi apresentado acima, pensar a ação como mediada? Pode-se

cogitar, por um lado, que o legado de Newton chegou ao senso comum e, por outro lado, que o mundo deslumbrante criado pelas novas tecnologias auxiliam no desenvolvimento do pensamento mágico do senso comum. Assim, o natural (com sentido cultural) é a ação a distância: "parece que muitos deles (estudantes do ensino médio) tomam a interação-a-distância no eletromagnetismo (assim como eles o fazem com a interação gravitacional) como uma coisa natural e não se incomodam com a ausência de um mediador observado na transferência da interação" [6, p. 383].

Há, ainda, uma forte razão para se optar por esta abordagem didática: no ensino médio, as interações são de natureza estática, isto é, na interação entre cargas elétricas, por exemplo, essas cargas não trocam nenhum tipo de informação, como as radiações eletromagnética (fótons) no caso em que elas são aceleradas.

3.4. Interações físicas como uma ação mediada pelo campo com recurso à dicotomia ação mediada - ação a distância, não localizada no reduto de uma controvérsia histórica

Ao se explorar historicamente a controvérsia ação mediada - ação a distância, pode-se entender o conceito de campo tal como exposto na eletrodinâmica clássica de Maxwell, que se encontra no domínio da física clássica, assim como avançar para os domínios da física moderna, donde o éter foi excluído e onde se instituiu o campo como entidade a par com a matéria. Vemos como um caminho rico em possibilidades a introdução da física moderna no ensino médio - tal como preconizada nos PCNs - a partir da controvérsia ação mediada - ação a distância.

Coisa distinta é valer-se no ensino médio, tal como o fazem os livros didáticos, da linguagem própria à física moderna, que confunde mais do que instrui. Pode-se afirmar que sem a necessária discussão do processo de mudança ontológica sofrida pelo campo ao longo do desenvolvimento da teoria eletromagnética, a inserção - sub-reptícia - da física moderna no ensino médio não passa de doutrinação, exercício puro e simples do discurso autoritário.

Tem-se que admitir, por outro lado, que não é fácil implementar as duas últimas abordagens didáticas, pois se espera o abandono dessa linguagem por parte dos professores, linguagem esta adotada tanto pelos livros de ensino médio, que servem de base para os planejamentos de suas aulas, como pelos de física básica universitária, a partir dos quais eles se formaram. É possível se pensar então em uma outra solução.

Trata-se de introduzir a dicotomia a partir, por exemplo, do questionário sugerido na abordagem anterior, sem, no entanto, entrar nos detalhes históricos. A ação mediada se impõe pela necessidade de haver um ente que dê conta da propagação da informação, que tem como valor limite a velocidade da luz. Da

mesma forma que as ondas mecânicas, as ondas eletromagnéticas - termo que já se incorporou ao glossário - necessitam de um meio para se propagar. Diferentemente delas, nas ondas eletromagnéticas esse meio não é material; mas adquire uma “realidade física” [23, p. 43], ainda que abstrata; está a par com a matéria sem ser matéria. Clara está a dificuldade de se imaginar um ente tão abstrato, especialmente no caso de um estudante de ensino médio, mas tornar evidente essa dificuldade é mais honesto do que camuflá-la.

Somente depois de um preâmbulo como este, caberia a definição expressa em Hewitt:

A Terra e a Lua atraem-se mutuamente. Isso é uma ação a distância, porque a Terra e a Lua interagem mesmo quando não estão em contato. Podemos colocar isso de outra maneira: podemos conceber a Lua como estando interagindo com o campo gravitacional da Terra [28, p. 165].

Com a exposição dessas abordagens espera-se que inovações didáticas sejam experimentadas e avaliadas.

Apêndice

Teste de sondagem inicial

1. De acordo com a lei da gravitação universal de Newton, a Terra gira ao redor do Sol por causa da força que o Sol faz sobre a Terra. Como você acha que o Sol age sobre a Terra, mesmo estando distante dela?
2. Você já deve ter observado ímãs se atraírem e repelirem. Como você acha que eles podem fazer força um sobre o outro, mesmo estando distantes um do outro?
3. Muitos aparelhos hoje em dia funcionam por controle remoto, tal como alarmes de carro e controles de TVs. Como você acha que eles funcionam?
4. Como você acha que uma pessoa pode:
 - a) ouvir o som de uma TV, mesmo estando ela distante de você?
 - b) sentir o cheiro de uma macarronada, mesmo estando ela distante de você?
 - c) ver a luz do sol, mesmo estando ele distante de você?
 - d) sentir o calor do sol, mesmo estando ele distante de você?

Referências

- [1] A.C. Tort, A.M. Cunha e A.K.T. Assis, Revista Brasileira de Ensino de Física **26**, 273 (2004).
- [2] A.K.T. Assis, *Instantaneous Action at a Distance in Modern Physics*, edited by A.E. Chubykalo, V. Pope and R. Sov-Ruenda, (New Science Publishers, Com-mack, 1999).
- [3] A. K.T. Assis, *Estudos de História e Filosofia das Ciências*, editado por C.C. Silva (Livraria da Física, São Paulo, 2006).
- [4] D. Gardelli, *Concepções de Interação Física: Subsídios para uma Abordagem Histórica do Assunto*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2004.
- [5] A.B. Arons, *Teaching Introductory Physics* (John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1997).
- [6] I. Galili, International Journal of Science Education **17**, 371 (1995).
- [7] S. Krapas e M.C. Da Silva, in *Actas do II Encuentro Iberoamericano sobre Investigación Básica em Educação em Ciências*, Burgos, 2004, editado por M.A. Moreira, C.C. Sahelices e J.M. Villagrà (Servicios de Publicaciones, Burgos, 2005), p. 351-366.
- [8] M.C. Pociu e F.N. Finley, Science & Education **12**, 387 (2003).
- [9] C. Furió e J. Guisasaola, Enseñanza de las Ciencias **15**, 259 (1997).
- [10] S. Krapas e M.C. Da Silva, Ciência e Educação **14**, 1 (2008)
- [11] N.J. Nersessian, *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories* (Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1984).
- [12] P. Abrantes, *Imagens de Natureza, Imagens de Ciência* (Papirus, Campinas, 1998).
- [13] W. Berkson, *Las Teorías de los Campos de Fuerza. Desde Faraday hasta Einstein* (Alianza Editorial, Madrid, 1981).
- [14] J.T. Cushing, *Philosophical Concepts in Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1998).
- [15] R.A. Martins, Caderno Catarinense de Ensino de Física **5**, 49 (1988).
- [16] E. Whittaker, *A History of Theories of Ether and Electricity* (Thomas Nelson and Sons, Londres, 1958), v. 1.
- [17] *The Oxford English Dictionary* (Oxford University Press, Oxford, 1961).
- [18] J.C. Maxwell, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, editado por W.D. Niven (Dover, New York, 1952), v 1.
- [19] J.C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Dover, Nova Iorque, 1954), v. 1.
- [20] H. Lorentz, *O Princípio da Relatividade*, editado por H. Lorentz, A. Einstein, e H. Minkowski (Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2001).
- [21] A.K.T. Assis, *Uma Nova Física* (Editora Perspectiva, São Paulo, 1999).
- [22] A. Einstein, *O Princípio da Relatividade*, editado por H. Lorentz, A. Einstein, e H. Minkowski, (Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2001).
- [23] L.D. Landau e E.M. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields* (Pergamon Press, Oxford, 1985).

- [24] A. Gaspar, *Física 3: Eletromagnetismo e Física Moderna* (Editora Ática, São Paulo, 2000).
- [25] A. Máximo e B. Alvarenga, *Curso de Física* (Editora Scipione, São Paulo, 2002), v. 3.
- [26] L.A. Guimarães e M. Fonte Boa, *Eletricidade e Ondas* (Futura, Niterói, 2001).
- [27] L.A. Guimarães e M. Fonte Boa, *Mecânica* (Futura, Niterói, 2001).
- [28] P.G. Hewitt, *Física Conceitual* (Artmed Editora AS, Porto Alegre, 2002).
- [29] M.R. Matthews, Caderno Catarinense de Ensino de Física **12**, 164 (1995).
- [30] T. Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas* (Ed. Perspectiva, São Paulo, 1982).
- [31] R.A. Martins, Caderno Catarinense de Ensino de Física **17**, 115 (2000).
- [32] A. Gonçalves e C. Toscano, *Física para o Ensino Médio* (Scipione, São Paulo, 2002).
- [33] F. Ostermann e M.A. Moreira, Investigações em Ensino de Ciências **5**, 23 (2000).
- [34] S.E. Spelke, *The Epigenesis of Mind: Essay on Biology and Cognition*, edited by S. Carey and R. Gelman (Erlbaum, Hillsdale, 1991).
- [35] V. Bar e B. Zinn, Science & Education, **7**, 471 (1998).
- [36] A. Ganot, *Traité Élémentaire de Physique* (Daguin, Pierre Adolphe, Paris, 1884).
- [37] N. de Gouvêa, *Lições de Physica* (Livraria Francisco Alves, Rio de Janeiro), 7^a ed.
- [38] G.F. Nicolau e S.P.A. de Toledo, *Física Básica* (Atual, São Paulo, 2004).