

In: Estudos de História e Filosofia das Ciências: Subsídios para Aplicação no Ensino, C. C. Silva (Org.), (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006), págs. 87-102.

V

INTERAÇÕES NA FÍSICA – AÇÃO À DISTÂNCIA VERSUS AÇÃO POR CONTATO

André K. T. Assis

Introdução

Neste artigo discuto algumas idéias sobre como ocorrem as interações entre corpos. Em particular comparo as idéias de ação à distância e de ação por contato. O dicionário *Aurélio* apresenta três definições para a palavra “interação”, (Ferreira 1975): 1. Ação que se exerce mutuamente entre duas ou mais coisas, ou duas ou mais pessoas: ação recíproca. 2. Ação mútua entre duas partículas ou dois corpos. 3. Força que duas partículas exercem uma sobre a outra, quando estão suficientemente próximas.

Por ação à distância entendo uma influência de um corpo A sobre um corpo B, quando estão separados entre si por uma distância mensurável, sendo que esta influência não é interpretada como sendo causada nem transmitida por nenhum outro agente material entre os dois corpos. Isto é, quando a influência é interpretada como sendo uma ação direta à distância.

Entendo ação por contato como sendo a influência de um corpo A sobre um corpo B quando eles entram em contato, quando se tocam fisicamente. Também entendo como sendo ação por contato quando a ação de um corpo A sobre um corpo B, separados entre si por uma distância mensurável, é interpretada como sendo causada ou transmitida por um agente intermediário C. Neste caso o contato a que me refiro não é o contato direto entre A e B, mas sim o contato de A com C, e depois o contato de C com B.

Os principais exemplos de corpos A e B que aparecerão neste texto são massa, carga elétrica, ímã, condutor conduzindo corrente elétrica e corpúsculo luminoso. Já os principais exemplos de agente intermediário C que serão considerados aqui

são: campos (gravitacional, elétrico, magnético), outras partículas (grávitons, fótons virtuais) e curvatura do espaço-tempo.

Exemplos de fenômenos que podem ser explicados pela ação à distância

Apresentamos nesta seção alguns fenômenos que podem ser explicados pela noção de ação à distância. Eles também podem ser explicados pela noção de campo ou de outras maneiras diferentes. O que nos interessa aqui é mostrar um conjunto de fenômenos que foram interpretados historicamente por alguns cientistas como sendo devidos a uma ação direta a distância entre dois corpos A e B, embora esta não seja a única interpretação possível para estes fenômenos, como veremos em outra seção.

A situação mais comum de um fenômeno interpretado por Newton (1642–1727) como sendo devido a uma ação à distância é a queda dos corpos em direção a terra. Esta queda é observada quando os corpos a uma certa distância da superfície da terra são soltos em repouso em relação a terra. Esta queda ocorre mesmo no vácuo mais perfeito que já se conseguiu produzir.

Desde Galileu Galilei (1564–1642) se sabe que no vácuo os corpos próximos à superfície da terra caem com uma aceleração constante independente do peso, da composição química ou da forma do corpo. Desde Isaac Newton se sabe que esta ação é mútua, ou seja, a terra também é influenciada pelo corpo em queda e é acelerada em relação a um referencial inercial devido à atração do outro corpo. Isto é mais facilmente observado quando os corpos têm massas mais próximas entre si, como no caso da terra e da lua. A lua é mantida em sua órbita pela atração gravitacional da terra. Por outro lado, a lua influencia as marés pela atração gravitacional que exerce sobre os mares da terra. A expressão matemática que descreve a interação gravitacional entre duas massas é devida a Newton e é conhecida como lei da gravitação universal, (Newton 1934 e 1990) e (Assis 1998). A força F entre duas massas pequenas m_1 e m_2 é proporcional ao produto das massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância r entre elas:

$$F = \frac{K_g m_1 m_2}{r^2}.$$

Aqui K_g é uma constante de proporcionalidade que depende do sistema de unidades que está sendo empregado. Esta força está ao longo da reta que une as duas partículas.

Desde a Grécia antiga (século V a.C.) se sabe que um ímã permanente atrai pequenos pedaços de ferro. Que o fenômeno é mútuo pode ser observado vendo a agulha magnetizada de uma pequena bússola alterar sua direção ao ser aproximada de um grande bloco de ferro (neste caso percebemos o movimento ou rotação do ímã ao ser colocado próximo de uma grande massa de ferro, mas não é fácil de perceber o movimento do ferro nem o efeito exercido sobre ele pela agulha magnetizada). Se tivermos ímãs e ferros com pesos da mesma ordem de grandeza, podemos observar o movimento dos dois corpos ao serem soltos do repouso em relação a terra, com cada corpo indo em direção ao outro. Newton descreveu uma experiência assim no seu livro *Principia*, (Newton 1990, p. 28), no Escólio depois das três leis do movimento:

“Fiz a experiência com magnetita e ferro. Se esses, colocados separadamente em recipientes adequados, flutuam, um próximo ao outro, em água parada, nenhum deles propelerá o outro; mas, por serem igualmente atraídos, sustentarão a pressão um do outro, e finalmente repousarão em equilíbrio.”

Ou seja, ele começa com o ímã e o ferro separados e flutuando em repouso em um recipiente com água. Após soltos eles se aproximam e se juntam, com os dois juntos permanecendo em repouso em relação à água.

Este fenômeno pode ser interpretado como uma ação direta entre o ímã e o ferro, separados entre si, sem a atuação de qualquer agente intermediário. Mas também é possível interpretar este fenômeno por meio de agentes intermediários, como veremos em outra seção.

Outra situação muito frequente que pode ser interpretada como sendo devida a uma ação à distância ocorre na interação entre dois ímãs. São observados dois efeitos principais aqui. O primeiro é o torque que um ímã exerce sobre o outro que tende a fazer com que seus pólos norte e sul fiquem alinhados ao longo de retas paralelas (com os pólos opostos dos ímãs mais próximos entre si). Isto é facilmente observado com uma bússola, cuja agulha magnetizada (um pequeno ímã) sempre se alinha com a direção norte-sul magnética terrestre (que é bem próxima da linha norte-sul geográfica, obtida pela rotação das estrelas em relação a terra). Também se pode observar este efeito ao se aproximar um grande ímã permanente (com um campo magnético bem mais intenso do que o da terra) de uma bússola, vendo que a agulha da bússola tende a ficar paralela com a linha que une os pólos do grande ímã. Nestes dois casos observa-se ou detecta-se apenas a ação da terra ou do grande ímã sobre a agulha magnetizada da bússola. Mas pode-se observar que o efeito é mútuo ao se trabalhar com dois ímãs que possuem pesos e intensidades magnéticas de mesma ordem de grandeza como, por exemplo, duas barras imantadas livres

para girar sobre seus centros. Neste caso, observa-se que as duas barras imantadas tendem a girar até ficarem alinhadas entre si. O segundo efeito é uma força que um ímã exerce sobre outro ímã e que faz com que se aproximem caso sejam soltos parados entre si, a uma certa distância um do outro. Estes dois efeitos (torque e força resultante entre ímãs) ocorrem não apenas no ar mas também no vácuo, quando não há matéria entre os ímãs. Também ocorrem mesmo que exista um vidro ou material não magnético entre os dois ímãs.

De acordo com a lei de Charles Augustin Coulomb (1736--1806), de 1785, dois pólos magnéticos p_1 e p_2 se repelem se forem do mesmo tipo ou se atraem se forem de tipos opostos, com uma lei igual à de Newton da gravitação, mas agora com $K_m p_1 p_2$ em vez de $K_g m_1 m_2$, onde K_m é uma constante de proporcionalidade.

Outro exemplo de fenômeno que pode ser interpretado como ação à distância ocorre na interação entre corpos carregados ou polarizados eletricamente. As experiências mais simples são quando atritamos um pedaço de âmbar ou uma régua no cabelo e depois conseguimos atrair pedacinhos de papel ou palha seca. Aqui o fenômeno parece ser unilateral (apenas o papel parece ser atraído, não se observando facilmente a atração ou força sobre a régua). Mas pode-se observar e perceber que o fenômeno é mútuo utilizando corpos de massa similares ou então lidando com instrumentos mais sensíveis como um pêndulo elétrico (ou pêndulo eletrostático) e um eletroscópio. Com isto são observados facilmente fenômenos de atração e repulsão entre corpos carregados com cargas opostas e com mesma carga, respectivamente, ver (Ferreira e Maury 1991) e (Gaspar 2003, p. 225--243). A lei matemática descrevendo a interação entre duas cargas q_1 e q_2 é conhecida como força de Coulomb. Ela é similar à lei de Newton da gravitação, mas agora com $K_e q_1 q_2$ em vez de $K_g m_1 m_2$, onde K_e é uma constante de proporcionalidade.

André-Marie Ampère (1775--1836) mostrou na década de 1820 pela primeira vez que dois fios transportando correntes constantes se atraem caso as correntes estejam fluindo no mesmo sentido e se repelem caso as correntes estejam fluindo em sentidos opostos. O efeito é mútuo (os dois fios se movimentam em relação a um referencial inercial, caso estejam livres para se mover) e ocorre também no vácuo, na ausência de matéria entre os fios. A força de Ampère entre dois elementos de corrente $I_1 dl_1$ e $I_2 dl_2$ (I_1 e I_2 são as intensidades das correntes, sendo dl_1 e dl_2 seus comprimentos infinitesimais) é do tipo da lei de Newton da gravitação, com $K_c I_1 dl_1 I_2 dl_2 f$ em vez de $K_g m_1 m_2$, sendo K_c uma constante de proporcionalidade e f uma função do ângulo entre as direções dos dois elementos de corrente, e do ângulo entre cada um deles e a reta que os une. Ampère interpretou estes fenômenos como sendo devidos a uma interação direta entre os dois elementos de corrente, sem

que fossem causados por qualquer agente intermediário entre eles. Para detalhes sobre a força de Ampère entre elementos de corrente ver (Bueno e Assis 1998).

Podemos citar alguns outros exemplos de fenômenos que podem ser interpretados por ação à distância: um fio com corrente constante alterando a orientação de uma agulha imantada (ou seja, exercendo um torque sobre ela), fenômeno descoberto por Hans Christian Oersted (1777–1851) em 1820, (Oersted 1986) e (Martins 1986). O efeito inverso de um ímã girando um pedaço de fio por onde passa corrente constante (ou seja, o ímã exercendo um torque sobre um condutor, tendendo a girar o condutor) foi observado pelo próprio Oersted e descrito em um segundo trabalho seu de 1820, (Martins 1986) e (Whittaker 1973, p. 83). Michael Faraday (1791–1867) descobriu em 1831 que ao variar a corrente em um circuito primário induz-se uma corrente em um circuito secundário que está separado espacialmente do primeiro circuito. Também descobriu que ao aproximar-se um ímã de um circuito fechado (ou o circuito fechado do ímã) também é induzida uma corrente elétrica no circuito.

Os fenômenos descobertos e descritos por Coulomb, Oersted, Ampère e Faraday podem ser todos eles derivados de uma lei de ação à distância devida a Wilhelm Eduard Weber (1804–1891). A força de Weber é igual à força de Coulomb, mas multiplicada por um fator que depende da velocidade e da aceleração entre as cargas que estão interagindo. Para detalhes sobre a força de Weber, sua energia potencial e sobre a eletrodinâmica de Weber em geral, ver (Assis 1995).

Exemplos de fenômenos que podem ser explicados pela ação por contato

Apresentamos nesta seção alguns fenômenos que são interpretados usualmente como ocorrendo devido ao contato direto entre dois corpos A e B. Estes fenômenos também podem ser explicados pela ação à distância entre as partículas que constituem A e B, mas por hora não entraremos nestes detalhes.

Os casos mais simples de fenômenos usualmente interpretados como sendo devidos a uma ação por contato são aqueles que percebemos com nosso tato, ao agirmos sobre objetos ao nosso redor com nosso corpo (e ao sofrermos a ação destes objetos ao entrarem com contato com nosso corpo). Para levantarmos uma pedra temos de segurá-la com nossa mão, quando a soltamos ela machuca nosso pé ao bater nele. Para um carro desatolar temos que empurrá-lo; quando um carro nos imprensa contra a parede ficamos feridos. Também a ação por contato é mútua. Quando estamos empurrando um carro atolado sentimos a pressão em nossa mão e vemos a deformação da pele. Quando um carro nos imprensa contra a parede e

nos fere, vemos que o carro não apenas diminui sua velocidade, mas também fica um pouco amassado. Estes efeitos são manifestações macroscópicas devidos a forças microscópicas atuando entre as partículas dos corpos.

Um exemplo muito importante de fenômeno interpretado usualmente como ocorrendo devido a uma ação por contato é a colisão de dois corpos rígidos, como duas bolas de bilhar. René Descartes (1596–1650) foi um dos primeiros a dar importância para se encontrar as leis de colisão. Mas os primeiros que obtiveram as leis corretas para as colisões perfeitamente elásticas, perfeitamente inelásticas e nos casos intermediários foram Christiaan Huygens (1629–1695), Christopher Wren (1632–1723), John Wallis (1616–1703) e Newton.

Outros exemplos de fenômenos interpretados como ocorrendo por interação por contato são aqueles realizados por fluidos. O som é transmitido no ar ou na água através de condensações e vibrações do fluido. Estas condensações e vibrações ocorrem entre a fonte do sinal e a detecção do sinal. Durante um concerto de música não há uma influência direta entre os instrumentos musicais e a platéia. O que ocorre é que os músicos produzem vibrações mecânicas em seus instrumentos, estas vibrações são transmitidas para o ar ao redor dos instrumentos, estas vibrações são transmitidas pelo ar na sala de concerto com uma velocidade finita, até que o ar próximo aos ouvidos das pessoas que estão na platéia também entra em vibração, fazendo com que vibrem os órgãos sensoriais dentro dos ouvidos das pessoas, e estes sinais vibratórios são então transmitidos aos cérebros e lá interpretados e apreciados como música.

Exemplos importantes de forças que se supõem usualmente como atuando por contato são as forças de atrito. Há diversos tipos de atrito, como o atrito estático entre superfícies sólidas que estão em repouso entre si (mas com uma outra força paralela à superfície atuando em um dos corpos e que tenderia a colocá-los em movimento relativo se não houvesse a força de atrito), o atrito cinético entre superfícies sólidas que deslizam uma em relação à outra, o atrito que ocorre quando um corpo se desloca num meio (um pêndulo oscilando no ar, na água ou no mel) etc.

Outras forças que são interpretadas comumente como atuando por contato são as forças elásticas exercidas por molas esticadas ou comprimidas e a força normal exercida por uma superfície comprimida (como um livro apoiado sobre uma mesa).

Embora boa parte das pessoas considere a ação por contato como sendo algo intuitivo e compreensível, existem também problemas nesta concepção. Por exemplo, hoje em dia considera-se que os corpos materiais são constituídos por partículas elétricas que nunca se tocam no sentido usual. Ou seja, as chamadas forças de contato descritas acima não seriam forças fundamentais da natureza, mas sim uma

aproximação macroscópica de forças muito mais complexas. A dificuldade maior é de entender como ocorrem, por exemplo, as interações eletromagnéticas entre as partículas carregadas elementares.

Exemplos de ação intermediada por um campo

Como vimos acima, a interação gravitacional entre duas massas, a interação elétrica entre duas cargas e a interação magnética entre dois ímãs podem ser interpretadas como ocorrendo devido a uma ação direta entre estes corpos, sem que haja contato físico entre eles. Mas é também possível interpretar a interação entre dois corpos A e B, separados espacialmente entre si, como ocorrendo através de um agente intermediário C. Neste caso não haveria contato entre A e B, mas sim contato entre A e C, assim como contato entre C e B. Este agente intermediário C é que transmitiria a ação entre A e B. Neste sentido alguns autores interpretam este tipo de interação como sendo ação exercida por contato, ou seja, contato deste agente intermediário com A e com B, embora não haja contato direto entre A e B.

No caso da força gravitacional, por exemplo, pode-se supor, como na teoria da relatividade geral de Einstein (1879–1955), que não existe interação direta entre duas massas A e B. Em vez disso, cada uma dessas massas curvaria o espaço ao seu redor (agente intermediário C), sendo que a outra massa interagiria com a curvatura do espaço-tempo ao seu redor. Neste caso a interação entre A e B seria interpretada como sendo uma ação intermediada pelo agente intermediário C, a curvatura do espaço-tempo.

No caso das interações elétricas e magnéticas, Faraday, por exemplo, acreditava que elas eram transmitidas por linhas de força. As cargas e ímãs teriam à sua volta certos filamentos reais, físicos, que transmitiriam estas forças. Logo, para ele não haveria uma interação direta entre duas cargas ou entre dois ímãs. Em vez disso imaginava que cada carga interagiria com as linhas de força que estivessem ao seu redor, linhas estas produzidas por outras cargas. Estas linhas de força seriam os agentes intermediários mediando a ação entre as cargas e os ímãs.

No eletromagnetismo atual supõe-se que não há ação direta entre duas cargas ou dois ímãs. Em vez disso interpreta-se os fenômenos de interação entre cargas como sendo mediados por campos elétricos e magnéticos. Isto é, uma carga A geraria campos elétricos e magnéticos (agente intermediário C) que se propagariam no espaço, tipicamente com a velocidade da luz, até alcançarem uma outra carga B, quando então estes campos interagiriam com B. Neste caso não se exige que haja contato físico entre a carga A e a carga B para que ocorra a interação. O que vai haver é contato físico da carga A com seu campo C, este campo C propaga-se até

a carga B, havendo então contato físico do campo C com a carga B. Esta força é chamada por alguns autores de força de campo, ou de força intermediada por um campo.

Há três tipos principais de campo na física clássica: campo gravitacional, campo elétrico e campo magnético. Estes conceitos foram iniciados por Faraday e por James Clerk Maxwell (1831–1879), sendo hoje em dia adotados pela maioria dos físicos. As pessoas que trabalham com estes conceitos de campo tentam interpretar os fenômenos de ação à distância descritos anteriormente (força de Newton da gravitação, força eletrostática entre cargas, força magnetostática entre pólos magnéticos, força de Ampère entre condutores com corrente elétrica, força entre correntes e ímãs, forças entre correntes e cargas) em termos de ação por contato. No caso da gravitação, por exemplo, supõem que uma massa gravitacional A gera um campo gravitacional C que se espalha ao redor de A (instantaneamente ou propagando-se tipicamente à velocidade da luz). Uma outra massa gravitacional B que esteja no espaço ao redor de A interagirá com este campo gravitacional C devido ao corpo A (e não interagirá mais com A diretamente), alterando então seu estado de movimento (se B não for impedido por outras forças). O corpo B também gerará seu próprio campo gravitacional D e o corpo A sentirá a presença deste campo D gerado por B no local onde está, alterando seu estado de movimento (se A não for impedido por outras forças).

Algo análogo aconteceria com as cargas elétricas. Isto é, um corpo carregado A geraria um campo elétrico C, este campo se espalharia ao redor de A, e um outro corpo carregado B interagiria com o campo elétrico C que está ao seu redor, alterando seu estado de movimento. Se o corpo carregado A estiver em movimento em relação a um referencial inercial, ele geraria também um campo magnético C' neste referencial, que se espalharia ao redor de A, influenciando magneticamente um outro corpo B que esteja em movimento em relação a este referencial inercial. Esta influência dependeria do valor do campo magnético C' na posição do corpo B, campo este gerado pelo corpo A e que se propagou no espaço de A até B.

Erroneamente muitos livros didáticos consideram estas forças de campo como sendo forças de ação à distância (para uma discussão detalhada deste aspecto, ver (Gardelli 2004)). Em vez disso, neste modelo considera-se que cada um destes corpos gera um ente intermediário (os campos gravitacional, elétrico ou magnético), sendo que o outro corpo vai interagir com este ente intermediário que existe onde ele está localizado. Por este motivo estas forças de campo têm de ser classificadas corretamente como ações por contato. Embora não haja contato físico entre os corpos A e B, existe nestes modelos de interpretação um contato físico entre A e

o campo C que ele gera, este campo se propaga até B, o campo C entre em contato com B, alterando então o estado de movimento de B.

Tanto Faraday quanto Maxwell consideravam que a ação intermediada por um meio ou por um campo era um tipo de ação por contato. Neste caso, contato entre o corpo B que sente a força e o campo C ao seu redor, campo este produzido por outro corpo A. Neste modelo considera-se que o campo C foi propagado ao longo do espaço de A até B. O que B sentiria seria a presença do campo C ao seu redor, sendo que ele não sentiria diretamente a presença do corpo A. Logo este tipo de concepção se opunha à idéia de ação à distância. Cito aqui alguns trechos do Prefácio do principal livro de Maxwell, *Um Tratado de Eletricidade e Magnetismo*, que comprovam esta interpretação, (Maxwell 1954). Págs. viii e ix (entre colchetes vão minhas palavras):

“Eu estava ciente de que se supunha haver uma diferença entre a maneira de Faraday conceber os fenômenos e a maneira dos matemáticos, de tal forma que nem ele nem os matemáticos estavam satisfeitos com a linguagem um do outro. [...] Por exemplo, Faraday, em sua mente, via linhas de força atravessando todo o espaço enquanto que os matemáticos viam centros de força atuando à distância. Faraday via um meio enquanto que os matemáticos não viam nada além da distância [entre os corpos]. Faraday procurava a causa dos fenômenos nas ações reais ocorrendo no meio, enquanto os matemáticos estavam satisfeitos em ter encontrado a causa dos fenômenos no poder da ação à distância impressa nos fluidos elétricos.”

(Maxwell 1954, pp. viii e ix)

“Grande progresso tem sido feito na ciência elétrica, principalmente na Alemanha, pelos cultivadores da teoria de ação à distância. As valiosas medições elétricas de W. Weber são interpretadas por ele de acordo com sua teoria, e a especulação eletromagnética, que foi originada por Gauss e continuada por Weber, J. [F.] e C. Neumann, [L.] Lorenz etc., está baseada na teoria de ação à distância, mas dependendo ou diretamente da velocidade relativa das partículas ou da propagação gradual de alguma coisa, seja potencial ou força, de uma partícula à outra. O grande sucesso obtido por estes homens eminentes na aplicação da matemática aos fenômenos elétricos fornece, como é natural, peso adicional às suas especulações teóricas de tal forma que aqueles que, como estudantes de eletricidade, se voltam em direção a eles como as maiores autoridades na eletricidade matemática provavelmente assimilariam, junto com seus métodos matemáticos, suas hipóteses físicas. Estas hipóteses físicas, contudo, são completamente diferentes da maneira de olhar os fenômenos que adoto e um dos objetivos que tenho em vista é que alguns daqueles que desejam estudar eletricidade possam, ao ler este tratado, ver que há

uma outra maneira de tratar o assunto, que não é menos apta a explicar os fenômenos e que, apesar de que em algumas partes ela possa parecer menos definida, corresponde, como penso, mais fielmente ao nosso conhecimento atual tanto naquilo que afirma quanto naquilo que deixa indeciso. De um ponto de vista filosófico, além disto, é extremamente importante que os dois métodos sejam comparados, ambos os quais tiveram sucesso na explicação dos principais fenômenos eletromagnéticos e ambos os quais tentaram explicar a propagação da luz como um fenômeno eletromagnético e de fato calcularam sua velocidade, enquanto que ao mesmo tempo as concepções fundamentais sobre o que de fato acontece, assim como a maioria das concepções secundárias das quantidades envolvidas, são radicalmente diferentes.”

(Maxwell 1954, p. x)

Já na eletrodinâmica quântica, desenvolvida no século XX, se considera que as forças eletromagnéticas são transmitidas por fótons virtuais, enquanto que alguns autores consideram que as forças gravitacionais são transmitidas por grávitons. Mais uma vez não haveria, nestas interpretações, ações diretas à distância, mas sim ações intermediadas e transmitidas por um outro agente.

Ação à distância versus ação por contato

Cientistas de todas as épocas têm se preocupado em entender como os corpos atuam uns sobre os outros. Interessam-se não apenas em obter as leis matemáticas que descrevem estas interações, mas também em verificar se há ou não mecanismos que transmitem estas forças mútuas. Algumas pessoas importantes que lidaram com este tema foram Aristóteles (384–322 a.C.), Newton, Ampère e Maxwell.

Aristóteles condenava a existência do vazio defendido pelos atomistas. Achava que todo o espaço era preenchido por uma matéria sutil (como um éter). Era contrário a uma ação de um corpo sobre o outro à distância, por achar que um corpo não pode agir onde não está. Seu trabalho teve uma influência muito grande e por 2.000 anos dominou o pensamento científico ocidental.

Newton oscilou entre as duas opções. Durante uma época era contrário à idéia de ação direta à distância. Tentou encontrar modelos de interação gravitacional supondo um éter de densidade variável entre os corpos (o gradiente de pressão deste éter é que impulsionaria os corpos um em direção ao outro). Chegou também a trabalhar com a idéia da gravitação ser devida a um fluxo de partículas que preencheriam o espaço fluindo em todas as direções (como um gás), sendo que a atração entre dois corpos seria de fato devida a um empurrão de fora para dentro exercido por estas partículas (pela sombra que um corpo exerceria sobre o outro).

Por outro lado em seu livro *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural* apresentou a principal lei de interação à distância. Ou seja, sua lei da gravitação universal segundo a qual matéria atrai matéria na razão direta das massas e na razão inversa do quadrado de suas distâncias. Esta força ao longo da reta que une os dois corpos atua em princípio sem a intermediação de qualquer outro agente entre os corpos. Segundo Newton, ela atua entre a terra e o sol, apesar da distância imensa que os separa, assim como entre todos os corpos materiais.

Embora a lei da gravitação universal de Newton seja o exemplo mais famoso de ação direta à distância, ele também defendeu a idéia deste tipo de ação ocorrendo na óptica. Como esta visão de Newton em relação à óptica é menos conhecida do que seus pontos de vista sobre gravitação, cita-se abaixo alguns trechos importantes de sua obra que ilustram este ponto de vista.

Em seu outro livro, *Óptica*, Newton argumenta que a interação entre os corpúsculos de luz e a matéria também ocorre diretamente à distância e não pelo contato imediato, (Newton 1996). Esta interação à distância seria a responsável pelos fenômenos da reflexão, refração e inflexão dos raios luminosos (hoje em dia a inflexão é chamada de difração da luz). Sua primeira questão ao final do livro diz o seguinte:

“Os corpos não agem sobre a luz a distância e, por sua ação, não curvam os seus raios? E essa ação não é mais forte na distância menor?”

Que Newton era a favor desta ação à distância entre a luz e a matéria fica claro pela Proposição 8, na parte 3 do Livro II do livro *Óptica*:

“A causa da reflexão não é o choque da luz com as partes sólidas ou impenetráveis dos corpos, como geralmente se acredita.”

Newton defendia uma teoria corpuscular ou balística da luz (a luz como consistindo de partículas muito pequenas emitidas com grande velocidade pelos corpos brilhantes, e não uma perturbação caminhando em um meio, como acreditavam Descartes, Hooke e Huygens). Apesar disto Newton achava que na reflexão a luz era defletida e curvada, antes de tocar na superfície refletora, devido a uma interação entre a matéria e as partículas luminosas. Newton apresenta vários argumentos a favor desta sua idéia ao defender a proposição 8, ver (Newton 1996, p. 199–203): a) a reflexão é tão forte na passagem da luz do vidro para o ar quanto do ar para o vidro; b) ocorre reflexão total quando a luz passa do vidro para o ar com obliquidade maior do que 40 ou 41 graus e não há explicação para isto se a reflexão fosse devida a

colisões da luz com as partes do vidro, além disto este grau muda se houver água em vez de ar, o que prova que o meio depois do vidro influencia na reflexão; c) para um mesmo ângulo de incidência da luz indo do ar para o vidro, os raios vermelhos podem ser em grande parte transmitidos enquanto os azuis são refletidos, o que não se pode explicar por colisões; d) nas partes onde dois vidros se tocam um ao outro não há reflexão perceptível, e não se pode explicar por colisões por que os raios não devam chocar-se com as partes do vidro, quer quando o vidro está contíguo a outro vidro, quer quando está contíguo ao ar; e) existem várias espessuras de lâminas de vidro ou de água nas quais não há reflexão observável; f) se as reflexões fossem causadas pelas partes dos corpos refletoras, seria impossível às lâminas finas ou às bolhas, em um mesmo lugar, refletir os raios de uma cor e transmitir os de outra, como elas o fazem de acordo com as observações de Newton; g) se os raios refletidos se chocassem com as partes sólidas dos corpos, suas reflexões nos corpos polidos não poderiam ser tão regulares como são. Em vez de explicar a reflexão por colisão da luz com as partes sólidas dos corpos refletoras, Newton conclui que a reflexão de um raio não é causada por um único ponto do corpo refletor, mas por algum poder ou força do corpo que está espalhado uniformemente por toda sua superfície, sendo que é por este poder ou força que o corpo age sobre o raio sem que haja contato imediato entre os dois. Para Newton também a refração e a inflexão (hoje em dia chamada de difração) são causadas por esta ação à distância entre os corpos materiais e os corpúsculos luminosos.

Mas, em outras proposições, como as 1, 2, 12, 13 e outras, Newton defende outras possibilidades para explicar a reflexão, refração e “interferência.” Na questão 29 ao final do livro *Óptica* Newton afirma que

“as substâncias transparentes agem sobre os raios de luz a distância, refratando-os, refletindo-os e inflectindo-os, e os raios agitam reciprocamente as partes dessas substâncias a distância para aquecê-las; e essa ação a distância assemelha-se muito a uma força atrativa entre os corpos.”

E na continuação Newton discute outros fenômenos de interação entre os corpúsculos de luz e a matéria:

Os raios de luz, ao saírem do vidro para o vácuo, curvam-se em direção ao vidro; e, se incidem muito obliquamente sobre o vácuo, tornam a curvar-se para dentro do vidro e são totalmente refletidos; e essa reflexão não pode ser atribuída à resistência de um vácuo absoluto, mas deve ser causada pelo poder do vidro de atrair os raios em suas saídas para o vácuo e de trazê-los de volta [aqui Newton está tratando da refração e da reflexão total]. Pois se a superfície mais distante do

vidro for umedecida com água ou óleo claro, ou mel líquido e claro, os raios que de outra maneira seriam refletidos irão para dentro da água, do óleo ou do mel; portanto, não são refletidos antes de chegar à superfície mais distante do vidro e começar a sair dele. Se saírem dele para dentro da água, do óleo ou do mel, eles continuarão, porque a atração do vidro é quase contrabalançada e tornada ineficaz pela atração contrária do líquido. Mas, se saírem dele para entrar num vácuo que não tem atração para contrabalançar a do vidro, a atração do vidro os curva e refrata, ou os traz de volta e os reflete. E isso fica ainda mais evidente quando juntamos dois prismas de vidro, ou duas objetivas de telescópios muito longos, uma plana, a outra um pouco convexa, e os comprimimos de tal modo que não se toquem completamente nem fiquem muito separados. Pois a luz que incide sobre a superfície mais distante do primeiro vidro no lugar onde o intervalo entre os vidros não é superior à milionésima parte de uma polegada atravessará essa superfície, e o ar ou vácuo entre os vidros, e entrará no segundo vidro, como foi explicado nas Observações 1, 4 e 8 da Parte 1 do Livro II. Mas, se o segundo vidro for removido, a luz que sai da segunda superfície do primeiro vidro para o ar ou o vácuo não continuará para a frente, mas retornará para dentro do primeiro vidro e será refletida; portanto, é retraída pelo poder do primeiro vidro, não havendo nada mais para retrocedê-la.

No eletromagnetismo a lei de ação direta à distância mais famosa é a força eletrostática entre duas cargas em repouso. Já a lei circuital magnética é hoje em dia interpretada em termos de ação intermediada pelo campo magnético, embora o próprio Ampère fosse contrário a esta interpretação, como se mostra a seguir. O fenômeno em si pode ser interpretado tanto por ação direta à distância quanto por ação por contato, mas nos parece importante apresentar as reflexões de Ampère sobre as forças entre condutores transportando correntes constantes.

Embora em geral se afirme que é de Ampère a lei circuital magnética (integral de linha do campo magnético sendo proporcional à corrente que flui pela área englobada pela linha fechada), esta lei foi obtida por Maxwell. O próprio Ampère era contrário à idéia de um campo magnético circulando um longo condutor retilíneo. Em vez de trabalhar com o conceito de campo magnético, Ampère trabalhava com a força direta à distância entre dois condutores com corrente de tamanho infinitesimal, força esta ao longo da reta unindo os dois elementos de corrente, (Bueno e Assis 1998). Citamos aqui alguns trechos do trabalho de Ampère datado de 1823, mas lido na Academia Real de Ciências de Paris em 1825 e publicado em 1827, intitulado "Sobre a Teoria Matemática dos Fenômenos

Eletrodinâmicos, Deduzida Experimentalmente”, (Tricker 1965) [entre colchetes vão nossas palavras]:

“A nova era na história da ciência marcada pelos trabalhos de Newton, é não apenas a época da descoberta mais importante pelo homem nas causas dos fenômenos naturais, mas também a época na qual o espírito humano abriu uma nova avenida nas ciências que possuem os fenômenos naturais como seu objeto de estudo. Até Newton, as causas dos fenômenos naturais haviam sido procuradas quase que exclusivamente nos impulsos de um fluido desconhecido que penetrava nas partículas dos materiais na mesma direção que suas próprias partículas; sempre que ocorria movimento rotacional, era imaginado um vórtice na mesma direção. Newton nos ensinou que movimento deste tipo, como todos os movimentos na natureza, tem de ser reduzido pelo cálculo em termos de forças agindo entre duas partículas materiais ao longo da linha reta que as une tal que a ação de uma partícula sobre a outra seja igual e oposta à ação que a última faz na primeira e, conseqüentemente, supondo que as duas partículas estejam permanentemente associadas, tal que nenhum movimento [do conjunto de duas partículas] possa resultar da interação entre elas.”

(Pág. 155)

“(…) Não parece que este enfoque [newtoniano], o único que pode levar a resultados que estão livres de todas as hipóteses, seja o preferido pelos físicos no restante da Europa como ele é preferido pelos franceses; o famoso cientista [Oersted] que viu pela primeira vez os pólos de um ímã transportados pela ação de um condutor em direções perpendiculares à direção do fio, concluiu que matéria elétrica circulava ao redor do fio [como hoje se supõe que o campo magnético circula o fio] e empurrava os pólos junto com ela, assim como Descartes havia feito ‘a matéria dos seus vórtices’ girar na direção da rotação planetária. Guiado pela filosofia newtoniana, reduzi os fenômenos observados pelo Sr. Oersted, como já havia sido feito para todos os fenômenos naturais similares, a forças agindo ao longo da linha reta ligando as duas partículas entre as quais é exercida a ação (...)”

(Págs. 156–157)

Ou seja, para explicar o torque sobre a agulha imantada de uma bússola, que faz com que ela fique perpendicular a um longo fio com corrente com o qual está interagindo, Ampère não utiliza nenhuma matéria circulando o fio, também não utiliza nenhum campo magnético dando voltas no fio (como estamos acostumados a fazer usando a regra da mão direita). Em vez disto Ampère explica o fenômeno

utilizando forças de ação e reação entre o fio com corrente e as correntes microscópicas dentro da agulha magnetizada, forças estas ao longo da reta que une cada par de elementos de corrente. Apesar de estar quase esquecida hoje em dia, esta força de Ampère entre elementos de corrente era considerada por Maxwell como a lei mais importante da eletrodinâmica, e que ela sempre permaneceria com esta relevância, (Maxwell 1954, p. 174 e 175, parágrafos 527 e 528). Toda a eletrodinâmica de Weber surgiu a partir da força de Ampère, (Assis 1995) e (Assis 1998).

Maxwell, por outro lado, já defende a idéia de ação intermediada por um meio. Sua ênfase maior é na interação eletromagnética. Ao seguir as idéias de Faraday, Maxwell defende que não existe ação direta entre cargas, entre ímãs nem entre correntes elétricas. Em vez disto supõe que cada carga, ímã ou corrente gera ao seu redor campos elétricos e magnéticos e que são estes campos que vão interagir com outras cargas, com outros ímãs e com outras correntes. Ou seja, defende a idéia de ação por contato, neste caso contato entre o campo eletromagnético e a carga, ímã ou corrente que está sentindo a força ou que está sofrendo os efeitos destes campos. Maxwell defende ainda abertamente a idéia de um éter, ou seja, um meio material responsável pela transmissão da interação. Maxwell tem dois artigos muito importantes de 1873 onde discute a ação à distância. Estes dois artigos já se encontram traduzidos para o português, (Assis 1992) e (Tort, Cunha e Assis 2004). Apesar de defender um dos pontos de vista, Maxwell é cuidadoso ao apresentar as duas possibilidades de interação, mostrando também os aspectos positivos da ação à distância. Estes artigos são recomendados a todos que se interessam por esta questão fundamental da ciência.

Não pretendemos encerrar a questão com este artigo. Muito pelo contrário, nosso objetivo aqui é o de mostrar a importância deste tema e de motivar outros a refletir sobre este tópico, um dos mais fascinantes e relevantes de toda a física.

Agradecimentos

À Profa. Cibelle Celestino Silva pelo convite para escrever este artigo e pelas sugestões valiosas relativas às primeiras versões. Todas as falhas e pontos de vista expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor.

Referências bibliográficas

- ASSIS, A. K. T. Teorias de ação a distância – Uma tradução comentada de um texto de James Clerk Maxwell. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência* 7: 53–76, 1992.

- ASSIS, A. K. T. *Eletrodinâmica de Weber*. Campinas: Editora da Unicamp, 1995.
- ASSIS, A. K. T. *Mecânica Relacional*. Campinas: Editora do CLE da Unicamp, 1998.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. *Novo Dicionário da Língua Portuguesa*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1975.
- BUENO, M. e ASSIS, A. K. T. *Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos*. Florianópolis: Editora da UFSC e Editora da UEM, 1998.
- FERREIRA, N. e MAURY, J.-P. *Plus et Moins – les Charges Électriques qu'est-ce que c'est?* Paris: Editions Ophrys, 1991.
- GARDELLI, D. *Concepções de Interação Física: Subsídios para uma Abordagem Histórica do Assunto no Ensino Médio*. São Paulo: Tese de mestrado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2004, orientador: R. d. A. Martins.
- GASPAR, A. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. São Paulo: Ática, 2003.
- MARTINS, R. d. A. Oersted e a descoberta do eletromagnetismo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* **10**: 89–114, 1986.
- MAXWELL, J. C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. New York: Dover, 1954, terceira edição.
- NEWTON, I. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Berkeley: University of California Press, 1934.
- NEWTON, I. *Principia – Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, volume 1. São Paulo: Nova Stella/Edusp, 1990. Tradução de T. Ricci, L. G. Brunet, S. T. Gehring e M. H. C. Célia.
- NEWTON, I. *Óptica*. São Paulo: Edusp, 1996. Tradução, introdução e notas de A. K. T. Assis.
- OERSTED, H. C. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* **10**: 115–122, 1986, tradução de R. de A. Martins.
- TORT, A. C., CUNHA, A. M. e ASSIS, A. K. T. Uma tradução comentada de um texto de Maxwell sobre a ação a distância. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**: 273–282, 2004.
- TRICKER, R. A. R. *Early Electrodynamics – The First Law of Circulation*. Oxford: Pergamon Press, 1965.
- WHITTAKER, E. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Vol. 1: *The Classical Theories*. New York, Humanities Press, 1973.