

Axiomatização da Mecânica Clássica

Questão: Por que e como axiomatizar as teorias físicas ?

1. Contexto da Descoberta e Contexto da Justificação

Ao se discutir a metodologia da ciência, é importante traçar uma distinção entre dois contextos: o da descoberta e o da justificação.¹³² A maneira como uma descoberta científica é feita envolve diversos fatores, incluindo aspectos psicológicos, sociais e culturais. O químico alemão August Kekulé (1865), por exemplo, chegou à idéia de que o benzeno é um *anel* de átomos de carbono após ter sonhado com uma cobra mordendo o rabo. No entanto, ele não incluiria esta informação ao escrever seu artigo para publicação. No contexto da justificação de uma teoria, procura-se partir de bases firmes e deduzir consequências de maneira rigorosa e de acordo com os cânones da metodologia científica. No contexto da descoberta, por outro lado, os caminhos para se adquirir conhecimento são os mais variados.

Ao se discutir uma questão de filosofia da ciência, é preciso especificar em qual contexto se está trabalhando. Por exemplo, qual a importância da *indução* na ciência? A “indução por enumeração” consiste de se observar uma regularidade em um número finito de casos, e daí generalizar para todos os casos, em uma “lei empírica”. No contexto da descoberta, tal método é muitas vezes usado, especialmente nos estágios iniciais de uma área científica. Os positivistas tendem a considerar que a indução também é uma maneira de *justificar* a aceitação de uma lei empírica. No entanto, autores como Karl Popper discordam que a indução possa servir de justificação, sem negar, porém, que ela possa ter um papel na geração de hipóteses (contexto da descoberta). Para Popper, o método privilegiado para se justificar uma teoria é o método hipotético-dedutivo, que consiste em formular uma hipótese e deduzir suas consequências empíricas (observacionais): se houver concordância entre a previsão e o que é de fato observado, a hipótese é “corroborada” (verificada); se não, ela é “falseada” (ou seja, a hipótese ou alguma outra suposição usada na dedução deve ser abandonada).

Neste capítulo, examinaremos as tentativas de fundamentar teorias científicas em bases rigorosas, por meio de sua axiomatização. Tais tentativas estão claramente no contexto da justificação. No Cap. XX, estudaremos o contexto da descoberta da teoria do eletromagnetismo por Maxwell, onde as analogias desempenham papel importante.

2. Discussão dos Princípios Newtonianos no Séc. XIX

Em meados do séc. XIX, concomitantemente com a ascensão da Termodinâmica e do princípio de conservação de energia, vários físicos começaram a questionar os fundamentos da mecânica newtoniana. Na França, Barré de Saint-Venant (1797-1886), em 1851, adotou uma perspectiva atomista para fundar a mecânica apenas nas velocidades e acelerações entre pontos, derivando definições de “massa” e “força”. Considerava que as forças eram “agências de uma natureza oculta ou metafísica”, e não as relacionou com as causas eficientes dos

¹³² Os termos “contexto da descoberta” e “contexto da justificação” foram cunhados por Hans Reichenbach (1938), mas a distinção é mais antiga. Immanuel Kant (1781), por exemplo, se referia a “questões de fato” (*quid facti*) e “questões de direito” (*quid juris*). John Herschel (1830) também é citado como um autor que distinguiu claramente entre “como alcançamos conhecimento” e “a verificação das induções”.

movimentos.¹³³ Por contraste, outro francês, Frédéric Reech (1852), seguiu a abordagem de Euler ao colocar a força como ponto de partida da mecânica. Comparou uma força a um fio tensionado que estaria ligado à partícula sofrendo a ação da força. A força poderia ser avaliada cortando-se o fio e observando o movimento subsequente da partícula. Trabalhando com diferenças de acelerações, buscou eliminar a descrição em termos de um referencial privilegiado. Sua “escola do fio” foi levada adiante por Jules Andrade (1898).

Um quarto de século após essas primeiras formulações, em 1876, o alemão Gustav Kirchhoff (1824-87) se propôs a construir a mecânica de maneira lógica, a partir das noções de espaço, tempo e matéria, e derivando destas os conceitos de força e massa. Uma abordagem semelhante foi publicada independentemente, em 1883, pelo austríaco Ernst Mach (de quem falamos nas seções VII.2 e XII.3), em seu livro *A ciência da mecânica*. Mach considerou que os princípios da mecânica precisariam ser fundados na experiência, e não na especulação teórica: seu livro seria “um trabalho de explicação crítica animado por um espírito *anti-metafísico*”.

Fez uso de um “princípio de simetria” para definir *operacionalmente* (por meio de operações experimentais) o conceito de massa (inercial). Para isso, considerou que dois corpos idênticos *A* e *B* comunicam acelerações iguais e contrárias, a_A , a_B , ao longo da linha que os une (por exemplo, por meio de uma mola). Tomando *A* como tendo massa unitária $m_A=1$, a massa de *B* seria tal que $m_B \cdot a_B = -m_A \cdot a_A$. Eliminou assim o apelo de Newton à noção intuitiva de “quantidade de matéria” (ver seção XI.2), e declarou que “nesta concepção de massa não há teoria”. A única tese teórica usada é o princípio de ação e reação. Tendo assim definido “massa” em termos operacionais, pôde caracterizar a 2ª lei de Newton como sendo uma definição¹³⁴ de força: $F := ma$, derivada a partir de termos observacionais. Sua estratégia foi apoiada por positivistas como Karl Pearson (1892).

Heinrich Hertz (1857-1894) também se dedicou ao problema, logo antes de sua morte prematura, publicando *Os princípios da mecânica, apresentados em uma nova forma* (1894). Seguindo seu professor Kirchhoff, buscou construir a Mecânica a partir dos conceitos de tempo, espaço e massa. Comentou a abordagem tradicional, baseada nos conceitos de espaço, massa, força e movimento, que estão ligadas às leis de Newton e ao princípio de d’Alembert (seção XV.2), argumentando que ela teria imprecisões lógicas. Uma dessas imprecisões seria que a noção de força em geral é tomada como a *causa* do movimento, mas, no caso de forças fictícias como a força centrífuga, ela surge como *efeito* do movimento. Criticou também a profusão do uso do conceito de força, por exemplo na Mecânica Celeste, sem que isso correspondesse a algo observável: só observamos as posições dos astros em diferentes instantes (comparou o uso de forças ao uso de epiciclos na Astronomia antiga).

Parte então da abordagem de Kirchhoff, mas faz a seguinte constatação, característica de uma atitude realista. “Se quisermos obter um quadro do mundo que é fechado em si mesmo, no que tange a leis, devemos conjecturar a existência de outros seres invisíveis por trás das coisas que vemos, e buscar os atores escondidos por detrás das barreiras de nossos sentidos”. Os conceitos de força e de energia seriam idealizações desse tipo, mas Hertz preferiu postular a existência de “variáveis ocultas” que nada mais seriam do que massas em movimento, que se chocariam com os corpos visíveis de maneira a dar conta do que observamos. Teríamos assim um retrato mecanicista, semelhante ao de Descartes ou Le Sage (seções X.6 e 7). Hertz, porém, não estava preocupado em fornecer modelos particulares para diferentes fenômenos, como a gravitação, mas em formular uma descrição geral que fosse consistente com os princípios da Mecânica Clássica. A lei fundamental da Mecânica seria uma lei de mínimo (seção XV.3): para sistemas isolados, o sistema segue a trajetória de curvatura mínima, com uma velocidade

¹³³ Nesta seção, seguimos DUGAS (1988), op. cit. (nota 127), pp. 436-51.

¹³⁴ Adotamos a convenção de “dois-pontos-igualdade”, adotada por alguns lógicos, para exprimir uma definição: “:=”. Outras signos usados para “definição” são: “≡” ou “=df.”.

constante. Tal lei se reduziria para as leis conhecidas da Mecânica, como o princípio de mínima restrição de Gauss, que era uma formulação alternativa do princípio de d'Alembert.

O último autor que consideraremos neste resumo é o francês Henri Poincaré (1854-1912), que em sua *Ciência e hipótese* (1902) levou adiante o projeto de mostrar em que medida as teorias físicas envolvem *convenções*. Uma convenção seria uma tese, a respeito do mundo, que poderia ser diferente, mas que é adotada porque permite a construção de uma teoria econômica (simples) e eficiente em suas previsões. Nossa tendência é supor que o princípio de inércia (1ª lei de Newton), por exemplo, reflete um fato fundamental do mundo ou espelha diretamente a uma realidade. No entanto, argumenta Poincaré, não é possível verificar experimentalmente este princípio. Podemos tentar fazê-lo lançando um corpo em uma região na qual não há forças resultantes, mas, neste caso, como sabemos que não há forças atuando? Um critério é verificar se um corpo de prova não sofre acelerações, mas neste caso estaríamos usando implicitamente o princípio de inércia para constatar que numa região não há forças, de modo a testar o próprio princípio de inércia! Seria um círculo vicioso!¹³⁵

Poincaré considerava que vários outros princípios seriam convencionais: a simultaneidade do tempo, o espaço absoluto, a suposição que o espaço seria euclidiano, a lei de ação e reação, e o princípio de conservação de energia. (Em um capítulo posterior examinaremos o argumento de Poincaré a respeito deste último princípio.) A 2ª lei de Newton seria uma convenção, mas mesmo assim Poincaré associava ao conceito de força um conteúdo intuitivo (associado à noção de esforço), ao contrário do que fizera Kirchhoff. Considerava assim que a abordagem de Kirchhoff era apenas uma convenção possível, assim como a adotada pela “escola do fio” que mencionamos anteriormente. Quanto ao papel da experimentação, considerava que ela poderia verificar a teoria física de maneira apenas aproximada (dado que não existiria um sistema perfeitamente isolado); ou seja, as convenções da física seriam parcialmente justificadas pela experimentação.

3. Críticas ao Método de Mach

Críticas à proposta de Mach começaram a surgir de maneira mais detalhada a partir do trabalho de dois matemáticos ingleses, L.N.G. Filon e C.G. Pendse, na década de 1930. Filon publicou em 1926 um estudo sobre as bases da mecânica racional em que tinha simpatia pela abordagem de Mach. Em torno de 1932, porém, passou a questionar a abordagem machiana por razões semelhantes às consideradas por Poincaré (a quem não cita): nunca podemos ter certeza que um corpo não está sob o efeito de uma força externa, nem que dois corpos interagentes (segundo a receita de Mach) também não estejam. As três leis de Newton não seriam leis experimentais, pois não poderiam ser provadas nem refutadas experimentalmente. Filon concluiu que a única maneira correta de definir a massa de um corpo seria através de seu peso, método este proposto pelo próprio Newton.¹³⁶

Em 1937, C.G. Pendse¹³⁷ mostrou que o método operacional de Mach, de observar as acelerações entre dois corpos para inferir os valores das massas, falhava para muitos corpos. Sem levar em conta a 3ª lei de Newton, se as acelerações fossem medidas apenas uma vez, o

¹³⁵ Esta e outras discussões são tratadas em CHIBENI, S.S. (1999), “A fundamentação empírica das leis dinâmicas de Newton”, *Revista Brasileira de Ensino de Física* 21, 1-13.

¹³⁶ FILON, L.N.G. (1938), “Mass and force in Newtonian mechanics”, *Mathematical Gazette* 22, 9-16.

¹³⁷ PENDSE, C.G. (1937), “A note on the definition and determination of mass in Newtonian physics”, *Philosophical Magazine* 24, 1012-22. PENDSE, C.G. (1939), “A further note on the definition and determination of mass in Newtonian mechanics”, *Philosophical Magazine* 27, 51-61. PENDSE, C.G. (1940), “On mass and force in Newtonian mechanics”, *Philosophical Magazine* 29, 477-84.

método falhava para mais do que 4 corpos, pois o número de incógnitas (forças entre pares de partículas, mais as massas) tornava-se maior do que o número de equações. Mesmo levando em conta a 3ª lei de Newton, uma única observação de aceleração, para corpos não coplanares, *não* consegue determinar as massas relativas, de maneira exata, para mais do que 5 corpos.

Pendse calculou também o que aconteceria se se pudesse medir as acelerações *em vários instantes diferentes*. Inicialmente, concluiu que para acima de 7 corpos o método falharia, mas em um artigo posterior concluiu que seria possível derivar as massas relativas em alguns casos, com um número suficientemente grande de medições, mas não as forças!

O método de Mach funcionaria, naturalmente, se se pudesse pegar cada corpo individualmente, e comparar sua aceleração com a de um corpo de referência, e pô-lo de volta no sistema, supondo que sua massa não varia neste procedimento.

Na prática, é claro, tal procedimento não é necessário para corpos de nosso cotidiano, pois confiamos em balanças. Para se determinar as massas dos planetas, não podemos retirar os corpos para pesagem, mas o fato de o Sol ser muito mais massivo do que os planetas facilita os cálculos a partir das acelerações. Já no caso de partículas elementares, as massas são medidas por diversos procedimentos, muitos dos quais dependem da aceitação de uma teoria física.

Concluindo esta seção, podemos dizer que métodos operacionais parecem viáveis na física, mas na prática científica utilizam-se de bom grado métodos nos quais conceitos teóricos são introduzidos de maneira primitiva.

4. Axiomatização de Teorias Matemáticas

Uma *axiomatização* consiste em uma formulação de uma teoria que se inspira na sistematização que Euclides deu para a geometria (ver seção XIII.1). Partem-se de axiomas, demonstram-se teoremas e resolvem-se problemas de construção.

No séc. XIX, o quinto postulado de Euclides – que diz que dados uma reta e um ponto fora dela, em um plano, então pelo ponto passa apenas uma paralela à reta – passou a ser modificado, resultando nas geometrias não-euclidianas (seção XIII.1). Com isso, começou a ficar claro que o importante em uma axiomatização na matemática não é nossa opinião sobre a veracidade dos axiomas, mas a consistência interna do sistema axiomático. Essa concepção foi bastante divulgada no começo do séc. XX pelo alemão David Hilbert, que sublinhou que uma axiomatização deve deixar claro quais são as noções *primitivas* (não-definidas) do sistema. No caso da Geometria Euclidiana, as noções de “ponto” e “reta” são primitivas: não devem ser definidas a partir de outros conceitos e nem precisam satisfazer nossa intuição a seu respeito. O significado dessas noções é parcialmente estabelecido pelos cinco axiomas de Euclides. No entanto, diferentes “interpretações” podem satisfazer o sistema axiomático, sendo chamadas de “modelos”. Por exemplo, o modelo representado pictoricamente na Fig. XVI.1 satisfaz o seguinte conjunto de axiomas, usados por Hilbert¹³⁸:

A1: Para quaisquer duas retas, há no máximo um ponto pertencente às duas.

A2: Para quaisquer dois pontos, há exatamente uma reta que os contém.

A3: Em cada reta há pelo menos dois pontos.

A figura pode causar estranheza, porque a reta BDF não se parece com as outras. Mesmo assim, representa um modelo do sistema de axiomas {A1,A2,A3}.

¹³⁸ Exemplo apresentado por VAN FRAASSEN, B. (2007), *A imagem científica*, trad. L.H.A. Dutra, Ed. Unesp/Discurso, São Paulo, pp. 84-6 (orig. em inglês: 1980).

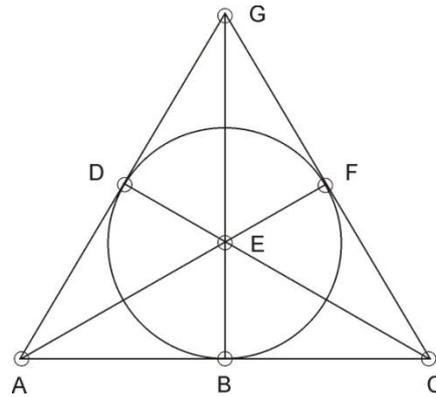


Figura XVI.1: Plano de Fano: geometria dos sete pontos e sete retas, que é um modelo dos axiomas A1, A2 e A3. Notar que não há intersecção entre retas se não houver a marcação de um ponto.

5. Axiomatização Dedutivista da Mecânica Clássica

A formulação que Newton deu para a Mecânica pode ser considerada uma “axiomatização informal”, pois partiu de algumas definições e das três leis fundamentais da Mecânica, além da lei de atração gravitacional, e deduziu diversos teoremas. No entanto, a sua axiomatização não satisfaz os critérios de rigor da lógica moderna, sendo por isso considerada “informal”.

Em 1953, J.C.C. McKinsey, A.C. Sugar & Patrick Suppes publicaram uma axiomatização da mecânica clássica de partículas que se propunha a cumprir os padrões de rigor estipulados por Hilbert. Em especial, tomaram cuidado em deixar claro quais são as noções *primitivas* da teoria mecânica. Escolheram não introduzir um axioma de impenetrabilidade entre partículas, e pressupuseram também diversos resultados da matemática clássica.

As noções primitivas introduzidas foram P , T , m , s e f . O que seria P ? Não diretamente uma entidade física, mas um *conjunto*! P e T são conjuntos, m uma função unária, s uma função binária e f uma função ternária. A axiomatização de McKinsey *et al.* é uma teoria matemática, baseada em conjuntos e em funções, que por sua vez são redutíveis a conjuntos. Assim, Suppes cunhou o slogan que “axiomatizar uma teoria é definir um predicado conjuntista”.¹³⁹ Essa abordagem não foi bem recebida pelos físicos, como pode ser visto pelo comentário de Clifford Truesdell, em nota na primeira página do artigo de McKinsey *et al.*, que se inicia assim: “O comunicador está em completo desacordo com a visão da mecânica clássica expressa neste artigo”.

Naturalmente, McKinsey *et al.* tinham em mente uma interpretação física para esses conceitos matemáticos. P poderia ser interpretado como um conjunto de partículas p , mas também poderia ser interpretado de maneira não física, como um conjunto de números, por exemplo. T é interpretado como um conjunto de números reais que medem o tempo transcorrido. A função $m(p)$ interpreta-se fisicamente como a massa da partícula p , $s(p,t)$ é seu vetor posição num instante de tempo t , e $f(p,t,i)$ é o vetor de força i atuando em p no instante t . Apresentam então seis axiomas, de tal forma que o conjunto ordenado $\langle P,T,m,s,f \rangle$ define um

¹³⁹ MCKINSEY, J.C.C.; SUGAR, A.C. & SUPPES, P. (1953), “Axiomatic foundations of classical particle mechanics”, *Journal of Classical Mechanics and Analysis* 2, 253-72. O slogan de Suppes aparece em um texto não publicado de 1967, e é citado na revisão feita por SANT’ANNA, A.S. & GARCIA, C. (1998), “É possível eliminar o conceito de força da mecânica clássica”, *Revista Brasileira de Ensino de Física* 20, 346-53, que axiomatiza a mecânica de Hertz.

sistema de mecânica de partículas. Os axiomas P1 e P2 apenas estipulam que P não é vazio e que T é um intervalo de números reais. O terceiro axioma cinemático determina que o vetor $s(p,t)$ é duplamente diferenciável em t . O axioma P4 apenas estipula que $m(p)$ é um número real positivo, e P5 que a soma em i das forças $f(p,t,i)$ converge em uma força resultante de valor finito. O último dos três axiomas dinâmicos, P6, corresponde à 2ª lei de Newton. Notamos a importância que os autores atribuem à especificação matemática precisa dos conceitos envolvidos.

A 1ª lei de Newton é derivada de P3, P4 e P6, como o teorema de que se a força resultante sobre um corpo é nula, o vetor velocidade é constante. Quanto à 3ª lei de Newton (ação e reação), McKinsey *et al.* preferem não impô-la como axioma, para permitir aplicações em que ela não é usada, como no disparo de uma bala de canhão (em que a força de reação na Terra é desprezada). Vemos assim uma característica pragmática de sua axiomatização, próxima de um instrumentalismo (seção IV.3), pois na formulação dos axiomas não importa tanto qual é a “verdade”, mas sim o quão prático é a aplicação do formalismo. De fato, no início do artigo eles advertem:

Deve-se notar que a mecânica de partículas, como quase qualquer outra ciência em forma dedutiva, envolve uma idealização do conhecimento empírico factual [*actual empirical knowledge*] – e é assim melhor concebida como um instrumento para lidar com o mundo [*a tool for dealing with the world*], do que como um retrato que o representa. (MCKINSEY *et al.*, 1953, p. 254.)

Apesar de não adotarem a 3ª lei de Newton, provam um teorema segundo o qual qualquer modelo de seu sistema axiomático pode ser inserido como parte de um modelo mais amplo que satisfaz a 3ª lei.

Um resultado bastante citado do trabalho de McKinsey *et al.* é a demonstração de que m , s e f são noções primitivas independentes, sendo que P e T , por seu turno, poderiam ser definidos em termos dos outros primitivos. Utilizam para isso um método lógico devido a Alessandro Padoa (1900), que consiste essencialmente em fixar os valores dos outros primitivos, e mostrar que o primitivo em questão pode assumir diferentes valores (ou seja, seu valor não é fixado univocamente pelos valores dos outros primitivos). No caso da força, mostram, em um exemplo simples, que as acelerações de um conjunto de corpos colineares podem ser devidas a distintos conjuntos de forças (ver Fig. XVI.2).

O exemplo é trivial porque os dois conjuntos de forças, $\alpha = \{f^0\}$, $\beta = \{f^1, f^2\}$, fornecem as *mesmas* forças resultantes em cada corpo. Isso revela a diferença entre a abordagem de McKinsey *et al.* e os de Kirchhoff e Mach (seção XVI.2). Kirchhoff define a força a partir da massa e da aceleração. Assim, no exemplo da Fig. XVI.2, as duas situações correspondem à mesma força em cada partícula, que no caso é a *força resultante*. Na abordagem fenomenista de Kirchhoff, não faria sentido nesse exemplo distinguir os casos (α) e (β), a não ser que houvesse alguma outra maneira empírica de distinguir essas situações. Já McKinsey *et al.* partem do princípio que existem os dois conjuntos distintos de forças, e que cada uma das forças indicadas é real, mesmo que empiricamente os conjuntos de forças sejam indistinguíveis. Apesar de termos citado um parágrafo em que apresentam um discurso instrumentalista, neste momento eles adotam uma postura mais realista que a de Kirchhoff, com relação ao conceito de força.

Com relação a Mach, consideram plausível que se pegue cada partícula, e que cada uma seja submetida (individualmente) ao procedimento operacional para se determinar sua massa, em relação a uma massa de referência. No entanto, tal procedimento envolve um cientista experimental, e McKinsey *et al.* não veem como seria possível incorporar tal cientista em um sistema clássico de mecânica de partículas!

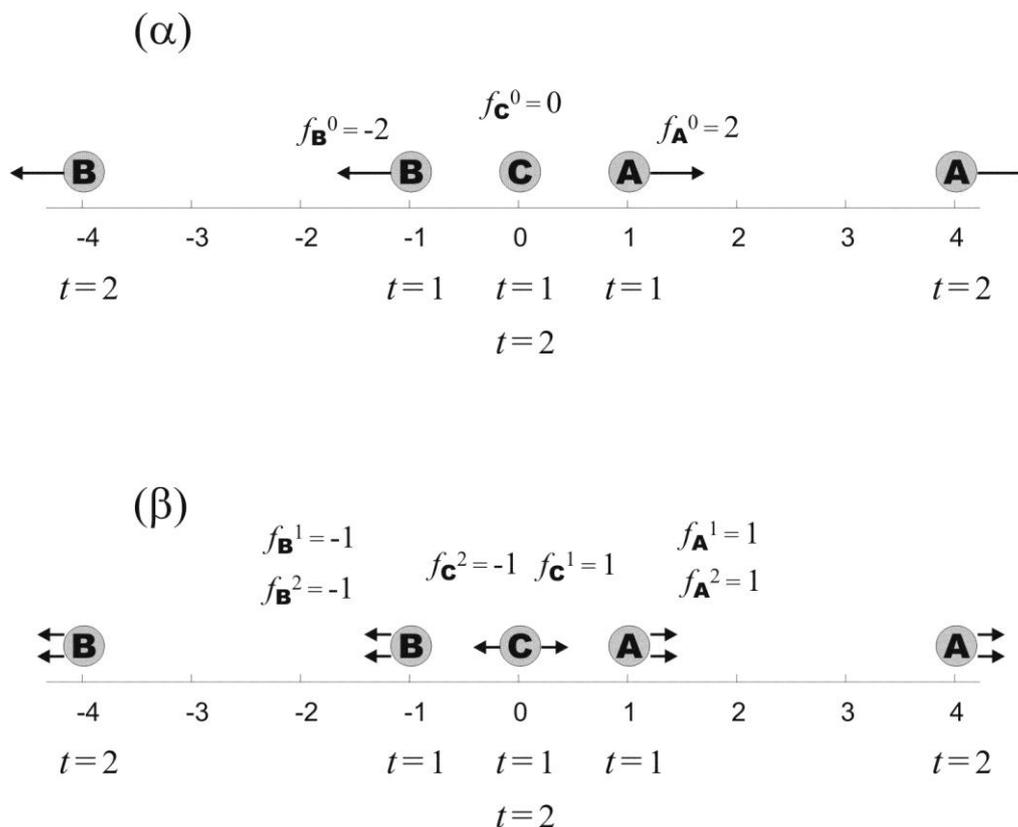


Figura XVI.2: Exemplo de McKinsey et al. de dois conjuntos de forças (indicadas por flechas) que geram as mesmas acelerações.

6. O Debate entre Axiomatizações Operacionais e Dedutivistas

Vimos até aqui duas estratégias para se fundar a mecânica clássica de partículas. Na axiomatização informal de Newton, cada axioma pretende exprimir uma lei fundamental do Universo, ou seja, pretende ter um importante conteúdo físico, mesmo que haja redundâncias (a 1^a lei é um caso particular da 2^a). A maioria das revisões formuladas no séc. XIX (que vimos na seção XVI.2) envolviam a questão de se os postulados de Newton exprimiam diretamente fatos *observados* na natureza, ou se eles envolviam conceitos teóricos (não diretamente observáveis), como “força”. A tentativa de axiomatizar uma teoria física com base em postulados próximos à observação pode ser chamada de abordagem *empirista* ou *operacional* (ou mesmo “indutivista”) à axiomatização de teorias científicas.

Já a abordagem de McKinsey, Sugar & Suppes encara o conceito de força de maneira realista (mesmo adotando um tom geral instrumentalista), aceitando que se possa definir esse conceito de modo independente das observações. Tal abordagem pode ser chamada de *dedutivista* ou *realista*.

Outros autores propuseram axiomatizações mais empiristas do que as de McKinsey *et al.* Herbert Simon, pensador multifacetado, expoente da inteligência artificial e ganhador do Prêmio Nobel de Economia, escreveu vários trabalhos formulando uma axiomatização de sabor mais empirista¹⁴⁰. Ele contorna as dificuldades que o método de Mach enfrenta para

¹⁴⁰ SIMON, H.A. (1946), “The axioms of Newtonian mechanics”, *Philosophical Magazine* (series 7) 38, 888-905. SIMON, H.A. (1954), “The axiomatization of classical mechanics”, *Philosophy of Science* 21, 340-3. SIMON, H.A. (1970), “The axiomatization of physical theories”, *Philosophy of Science* 37, 16-26.

definir operacionalmente massa, ao incluir a lei da atração gravitacional como um axioma. Dentre as conclusões que obteve, está a de que se se quiser *definir* força a partir da 2ª lei de Newton, então a lei da gravitação se torna uma lei empírica. Mas se, de maneira alternativa, se quiser definir força a partir do axioma correspondente à lei da gravitação, então $F=ma$ se torna uma lei empírica da Física. Ou seja, a questão de qual é a convenção (definição) e qual é a lei empírica depende da perspectiva que se adota.

Um interessante balanço geral deste debate foi fornecido pelo filósofo da física inglês Jon Dorling¹⁴¹:

Este resultado [de Suppes e colegas] é normalmente tomado como mostrando que, ao contrário das visões positivistas de Mach, massas e forças são termos teóricos que não podem ser eliminados em favor de termos de observação. À primeira vista, essa conclusão parece também fornecer um forte apoio para o hipotético-dedutivismo, contra o indutivismo.

Porém, é difícil aceitar os resultados facilmente provados de Suppes da maneira em que são vendidos filosoficamente. Por um lado (ao contrário do que a maioria dos filósofos parece supor), os físicos matemáticos parecem, em geral, ter tido sucesso em eliminar termos teóricos em favor de termos mais diretamente observáveis [...] (DORLING, 1977, p. 55.)

Dorling cita as axiomatizações operacionais da Termodinâmica e da Mecânica Quântica feitas por Robin Giles, e se detém numa axiomatização da Mecânica Clássica feita por G.W. Mackey (1963), que fornece uma generalização do método de Mach para se determinarem operacionalmente as massas. Conclui que o resultado de independência de McKinsey *et al.* é decorrente da “escolha idiossincrática” de primitivos feita por eles, e que seu resultado não é geral, não afetando a plausibilidade de axiomatizações operacionais ou positivistas.

¹⁴¹ DORLING, J. (1977), “The eliminability of masses and forces in Newtonian particle mechanics: Suppes reconsidered”, *British Journal for the Philosophy of Science* 28, 55-7.