

Imagem de uma bala supersônica, formando ondas de choque, obtida por Mach (1887) por meio da técnica “schlieren”.

## Crítica do princípio de ação e reação e do conceito de massa (1883)

Ernst Mach (1838-1916)

Cap. II, seção 5, do livro *Desenvolvimento histórico-crítico da mecânica*, originalmente de 1883, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig. Tradução (sem os trechos adicionados posteriormente pelo autor) da 4ª edição alemã, de 1901, a partir da 2ª edição em inglês: *The science of mechanics*, trad. Thomas J. McCormack, Open Court, Chicago, 1919, pp. 216-22. Cotejado também com a tradução em castelhano da 7ª ed. (de 1912): *Desarrollo historico-crítico de la mecánica*, trad. Jose Babini, Espasa-Calpe, Buenos Aires, 1949, pp. 184-88.

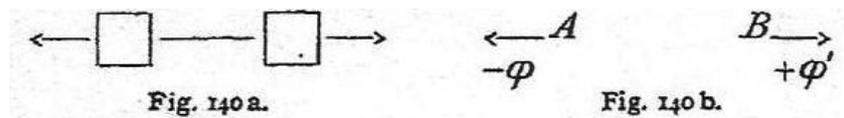
Tradução para o português feita por Osvaldo Pessoa Jr., para o curso de Filosofia e História da Ciência Moderna (FLF0449), 1º semestre de 2012.

[216] 1. Depois de termos nos familiarizado com as concepções de Newton, estamos suficientemente preparados para uma investigação crítica das mesmas. Limitar-nos-emos primeiramente ao conceito de massa e ao princípio de ação e reação. Nessa investigação, ambas não podem ser separadas, e em ambas reside o fundamento principal da contribuição de Newton.

2. Reconheçamos primeiramente que a expressão “quantidade de matéria” não está adaptada para explicar ou elucidar o conceito de massa, pois a própria expressão não possui o requisito da clareza. Isso vale mesmo se, como fizeram muitos autores, fizermos uma decomposição em termos de átomos, que são afinal hipotéticos. Com isso, só se complicam concepções indefensáveis. Concedo, no entanto, que se juntarmos muitos corpos quimicamente homogêneos, podemos associar alguma ideia clara à “quantidade de matéria”, reconhecendo também que a resistência que o corpo oferece ao movimento cresce com essa quantidade. Porém, se supusermos a heterogeneidade química, as experiências mecânicas se aproximam bastante da hipótese de que, em corpos *diferentes*, [217] existe algo mensurável com a *mesma* unidade, e que poderíamos chamar de quantidade de matéria; esta hipótese, contudo, precisa de justificação. Pois se, como fez Newton ao referir-se à pressão devida a um peso, fazemos a hipótese de que  $p=mg$ ,  $p'=m'g$ , e deduzimos  $p/p'=m/m'$ , já se faz uso da *suposição* da mensurabilidade de corpos diferentes com a *mesma* unidade, que é precisamente o que deve ser justificado.

Poderíamos também fixar arbitrariamente que  $m/m' = p/p'$ , ou seja, definir a razão das massas como sendo a razão das pressões devidas ao peso para uma mesma [aceleração gravitacional]  $g$ . Mas então teríamos que *justificar* o uso que se faz dessa noção de massa no princípio de ação e reação e em outras relações.

3. Quando dois corpos (Fig. 140 a), perfeitamente iguais em todos os aspectos, são colocados em lados opostos, esperamos, de acordo com o familiar princípio de simetria, que eles produzirão um no outro acelerações iguais e opostas, segundo a direção da linha que os une. Mas se estes corpos apresentarem qualquer diferença, por menor que seja, de forma, composição química, ou diferirem em qualquer outro aspecto, o princípio de simetria deve ser abandonado, a não ser que *assumamos ou saibamos de antemão* que a igualdade da forma ou constituição química, ou qualquer outra coisa que esteja em questão, não são determinantes. Se, porém, experiências mecânicas clara e



indubitavelmente apontarem a existência nos corpos de alguma propriedade especial e distintiva que determine suas *acelerações*, [218] nada nos impede de estabelecer arbitrariamente a seguinte definição:

*Chamam-se corpos de igual massa aqueles que, atuando um sobre o outro, produzem acelerações iguais e opostas.*

Dessa forma, apenas *designamos* uma relação atual entre fatos. No caso geral, procede-se da mesma maneira. Os corpos *A* e *B* recebem, respectivamente, devido a sua ação mútua (Fig. 140 b), as acelerações  $-\varphi$  e  $+\varphi'$ , onde os sentidos das acelerações estão indicados pelos sinais. Dizemos então que *B* tem  $\varphi/\varphi'$  vezes a massa de *A*. Se adotarmos *A* como unidade, atribuiremos a massa *m* àquele corpo que produz, em *A*, *m* vezes a aceleração que *A* produz em sua reação sobre esse corpo. A razão das massas é o inverso das acelerações, com sinal trocado. A experiência, e somente ela, pode ensinar-nos que essas acelerações têm sempre sinais opostos, e que portanto, de acordo com nossa definição, as massas são sempre positivas. Nenhuma teoria está envolvida em nosso conceito de massa, e nele a “quantidade de matéria” é totalmente desnecessária; tudo que ele contém é a determinação exata, a caracterização e a denominação de um fato.

4. Uma dificuldade deve ser aqui mencionada, cuja superação é necessária para que se tenha um conceito perfeitamente claro de massa. Consideremos um conjunto de corpos, *A*, *B*, *C*, *D*, ..., e comparemo-los todos com a unidade *A*.

$$\begin{array}{cccccc} A, & B, & C, & D, & E, & F. \\ 1, & m, & m', & m'', & m''', & m'''' \end{array}$$

Encontramos assim para as massas, respectivamente, os valores 1, *m*, *m'*, *m''*, ..., etc. Surge então a pergunta: [219] se escolhêssemos *B* como nosso padrão de comparação (unidade), obter-se-ia para *C* o valor de massa  $m'/m$ , para *D* o valor  $m''/m$ , ou os valores resultantes seriam completamente diferentes? De maneira mais simples, a pergunta pode ser colocada da seguinte maneira: se dois corpos *B* e *C* têm massas iguais ao interagirem [separadamente] com *A*, terão eles a mesma massa ao interagirem entre si? Não há nenhuma necessidade *lógica* de que duas massas iguais a uma terceira tenham que ter a mesma massa. Pois não se trata de uma questão matemática, mas de uma questão *física*. Isso pode ser esclarecido ao considerarmos uma relação análoga. Tomemos três corpos *A*, *B*, *C*, dispostos lado a lado, com pesos proporcionais a *a*, *b*, *c*, com os quais se unem em combinações químicas *AB* e *AC*. Não há aqui nenhuma necessidade *lógica* de se supor que as mesmas proporções de peso *b*, *c* dos corpos *B*, *C* entrariam na combinação química *BC*. No entanto, a experiência nos ensina que este é o caso. Se tomarmos qualquer conjunto de corpos com pesos na proporção em que eles se combinam com o corpo *A*, eles se unirão entre si com as mesmas proporções de peso. Mas ninguém pode conhecer isso sem ter feito um experimento. E é isso precisamente o que ocorre com os valores das massas dos corpos.

Se supuséssemos que a ordem da combinação dos corpos, com a qual os valores de massas são determinados, exercessem qualquer influência sobre os valores das massas, então descobriríamos que alguma consequência de tal suposição entraria em conflito com a experiência. Tomemos, por exemplo, três corpos elásticos *A*, *B*, *C* que podem se mover em um anel rígido e sem atrito (Fig. 141). Supomos que *A* e *B* se comportam entre si como se tivessem a mesma massa, [220] e que *B* e *C* também se

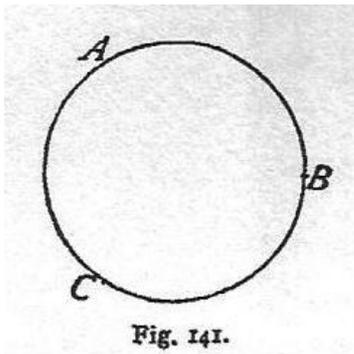


Fig. 141.

comportam como tendo a mesma massa. Assim, para evitar conflito com a experiência, devemos admitir que C e A se comportam entre si como se tivessem a mesma massa. Com efeito, se A tiver inicialmente uma velocidade qualquer, ao se chocar com B [em repouso], ele transmitirá esta velocidade para B [e ficará em repouso], e o mesmo ocorrerá no choque de B com C. Porém, se C agisse sobre A como se sua massa fosse maior, então após o choque A ganharia uma velocidade maior do que a inicial, enquanto C conservaria um pouco da que tinha. Em cada rotação no sentido dos

ponteiros do relógio, a *vis viva* [energia cinética] do sistema *aumentaria*. Se C tivesse a massa menor em comparação com A, a reversão do movimento produziria o mesmo resultado. Mas tal aumento contínuo da *vis viva* estaria claramente em desacordo com nossa *experiência*.

[220] 5. O conceito de massa obtido desta maneira torna desnecessária a enunciação especial do princípio de ação e reação. Conforme mencionamos na página anterior, com o conceito de massa e o princípio de ação e reação formula-se o *mesmo fato de duas maneiras* distintas; há pois redundância. Se duas massas 1 e 2 interagem, nossa definição de massa afirma que eles provocam acelerações de sinal contrário um no outro, respectivamente na razão 2:1 [ou seja,  $\varphi_1/\varphi_2 = -m_2/m_1$ ].

6. De nossa definição, pode-se deduzir também que a *massa* pode ser *medida* pelo *peso*, para uma aceleração da gravidade constante. Temos sensibilidade imediata ao aumento ou diminuição de uma pressão, mas tal sensação nos dá apenas uma medida grosseira da intensidade da pressão. Uma medida exata de pressão pode ser obtida a partir da observação de que toda pressão é substituível pela [221] pressão de uma soma de pesos semelhantes. Qualquer pressão pode ser contrabalançada pela pressão de pesos deste tipo. Sejam dois corpos  $m$  e  $m'$  (Fig. 142) imbuídos respectivamente das acelerações  $\varphi$  e  $\varphi'$ , em sentidos contrários, devido às circunstâncias externas. Suponhamos agora que os dois corpos venham a estar ligados por um fio. Na situação de equilíbrio, a interação [mediada pelo fio] balanceia exatamente a aceleração  $\varphi$  de  $m$  e a aceleração  $\varphi'$  de  $m'$ . Neste caso, então,  $m\varphi = m'\varphi'$ . Quando  $\varphi = \varphi'$ , como no caso em que os corpos são abandonados sob ação da gravidade, temos no caso de equilíbrio que também  $m = m'$ . Evidentemente não tem importância se os corpos interagem diretamente por meio de um fio, ou por um fio que passa em volta de uma polia, ou colocando-os em dois pratos de uma balança. Assim, nossa definição torna evidente que a massa pode ser medida pelo peso, sem que se faça referência à “*quantidade de matéria*”.

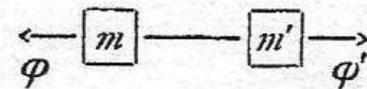


Fig. 142.

7. Guiados pela experiência, tão logo *percebemos* a existência nos corpos de uma característica especial que determina acelerações, nossa tarefa termina com o reconhecimento e designação inequívoca deste *fato*. Não iremos para além do reconhecimento deste fato, pois ir além só conduziria à obscuridade. Todo mal-estar desaparece quando reconhecemos que no conceito de massa não há qualquer tipo de teoria, mas apenas um fato da experiência. Até hoje, o conceito tem se sustentado. É muito improvável, mas não impossível, que no futuro ele seja alterado, como ocorreu [222] com o conceito de quantidade constante de calor, que também se baseava na experiência, mas que foi modificado a partir de novos experimentos.