



A gênese da causalidade física

Michel Paty

► To cite this version:

| Michel Paty. A gênese da causalidade física. *Scientiae Studia*, 2004, n°1, p. 9-32. halshs-00177354

HAL Id: halshs-00177354

<https://shs.hal.science/halshs-00177354>

Submitted on 7 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

A gênese da causalidade física

MICHEL PATY

RESUMO

As noções ou categorias de causalidade e determinismo acompanharam a formação das ciências modernas e, em primeiro lugar, da física. O uso corrente em nossos dias tende freqüente e erroneamente a confundi-las, nas reconsiderações feitas pela própria física. Propomo-nos esclarecer aqui a primeira dessas noções, examinando sua elaboração no início da dinâmica, por meio das primeiras operações e conceituações que acompanham a matematização da mecânica, antes dela ser estendida à física em geral. Veremos como, apoiando-se inteiramente em um aspecto filosófico tradicional da idéia de causalidade (aquele de "causa eficiente"), a causalidade física se estabelece em ruptura com o sentido metafísico que lhe era anteriormente associado. Mais do que no *Principia* de Newton, é na reelaboração por d'Alembert, no *Traité de dynamique*, das leis do movimento formuladas como princípios e expressas pelo cálculo diferencial, que a idéia de causalidade física é expressamente considerada como indissociável de seu efeito, que é a *mudança de movimento*. Os respectivos pensamentos de Newton e de d'Alembert sobre as noções de *causa* e de *força* estão a esse propósito em oposição, diferindo quanto à natureza propriamente física dessa mudança, considerada por d'Alembert como imanente ao movimento, segundo a *causa* circunscrita por seu efeito, enquanto ela permanece matemática e metafísica na concepção newtoniana da *força externa*, como substituto matemático das causas, tal como havia sido proposto antes de Lagrange. É a concepção física herdada de d'Alembert que prevaleceria a seguir por meio da mecânica analítica lagrangiana, que permitiu reintegrar o conceito de força em sua transcrição euleriana.

PALAVRAS-CHAVE: Causalidade. Causalidade física. Causa eficiente. Tempo. Legalidade. Galileu. Descartes. Newton. Kant. d' Alembert. Lagrange. Cálculo diferencial e integral. História da dinâmica. História da mecânica.

INTRODUÇÃO: ENTRE FILOSOFIA E FÍSICA

As noções de *causalidade* e de *determinismo* estiveram de tal modo ligadas à formação e à afirmação da ciência moderna e, acima de tudo, da física, que elas foram e continuam sendo freqüentemente consideradas como indissociáveis da própria idéia de ciência. Entretanto, essas noções gerais, esses *meta-conceitos* ou *categorias*, possuem uma história muito tumultuada e sua ligação com a ciência e particularmente com a física é bem mais complexa que a implicação biunívoca que lhes é freqüentemente atribuída. Ao tornarem-se "noções comuns", a significação que lhes atribuímos é com freqüência indecisa e oscila entre o vaporoso das generalidades e a precisão das atribuições cujo rigor não está forçosamente assegurado. Essas noções vieram reunir-se na física, estendendo-se depois eventualmente a outros domínios da ciência, em momentos e circunstâncias cujos traços é útil recuperar. Sua significação precisa é uma função direta das elaborações da física nos estágios correspondentes, o que é indicativo de que elas poderão comportar limites de validade e conhecer transformações radicais.

O presente trabalho se inscreve no quadro de uma reflexão e de uma análise epistemológica e histórica sobre a causalidade e o determinismo na física, consideradas na sucessão de três etapas, a de constituição da mecânica e da física clássica, a etapa da constituição da física relativística e, enfim, a da física quântica. Nosso projeto será o de esclarecer de que maneira a física fez apelo a essas noções, dotou-as de definição e transformou-as no campo de seus conceitos; e as aventuras e atribulações que se seguiram. Essas atribulações estão, desde o início, ligadas ao fato de que essas noções se constituem em dois momentos diferentes: a *causalidade física* com a mecânica clássica e analítica, o *determinismo* com a astronomia teórica e a teoria das probabilidades.

Embora a idéia de causalidade seja antiga, não é senão com a física no sentido moderno, e a física matematizada, que se afirma a idéia de uma causalidade física, no sentido muito preciso de uma *causalidade temporal diferencial*, que se efetiva inicialmente na mecânica clássica pós-newtoniana, mais do que naquela propriamente newtoniana. Foi necessária, com efeito, a transcrição exata e argumentada de uma causa física do movimento, e de sua mudança, em uma equação envolvendo as grandezas que o descrevem. A conceituação explícita do tempo instantâneo e contínuo da dinâmica como grandeza e a formulação do problema pela análise (ou cálculo diferencial e integral) foram indispensáveis. Mas é somente a seguir que o termo causalidade física foi utilizado para exprimir a significação dessa relação entre as mudanças instantâneas de grandezas que constituem a equação de um movimento (a equação dita de Newton, as equações de Lagrange da mecânica) ou a de uma evolução ou mudança de estado (como o sistema de equações de Maxwell, que exprimem as variações mútuas e em função do tempo de um campo elétrico e de um campo magnético).

Trataremos aqui da questão da causalidade física considerada sob a perspectiva de sua gênese, deixando para um outro trabalho as modificações que aportaram à causalidade tanto a relatividade como a física quântica, bem como as questões do determinismo (com a consideração das condições iniciais) e da completude teórica (formulada a propósito da teoria da relatividade geral e da física quântica) que lhes estão ligadas.ⁱ

1. QUESTÕES DE DEFINIÇÃO: LEGALIDADE E CAUSALIDADE

A palavra "causa", a partir da qual se formou "causalidade", é um termo de origem jurídica, assim como a palavra "lei", da qual se obtém "legalidade", ambas associadas à idéia de conhecimento científico (mas a segunda remonta somente à Idade Média cristã e à idéia de lei divina e natural).ⁱⁱ A palavra latina "*cavere*" que origina causa, significava "a causa de alguém". Esse sentido é herdado do grego αἰτία (*aitia*) (cf. Lalande, 1980 [1926]). Sabe-se que Aristóteles distinguia as quatro causas: formal, material, eficiente, final (cf. Aristóteles, *Metafísica*, I, 3, 983a), retomadas pelo pensamento escolástico que a elas juntará outras (*causa primeira*, aquela que não tem ela mesma causa etc.). Francis Bacon ainda emprega, no início do século XVII, a *causa formal*, que cai logo depois em desuso. A *causa final* perdura até o século XVIII para a física e até mais tarde para outras disciplinas; pode-se encontrá-la notadamente na formulação do *princípio de mínima ação* de Pierre-Louis Moreau

de Maupertuis, embora subsumida por uma relação matemática funcional, e é somente esta última que permanecerá na expressão de William Rowland Hamilton no século XIX.

Cabe mencionar a esse propósito as considerações pertinentes feitas por Jean le Rond d'Alembert nos verbetes intitulados "Ação" e "Causa (final)" da *Encyclopédie*, que exprimem a autonomia de uma lei geral tal como o princípio de mínima ação com relação a considerações metafísicas tais como a das causas finais. "O Sr. de Maupertuis", escreve d'Alembert no verbete "Ação",

descobriu essa lei geral de que, nas mudanças que se fazem no estado de um corpo, a quantidade de ação necessária para produzir essa mudança é a menor que seja possível. Ele aplicou com sucesso esse princípio na investigação das leis da refração, das leis do choque, das leis do equilíbrio etc.

E d'Alembert acrescenta um pouco mais adiante:

Qualquer que seja o partido que se tome concernente à metafísica que lhe serve de base, assim como sobre a noção que o Sr. de Maupertuis deu para a quantidade de *ação*, não será menos verdadeiro que o produto do espaço pela velocidade é um *minimum* nas leis mais gerais da natureza. Esta verdade geométrica, que devemos ao Sr. de Maupertuis, subsistirá para sempre; e poderemos, se quisermos, tomar a palavra *quantidade de ação* simplesmente como uma maneira abreviada de exprimir o produto do espaço pela velocidade (Alembert, 1751b).

Em suma, se nos limitamos a falar da "causa final", como d'Alembert alerta no artigo tendo esse título, jamais será de outro modo que *a posteriori*, uma vez estabelecidas as leis da mecânica, e não o inverso. Ou, em seus próprios termos:

Mas se é perigoso servir-se de *causas finais a priori* para encontrar as leis dos fenômenos, pode ser útil, e é pelo menos curioso, fazer ver como o princípio das causas finais está de acordo com as leis dos fenômenos, desde que se tenha começado por determinar essas leis segundo princípios mecânicos claros e incontestáveis. É o que o Sr. de Maupertuis se propôs fazer particularmente com relação à refração, em uma dissertação impressa dentre aquelas da Academia de Ciências em 1744 (Alembert, 1752).

Expulsão, portanto, da "causa final", a não ser como um modo de falar, para exprimir uma lei sintética da natureza como um princípio de mínimo para as grandezas exatamente definidas.

Quanto à *causa eficiente*, é ela que subsiste finalmente na terminologia moderna,ⁱⁱⁱ tomando o sentido de *causa física*, ligada à mudança de movimento. É esse o sentido que reencontramos naquilo que se chamou a "lei da causalidade newtoniana", cuja formulação exata é, de fato, como o veremos, posterior a Newton.

Mas antes das causas, que são particulares, deve-se considerar a *causalidade*, como um dos princípios racionais do pensamento, que enuncia a relação entre um fenômeno e uma causa e principalmente que todo fenômeno tem uma causa (cf. Lalande, 1980 [1926], "Causalidade"). Causa reveste-se aqui do sentido geral de *razão*, e a causalidade corresponde ao mesmo tempo ao pensamento de uma *necessidade* da natureza e à idéia de que o pensamento racional pode dar conta dessa necessidade principalmente na ciência, com a ajuda de *leis*. Somos assim tentados a propor que a idéia de causalidade se encontra entre a idéia de *legalidade* e a de *necessidade* à qual a primeira remete. Todavia, a idéia de necessidade é sobretudo tomada em consideração, no pensamento clássico, por

oposição àquela de contingência, como na célebre questão, posta em concurso pela Academia de Berlim, no século XVIII, de saber "se as leis da natureza são verdades necessárias ou contingentes". Nesse contexto, a necessidade se identifica ao racional e a contingência ao empírico (ou ao acaso), e a questão ultrapassa as da legalidade e da causalidade, *que têm a ver nos dois casos*. Uma certa idéia de necessidade transparece, entretanto, sob o apelo dos dois, mas sem ser explicitada, como veremos, principalmente em uma das duas acepções da causalidade em sua definição filosófica com relação à física (aquela de anterioridade lógica). Ela ressurgirá mais tarde de maneira marcante a propósito da "força constrangedora dos fenômenos"^{iv} da natureza, que obrigam o pensamento físico a admitir a regra de princípios e de leis a despeito das dificuldades encontradas por noções como as de causalidade e de determinismo. Mas isso acontecerá em um contexto diferente daquele do período clássico, ao qual nos restringimos por enquanto.

Convém dizer aqui algumas palavras acerca das noções de *lei* e de *legalidade* que, como se acaba de ver, estão pelo menos implícitas na consideração da causa e da causalidade. A física, em sua acepção clássica de "filosofia natural" (termo ainda utilizado por Bacon, Galileu e Descartes, assim como por Newton e seus sucessores britânicos até nossos dias),^v se identificava ao conhecimento das leis da natureza, exprimindo regularidades e relações de causalidade. Mas essas leis e essas relações revestiram-se de um sentido preciso e "científico" sobretudo a partir do século XVII, em particular com o estabelecimento da primeira lei dinâmica do movimento local, a da queda dos corpos por Galileu, e com a formulação das leis do movimento, tanto gerais como particulares.

Precisemos, a respeito do primeiro aspecto, que é aos nossos olhos legítimo qualificar a lei galileana de "lei dinâmica", ainda que ela não exprima mais que uma relação entre o espaço percorrido e o tempo correspondente, sem se interrogar sobre as razões de uma tal relação. É evidente que falar a seu respeito de "lei cinemática" não seria satisfatório, dado que essa lei está prenhe de uma dinâmica. Essas questões de terminologia só se colocam, é bem verdade, retrospectivamente, pois é a partir do século XVIII que se tornou usual qualificar de "dinâmico" o que tem relação não apenas com as forças de maneira explícita, mas também com as mudanças de movimento de uma maneira geral (veremos mais adiante as considerações de d'Alembert sobre esse ponto em seu *Traité de dynamique*).^{vi} Ora, a lei da queda dos corpos trata certamente da mudança de movimento (aumento uniforme da velocidade) ocasionada pela gravidade a uma altura dada. É importante, para lançar luz sobre toda a significação da causalidade física tal como será formulada mais tarde, relacionar a lei de Galileu à *dinâmica*, dado o papel central que nela tem o *tempo* como variável e a *aceleração* (constante para a altura dada) como estado da dinâmica particular da gravidade.

Quanto ao segundo aspecto, sobre as leis do movimento, Descartes recebe o crédito, com justiça, de ter sido um dos primeiros a afirmar-lhes a necessidade.^{vii} Sua concepção da *mathesis universalis*, ou seja, de um conhecimento inteligível que seja tão seguro e universal como o conhecimento das matemáticas, concernia em particular a física (e também a metafísica). A inteligibilidade da física implicava a seus olhos a necessidade das leis, sem que ele estivesse igualmente à altura de fornecer uma formulação matemática precisa, a não ser em certos casos, como a lei dos senos na refração da luz na *Dioptrique* (*Dióptrica*), a lei da inércia para o movimento dos corpos e para a luz, ou ainda a lei

da conservação do movimento. Ainda que Descartes se tenha enganado sobre a forma exata desta última e sobre as leis do choque (corrigidas por seu discípulo Christiaan Huygens), o que importa aqui é a direção tomada pelo pensamento das ciências em geral e da física (em sentido restrito) em particular. A especificação desta última dentre as ciência da natureza é acompanhada de sua matematização, empreendida desde o século XVII com as leis do movimento e realizada no século XIX com a matematização de vários domínios da física e seu reagrupamento em um mesmo corpo teórico.

Além da necessidade das leis, Descartes tinha dado uma das chaves que deveria permitir formulá-las quantitativamente: como se lembra d'Alembert no século XVIII, a "aplicação da álgebra à geometria" (geometria analítica), inventada por Descartes, implicava o uso da álgebra (e mais tarde da análise diferencial) *em todas as "ciências físico-matemáticas"*. Descartes tinha, além disso, indicado antecipadamente as razões profundas para tanto, quando apresentou, nas *Règles pour la direction de l'esprit* (*Regras para a direção do espírito*), a exposição de sua concepção das grandezas contínuas, tanto na geometria e na matemática, como para toda entidade que possa ser tomada segundo "a ordem e a medida".^{viii}

No fim das contas, a lei, em física, dá conta de uma regularidade entre grandezas, expressas por uma equação. A lei de Galileu da queda dos corpos compreende o *tempo* como variável. A "segunda lei de Newton" expressa a relação geral, na transmissão ou na mudança de movimento de um corpo, entre a mudança da quantidade de movimento, a força aplicada e a massa, primeira forma daquilo que será a seguir chamado "lei de causalidade", na sua expressão em termos de quantidades diferenciais. Essa lei obedece à relatividade galileana do movimento e essa será uma marca geral das leis físicas do movimento até a relatividade restrita: a condição geral, "lei universal da natureza", que seria substituída ulteriormente pelas invariâncias relativísticas mais fortes (aquelas das teorias da relatividade restrita e geral). Essa lei mais geral que as leis particulares afirma precisamente que as leis do movimento são expressas por equações diferenciais de segunda ordem envolvendo as grandezas contínuas.^{ix}

De uma maneira geral, as leis físicas expressam as mudanças mútuas das grandezas contínuas postas em relação. Essas mudanças são expressas, mais freqüentemente, em função do tempo como variável principal: o papel privilegiado do tempo na lei dinâmica, visível em Galileu e em Newton, não é, entretanto, exclusivo e constata-se a partir do século XVIII a generalização das equações a funções de outras variáveis e às derivadas parciais, como na física dos meios contínuos e, para além da mecânica, na física de campo, tal como nas equações de Maxwell do campo eletromagnético.

Para ficarmos restritos à situação referente ao estatuto das leis e da causalidade naquele momento em que esta última adquiriria um sentido preciso na física, perceber-se-á que o enunciado das leis quantitativas era então essencialmente descritivo quanto às relações das grandezas que caracterizam os fenômenos considerados, e tratavam de propriedades globais ou "integrais", como as leis de Kepler do movimento dos planetas ou a lei da queda dos corpos de Galileu. Elas descreviam os movimentos finitos ou médios, sem dar as "razões" desses movimentos e sem expressar, por exemplo, o nascimento ou a extinção, ou a modificação de um movimento, por considerações *locais*, em um ponto do espaço e num instante dado. Para a lei de Galileu da queda dos corpos, como igualmente para

as leis de Kepler do movimento dos planetas, o movimento estava dado, faltava apenas encontrar as leis de uma maneira *global*.^x A lei de Galileu expressava a distância percorrida em função do tempo sob a ação da gravidade, que correspondia a um crescimento da velocidade, ou aceleração, uniforme g ($v = gt$, $x = 1/2gt^2$). Mas o que é que fazia com que houvesse movimento ou que o movimento se modificasse em conformidade com essas leis?

Para responder a essas questões, será necessário fazer apelo a uma idéia precisa da *causa* do movimento. A formulação do princípio de inércia, por parte de Galileu, de Descartes e de Gassendi (cf. Koyré, 1966 [1939]), conduziu à consideração da mudança de movimento, a aceleração, que Galileu encontrou ser uniforme para a gravidade. Mas isso era apenas uma constatação: o que fazia que a aceleração fosse uniforme (e independente dos corpos)? A descoberta operatória e matemática da lei da atração gravitacional por Newton só constituiria uma resposta verdadeiramente inteligível mediante uma reflexão nova sobre a significação física da causalidade. Essa reflexão seria *filosófica*, sobre a causalidade como categoria do pensamento, mas também *conceitual e crítica* pela produção e explicação da noção de *causa física*, tornando-a efetiva na formulação teórica em virtude de sua ligação direta com a formulação de equações.

2. A CAUSALIDADE DO PONTO DE VISTA FILOSÓFICO: ANTERIORIDADE E TEMPORALIDADE

Consideremos, portanto, em primeiro lugar a noção de causa tal qual foi considerada do ponto de vista filosófico. Para os pensadores da racionalidade clássica, Descartes, Spinoza e Leibniz, a noção de causa comporta a idéia de *anterioridade lógica*, que permite afirmar uma proposição. Ela corresponde à própria idéia de *razão*, diretamente vinculada à *inteligibilidade*: "*causa sive ratio*" ("causa, ou seja, razão"), segundo a expressão de Spinoza na *Ética*. E Leibniz, na *Teodicéia*: "Nada acontece sem que exista uma *causa* ou pelo menos uma *razão* determinante, ou seja, alguma coisa que possa servir para dar a razão *a priori* de porque aquilo é existente antes que não existente, de porque é assim em vez de todo outro modo."^{xi} Essa razão comporta um aspecto real, relativo à natureza, como fica explícito em Leibniz: "*nihil aliud enim causa est, quam realis ratio*" ("*nenhuma outra é a causa senão a razão real*"). Passaremos diretamente daqui a Hume e sobretudo a Kant, ainda que a noção de causalidade esteja presente e seja discutida filosoficamente por outros autores, tais como principalmente Locke e d'Alembert. Mas, como veremos para este último, ela está em parte ligada à implicação direta da causalidade no pensamento físico e à constituição da idéia de *causalidade física* em um sentido muito preciso expresso por uma relação matemática. Retornaremos a isso em breve.

Em sua crítica da causalidade racional, David Hume expressa a idéia de que o que atribuímos às causas é-nos dado, de fato, pelo hábito (cf. Hume, 1748). Embora o ceticismo humeano se aplique às formas da razão, em nenhum lugar ele põe em dúvida a necessidade da natureza e a realidade do mundo exterior. Ele se volta para as representações que nós lhe damos sem nos interrogarmos sobre sua origem. A crítica humeana da indução, liberando a relação entre os fenômenos da natureza e os conceitos, teria com o tempo uma rica posteridade, de Ernst Mach, a quem ela ajudou a pensar a relatividade dos conceitos e suas transformações, a

Henri Poincaré, Pierre Duhem e Albert Einstein, a quem ela inspirará na idéia de *convenção* ou de *livre escolha lógica* dos conceitos, e ainda Karl Popper, que se baseará nela para recusar os critérios positivos de cientificidade e reter somente aquele, negativo, da "falseabilidade".^{xii} Uns e outros guardariam com relação à causalidade e, sobretudo com relação ao determinismo posterior, uma liberdade de espírito, à qual a crítica humeana não foi sem dúvida estranha. Mas a mensagem de Hume atingiu, antes deles, Immanuel Kant que, liberado graças a ela do "sono dogmático", procurará como levar em conta essa lição ultrapassando o ceticismo e o empirismo, para encontrar uma racionalidade que garanta a ciência. Para todos esses autores, inclusive para Kant, deve-se acrescentar à crítica humeana da causalidade em geral a formulação, positiva e racional, de Newton a d'Alembert (este último, contemporâneo e amigo de Hume), de uma causalidade física de sentido mais limitado mas, ao mesmo tempo, mais preciso, do qual falaremos mais adiante.

Para Kant, o princípio de causalidade faz parte daquilo que ele chama as "analogias da experiência", que são tratadas na "Analítica transcendental" da *Crítica da razão pura* (cf. Kant, 1781/1787, livro 2, Cap. 2; Vuilleman, 1955). Encontram-se duas formulações diferentes do princípio respectivamente em cada uma das duas edições da obra. A primeira, na edição de 1781, aproxima-se da concepção da razão ou da anterioridade lógica de Descartes e de Leibniz, mas expressa nos termos da filosofia transcendental. Lê-se, com efeito:

Princípio da produção: tudo o que acontece (ou começa a existir) supõe antes de si alguma coisa da qual ele resulta segundo uma regra.

A segunda, na edição de 1787, é mais newtoniana, pelo menos porque faz intervir a temporalidade e contém uma evocação da lei fundamental da dinâmica de Newton (segunda lei de Newton):

Princípio da sucessão no tempo segundo a lei da causalidade: todas as mudanças se produzem segundo a lei da ligação da causa e do efeito.

Todavia, não foi Newton, mas seus sucessores da mecânica racional, Euler e d'Alembert, e mais tarde Lagrange, que exprimiram de maneira explícita a dependência da dinâmica com relação ao tempo tomado como grandeza (voltaremos a isso mais adiante). A formulação de Kant retém disso a implicação filosófica transcendental.

Se nos reportarmos à "tabua das categorias" de Kant, encontraremos as três categorias de relação, que são: a "inerência" ou a "substância" (a saber, aquilo que se conserva); a "causalidade" e a "dependência"; a "comunhão" ou "ação recíproca". Sua relação com a experiência é dada pela análise das "analogias da experiência", entendendo-se analogia no sentido clássico e etimológico de relação. Elas são retomadas nos "princípios da mecânica" enunciados por Kant, no *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft (Primeiros princípios metafísicos da ciência da natureza)* de 1796, a partir das leis da mecânica de Newton (cf. Kant, 1985 [1796]). Elas se distinguem, entretanto, quando consideradas no plano transcendental, erigidas em princípios do entendimento. Neste nível, seu papel é precisamente tornar possíveis os enunciados das leis e dos princípios da mecânica.

A *primeira analogia da experiência* exprime a conservação da substância e corresponde, nos *Primeiros princípios metafísicos*, ao princípio de conservação da massa. Ela reúne, contra Kant, a idéia de permanência do ser no tempo, que encontramos em vários autores, por exemplo, em Descartes assim como

em Locke; a favor de Kant, aquela de conservação, como a expressará principalmente Hermann von Helmholtz (referindo-se aliás a Kant) em sua obra de 1847 sobre a conservação da energia (cf. Helmholtz, 1978 [1847]). As duas outras analogias são paralelas às leis do movimento de Newton. A *segunda analogia* é precisamente o *princípio de causalidade*, que subsume a lei dita mais tarde "da causalidade newtoniana", da qual falaremos adiante, ou mais exatamente as duas primeiras leis de Newton tomadas em conjunto, a "lei da força de inércia" que conserva o movimento e aquela da mudança do movimento propriamente dita (a primeira é um caso particular da segunda, para uma mudança de movimento nula).

Kant exprime, portanto, a causalidade como sendo, de uma parte, a união das coisas que se seguem ou que são reunidas, essa união sendo uma condição posta pelo entendimento (é a causalidade segundo *a ordem do tempo*); e, de outra parte, a sucessão temporal, que vem após a relação, da qual ela depende (é a causalidade segundo *o curso do tempo*).^{xiii} Se, segundo a expressão de Kant, "o que segue ou acontece deve seguir-se, segundo uma regra geral, ao que estava contido no estado precedente", existe também uma simultaneidade na relação entre a causa e o efeito: "no momento em que o efeito começa a produzir-se, ele é sempre simultâneo com a causalidade da causa" (Kant, 1963, p. 189-90). Guardemos essas considerações no espírito, pois veremos a seguir, com a explicitação da causalidade física por d'Alembert (efetuada no seu *Traité de dynamique* de 1743, que não pode ter sido ignorado por Kant), uma formulação muito próxima sobre a simultaneidade da relação de causa e efeito no momento de sua realização. A distinção de Kant entre a ordem e o curso do tempo parece feita sob medida para explicar que a idéia de causa como relação foi com razão determinante para a expressão da causalidade na sucessão temporal; ao mesmo tempo, a primeira guarda o passo sobre o segundo enquanto condição de possibilidade (ela depende do entendimento, enquanto o segundo, que lhe constitui o critério empírico, ligar-se-ia antes à sensibilidade).

A causalidade física temporal, como iremos ver, só pode ser formulada com clareza e eficácia graças ao pensamento do cálculo diferencial; somente este último, com a atribuição de uma significação positiva aos elementos diferenciais leibnizianos (tal como formulada por d'Alembert, que a fundamentou na noção de limite) permitiria conciliar a simultaneidade que implica a idéia de ordem com a sucessão no tempo. Convém sublinhar o papel central representado a esse propósito pela grandeza diferencial de tempo, *dt*. A própria formulação de Kant parece indicar esse papel do pensamento sobre as grandezas infinitesimais (diferenciais leibnizianas algébricas que exprimem as fluxões newtonianas, pensadas segundo o movimento) na definição da causalidade temporal, do mesmo modo que lhe era igualmente necessário para sua concepção das grandezas intensivas (cf. Kant, 1781/1787; Paty, 2001). Entre a ordem do tempo e seu curso, escreve ele, a relação permanece a mesma se não tiver decorrido tempo. O tempo entre a causalidade da causa e seu efeito imediato pode ir desaparecendo, e a causa e o efeito são, por conseqüência, simultâneos, mas a relação entre um e outro permanece entretanto sempre determinável no tempo" (Kant, 1963, p. 190-1, grifo meu).

Além disso, é interessante encontrar em Descartes uma formulação que reflete, bem antes da distinção kantiana e antes mesmo da invenção do cálculo infinitesimal de Newton e Leibniz, essa dupla exigência. Descartes indica, em uma carta a Mersenne, a propósito do movimento da luz, ao enunciar a equivalência de todos os instantes (ou seja, a homogeneidade do tempo), que não há "prioridade do

tempo”, entendendo-a nesse sentido de que todas as partes da luz em todos os instantes sucessivos de seu percurso são dependentes dos precedentes, e essa dependência é a mesma de um instante a outro (o que parece, para nossa compreensão atual, uma espécie de antecipação da expressão diferencial da continuidade do movimento).^{xiv} Dito de outro modo, a simultaneidade do instantâneo é, de certo modo, uma sucessão virtual, comprimida, que exprime uma relação de ordem. Encontra-se também em Descartes a idéia, ligada a essa concepção do tempo, de que tudo o que se requer para produzir o movimento “encontra-se nos corpos a cada instante que possa ser determinado enquanto eles se movem” (Descartes, 1644, p. 39). Requer-se, portanto, o instante e o movimento: os corpos têm, a cada instante, uma tendência ao movimento, que é o *conatus* ou inclinação instantânea, que o corpo seguiria, se não fosse impedido (AT, 7, p. 165; 9, p. 127). Não se pode deixar de pensar que a concepção cartesiana do tempo físico corresponde a uma intuição profunda, mas que não tinha a sua disposição o instrumento conceitual e matemático que permitisse sua realização, ultrapassando a contradição aparente de conceber o movimento como sendo, ao mesmo tempo, submetido a uma propagação regulada e instantânea. Essa intuição era, por assim dizer, aquela do instante (sem duração) diferido...

Uma lição a tirar dessa dupla leitura, filosófico-transcendental (kantiana) e físico-matemática (cartesiana), da relação ordem-sucessão tal como se manifesta na causalidade poderia ser a idéia de uma semelhança estrutural entre o pensamento racional em geral e o pensamento matemático. Além disso, a idéia de relação é aqui fundamental: é ela que justifica a definição e o uso das *grandezas* de expressão matemática, colocadas sob a jurisdição dos princípios físicos que as legitimam. Ora, *relação* anuncia *função*, e pode-se já entrever que a idéia da causalidade possa ser subsumida pelo estabelecimento da relação funcional de grandezas como tendo valor explicativo.

3. A CAUSALIDADE DIFERENCIAL DA MECÂNICA CLÁSSICA E O TEMPO INSTANTÂNEO E CONTÍNUO

Após a reflexão filosófica sobre a causalidade, tratemos da constituição da *causalidade física*, que se deu em relação direta com a elaboração de uma teoria física matematizada (a mecânica como ciência do movimento dos corpos), na qual a análise no sentido do cálculo diferencial e integral teve um papel fundamental.

Deve-se inicialmente sublinhar a importância, nessa constituição, do conceito de *tempo*, em torno do qual foi elaborada a nova ciência da *dinâmica*, a qual teve como sentido, desde o início, ao mesmo tempo aquele de ciência da *mudança de movimento* dos corpos e aquele de ciência das potências (ou forças) que são a *causa dessa mudança*.^{xv} É, com efeito, o conceito de *tempo instantâneo* que seria decisivo (sob os nomes de *instante* ou de *momento*). A expressão da lei do movimento em função do tempo é uma descoberta que remete a Galileu a propósito da queda dos corpos. Devemos a Galileu a introdução do tempo como parâmetro variável da dinâmica. Ele se viu obrigado, sem tê-lo posto de saída, a admitir que a lei dos espaços percorridos deve ser expressa em função do tempo (os espaços estão como os quadrados dos tempos) (cf. Galilei, 1638). Mas o próprio Galileu não considerava o tempo como instante, a não ser de maneira completamente verbal, e

preocupava-se com as velocidades médias em intervalos finitos de tempo. A idéia da *instantaneidade* está no centro do pensamento sobre o movimento em Descartes (e principalmente do movimento da luz), ligada, por um lado, a sua idéia de inteligibilidade (ela é iluminação imediata da razão), ainda que ele não se tenha preocupado em exprimir as leis do movimento em função do tempo; por outro lado, sua concepção da causalidade escapa ao tempo (cf. Wahl, 1994 [1920]; Paty, 1996). Evocamos acima sua observação sobre a ordem e a sucessão do tempo no movimento da luz, rica em intuição sobre a causalidade e sobre o pensamento do infinitesimal.

É somente a partir de Newton que as leis da mecânica fazem intervir, de fato, o tempo instantâneo como variável do movimento, sem que todavia ele seja completamente conceituado. Quanto à noção de causa, ou de causalidade, ela está presente no *Principia* sobretudo através do conceito de *força*, que recebe imediatamente uma significação matemática (de onde obtém seu poder de unificação), apagando a dimensão "filosófica" (onde metafísica e física estão então misturadas). Esta última é abordada rapidamente nas "Regras para o raciocínio na filosofia" (entenda-se: "filosofia natural") que abrem o terceiro livro do *Principia*. A regra 1 estipula: "não se deve admitir mais *causas* das coisas naturais que aquelas que sejam ao mesmo tempo verdadeiras e suficientes para explicar sua aparência". Ela é seguida do seguinte comentário: "eis porque os filósofos dizem que a Natureza nada faz em vão (...); pois a Natureza deseja a simplicidade e não ama a pompa das causas supérfluas". E a regra 2: "Eis porque para os mesmos *efeitos* naturais devem, tanto quanto possível, ser atribuídas as mesmas *causas*". A regra seguinte explicita as *qualidades* dos corpos que devem ser consideradas para explicar suas *propriedades* (trata-se das *causas subjacentes*, de certo modo, dessas propriedades): a extensão, a dureza, a impenetrabilidade, a mobilidade, a inércia e a gravitação. A conclusão é lapidar: "e este é o fundamento de toda a filosofia" (Newton, 1962 [1687], v. 2, p. 399).

Quanto aos outros livros do *Principia*, é o conceito de *força* que neles preenche de imediato a função de *causa*, com, é verdade, a vantagem de recobrir-se de um sentido mais preciso e quantitativo, dado explicitamente (definição 3, completada pelas definições 4 a 8 do Livro I), após os conceitos de quantidade de matéria e quantidade de movimento. É somente ao final do *Scholium* dessas definições que se encontra a palavra *causa*, a propósito da possibilidade de distinguir os movimento absolutos com relação aos movimentos relativos: "Somos guiados [nisso] em parte pelos movimentos aparentes, que são as diferenças dos movimentos verdadeiros, em parte pelas *forças*, que são *as causas e os efeitos* dos movimentos verdadeiros" (Newton, 1962 [1687], v. 1, p. 12). Entendamos, por essa simetria na expressão das causas e dos efeitos, que as forças são causa dos movimentos e que os movimentos são causa de outras mudanças de movimento ou, dito de outro modo, da aparição de outras forças. Certamente, para Newton, as forças são reais, mas ele não quer se pronunciar, como o escreve ele mesmo, sobre o caráter físico, isto é, sobre as modalidades de sua aplicação, metafísicas ou hipotéticas (relativas ao famoso *hypotheses non fingo* que se opõe a Descartes).

A filosofia neoplatônica de Newton se satisfaz em considerar os "princípios matemáticos" e as grandezas absolutas, "verdadeiras e matemáticas", para atingir a física para além das aparências. Newton se justifica de não se ter limitado à consideração de modalidades físicas, ou da relação entre as características

físicas e a representação matemática dos movimentos e das ações consideradas, proclamando imediatamente como “matemáticas” todas as proposições que examinam os diferentes tipos de movimentos. Por exemplo, sobre a ação das forças centrípetas:

Eu continuarei presentemente a tratar os movimentos dos corpos submetidos à atração mútua, considerando as forças centrípetas como atrações, ainda que talvez, de um ponto de vista *físico* estrito, elas possam ser mais exatamente chamadas impulsões. Mas essas proposições devem ser consideradas como puramente *matemáticas*; deixando, portanto, de lado toda consideração física, emprego essa maneira familiar de falar, para fazer-me compreender mais facilmente pelo leitor matemático.

Essa consideração sobre o “ponto de vista físico estrito” pode parecer curiosa, pois isso seria retornar às impulsões cartesianas. O raciocínio relembra aqueles da astronomia pré-copernicana acerca dos movimentos físicos e matemáticos que não coincidem. Deve-se, sem dúvida, relacioná-lo com uma física tomada no sentido antigo, qualitativo e pré-galileano, anterior à concepção de sua matematização, quando reinava a oposição, discutida por Newton no Prefácio do *Principia*, entre a geometria e a mecânica.

A única alusão que Newton fez à modalidade da transmissão do movimento encontra-se no enunciado da segunda “lei ou axioma do movimento”: “Se uma força engendrar um movimento, uma força dupla engendrará um movimento duas vezes maior, uma força tripla um movimento triplo, seja essa força *aplicada inteiramente de uma só vez, seja de maneira gradual e sucessiva*”.^{xvi} A proporcionalidade da força à quantidade de movimento transmitida é suficiente, qualquer que seja a modalidade dessa transmissão, instantânea e descontínua ou progressiva e continuada. Sob essas duas possibilidades ocorrem respectivamente os movimentos (“violentos”) provocados pelos choques ou impulsões, e os movimentos contínuos, tais como os das forças centrípetas ou da atração à distância, todos unificados pela segunda lei, exceção feita à imprecisão sobre a forma da quantidade de movimento transmitida, finita no primeiro caso (Δp), fluxo no segundo (p , que corresponderia, na escrita diferencial, a dmv/dt), e da dificuldade correlativa concernente à dimensão do intervalo infinitesimal de tempo. Como quer que seja, a segunda lei, que é sobre a transmissão ou a aquisição (ou a perda) de movimento, é concebida em relação à noção de tempo instantâneo, que é introduzida implicitamente mas efetivamente por Newton em seu método das “primeiras e últimas razões das grandezas”, ou geometria dinâmica infinitesimal (com o tempo como variável) pela qual ele tratava o movimento dos corpos, principalmente celestes.

Dentre os primeiros “sucessores continentais” de Newton no século XVIII, que adaptaram a mecânica newtoniana à análise leibniziana, foi d’Alembert que acabaria por formular mais claramente os desideratos de uma causalidade física que funda ao mesmo tempo a matematização da mecânica e sua formulação analítica. Embora sua concepção da inteligibilidade, assim como sua visão da natureza das grandezas na matemática e na física sejam de inspiração cartesiana, ele adota plenamente a hipótese newtoniana da atração gravitacional sem causa aparente do gênero das ações por impulsão, mas não se satisfaz com o caráter unicamente matemático das relações entre as grandezas do movimento. Ele pretende que tenham

uma significação e uma justificação do ponto de vista da física, isto é, da existência e da realização de movimentos na natureza.

Sua análise crítica da noção de causalidade, feita desde as primeiras páginas de seu *Traité de dynamique* (cf. Alembert, [1743]; 1752; 1758, Cap. 16), tem por objeto arrancar a noção de causa das “obscuridades da metafísica” e de atribuir-lhe um papel positivo, que permite conceber, considerando o movimento (e sua permanência natural, afirmada pelo princípio de inércia),^{xvii} como este tem nascimento, transforma-se ou destrói-se. Sendo dado que “um corpo não pode dar-se movimento a si mesmo”, “ele não pode portanto ser retirado do repouso a não ser pela ação de alguma *causa* externa”; e “é claro que o movimento, que tem necessidade de uma causa para começar pelo menos a existir, muito menos poderia ser acelerado ou retardado a não ser por uma causa externa” (Alembert [1743], p. viii-x). Não se trata, portanto, para d’Alembert, de negar que exista uma causa do movimento; ou, mais exatamente, da *mudança de estado* de movimento ou de repouso, pois, admitindo o movimento “natural”, de inércia, que se perpetua uma vez que tenha sido adquirido, é evidente que o “movimento que começa a existir” é o movimento modificado com relação àquele da inércia. Mas o papel da noção de causa é muito precisamente limitado: todo o propósito de d’Alembert será o de descrever e compreender os movimentos, engendrados por causas, sem se preocupar com a natureza dessas causas, restringindo-se a examinar seus efeitos. Ora, estes últimos podem ser circunscritos de maneira muito precisa, como iremos ver.

Ainda algumas palavras a propósito das considerações de d’Alembert sobre a noção de causa, antes de chegar a sua tradução em termos das grandezas descritivas do movimento. Admitindo a *atração à distância*, d’Alembert aceitava as causas do movimento que escapam à percepção (e ao conhecimento imediato), ao lado das causas reconhecidas por todos, que são aquelas devidas à impulsão, as únicas admitidas por Descartes e cuja razão se encontra na *impenetrabilidade*. Mas esta última é um conceito newtoniano, de outro modo anti-cartesiano, pois é requerido por Newton para distinguir os corpos de sua simples extensão espacial. É verdade que Descartes admitia que os corpos, cuja “natureza” ou propriedade fundamental ele remetia unicamente à extensão,^{xviii} não se penetram, mas ele relacionava essa propriedade àquelas do movimento, principalmente à relação de exata adequação da matéria com seu espaço próprio ou “lugar interior”: Cada parte da matéria é *de tal modo* proporcionada à grandeza do lugar que ela ocupa [...] [que não é possível] *que qualquer outro corpo aí encontre lugar enquanto ela nele se encontra*, e devemos concluir que é preciso necessariamente que exista sempre todo um círculo de matéria ou anel de corpos que se movem em conjunto ao mesmo tempo (AT, 9, §33).

Se, para Descartes, os corpos não se penetram, não se poderia falar da impenetrabilidade como uma propriedade que seria distinta da extensão; ao contrário, no *Principia* de Newton, a *impenetrabilidade* recebe o estatuto de um conceito para qualificar os corpos. Newton a define, dentre as “Regras do raciocínio na filosofia” que abrem o Livro III, como uma das “qualidades universais de todos os corpos”, consideradas não apenas matematicamente (como o são as leis do movimento dos Livros I e II), mas fisicamente, tal como conhecidas a partir da experiência dos sentidos (cf. Newton, 1962 [1687], Livro III, regra 3).^{xix}

Como quer que seja, é o conceito newtoniano de impenetrabilidade que d’Alembert admite de modo muito explícito, colocando-o no rol das propriedades

dos corpos que os distinguem da simples extensão no espaço. Lê-se no verbete “Causa”:

Pode-se, portanto, considerar a impenetrabilidade dos corpos como uma das *causas* principais dos efeitos que observamos na natureza; mas há outros efeitos dos quais não vemos tão claramente que a impenetrabilidade seja a *causa*; porque não podemos demonstrar por qual impulsão mecânica esses efeitos são produzidos; e que todas as explicações que foram dadas pela impulsão são contrárias às leis da mecânica ou desmentidas pelos fenômenos. Essas são a gravidade (*pesanteur*) dos corpos, a força que retém os planetas em suas órbitas etc. É, portanto, necessário reconhecer uma classe de efeitos e, por conseqüência, de *causas*, nas quais a impulsão ou não age ou não se manifesta (Alembert [1752]).

Essas causas que não conhecemos, só as percebemos por seus *efeitos*, que nos são dados na experiência: “Nós vemos o efeito, concluímos que existe uma *causa*; mas eis até aonde nos é permitido ir”. Além disso, quando acreditamos conhecer a causa, ela nos escapa, como essa impenetrabilidade, causa da impulsão, ela mesma causa do movimento. A idéia de causa não tem, no final das contas, por função mais que nos permitir investigar e estabelecer as leis do movimento dos corpos. Prossegue d’Alembert,

Seria desejável que os mecânicos enfim reconhecessem de modo bem distinto que não conhecemos nada no movimento além do próprio movimento, isto é, o espaço percorrido e o tempo empregado para percorrê-lo, e que as *causas metafísicas* nos são desconhecidas; que aquilo que chamamos *causas*, mesmo aquelas da primeira espécie [a impulsão], só é causa de modo impróprio; trata-se de efeitos dos quais resultam outros efeitos... (Alembert [1752]).

É com base nessa constatação que ele estabelece seu próprio programa concernente à dinâmica: formular as leis dos movimentos de quaisquer corpos submetidos a quaisquer ações, fazendo apelo somente às grandezas que servem para descrever o movimento: espaço, tempo, velocidade, aceleração (ou “força aceleradora”), massa, quantidade de movimento (massa multiplicada pela velocidade), força motriz (massa multiplicada pela aceleração) etc. D’Alembert se recusa a fazer apelo à noção de força concebida como externa aos corpos, pois isso seria precisamente recorrer à vertente metafísica da idéia de causa ou a idéias desprovidas de significação precisa como aquela (vinda de Newton e retomada por Euler) de “proporcionalidade da causa e do efeito”.

As causas são “efeitos que resultam de outros efeitos”. Estamos restritos, portanto, ao nível dos efeitos, dos efeitos sobre o movimento. A equação do movimento, em d’Alembert, não é dada pela segunda lei de Newton, mas pelos segundo e terceiro “princípios do movimento”, segundo sua formulação, transpostos a partir dos de Newton, mas que também retoma resultados anteriores da mecânica: a *composição do movimento* (de Galileu e depois de Descartes) e o *equilíbrio* (de Stevin), este último implicando a noção de velocidade virtual, da qual d’Alembert faz desde então grande uso. A síntese desses resultados produz o “princípio de d’Alembert”, demonstrado como *teorema* da dinâmica (sobre o qual Lagrange fundará mais tarde sua *Mecânica analítica*).

É nessa reformulação dos princípios da dinâmica que intervém a causalidade para construir as grandezas do movimento, ao mesmo tempo que as relações entre elas: d’Alembert determina as grandezas que caracterizam uma mudança de movimento, ou um movimento nascente, por diferença com o

movimento já adquirido. Ele dispõe para tanto de um precioso instrumento de pensamento, que é a diferencial de uma grandeza, *de* para a variável do espaço, *dt* para o tempo, *dv* para a velocidade, *dA* para a grandeza *A*. As quantidades diferenciais são, do ponto de vista das unidades, homogêneas às grandezas finitas correspondentes e podem, portanto, compor-se com elas. No *Traité de dynamique*, d'Alembert representa o movimento por um diagrama espaço-temporal com o tempo como abscissa e o espaço como ordenada, e pode assim escrever a aceleração a partir de *dv* e *dt*, ou de *dde* e de *dt²* etc., construindo a “força aceleradora” como mudança instantânea da quantidade de movimento, por definição e construção, simples efeito da causa da mudança, sem que essa mesma causa figure a partir de então nas equações da dinâmica. Nessa fórmula, que se escreve $dde = \pm \Phi dt^2$, e que se assemelha pela forma àquela de Newton traduzida em linguagem diferencial (Euler a proporá em 1750 retendo a força no sentido de Newton e igualmente em um sentido vetorial), mas com uma significação totalmente diferente, tem-se *a causa apreendida em seu efeito*.

D'Alembert raciocina considerando a modalidade pela qual a causa agente pôde produzir seu efeito, no instante dado (modalidade à qual Newton não quis restringir-se): seja instantaneamente (na singularidade de um instante), seja continuamente (durante um certo tempo Δt reduzido à *dt*). No primeiro caso, o ponto corrente do diagrama recebe em um instante seu incremento de velocidade (a diferencial segunda do espaço), que se compõe com a velocidade já adquirida nesse ponto (segundo a tangente à curva do diagrama), e a continuação das ações sucessivas colocará do mesmo modo em jogo cada um dos pontos da curva contínua. No segundo caso, é somente ao final do tempo Δt (*dt*) que o corpo recebeu o incremento de velocidade, tendo-se deslocado Δx (*dx*). O processo equivale a substituir a curva por um polígono, que se faz depois tender ao limite ($dt \rightarrow 0$). Nos dois casos, o movimento é descrito pela fórmula da “força aceleradora” e os dois são, portanto, física e matematicamente equivalentes.^{xx}

Dito de outro modo, não há lugar para preocupar-se com o modo de ação da causa, uma vez que o equacionamento acaba finalmente resultando no mesmo. Será suficiente considerar o efeito da causa, que dá a equação diferencial do movimento (cf. Paty, no prelo). Mas o resultado líquido é, entretanto, o de ter considerado as ações físicas segundo o desenrolar do tempo e de ter construído (matematicamente; de fato geometricamente) as grandezas *físicas* apropriadas, submetidas aos princípios do movimento. Cabe notar a modernidade do procedimento, que constrói as grandezas físicas com suas relações (segundo sua forma matemática) reguladas por princípios físicos.

No seu pensamento físico da causalidade, d'Alembert começa por efetuar uma separação entre a idéia de *causa metafísica*, nebulosa e desconhecida, e aquela de *causa física* (herdada da “causa eficiente”), que é ela mesma efeito de uma causa e que se manifesta por um efeito, sem ultrapassar esse efeito. Essa identificação ou igualdade da causa física com seu efeito (no próprio instante de sua aplicação) não é de modo algum uma identidade ontológica pois, precisamente, ela é proposta para evitar a ontologia; ela é simplesmente, funcionalmente, poder-se-ia dizer, expressa na *relação matemática* entre as grandezas do movimento físico, representadas matematicamente. Mais precisamente, na *forma diferencial* que exprime o que se produz em um instante, conceito que apreende, de fato, o singular instantâneo no fluxo do contínuo.

4. PERSPECTIVAS SOBRE A CAUSALIDADE NA FÍSICA

Vimos como, apoiando-se integralmente sobre um dos aspectos filosóficos tradicionais da idéia de causalidade (aquele de “causa eficiente”), a causalidade física é estabelecida em ruptura com o sentido metafísico que lhe estava precedentemente associado. Muito mais do que no *Principia* de Newton, é portanto na reelaboração feita por d’Alembert, no *Traité de dynamique*, das leis do movimento formuladas como princípios e expressas pelo cálculo diferencial que a idéia de *causalidade física* foi pela primeira vez expressamente considerada, concebida como indissociável de seu efeito, que é a *mudança de movimento*. Ficou evidente que os respectivos pensamentos de Newton e de d’Alembert sobre as noções de *causa* e de *força* estavam a esse respeito em oposição, naquilo que concerne à natureza propriamente *física* dessa mudança. A concepção newtoniana da *força externa* ou *impressa* (*vis impressa*), como substituto matemático das causas, afastava a consideração física dessas últimas. D’Alembert, de sua parte, considerava a mudança produzida como imanente ao movimento segundo a *causa* circunscrita pelo seu efeito e evitava, por essa razão, de recorrer à noção de força externa (mal definida e “metafísica”). A força imanente ao movimento, na mudança deste último, era a única *força aceleradora*, definida por d’Alembert a partir do próprio movimento, identificado de fato à aceleração (sendo a “força motriz” igual à aceleração multiplicada pela massa).

É sobre essa base conceitual que ele estabelece imediatamente a seguir seu teorema da dinâmica ou *princípio de d’Alembert*. Para o estabelecimento da forma de um problema de dinâmica, d’Alembert considerava os seguintes movimentos do sistema (de fato, em termo das *quantidades de movimento*): aquele movimento efetivamente tomado (que se deve encontrar, por exemplo, p_E), aquele recebido ou adquirido (p_A , geralmente por impulsão ou atração, que se acrescenta ao movimento de inércia, anteriormente adquirido) e aquele perdido pelas ligações (p_L), compondo-os em grandeza e direção, ou seja, no sentido vetorial ($p_E = p_A - p_L$).^{xxi} O movimento perdido nas ligações foi obtido pelo estudo do sistema em equilíbrio (que fazia apelo aos movimentos virtuais). Quanto ao movimento adquirido, ele foi calculado a partir da “força aceleradora”, definida por d’Alembert como a aceleração recebida pelos elementos do sistema. Em suma, um problema de dinâmica para um sistema material era escrito, na perspectiva de d’Alembert, como um balanço da composição das quantidades de movimento (tomadas vetorialmente), reais e virtuais, das partes do sistema. Essa formulação resultava, em última instância, de ter colocado em operação a causalidade física tal como ele a concebia, relacionada, como o vimos, com as acelerações instantâneas, escritas em sua forma diferencial.

Na *Mécanique analytique* (*Mecânica analítica*), Lagrange tomou como ponto de partida o teorema da dinâmica de d’Alembert. Por isso mesmo, adotou o mesmo ponto de vista conceitual fundamental que este último, aquele da consideração interna do movimento e, portanto, da “causalidade imanente”: esta era diretamente transcrita nas equações gerais da mecânica tais como ele as estabeleceu (por meio da utilização do cálculo variacional). Ao fazer isso, levava em consideração igualmente outras aquisições, como a equação de Newton-Euler, e

reintegrava o conceito de força, concebido, entretanto, desde então como físico e como neutro do ponto de vista metafísico.

Pode-se então considerar que a concepção de d'Alembert da causalidade física e da significação física correlativa das equações do movimento é aquela concepção que a física teórica e matemática herdou duravelmente no que se seguiu. A causalidade (física) está dada na própria forma das equações, sem que seja mais necessária uma interpretação que fixe as condições de utilização, como havia sido o cuidado prévio de d'Alembert, e portanto, que essa condição era daí em diante uma parte integrante da formulação de equações. Vimos, assim, a *causalidade física* (diferencial) ser proposta para acompanhar e justificar o ponto de vista dos conceitos apropriados aos fenômenos do movimento e da mudança: toda a física constituiu-se depois com base nessa noção, escolhendo com referência a ela os princípios e os conceitos apropriados para sua matematização. Essa noção devia, em troca, adaptar-se às novas exigências teóricas, com a teoria da relatividade restrita, que porá restrições espaço-temporais (devidas ao fato de que as ações causais possuem velocidade finita). Entretanto, ela encontraria aparentemente seu limite com a física quântica, pelo menos em sua expressão para as variáveis diferenciais tradicionais. Mas isto é uma outra história (cf. Paty, 2003).

Traduzido do original em francês por Pablo Rubén Mariconda

NOTA. Este trabalho e aquele já mencionado sobre o determinismo (Paty, 2003), que é a continuação deste, foram apresentados em conjunto numa exposição intitulada "Causalité et déterminisme en physique classique, relativiste et quantique. Tribulations et différences" em duas oportunidades, na *Journée "Causalité et relation fonctionnelle" de L'Ecole Doctorale Savoirs Scientifiques*, Université de Paris 7, Denis Diderot, França, em 13 de março de 2002; e no *Séminaire "Realisme scientifique et causalité"*, Centre de philosophie des sciences, Institut Supérieur de Philosophie, Université Catholique de Louvain, Bélgica, em 15 de março de 2002. Agradeço pelo interesse a Claude Debru, Laurence Viennot e muito particularmente Michel Ghins por seus comentários ao presente texto, que me conduziram a tornar mais precisos certos pontos.

Michel PATY

Diretor de pesquisa emérito do CNRS,
Equipe REHSEIS (UMR 7596),
CNRS e Université Paris 7 - Denis Diderot,
Paris, França.
paty@paris7.jussieu.fr

ABSTRACT

The notions or categories of causality and determinism have accompanied the formation of modern sciences, and primarily those of physics. The current nowadays use tends often, but wrongly, to get them identified in the reevaluations to which they are submitted in physics itself. In this work we intend to clarify the first of these notions, more precisely *physical causality*, by following its elaboration with the beginnings of dynamics, through its first utilizations and conceptualizations in the making of the mathematization of mechanics, before being extended to physics in a general way. We will see how, while having been supported by one of the traditional philosophical aspects of the idea of causality (that one of "efficient cause"), physical causality breaks with the metaphysical meaning that was previously attached to it. Rather more than in the Newton's *Principia*, as it is usually thought, it is in the re-elaboration made by d'Alembert, in his *Treatise of dynamics*, of the laws of motion considered as *principles*, and expressed by differential calculus,

that the idea of physical causality is explicitly considered indissociably of its effect, that is the *change of motion*. The respective thoughts of Newton and d'Alembert on the notions of *cause* and *force* are, in this respect, in opposition with regard to the properly physical nature of this change. The change of motion was viewed by d'Alembert as immanent to motion, for its *cause* could be circumscribed by its effect, whereas it remained mathematical and metaphysical in the newtonian conception of the *external force* taken as a mathematical substitute of the cause, which was the common way to consider forces before Lagrange's analytical mechanics. It is the physical conception inherited from d'Alembert that was thenafter to prevail through lagrangean analytical mechanics that permitted to re-integrate physically and rationally the concept of force in its eulerian differential transcription.

KEYWORDS: Causality. Physical causality. (Efficient) Cause. Time. Legality. Galileo. Descartes. Newton. Kant. d'Alembert. Lagrange. Differential and integral calculus. History of dynamics. History of mechanics.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEMBERT, J. R. d'. Discours préliminaire de l'Encyclopédie. In: ALEMBERT, J. R. d' & DIDEROT, D. (Ed.). *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. Paris, Briasson/David/Le Breton/Durant, 1751a. v. 1, p. i-xliv.

_____. Action. In: ALEMBERT, J. R. d' & DIDEROT, D. (Ed.). *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. Paris, Briasson/David/Le Breton/Durant, 1751b. v. 1, p. 458-74.

_____. Cause. In: ALEMBERT, J. R. d' & DIDEROT, D. (Ed.). *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. Paris, Briasson/David/Le Breton/Durant, 1752.v. 6, p. 568-75.

_____. *Traité de dynamique*. Paris, David, 1758 [1743].

_____. *Essai sur les éléments de philosophie ou sur les principes des connaissances humaines*. Prefácio de Richard N. Schwab. Hildesheim, Olms Verlag, 1965 [1758].

ALEMBERT, J. R. d' & DIDEROT, D. (Ed.). *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. Paris, Briasson/David/Le Breton/Durant, 1751-1780. 17v. + 11 v. de pranchas. (Encyclopédie).

ARISTÓTELES. *La Métaphysique*. Trad. e comentários de J. Tricot. Paris, J. Vrin, 1962. 2 v. (Metafísica).

DEBRU, C. Causalité, temporalité, fonction: Kant, Helmholtz, Mach. In: VIENNOT, L. & DEBRU, C. (Ed.). *Enquête sur le concept de causalité*. Paris, Presses Universitaires de France, 2003. (Collection sciences, histoire et société).

DESCARTES, R. *Oeuvres de Descartes*. Edição de Charles Adam e Paul Tannery. Paris, J. Vrin, 1964-1974. 11 v. (AT).

_____. *Discours de la méthode, suivis d'essais de cette méthode: la dioptrique, les météores, la géométrie*. In: ADAM, C. & TANNERY, P. (Ed.). *Oeuvres de Descartes*. Paris, J. Vrin, 1964-1974. v.6, p. 1 - 720.

_____. *Meditationes de prima philosophia*. In: ADAM, C. & TANNERY, P. (Ed.). *Oeuvres de Descartes*. Paris, J. Vrin, 1964-1974 [1641]. v. 7, p. 1-612.

_____. *Principia philosophiæ*. In: ADAM, C. & TANNERY, P. (Ed.). *Oeuvres de Descartes*. Paris, J. Vrin, 1964-1974 [1644]. v. 8, p. 1-353.

_____. *Principes de la philosophie*. In: ADAM, C. & TANNERY, P. (Ed.). *Oeuvres de Descartes*. Paris, J. Vrin, 1964-1974 [1647a]. v. 9, p. 1-362.

_____. *Méditations métaphysiques*. In: ADAM, C. & TANNERY, P. (Ed.). *Oeuvres de Descartes*. Paris, J. Vrin, 1964-1974 [1647b]. v. 9, p.1-254.

_____. *Regulæ ad directionem ingenii*. In: ADAM, C. & TANNERY, P. (Ed.). *Oeuvres de Descartes*. Paris, J. Vrin, 1964-1974 [ca 1628]. v. 10, p. 349-486.

EINSTEIN, A. Newtons mechanik und ihr einfluss auf die gestaltung der theoretischen physik. *Naturwissenschaften*, 15, p. 273-276, 1927.

_____. La mécanique de Newton et son influence sur l'évolution de la physique théorique. In: _____. *Œuvres choisies*. Paris, Seuil, 1989. v. 5, p. 235-241.

GALILEI, G. *Discorsi e dimostrazioni mathematiche in torno di due nuove scienze*. Leyde, Elzevir, 1638.

HELMHOLTZ, H. von. On the conservation of force. In: COHEN, R. S. & ELKAN, Y. (Ed.). *Epistemological writings*. Trad. de Malcolm F. Lowe. Dordrecht & Boston, Reidel, 1978 [1847].

HUME, D. *Philosophical Essays Concerning Human Understanding*. [S.l.], [s.n.], 1748.

_____. *An inquiry concerning human understanding*. Ed. de Charles W. Hendel. Nova Iorque, Bobbs-Merrill, 1955 [1758].

KANT, E. *Critik der reinen Vernunft*. Riga, Hartknoch, 1781.

_____. *Critik der reinen Vernunft*. 2^e ed., Riga, Hartknoch, 1787.

_____. *Critique de la raison pure*. In: _____. *Oeuvres philosophiques*. Trad. de Delamarre, A. J. L. & Marty, F. Paris, Gallimard, 1980. v. 1, p. 705-1470.

_____. *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*. In: _____. *Oeuvres philosophiques*. Trad. de Gandt, F. de. Paris, Gallimard, 1985 [1796]. v. 2, p. 347 -493.

KOYRÉ, A. *Etudes galiléennes* (1935-1939). Paris, Hermann, 1966 [1939].

_____. *Etudes newtoniennes*. Paris, Gallimard, 1968.

LAGRANGE, L. J. *Mécanique analytique*. In: _____. *Oeuvres*. Paris, Gauthier-Villars, 1867-1892. v. 11 e 12.

LALANDE, A. *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*. Paris, Presses Universitaires de France, 1980 [1926].

LEIBNIZ, G. W. *Opusculs et fragments inédits*. Edição de L. Couturat. Paris, Alcan, 1903.

_____. *Essais de Théodicée*. Edição de J. Jalabert. Paris, Aubier-Montaigne, 1962 [1710].

MACH, E. *Die mechanik in ihrer entwicklung historisch-kritisch*. Leipzig, Dargellstellt, 1883.

MALEBRANCHE, N. *Entretiens sur la métaphysique et sur la religion*. Edição de A. Cuvelier. Paris, J. Vrin, 1961 [1688].

NEEDHAM, J. Le grand titrage. In: _____. *La science chinoise et l'Occident*. Trad. de E. Jacob. Paris, Seuil, 1973.

NEWTON, I. *Mathematical principles of natural philosophy*. Edição de Florian Cajori. Berkeley, University of California Press, 1962 [1687]. 2 v.

PATY, M. Einstein et la pensée de Newton. *La Pensée*, 259, p. 17-37, 1987.

_____. Sur la notion de complétude d'une théorie physique. In: FLEURY, N.; JOFFILY, S.; SIMÕES, J.A. M. & TROPER, A. (Ed.). *Leite Lopes festchrift. A pioneer physicist in the third world*. Singapura, World Scientific Publishers, 1988. p. 143-64.

_____. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*. Paris, Presses Universitaires de France, 1993.

_____. Sur l'histoire du problème du temps: le temps physique et les phénomènes. In: KLEIN, E. & SPIRO, M. (Ed.). *Le temps et sa flèche*. Paris, Flammarion, 1996. p. 21-58. (Collection Champs).

_____. «Mathesis universalis» e inteligibilidad en Descartes. In: ALBIS, V. R.; CHARUM, J.; SANCHEZ, C. H. & SERRANO, G. (Ed.). *Memorias del seminario en conmemoración de los 400 años del nacimiento de René Descartes*. Trad. de M. C. Bustamante. Bogotá, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1997. p. 135-70. (Colección Memorias, 9).

_____. Les trois stades du principe de relativité. *Revue des questions scientifiques*, 170, 2, p. 103-50, 1999.

_____. D'Alembert, la science newtonienne et l'héritage cartésien. *Corpus*, 38, p. 19-64, 2001.

_____. La notion de déterminisme en physique et ses limites. In: VIENNOT, L. & DEBRU, C. (Ed.). *Enquête sur le concept de causalité*. Paris, Presses Universitaires de France, 2003. (Collection sciences, histoire et société).

_____. Mach et Duhem: l'épistémologie de savants-philosophes. *Manuscrito*, 9, 1, p. 11-49, 1986.

POINCARÉ, H. *La science et l'hypothèse*. Paris, Flammarion, 1968 [1902].

POPPER, K. R. *La logique de la découverte scientifique*. Trad. de N. Thyssen-Rutten & P. Devaux. Paris, Payot, 1973.

SPINOZA, B. *L'Ethique*. In: _____. *Œuvres*. Trad. de C. Appuhn. Paris, Garnier-Flammarion, 1955 [1675]. v. 3.

VUILLEMIN, J. *Physique et métaphysique kantienne*. Paris, Presses Universitaires de France, 1955.

WAHL, J. *Du rôle de l'idée de l'instant dans la philosophie de Descartes*. Introd. de F. Worms. Paris, Descartes et Cie, 1994 [1920].

ⁱ Por "completude teórica" entendemos, juntamente com Einstein, o fechamento relativo de um sistema teórico, do qual a lei de causalidade representa um primeiro estado e ao qual se aproximaria uma teoria do gênero da relatividade geral, mas uma teoria cujos parâmetros seriam fixados pela própria teoria (cf. Paty, 1988, 2003).

ⁱⁱ Para a idéia de *lei* em ciência, ver a análise comparativa proposta por Joseph Needham entre a ciência da Idade Média na Europa ocidental e na China (Needham, 1973).

ⁱⁱⁱ Malebranche (1961 [1688], p. 7, 159, 162), fala da causa *eficiente* ou *eficaz* como a ação exercida por alguma coisa, isto é, uma ação física efetiva. D'Alembert, de quem voltaremos a falar mais adiante, recebeu sua educação de mestres malebranchistas.

^{iv} A expressão é empregada principalmente a propósito da física quântica, tanto por Albert Einstein como por Niels Bohr.

^v Esse sentido clássico da "filosofia natural", que se liga à definição tradicional da filosofia como ciência, é equivalente a "física" no sentido geral de natureza (*physis*). A "filosofia da natureza" (*Naturphilosophie*) dos filósofos alemães do século XIX tem um sentido bastante diferente.

^{vi} Cf. o texto à altura da nota 31 e essa mesma nota.

^{vii} A esse propósito, cf. Descartes, [1637]; [1644]. Cf. também Koyré, 1968, Cap. 4: Newton e Descartes. D'Alembert reconheceu o pioneirismo de Descartes, ao mesmo tempo em que o critica: "se ele se enganou sobre [as leis do movimento], ele pelo menos foi o primeiro a supor que elas deviam existir", escrevia no *Discours préliminaire de l'Encyclopédie* (Alembert, 1751a).

^{viii} "Medida" deve ser entendida no sentido das proporções. Isso se encontra, em particular,

na regra 14 de Descartes (1628; cf. Paty, 1997b, 2001).

^{ix} Contudo, a relatividade do movimento não podia ter um estatuto teórico fundamental devido ao papel fundamental desempenhado no pensamento da física clássica pelos conceitos de espaço absoluto da mecânica e de éter de repouso absoluto da óptica e do eletromagnetismo, até o advento da teoria da relatividade restrita de Einstein (cf. Paty, 1999a).

^x Pode-se referir, a esse propósito, as observações de Albert Einstein em seu artigo sobre a mecânica de Newton, no qual ele avalia a influência deste para o desenvolvimento da física teórica (cf. Einstein, 1927; Paty, 1987).

^{xi} Respectivamente, Descartes, no axioma 1 das *Respostas às segundas objeções* (Descartes, 1641); Spinoza, no axioma 3 da *Ética* (Spinoza, 1675, I); e Leibniz no §44 da *Teodicea* (Leibniz, 1710) e também em textos inéditos (Leibniz, 1903, p. 471).

^{xii} Cf. Mach, 1883; Poincaré, 1902; Popper, 1973; Paty, 1986; 1993, p. 243-6, 335, 368-73, 418-9. O critério popperiano de *refutabilidade* ou *falseabilidade* é *negativo* no mesmo sentido em que se fala de teologia negativa: uma teoria não pode ser afirmada como verdadeira, ela somente pode ser refutada (ou não).

^{xiii} Para uma análise da distinção kantiana entre a ordem (*Ordnung*) e o curso (*Ablauf*) do tempo, cf. Debru, 2003.

^{xiv} Pode-se ler, na carta de Descartes a Mersenne de 27 de maio de 1638: "A palavra *instante* não exclui *senão a prioridade do tempo* e não impede que cada uma das partes inferiores do raio [proveniente do Sol] seja dependente de todas as superiores, do mesmo modo que o fim de um movimento sucessivo depende de todas suas partes precedentes" (AT, II, p. 143, grifo meu).

^{xv} A *dinâmica* opõe-se em Galileu à *estática*. O termo se imporá no duplo sentido que indicamos sem dúvida a partir de Leibniz (*Specimen dynamicum*), de seus discípulos, os irmãos Jean e Jacques Bernoulli assim como Pierre Varignon, e depois Leonhard Euler e Jean d'Alembert (este último discípulo espiritual de Jean Bernoulli e de Varignon, que deixará uma tradição no Collège des Quatre Nations onde d'Alembert foi educado). D'Alembert esclarece, no *Traité de dynamique*, que emprega a palavra no sentido de "ciência do movimento dos corpos que agem uns sobre os outros de uma maneira qualquer" (Alembert, 1743). O princípio da dinâmica de d'Alembert fornece o meio de responder a esse programa (cf. Paty, 2001).

^{xvi} Este é o enunciado da segunda lei, dos axiomas e leis do movimento de Newton: "If any force generates a motion, a double force will generate double de motion, a triple force triple the motion, whether that force be impressed *altogether and at once, or gradually and successively*" (Newton, 1962 [1687], p. 13, grifo meu).

^{xvii} Por exemplo, d'Alembert, no verbete "Causa" da *Encyclopedie*: "CAUSA na Mecânica e na Física se diz de tudo aquilo que produz mudança no estado de um corpo, isto é, que põe em movimento ou que pára, ou que altera o movimento. É uma lei geral da natureza que todo corpo persiste em seu estado de repouso ou movimento até que aconteça alguma *causa* que mude esse estado" (Alembert, 1752, "Cause"). Esta definição é de um modo geral o verbete seguem os desideratos sobre esse ponto formulados pelo *Traité de dynamique* de 1743.

^{xviii} Como dizia Descartes, no *Principes de la philosophie*, a propósito da natureza da matéria: "sua natureza consiste unicamente em ser uma substância que tem extensão". O texto está sublinhado no original; há variações entre a tradução francesa de 1647 com relação ao texto latino da edição original de 1644; essas variações são geralmente atribuídas ao próprio Descartes.

^{xix} Essas qualidades são: a extensão, a dureza, a impenetrabilidade, a mobilidade e a inércia, às quais se acrescenta a atração mútua universal dos corpos, ainda que ela não seja imutável e varie com a distância.

^{xx} Existe uma diferença entre os dois cálculos da aceleração, segundo a subtangente ou segundo a corda, a saber, um fator 2, mas isso não tem influência nos resultados para um movimento dado, se se mantém a coerência e não se misturam os dois modos de cálculo. Essa dificuldade só seria evitada com a *Mécanique analytique* de Lagrange, que é independente de representações geométricas, notadamente no que concerne a *dt*. (Cf. Lagrange, 1788).

^{xxi} Essas notações não são de d'Alembert; só as utilizamos para simplificar a exposição.