

CBPF-NF-053/86

NOTAS SOBRE A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE CAUSA NA FÍSICA
PÓS-NEWTONIANA: DA CAUSA EFICIENTE À CAUSA FORMAL*

por

Roberto Moreira Xavier

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CNPq/CBPF
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

*Apresentado no 2º Colóquio de História da Ciência, na UNICAMP, por ocasião do tri-centenário dos "Principia" de Newton, em 5 de novembro de 1986. Submetido para publicação em "Cadernos de História e Filosofia da Ciência"

RESUMO

Comentário sobre a evolução do conceito de causa na Física pós-Newtoniana. Enfatiza-se o fato de que, devido a influência de Lagrange, generalizou-se no século XX o uso de explicações formais e finais, na Física.

Palavras-chave: Teoria da causalidade de Aristóteles; Causa eficiente; Causa formal, Causa final; Causa material; Lagrange; Fourier.

I

Neste ensaio apresentamos alguns argumentos que indicam que a natureza da explicação causal muda, substancialmente, no período que vai de Newton a Fourier, via Lagrange. A compreensão dessas mudanças é essencial para entendermos a natureza dos sistemas explicativos vigentes na Física do século XX. Para isso vamos ampliar e aprofundar, ainda que de maneira esquemática, o artigo de Kuhn sobre a evolução dos conceitos de causa [ref. 1] e [ref. 2].

Se fosse possível sintetizar, em poucas palavras, a tese que vamos desenvolver, diríamos o seguinte: em Newton o que se chama de causa está ligado à ação (actio) e se pode, com propriedade, chamar de "causa eficiente".

Entretanto, quando Fourier escreve a sua equação do calor, o seu objetivo é descrever, por meio de uma equação diferencial (uma forma), como o calor se propaga. Podemos dizer que a equação diferencial é a "causa formal" da propagação do calor. Esse tipo de explicação, que tem suas raízes remotas em Aristóteles, passa por Lagrange: é exatamente através do uso extensivo de Lagrangeanas, que explicações baseadas em causas formais e em causas finais (pelo chamado "princípio de Hamilton") chegam a ter um papel central na Física do século XX.

II

O que está dito no parágrafo anterior é uma versão, de certo modo grosseira e simplificada, da nossa tese. Para que ela fique clara, precisamos remontar à primeira sistematização da noção de causa, devida a Aristóteles. A necessidade de rigor não afastará, esperamos, a nossa preocupação com a clareza.

Antes disso, porém, é preciso esclarecer o significado da palavra *causa*.

O nosso ponto de partida será o debate sobre causalidade, em Genebra [ref. 1] e, em especial, o trabalho de Kuhn, sobre os "conceitos de causa na evolução da Física" [ref. 1,2] que procuraremos ampliar e aprofundar.

Piaget acentua o fato de que a palavra *causa* pode ser usada em 2 sentidos. No sentido restrito, o conceito de causa está ligado a um agente, que exerce uma "força", e corresponde aproximadamente à causa eficiente de Aristóteles.

Essa noção teve um papel importante na teoria das colisões no século XVII e está por detrás das sistematizações da noção de causa em Locke, Berkeley e Hume e nos empiristas em geral.

No sentido lato, o conceito de causa se associa à idéia geral de *explicação*. Mario Bunge chama algumas dessas explicações de "não-causais" [ref. 3]. Sobre elas focalizaremos fortemente a nossa atenção, neste artigo. Voltemos agora a Aristóteles e aos aristotélicos.

III

É bem sabido que Aristóteles identifica 4 tipos de causa. Numa paráfrase livre:

"Causa de alguma coisa é aquilo de que ela é feita e nela permanece, assim como o bronze é a causa da estátua (causa material); em segundo lugar, causa é a forma, isto é, a essência necessária ou substância, por exemplo, é causa do Homem a natureza racional que o define (causa formal). Em terceiro sentido causa é o que dá início ao movimento ou repouso (causa eficiente). Em quarto sentido a causa

é o fim ou propósito (causa final) ou o "Bem" pois este é o fim de todo processo de geração ou movimento". [ref. 4].

Entre parênteses apresentamos a nomenclatura dos escolásticos: causa materialis, causa formalis, causa efficiens et causa finalis.

Pois bem. As 2 primeiras causas podem ser consideradas *causas do ser*, enquanto a causa eficiente e a causa final são as *causas do devir* (ver Bunge, ref. 3, página 32).

É importante frisar que Aristóteles considera que há uma estreita conexão entre o conceito de causa e o conceito de substância.

Além disso, em seu sistema, a causa formal (intimamente ligada à causa final) ocupa um lugar central, denunciando a importância do conceito de forma em Aristóteles.

Esse sistema explicativo, complexo e abrangente, evoluiu muito durante a Idade Média, época em que surgiram as expressões, causa formal, causa material, causa eficiente e causa final, além de outras sutilezas classificatórias que se situam fora da nossa problemática.

Em princípio, para os aristotélicos, a explicação completa de qualquer mudança envolvia o conhecimento das 4 causas e "a verdadeira ciência consistia na identificação dessas causas".

Na prática, para explicar a Ordem Natural (objetivo principal da Física) era preciso usar as causas formais e finais (que frequentemente se confundiam).

Por outro lado, os movimentos violentos, as rupturas da Ordem Natural, eram explicados por causas eficientes, isto é "forças".

IV

Em Galileu o sistema explicativo se baseia na idéia de "causa formal". Isso se deve ao papel que a geometria (e a teoria das formas de Platão) tem em seu sistema - colocado em destaque por Koyré.

É importante observar que, em Galileu, o movimento de um projétil, antes considerado um movimento violento - e portanto devido a causas eficientes - passa a ser tratado como devido a uma "causa formal", isto é, a uma regularidade matemática.

A trajetória, agora, é uma figura geométrica perfeita, uma parábola - isto é, uma "forma".

Em Kepler o apelo às causas formais é uma constante. Basta lembrar a idéia de Harmonia das Esferas, em que as relações entre os sólidos geométricos regulares aparecem na estrutura do sistema solar.

V

Com o surgimento do programa cartesiano de pesquisa, as causas formais e finais foram abandonadas.

A partir dessa época a causa eficiente passa, pouco a pouco, a ocupar o lugar central dos esquemas explicativos da Física. É claro que causa eficiente, agora, tem um sentido diferente do que se encontra em Aristóteles. Já se delineia a visão mecanicista do mundo e causa eficiente passa a ser, somente, sinônimo de "força". Note que "força" aqui não tem o significado moderno, mas sim o da época que, visto de hoje, tem muito de energia, momentum, etc. [ref. 5]. Entretanto o ponto fundamental é que já é um conceito mecânico. Agora, dificilmente, "alguém que dá um conselho" - para usar um exemplo de Aristóteles de "causa eficiente" - é visto como "força".

A partir de Newton isso se torna ainda mais nítido. Para Newton, causa é, antes de tudo, ação (actio), ou seja "força".

Para os newtonianos o programa de pesquisa gira em torno da determinação das forças que geram os movimentos. Esse programa foi for

malizado por Euler, como nos ensinou Truesdell.

Na linguagem kuhniana Euler deve ser considerado o articulador do paradigma Newtoniano.

Entretanto o Mecanicismo, nascente, como programa, em Descartes, culmina em Laplace:

"Nós devemos considerar o estado presente do Universo como efeito do seu estado anterior, e a causa do que se deve seguir. Uma inteligência que, por um dado instante, conhecesse todas as forças de que a natureza é animada e a situação respectiva dos seres que a compõem, se fosse suficientemente vasta para submeter esses dados ao cálculo, abraçaria na mesma fórmula os movimentos dos maiores corpos do Universo e os do tomo mais leve: nada seria incerto para ela e o futuro, como o passado, estaria presente aos seus olhos" [ref. 6].

É o predomínio absoluto da causa eficiente.

VI

Até aqui o que fizemos foi recordar a evolução do problema causal até o auge do Mecanicismo.

Agora vamos entrar na substância do nosso trabalho.

Para isso vamos ouvir o que diz Fourier [ref. 7].

A primeira frase da Teoria Analítica do calor é: "As causas primárias nos são desconhecidas; mas estão sujeitas a leis simples e constantes, que podem ser descobertas pela observação, cujo estudo constitui o objeto da Filosofia Natural (...). Qualquer que seja o âmbito das teorias mecânicas, elas não se aplicam aos efeitos do calor. Estes constituem um tipo especial de fenômeno, e não podem ser explicados pelos princípios do movimento e do equilíbrio".

Este é um ponto de vista completamente diferente do de Laplace.

O fato de Fourier descrever o modo pelo qual o calor se propaga (sem discutir o que é o calor) inicia um novo estilo de fazer Ciência, um novo programa de pesquisa.

Trata-se agora de encontrar uma equação diferencial para explicar um fenômeno físico. Ou melhor, explicar um fenômeno físico é encontrar a equação diferencial que descreve esse fenômeno. Esse programa, tão elogiado por Comte e Mach, desloca a pergunta do *porque* ao *como*, o que, durante muito tempo foi considerado (pelos positivistas) como o modo adequado de fazer ciência. É curioso observar que por trás desse *como* está a velha causa formal aristotélica: a equação diferencial é simplesmente uma *forma*, e a equação de propagação do calor é a mesma equação de transporte ou a equação de Schrodinger. A equação de D'Alembert, isto é, a equação de onda, tanto serve à acústica quanto ao eletromagnetismo. Em outras palavras, a equação diferencial é a *causa formal* do fenômeno.

VII

Evidentemente, o uso da causa formal não renasce, pronto e acabado, em Fourier: tem suas origens em Lagrange. Isso se deve ao fato de que para Lagrange as equações gerais de movimento tem sempre a mesma forma, dada pelo princípio variacional (chamado "da mínima ação" ou "de Hamilton") ou seja pelas equações de Euler-Lagrange, forma esta que é sempre a mesma qualquer que seja a Lagrangeana. Ora, as Lagrangeanas estão descritas em coordenadas generalizadas e, sabemos hoje, podem ser usadas para descrever um número muito grande de sistemas fora do programa Newtoniano: campos eletromagnéticos, al

guns processos dissipativos, e até certos problemas econômicos. Além disso o princípio da mínima ação sobrevive às revoluções da Relatividade e da Mecânica Quântica.

Não é necessário desenvolver esse ponto: a maior generalidade dos métodos lagrangeanos é largamente aceita há quase um século.

Pois bem: resolver um problema pelo método de Lagrange, expressá-lo por meio de um princípio variacional, é dar-lhe uma explicação do tipo *causa formal* (e, também, *final*).

É importante frisar que essas expressões (*causa formal* e *causa final*) estão sendo usadas, aqui, num sentido diferente do aristotélico ainda que, inegavelmente, a origem desse tipo de explicação remonte a Aristóteles.

A verdade é que a Ciência passou, pouco a pouco, a aceitar esse novo modelo causal, mais amplo, abandonando as restrições metodológicas mecanicistas que visavam reduzir todas as explicações às forças [ref. 8] ou seja a causas eficientes.

Esta análise poderia sugerir que Lagrange inicia um novo paradigma (metafísico), do ponto de vista de Thomas Kuhn ainda que o próprio Kuhn considere Lagrange um cientista "normal" em relação a Newton. Esse problema, entretanto, será analisado em outro trabalho.

VIII

Aqui cabe fazer um parênteses. Para Aristóteles a idéia de causa está intimamente ligada à idéia de substância. Note que o movimento é um processo, isto é, o aparecimento (em ato) de algo existente (em potência), em outras palavras, é a atualização das potências. Isso significa que, para Aristóteles, as causas formais geram o devir, co

mo processo. Na Física posterior a Newton o movimento é um estado (e não um processo). Mas aqui é preciso ter cuidado com as palavras. Ainda que isso seja verdade, isso não significa que a Ciência tenha deixado de lado a preocupação com a mudança lato sensu, só que, é claro, deixou de usar a palavra movimento para designá-la, embora, às vezes, os hegelianos e os marxistas empreguem a palavra movimento no sentido de processo.

A expressão causa formal, portanto, aqui empregada não tem o significado aristotélico, mas um outro "atemporal". Isto significa que nas equações diferenciais em que o tempo aparece explicitamente, ainda assim, do ponto de vista da causalidade formal, a explicação é *a-temporal*, porque o procedimento explicativo consiste em obter a equação diferencial (forma) que descreve o fenômeno, passando o tempo a ser tratado como parâmetro. É provável que, sem Hume, a noção de causa formal dificilmente chegaria a ser usada do modo que indicamos, isto é, chegar a incluir o tempo numa forma, vista, agora, como algo a-temporal - influência, talvez, de um certo platonismo. Observe que para Hume a relação causal se dá por conjunções e não por conexões, i.e, "a constant union betwixt cause and effect". Em outras palavras, para Hume, a associação regular (entre 2 fatos) está na base da idéia de causa. Desse fato, Kant conclui que Hume deixa a Ciência e, em particular, a Mecânica de Newton sem fundamento, por não conceber a causalidade como algo universal e necessário.

Mario Bunge [ref. 3], criticando Hume, afirma "contrariamente ao que Hume e seus seguidores sustentaram, estou aqui rejeitando a identidade de produção e causação, pois como a ciência mostra - e como se desenvolve abundantemente nesse estudo - algumas coisas são produzidas ou causadas de um modo não-causal".

IX

Voltemos agora às causas formais no século XX. Kuhn em seu importante estudo já citado sobre a evolução do conceito de causa, identifica o aparecimento de explicações formais no nosso século com a crescente abstração inerente à Física contemporânea. Nas palavras de Kuhn: "A matéria adquiriu propriedades formais, inimagináveis do ponto de vista mecânico - spin, paridade, estranheza, etc. - passíveis de descrição apenas em termos matemáticos".

Isso que dizer que não se trata de fazer uma teoria abstrata e formal de algo que pode, em princípio, ser reduzido a causas eficientes (a agentes, em última análise). Não. A explicação termina no momento em que se encontra a causa formal. Para nós, em função da análise anterior, a origem desse tipo de explicação está em Lagrange e Fourier.

Podemos, agora, ampliar essa análise da causalidade na Física atual.

O uso de propriedades de simetria - assimetria, para nós, se insere na causalidade formal.

Exemplos:

1- Quando se relacionam os teoremas de conservação com propriedades de simetria, a razão pela qual a grandeza se conserva a "causa" (causa=razão, Descartes) é evidentemente formal, em outras palavras, a utilização do teorema de Noether implica em causalidade formal.

2- Considere as soluções de açúcar em água e as experiências de desvio do plano de polarização da luz nessas soluções. Esse tipo de problema foi estudado por Pasteur (isomerismo ótico). Pois bem. As diferenças entre isômeros são baseadas na geometria das moléculas: os isômeros dextrógiro e levógiro são imagens especulares, que não se

superpõem (enantiomorfismo).

Aqui cabe chamar a atenção para o seguinte: se a geometria das moléculas fosse explicável em termos mecânicos (com uso de causas eficientes) então a causa formal não seria "fundamental", poderia ser abandonada. Mas isso não pode ser feito.

Note que a solução de um problema quântico exige a formulação prévia do problema clássico correspondente, ou, em outras palavras, quantizar é transformar um Parênteses de Poisson (clássico, já conhecido) em um comutador (quântico). Essa transformação equivale a supor que os sistemas clássicos e quânticos são descritos pelas mesmas Lagrangeanas, que funcionam, então, como puras formas.

Um comentário análogo poderia ser feito sobre a explicação das propriedades macroscópicas de um cristal em termos de suas simetrias.

A propósito, o uso extensivo da teoria dos grupos na Física demonstra, claramente, a importância da causa formal nas explicações modernas.

Aqui nos lembramos de P. Curie: "A simetria característica de um fenômeno é a simetria máxima compatível com a existência do fenômeno.... Certos elementos de simetria podem coexistir com certos fenômenos, mas não são necessários. O que é necessário é que certos elementos de simetria não existam: é a assimetria que cria o fenômeno".

E ainda: "Quando certas causas produzem certos efeitos, os elementos de simetria das causas devem se encontrar nos efeitos produzidos; quando certos efeitos revelam uma certa assimetria, essa assimetria deve se encontrar nas causas que os geraram". [ref. 9]. Note o uso da palavra causa no sentido de causa eficiente.

3- A explicação por quebra de simetria, frequente na teoria dos campos, hoje, é de tipo mais complexo. Envolve "causa formal" (para a descrição das simetrias) e "causa eficiente" na quebra de simetria.

Note que nesse caso causa eficiente já não é mais força. Por exemplo: as partículas de um campo de Yang-Mills tem massa, por quebra espontânea de simetria (mecanismo de Higgs). Poderíamos dar outros exemplos, mas julgamos que esses são suficientes.

Antes de concluir gostaríamos de dizer duas palavras sobre as causas materiais.

Faremos isso por meio de um exemplo concreto. Qual é a causa da impenetrabilidade da matéria? Em geral, quando se tenta responder a essa pergunta se diz: o Princípio de Pauli. Mas esse princípio apenas nos diz como deve se comportar um sistema de férmions, isto é, que sua função de onda deve ser antissimétrica.

As leis que expressam proibições constituem uma grande dificuldade para quem estuda os sistemas de explicação. Mas nesse caso - o do Princípio de Pauli - talvez estejamos diante de um avatar da "causa material" (uma propriedade específica dos férmions, mas não dos bósons, algo que faz os férmions serem férmions). Note que isso não exclui a presença da causa formal.

Esses exemplos mostram que os sistemas explicativos usados na Física do século XX são muito complexos e transbordam os estreitos limites do mecanicismo.

É interessante observar, entretanto, que muitas das explicações correntes tem suas raízes remotas no esquema causal aristotélico, que revela ter muito mais fôlego do que alguns imaginam (veja por exemplo, esta citação: "Although diverse figures have claimed to detect a philosophically significant affinity between Aristotelian and post-Newtonian science, it is only in the fields of history and the human sciences that the theory of the four causes retains significant contemporary interest") [ref. 10].

Quando a história da evolução da noção de causa for devidamente contada, o papel de Lagrange e Fourier como reintrodutores da causa formal (e final) na Física não poderá ser subestimado.

Agradecimentos:

É um prazer agradecer a Francisco Caruso e a Wilton Barroso Filho por valiosas discussões.

REFERÊNCIAS

- 1) Les Théories de la causalité - M. Bunge, F. Halbwachs, T.S. Kuhn, J. Piaget et Leon Rosenfeld - P.U.F. - 1971.
- 2) T.S. Kuhn - "Concepts of Cause in the development of Physics" in "The essential Tension" - University of Chicago Press - 1977.
- 3) M. Bunge - Causality - Harvard University Press (1959).
- 4) A teoria das causas de Aristóteles se encontra em vários lugares de sua obra:
 Metaphysica livro I cap 3, 983 a,b. Ver tb.
 Metaphysica livro V cap 2 (1013a)
 Physica livro II, cap 3 (195a)
 in Aristotile - vol I - Great Books - Enc. Britannica - vol.8.
- 5) M. Jammer - Storia del Concetto di Forza - 1979 - Feltrinelli.
- 6) Laplace - "Teoria analítica das probabilidades - Prefácio" - apud J. Ferrater Mora - Diccionario de Filosofia-Alianza, 1982
- 7) Jean Baptiste Joseph Fourier, "Teoria Analítica do Calor" - tradução inglesa in Great Brooks - Enc. Britannica - vol. 45.
- 8) M. Bunge - Lagrangian Formulation and Mechanical Interpretation - Am. J. of Physics 25, 211 (1957).
- 9) P. Curie - Sur la symétrie dans les phenomènes physiques (1894) apud A. Lalande - Vocabulaire de la Philosophie ("symetrie") 9^{eme} ed. P.U.F. 1962.
- 10) Roy Bhaskar, "Aristotle's theory of cause" in "Dictionary of the History of Science", W.F. Bynum, E.J. Browne and R. Poster - 1981 - Macmillan.