
METÁFORAS NA FÍSICA

Sérgio M. Arruda

Depto. de Física – UEL

Londrina – PR

Instituto de Física – USP

São Paulo – SP

Introdução

A interpretação de uma teoria física: regras semânticas ou semelhanças de família?

É razoavelmente difundida no meio científico a idéia de que o discurso científico, por estar comprometido com a descrição objetiva da realidade, deve tanto quanto possível ser claro, construído a partir de termos com significado preciso e estável. Não deve haver lugar na linguagem científica para as ambigüidades provenientes do uso de metáforas, alegorias e outras figuras características da linguagem comum e poética ⁽¹⁾. Dentro dessa visão chamada literalista, a linguagem é vista como “um sistema ideal, estático, com significados fixos, os quais são dependentes de regras sintáticas e semânticas fixas” (Arbib; Hesse, 1986, p. 148). Bunge, por exemplo, mantém que “um signo possui um significado físico, ou é fisicamente significativo, se e somente se ele designa uma idéia que por sua vez se refere a uma classe de objetos físicos” (Bunge, 1967a, p. 26). Em conseqüência, a interpretação de uma teoria física consiste “num conjunto de correspondências entre símbolos matemáticos e palavras, de um lado, e as quantidades físicas... do outro”, ou seja, “a interpretação é dada pelas regras semânticas que conferem conteúdo físico ao sistema matemático” (Bunge, 1957, p. 212).

A idéia de que o significado das teorias físicas seja intermediado necessariamente por tais regras é contestada por alguns filósofos e historiadores da ciência. Kuhn, por exemplo, apontando para a dificuldade de encontrá-las na história da Física, duvida que as regras de correspondência sejam suficientes para explicar as correlações atuais entre o formalismo e o experimento (Kuhn, 1989, p. 364). Para ele, os cientistas podem concordar na identificação de um paradigma sem, entretanto, entrar num acordo quanto à sua interpretação, o que não impede que o paradigma cumpra sua função de orientar

a pesquisa (Kuhn, 1978, p. 69). Para fundamentar suas afirmações, Kuhn se refere às idéias de Wittgenstein sobre a nossa capacidade em identificar e nomear objetos devido à possibilidade de agrupá-los segundo suas “semelhanças de família” (Wittgenstein, 1975, p. 43). Por exemplo, a compreensão do que significa a palavra “jogo” vem da experiência prévia com jogos de cartas, de bola, de tabuleiro e de outras atividades similares. Analogamente, segundo Kuhn, os cientistas nunca aprendem conceitos, leis e teorias de forma abstrata e isoladamente. Ao contrário, esses instrumentos intelectuais são desde o início encontrados numa unidade histórica e pedagógica anterior, na qual são apresentados juntamente com suas aplicações e através delas (Kuhn, 1978, p. 71). A compreensão de termos como “força”, “massa” e “aceleração”, por exemplo, dependeria mais da aplicação desses conceitos durante a resolução de problemas exemplares propostos nos manuais do que da leitura de suas definições. Da resolução de problemas “resulta uma habilidade para ver semelhanças entre uma variedade de situações”, todas elas submetidas à mesma generalização simbólica – no caso $f = m a$ (Kuhn, 1978, p. 234). A exposição aos exemplares partilhados pelo grupo permitiria ao estudante conceber as situações e compreender a natureza a partir do mesmo contexto que os outros membros de sua especialidade (ibid, p. 235).

O papel das metáforas na aquisição do conhecimento

Wittgenstein também fundamenta a teoria holística da linguagem de Arbib e Hesse, para os quais toda a linguagem é metafórica. Os autores afirmam que a distinção entre o significado literal de uma palavra ou frase é pragmático e não semântico, sendo o termo metáfora “usado para denotar formas particulares de expressão literária que dependem de reconhecimento explícito de similaridades e analogias...” (Arbib; Hesse. p. 153). Numa conversa, por exemplo, a inteligibilidade de uma palavra pressupõe o reconhecimento do significado que ela pode ter em diferentes contextos, sendo necessário para o entendimento que a maioria das idéias a ela associadas sejam partilhadas pelo grupo. Isso envolve o estabelecimento de relações e extensões do significado de palavras ou idéias e, portanto, o uso de analogias e metáforas. Sua função na ampliação do conhecimento coincide com o que Black chama de enfoque interativo da metáfora: ela não só formularia ou explicitaria uma relação conhecida entre dois campos semânticos diferentes, mas poderia criar semelhanças estabelecendo novas conexões entre eles (Black, 1966, p. 47, 49)². O papel central da metáfora na aquisição do conhecimento novo é também

defendido por Petrie, para quem as metáforas, modelos e analogias, do mesmo modo que os exemplares de Kuhn, podem providenciar “...uma ponte racional entre o conhecido e o radicalmente desconhecido...” (Petrie, 1984, p. 440)⁽²⁾.

Afirmações desse tipo também valem para o papel desempenhado pelos modelos na Física ⁽³⁾: “O modelo é usado para nos permitir introduzir conceitos técnicos e construir uma teoria mais avançada, a qual não se relaciona diretamente com o experimento. Nós somos forçados a construir modelos quando, por uma razão ou outra, não podemos dar uma descrição completa e direta na linguagem que normalmente usamos. Ordinariamente, quando a palavra nos falha, recorremos à analogia e à metáfora. O modelo funciona como um tipo mais geral de metáfora.” (Hutten, 1954, p. 289). Essa é também a visão de Kuhn, para quem todos os modelos, desde os heurísticos até os ontológicos, possuem funções similares: “dentre outras coisas, fornecem ao grupo as analogias ou metáforas preferidas ou permissíveis” (Kuhn, 1978, p. 229). Portanto, assim como as metáforas, os modelos e analogias permitem que domínios separados sejam postos em relação cognoscitiva e por isso, esses “instrumentos especulativos” são considerados por Turbayne como “metáforas extendidas” (Turbayne, 1982, p. 33).

Todas essas afirmações a respeito das metáforas e suas extensões, nos levam a questionar a suposta precisão da linguagem científica e tentar esclarecer as possíveis funções que as metáforas teriam no conhecimento e no processo de produção científicos. Isso nos remete a uma afirmativa de Arbib e Hesse em *The Construction of Reality*: “as revoluções científicas são, de fato, revoluções metafóricas” (Arbib; Hesse, p. 156). Essa frase fornece o tema básico sobre o qual refletiremos nas seções seguintes deste ensaio. A partir de um breve estudo sobre mudanças conceituais importantes introduzidas por Einstein em 1905, tentaremos esclarecer em que sentido as revoluções científicas estão envolvidas com algumas mudanças metafóricas básicas.

II. Metáforas e revoluções científicas I: o quantum de luz e a dualidade onda-partícula

Em 1905, Einstein publicou três artigos de extrema importância para o desenvolvimento posterior da Física: o primeiro deles é a primeira defesa de uma teoria quântica da radiação, embora seja mais conhecido pela sua discussão do chamado efeito fotoelétrico (Einstein, 1905a); o segundo teve o objetivo de “...encontrar fatos que assegurassem, da melhor forma possível, a existência de átomos de tamanhos finitos definidos” (Einstein, 1982, p. 50) e de

discutir o movimento browniano (Einstein, 1905b); e o terceiro trata da teoria da Relatividade Especial (1905c), pela qual Einstein é mais lembrado fora do meio científico. Esses três artigos, aparentemente sem nenhuma relação entre si, estão na verdade ligados pela preocupação central da carreira de Einstein: “a pesquisa por um fundamento unificador de toda a Física” (Klein, 1967, p. 510). Todos eles estão também envolvidos com algumas das principais metáforas de toda a Física. Neste ensaio, entretanto, trataremos somente das mudanças provocadas pela idéia do fóton e pela teoria da Relatividade Restrita, por se tratarem de exemplos de dois tipos de teorias diferentes.

As teorias sobre a natureza da radiação, bem como as teorias atômicas, a teoria cinética dos gases, as teorias sobre o calor, etc, são, usando a terminologia de Einstein, “teorias construtivas” por fazerem modelos. Já as teorias da Relatividade e a Termodinâmica são “teorias de princípio” por partirem de princípios gerais sem fazer uso de suposições a respeito de constituintes básicos (Einstein, 1950, p. 54).

Metáforas e estrutura matemática de uma teoria

No artigo sobre o quantum de luz (“Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da criação e transformação da luz”), Einstein começa apontando para a “existência de uma diferença formal essencial entre a visão teórica que os físicos tiraram dos gases e outros corpos materiais e da teoria de Maxwell dos processos eletromagnéticos no chamado espaço vazio”. Em particular, como a “energia é uma função contínua no espaço para todos os fenômenos eletromagnéticos”, inclusive a luz, para um corpo material, ela “pode ser escrita como uma soma sobre átomos e elétrons”. Dessa forma, como Einstein expressaria mais tarde, “a energia cinética e a energia do campo aparecem como coisas essencialmente diferentes” (Einstein, 1982, p. 41) pois o número de graus de liberdade do sistema é finito no primeiro caso e infinito no segundo. Esse “dualismo” ou “diferença formal essencial”, que tornaremos mais explícito abaixo, representava um estado de coisas altamente insatisfatório para Einstein.

A mecânica e o eletromagnetismo se estruturaram em torno de duas metáforas ou modelos diferentes a respeito dos constituintes fundamentais do universo: para a mecânica, a realidade é formada por corpúsculos discretos ou partículas, dotados de massa e movimento que interagem entre si através de forças de contato (como numa colisão) ou à distância (como na atração gravitacional); para o eletromagnetismo, a noção fundamental é a de campo ou

continuum através do qual as ações ou ondas (entre cargas elétricas, por exemplo) são transmitidas por contigüidade. Essas duas metáforas fundamentais para a natureza última das coisas – partícula ou campo – definem o tipo de formalismo matemático da teoria. Assim, se a entidade é do tipo partícula as equações básicas são derivadas totais em relação ao tempo.

Na mecânica, a equação fundamental é a 2ª lei de Newton, que, no caso unidimensional, é dada pela expressão:

$$\frac{m d^2 x}{dt^2} = F(x, v, t) \quad (1)$$

na qual x , v e $\frac{d^2 x}{dt^2}$ são, respectivamente, a posição, a velocidade e a aceleração da partícula num certo instante de tempo, m é a sua massa e $F(x, v, t)$ é a expressão da força que atua sobre ela no mesmo instante. Por outro lado, se tratamos com campos (ou ondas) eletromagnéticos no vácuo e na ausência de fontes, as equações fundamentais são as equações de Maxwell:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Na qual \vec{E} e \vec{B} são os campos elétrico e magnético, c é a velocidade da luz no vácuo (= 300.000 km/s) e ∇ é o operador nabla, dado por:

$$\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial x \vec{i}} + \frac{\partial}{\partial y \vec{j}} + \frac{\partial}{\partial z \vec{k}} \quad (3)$$

Vemos que as equações de Maxwell são derivadas parciais em relação à posição e ao tempo.

O quadro abaixo resume as diferenças formais básicas entre as duas teorias:

	Mecânica	Eletromagnetismo
Metáfora básica	a natureza última é do tipo corpúsculo	a natureza última é do tipo contínuo
Equações fundamentais	derivadas totais em relação ao tempo	derivadas parciais em relação à posição e ao tempo
Variável independente	tempo	posição e tempo
Tipo de interação	ação à distância	ação através de campos
Energia cinética	soma sobre partículas (finitos graus de liberdade)	função contínua (infinitos graus de liberdade)

A metáfora do fóton e a dualidade

No final do séc. XIX, principalmente após as pesquisas de Hertz sobre a “propagação da ação elétrica com velocidade finita no espaço” (Hertz, 1962), a teoria eletromagnética se estabeleceu firmemente como uma teoria sobre perturbações transversais se movendo com velocidade constante e igual a da luz num meio hipotético, chamado éter, permeava todo universo, chamado éter. Assim, o éter estaria para a luz e outras radiações similares, como a água para as ondas do mar ou o ar para as ondas sonoras.

Independentemente dos problemas relacionados com a detecção do éter, a ser comentado na seção seguinte, a teoria eletromagnética – apontava Einstein em 1905 – apresentava dificuldades sérias quando aplicada a fenômenos que envolviam a emissão ou absorção da luz pela matéria, como a explicação do espectro da radiação do corpo negro, a fotoluminescência e o efeito fotoelétrico. O que Einstein propunha nesse artigo (1905a) era uma modificação na metáfora básica da teoria eletromagnética, ou seja, que os fenômenos citados poderiam ser melhor entendidos supondo que a “energia luminosa fosse distribuída descontinuamente pelo espaço” e constituída de “um número finito de quanta de energia, localizados, movendo-se sem ser divididos, podendo ser absorvidos ou emitidos somente como um todo”. O que Einstein colocava não era simplesmente um retorno à teoria corpuscular newtoniana, mas “uma espécie de fusão entre as teorias ondulatórias e de emissão” (Einstein, 1909, apud. Klein, 1963, p. 5).

Essa nova metáfora para a luz e radiação, em que as características ondulatórias e corpusculares deveriam cada uma manter o seu papel, que em 1909 apontava para Einstein a direção em que a Física da época deveria se

desenvolver, ficou conhecida como a natureza dual da luz ou a dualidade onda-partícula para a radiação: a luz, para fenômenos como a difração e interferência, se comportaria “como se fosse” uma onda, ao passo que, para fenômenos que envolvem a interação com a matéria, seu comportamento seria “como” o de uma partícula. Podemos então entender a revolução provocada pela hipótese do quantum como uma mudança na metáfora básica sobre a natureza da radiação e responder positivamente à questão levantada no final da introdução deste ensaio, pelo menos neste caso.

III. Metáforas e revoluções científicas II: a teoria da relatividade especial

A TR é uma teoria que não faz suposições sobre constituintes básicos mas parte de princípios gerais dos quais são deduzidas conseqüências empiricamente observáveis. Aparentemente, como nesse caso não existem modelos, as metáforas não seriam tão evidentes como no caso analisado anteriormente. Entretanto, a TR está, desde suas origens, envolvida com construções metafóricas e ela é fundamentalmente uma mudança nas metáforas a respeito da natureza do espaço e do tempo⁽⁴⁾.

Origens da Teoria da Relatividade Especial: outras dificuldades com a metáfora básica do eletromagnetismo

A TR nasceu de um paradoxo na teoria eletromagnética que Einstein percebeu quando tinha 16 anos e que foi assim enunciado, mais tarde, em sua Notas Autobiográficas: “se um raio luminoso for perseguido a uma velocidade c (velocidade da luz no vácuo), observamos esse raio de luz como um campo eletromagnético em repouso, embora com oscilação espacial. Entretanto, aparentemente não existe tal coisa, quer com base na experiência, quer de acordo com as equações de Maxwell. Desde o início, tive a intuição clara que, segundo o ponto de vista desse observador, tudo deveria acontecer de acordo com as mesmas leis aplicáveis a um observador que estivesse em repouso em relação à Terra” (Einstein, 1982, p. 55). Esse paradoxo, que é praticamente uma alegoria – ou seja, uma “construção que tem metáforas como tijolos” (Machado, 1991, p. 82) – a respeito de uma pessoa que persegue um raio de luz, apontava para outra dificuldade com a teoria eletromagnética.

Das equações de Maxwell (2), obtemos facilmente as seguintes equações para os campos \vec{E} e \vec{B} :

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (4)$$

Os itens são equações de onda, cujas soluções são campos ou ondas eletromagnéticas se deslocando com velocidade c . Uma das características de uma onda é que sua velocidade depende de parâmetros relacionados exclusivamente ao meio. No caso de ondas em uma corda, por exemplo, que são descritas por equações idênticas às mostradas em (4), a velocidade depende da tensão a que a corda está submetida e de sua densidade. Portanto, no caso das ondas eletromagnéticas, a velocidade dependeria de parâmetros relacionados exclusivamente ao éter. Assim, se a metáfora das ondas no éter é uma imagem satisfatória da realidade, somente para um observador em repouso em relação a ele é que a velocidade das ondas seria igual a c . Para um observador movendo-se com velocidade v , por exemplo, no mesmo sentido do raio de luz, a velocidade desse raio seria igual a $c-v$. Se esse observador conseguisse igualar sua velocidade a do raio, ele o veria em repouso, e isso teria duas conseqüências: primeiro, as equações (4) – e as de Maxwell, das quais elas derivam – só valeriam para um observador em repouso em relação ao éter, ou seja, as equações fundamentais do eletromagnetismo só valeriam para o referencial do éter; segundo, o éter seria um referencial privilegiado ou absoluto, em relação ao qual seria possível determinar absolutamente por meios eletromagnéticos as velocidades de quaisquer objetos.

Essas conclusões tornariam o eletromagnetismo inconsistente com a mecânica (cujas equações fundamentais não necessitam da existência de um referencial absoluto) e com diversos experimentos relacionados com a determinação da velocidade relativa entre a terra e o éter realizados no final do séc. XIX e início do séc. XX. Esses problemas eram, para Einstein, mais um indício da situação insatisfatória em que se encontrava a Física da época, em especial a teoria eletromagnética. Os passos dados por ele para remover essas inconsistências são descritos em detalhes por Wertheimer (1945, cap. B) e levaram Einstein a propor uma modificação nas metáforas existentes a respeito do tempo e do espaço.

Mudanças nas concepções sobre tempo e espaço

Até a época da criação da TR, as concepções existentes sobre o espaço e o tempo eram fundamentalmente idênticas às concepções absolutas de Newton, conforme ele as definiu no Principia (Newton, 1687): “Tempo absoluto, verdadeiro e matemático, em si e por sua própria natureza e sem relação a algo externo, flui uniformemente [...]” (p. 127). “[...] O fluxo do tempo absoluto não pode alterar-se[...]” (p. 129). “Espaço absoluto, por sua própria natureza e sem relação a qualquer coisa externa, sempre permanece igual e imóvel...” (p. 127); [...] em relação ao qual se determinam as “posições absolutas” dos objetos... (p. 128).

É como se, para Newton, tempo e espaço pudessem ser descritos por duas metáforas: o tempo é como um fluido que escoava uniformemente e o espaço é como um continuum infinito, em relação ao qual as posições de todas as coisas do universo podem ser determinadas absolutamente. Para que as inconsistências entre a mecânica e o eletromagnetismo fossem removidas, essas metáforas tiveram de ser modificadas: na Relatividade Especial não há mais um tempo que flui inexoravelmente nem um espaço imóvel, ambos com valores absolutos, mas intervalos de tempo e distâncias medidos a partir de relógios e réguas e com valores dependentes do movimento do observador – objetos se contraem e relógios andam mais lentamente quando observados de um referencial em movimento. Espaço e tempo se fundem na TR num continuum quadridimensional em relação ao qual devem os eventos ser determinados. Portanto, também a revolução relativística está envolvida com uma mudança metafórica.

IV. Considerações Finais

Das breves análises que fizemos a respeito de dois episódios extremamente ricos da história da Física, é possível inferir que as metáforas desempenham um papel importante nessa ciência. De um modo geral, poderíamos afirmar que elas estruturam o discurso científico de tal modo que uma mudança numa metáfora básica pode acarretar uma mudança conceitual e formal nesse discurso ou na teoria em questão.

É bastante interessante, por exemplo, a relação entre a metáfora e a estrutura matemática da teoria. Em alguns casos, a relação é direta: movimentos de pontos materiais são descritos através de equações diferenciais totais em relação ao tempo, enquanto que para a descrição do movimento de fluidos, que

são meios contínuos, são necessários equações diferenciais parciais em relação à posição e tempo. Nesse caso, há claramente uma relação lógica entre o formalismo e a metáfora. Entretanto, há teorias puramente matemáticas que se aplicam tanto a partículas quanto a campos, como o formalismo de Lagrange ou o princípio de Hamilton, e que são, por isso, consideradas como sistemas gerais apenas parcialmente interpretados (Bunge, 1967a, p. 112). Nesse caso, esses sistemas funcionam “em todos os aspectos, como um modelo, o qual pode ser pensado e generalizado independentemente dos dados ao qual está sendo aplicado” (Hesse, 1954, p.207).

As metáforas também são muito usadas na Física para apontar inconsistências ou anomalias, inter ou intra teorias, aparecendo sob a forma das conhecidas “experiências de pensamento”. O paradoxo einsteniano mencionado neste trabalho e o paradoxo do gato de Schroedinger da Mecânica Quântica (Gribbin, 1988) são exemplos dessas consistências. Essas construções metafóricas ou alegorias exerceram em alguns casos um papel importante na discussão de problemas fundamentais e mesmo na criação de teorias, como no caso da TR, discutido aqui. Há casos em que as metáforas são levadas a sério, ou seja, o compromisso com a metáfora básica é muito sólido. A história das teorias sobre o éter é um exemplo: vinte anos após TR ter demonstrado que a introdução da hipótese do éter era desnecessária ou “supérflua” (Einstein, 1905c), experiências sobre o “arrastamento” do éter ou sobre a detecção do movimento relativo entre a Terra e o éter ainda eram realizadas (Miller, 1933). Há outros casos em que metáforas que se mostraram posteriormente inconsistentes com os experimentos ajudaram em novas descobertas. É o caso da garrafa de Leyden, descoberta a partir da idéia de engarrafar o “fluido elétrico” (Kuhn, 1978, p.37).

Acreditamos que os exemplos discutidos aqui foram suficientes para ilustrar que a linguagem científica, supostamente exata e objetiva, está permeada de construções metafóricas. Entretanto, o nível de comprometimento metafórico da linguagem científica, provavelmente, ainda maior. Os físicos criaram um universo próprio formado por pontos materiais, campos, átomos e radiações através dos quais vêm o mundo. Como disse Hertz, no esforço de inferir o futuro a partir do passado “nós formamos para nós mesmos imagens ou símbolos dos objetos externos; e a forma que damos a eles é tal que a consequência necessária das imagens no pensamento são sempre as imagens das consequências necessárias na natureza...” (Hertz, 1956, Introdução), ou seja, inventamos um universo para poder entender e falar sobre a realidade e prever novos fatos. Nesse sentido, a Física (e toda a Ciência) nada mais é que uma

grande alegoria, uma gigantesca estrutura metafórica através da qual, nas palavras de Ortega, “...conseguimos apreender o que se acha mais distante de nossa potência conceitual” (Ortega y Gasset, 1987, p.391).

Agradecimentos

Ao professor Alberto Villani (IFUSP), pelas críticas e sugestões e ao professor Nilson Machado (FEUSP), que através de seu curso inspirou esse trabalho. À CAPES, pelo apoio financeiro.

Notas

(1) A metáfora consiste basicamente “em dar a uma coisa um nome que pertence a outra” (Aristóteles, Poética. Em Turbayne, 1982, p.23) produzindo-se com isso uma transferência de significado ou uma associação de idéias com base na analogia. Nesse sentido, a metáfora é um caso de tropo, ou seja, “do emprego de uma palavra ou frase em um sentido diferente do que lhe é próprio”(Turbayne, p.23). Exemplos de metáforas:

O homem é um lobo.

A vida é um moinho.

O átomo é um sistema solar-.

A luz é uma onda.

(2) A partir dessa concepção interativa, a metáfora pode ter uma função no processo de ensino-aprendizagem. Servindo de “ponte racional” entre o conhecimento antigo (ou os esquemas prévios do indivíduo) e o conhecimento novo, a metáfora pode ser usada para possibilitar a reestruturação das estruturas cognitivas ou acomodação. Sobre isso ver Petrie, 1984.

(3) De um modo geral, modelos são “esquemas teóricos” ou “sistemas conceituais” construídos para representar aspectos de sistemas reais, podendo ser visualizáveis ou não (Bunge, 1967b, p.385). Exemplos: modelo atômico de Bohr, modelo do oscilador harmônico, etc.

(4) A princípio, a revolução relativística poderia ser separada em duas partes: a inferência das equações de transformação de Lorentz e a revolução relativística propriamente dita, envolvendo uma mudança nas concepções de simultaneidade, tempo, espaço, massa, etc., e uma interpretação adequada das transformações de Lorentz.

Referências

- ARBIB, M. A. e HESSE, M. B., 1986. The construction of reality. Cambridge: Cambridge University Press.
- BLACK, M., 1966. Modelos Y metaforas. Madrid: Editorial Tecnos Ltda.
- BUNGE, M., 1957. Lagrangean formulation and mechanical interpretation. Am. J. Phys., 25, 4, 211-218.
- BUNGE, M., 1967a. Foundations of Physics. Berlin: Springer-Verlag.
- BUNGE, M., 1967b. Scientific Research, vol. I. Berlin: Springer Verlag.
- EINSTEIN, A., 1905a. On a heuristic view point about the creation and conversion of light. Em Haar, D. T., 1967. The old quantum theory. Oxford: Pergamon Press.
- EINSTEIN, A., 1905b. On the movement of small particles suspended in a stationary liquid demanded by the molecular kinetic theory of heat. Em Einstein, 1956. Investigationson the theory of brownian movement. N. Y.: Dover Publico
- EINSTEIN, A., 1905c. Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. Em O princípio da Relatividade. Lisboa: Fundação Calouste-Goulbenkian. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira.
- EINSTEIN, A., 1950 Out of my later years. New York: Philos. Library.
- EINSTEIN, A., 1982. Notas autobiográficas. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira.
- GRIBBIN, J., 1988. A procura do gato de Schrödinger. Lisboa: Editorial Presença.
- HERTZ H, 1956. The principles of mechanics. New York: Dover Public.
- HERTZ, H., 1962. Electric waves. New York: Dover Public.
- HERTZ, M. B., 1954. Models in Physics. Brit. J. Phil. Sci., vol. IV, 198-214.
- HUTTEN, E. H., 1954. The role of models in Physics. Brit. J. Phil. Sci., vol. IV, 284-301.

- KLEIN, M. J., 1963. Einstein and the wave-particle duality. Natur. Phil., 3, 1-49.
- KLEIN, M. J., 1967. Thermodynamics in Einstein's thought. Science, 157, 509-516.
- KUHN, T. S., 1978. A estrutura das revoluções científicas. São Paulo: Editora Perspectiva.
- KUHN, T. S., 1989. A tensão essencial. Lisboa: Edições 70.
- MACHADO, N., 1991. A alegoria em Matemática. Revista de Estudos Avançados, 5, 13, 78-100.
- MILLER, D. C., 1933. The ether-drift experiments and the determination of the absolute motion of the Earth. Rev. Mod. Phys., 5, 203-242.
- NEWTON, I., 1687. Principios Matemáticos de la Filosofía Natural, vol I. Madrid: Alianza Universidad. Edição de 1987.
- ORTEGA Y GASSET, J., 1987. Las dos grandes metáforas. Em Obras Completas, vol 2. Madrid: Editorial Tecnos Ltda.
- PETRIE, H., 1984. Metaphor and learning. Em Ortony, A. (org). Metaphor and thought. Cambridge: Cambridge University Press.
- TURBAYNE, C. M., 1982. El mito de la metáfora. México: Fondo de Cultura Económica.
- WERTHEIMER, M., 1945. Productive thinking. New York: Harper and Brothers.
- WITTGENSTEIN, L., 1975. Investigações filosóficas. Coleção Os Pensadores. São Paulo: Abril Cultural.