

As leis das leis físicas

[Laws of physical laws]

Mario Bunge

Publicado originalmente em:

American Journal of Physics, v. 29, pp. 518-529, 1961

Tradução: Prof. Valter A. Bezerra

Universidade Federal do ABC

Uma das novidades mais excitantes na física recente é a descoberta de que nem toda lei física é invariante sob inversão espacial, i.e. que a lei da conservação da paridade não é universalmente válida. A despeito do impacto que essa descoberta teve na pesquisa em física e até mesmo na nossa visão geral (uma vez que envolve a distinguibilidade entre direita e esquerda em certos casos), existe margem para dúvida sobre se a “violação da paridade” é sempre compreendida com clareza — o que não deveria nos parecer surpreendente, uma vez que a frase faz referência, de modo ambíguo, a duas categorias bem distintas de objetos: os enunciados de leis e os fatos. Uma análise do conceito de *enunciado sobre enunciados de leis*, como sendo algo distinto dos enunciados acerca de fatos, deve, portanto, ser útil para esclarecer não apenas o estatuto lógico das proposições acerca da simetria, como também o seu significado físico. O material a seguir, embora seja ilustrado principalmente com enunciados acerca de enunciados da física, transcende o âmbito da filosofia da física: o conceito de lei é tão importante em todo o campo das ciências empíricas como o é a noção correspondente de metateorema nas ciências formais.

1. Enunciados de metaleis e enunciados metanomológicos

Os textos científicos contêm tanto **enunciados-objeto** (p. ex. “ $2 + 3 = 5$ ” [*sic*],¹ “A água se expande ao ser congelada”) como **meta-enunciados** (p. ex. “A igualdade ‘ $2 + 3 = 5$ ’ é um teorema da aritmética ordinária”, “A lei ‘A água se expande quando congelada’ é bem conhecida pelos encanadores”). Enquanto os enunciados-objeto se referem aos objetos (sejam eles materiais ou não) dos quais trata a parte correspondente da linguagem, os meta-enunciados dizem algo acerca de outros enunciados: eles não são signos dos objetos primários, mas signos de signos; conseqüentemente, os meta-enunciados pertencem à metalinguagem.

Uma subclasse importante dos meta-enunciados é constituída por aqueles que tratam de enunciados de leis, ou seja, leis científicas. Os enunciados acerca de enunciados de leis podem ser denominados enunciados de **metaleis**. Eles podem falar sobre qualquer um dos problemas associados à conjectura, processamento, teste ou aplicação de regularidades de qualquer tipo. Assim, os enunciados de metaleis podem se referir à forma lógica dos enunciados de leis (p. ex. “As leis estatísticas não consistem em implicações de caráter geral”), aos métodos adequados para se testar enunciados de leis (p. ex. “As leis da fisiologia são testadas por meios físico-químicos”), ao seu âmbito de validade (p. ex. “A lei da equivalência entre massa e energia não se aplica aos campos”), às suas propriedades de

¹ Evidentemente, interessa a Bunge fornecer exemplos tanto de enunciados científicos *verdadeiros* quanto de enunciados *falsos*. (N. do T.)

simetria (p. ex. “As equações de Maxwell são invariantes sob inversão espacial”), e assim por diante. Alguns enunciados de metaleis ocorrem na linguagem ordinária, outros pertencem à ciência, e alguns são de propriedade da metaciência. Em nenhum caso eles são leis da natureza ou leis da cultura: eles apenas se referem a *enunciados* que expressam, por sua vez, aquilo que se supõe serem as leis objetivas da natureza ou da cultura.

No que se segue, iremos concentrar nossa atenção em um tipo particularmente interessante e negligenciado de enunciados de metaleis: a classe dos enunciados **legiformes**² (ou nomomorfos) acerca de leis científicas; isto é, o conjunto das assertivas bem justificadas (ou, pelo menos, aceitas), que são de caráter geral, em algum sentido e em alguma medida, e que se referem às leis científicas. Os enunciados “A lei da conservação da paridade não vale para as interações fracas” e “As leis da hereditariedade estão baseadas nas leis da química” são membros desse conjunto. Enunciados legiformes como esses diferem dos pronunciamentos casuais de metaleis no sentido de que os primeiros não especificam situações particulares envolvendo o uso dos enunciados de leis (como, p. ex., em “Os eletricitistas empregam as leis de Kirchhoff”), mas *descrevem ou prescrevem características básicas dos enunciados de leis*. Sugeriu-se o nome **enunciado metanomológico** para esta subclasse dos enunciados de metaleis; ele é menos ambíguo que o nome “lei de leis” porque as leis científicas também podem ser consideradas como leis de leis se o termo “lei”, na sua segunda ocorrência, for tomado como denotando um padrão ou estrutura nômica objetiva. O nome “enunciado metanomológico” também é mais correto do que “lei de leis” porque, como veremos a seguir, nem todos os enunciados acerca de leis são, eles próprios, leis: nem todos eles são passíveis de serem verdadeiros (pois alguns deles são normas ou prescrições), embora todos eles sejam mais ou menos gerais e justificados. Porém é claro que é apenas por meio de uma convenção lingüística que nós atribuímos *designata* diferentes a “enunciado de metalei” (a classe dos enunciados acerca de enunciados de leis) e “enunciado metanomológico” (a subclasse própria dos enunciados legiformes de metalei).

Antes de prosseguir com o levantamento dos tipos de enunciados metanomológicos, convém examinar um exemplo. Um bom exemplo é o seguinte: “A região de validade das aproximações simplificadoras, que toda teoria necessariamente precisa utilizar, é sempre muito maior do que aquilo que poderia ser justificado por meios teóricos”. Este enunciado metacientífico não se refere à natureza, mas sim a uma característica universal das *teorias* científicas quantitativas (sistemas de proposições dentre as quais os enunciados de leis desempenham um papel proeminente); mais especificamente, ele se refere ao desempenho das suposições auxiliares simplificadoras que são feitas em *toda* tentativa de se descrever um estado de coisas com a ajuda de enunciados de leis teóricas, ou de explicá-lo construindo um modelo teórico simples o suficiente para ser desenvolvido. A frase citada abrange, além disso, o desempenho das suposições simplificadoras envolvidas em *qualquer* enunciado nomológico quantitativo digno desse nome. Como toda lei científica, o enunciado em foco transcende o conjunto das experiências singulares disponíveis (relativas a tal desempenho) e assume o risco de afirmar que algo — a saber, a região de validade das aproximações simplificadoras — é *sempre* maior do que aquilo que poderia ser esperado antes do teste experimental. Trata-se, portanto, de um enunciado metanomológico duplamente universal. É claro que nem todos os enunciados metanomológicos possuem um escopo tão amplo; todos eles são, porém, gerais em algum sentido e em alguma medida.

² No original, *lawlike* (N. do T.)

Ora, nem todos os enunciados metanomológicos são iguais: alguns são enunciados legiformes acerca do estatuto das leis científicas, ao passo que outros são critérios ou, se se preferir, requisitos que freqüentemente são impostos às leis. Na verdade, pode-se distinguir pelo menos três tipos de enunciados metanomológicos, os quais serão denominados enunciados metanomológicos **factuais**, **normativos** e **metodológicos**. Vamos examinar cada um desses tipos separadamente.

2. Enunciados metanomológicos factuais

Estes são enunciados sobre as *propriedades*, o *desempenho* (domínio de validade) ou a *utilidade dos enunciados nomológicos*. Podem ser particulares ou universais, conforme se refiram a algumas leis ou a todas as leis que caracterizam um dado nível ou subnível da realidade. Porém os enunciados metanomológicos factuais são todos gerais no sentido de que não se referem a instâncias particulares de aplicação das leis científicas. A proposição “As leis da mecânica newtoniana são válidas para corpos movendo-se a baixas velocidades no âmbito macroscópico” é uma instância de enunciado metanomológico *particular*: é particular porque se refere a um conjunto específico de leis, mas é universal no que diz respeito à classe dos fatos para os quais essas leis são tidas como válidas. Este âmbito permanece aberto. Por outro lado, um enunciado metanomológico como aquele que se referia ao domínio de aplicabilidade das aproximações feitas nos enunciados de leis e nas suas conseqüências³ (ver a seção 1) é *universal* tanto no que diz respeito ao escopo dos enunciados de leis como à sua variedade. Outro enunciado metanomológico de escopo universal é: “Todas as equações diferenciais da ciência são deriváveis a partir de princípios variacionais”. Também “As leis da história são todas de caráter estatístico” é um enunciado metanomológico universal na medida em que se refere a todas as leis de um certo campo.

Deve-se ter em mente que os enunciados metanomológicos factuais *não são leis da natureza ou da sociedade*, mas sim afirmações acerca de enunciados de leis. O enunciado “As equações de movimento são invariantes sob transformações canônicas” ilustra esse ponto com particular clareza. Em primeiro lugar, se ele for tomado como uma definição implícita da expressão “transformações canônicas”, trata-se de uma proposição analítica. Em segundo lugar, as transformações canônicas não são e não refletem processos tendo lugar na natureza, mas são apenas mudanças na nossa descrição ou representação de certos fenômenos físicos, em pé de igualdade com as mudanças na direção de observação. O fato de que um mesmo conjunto de fenômenos que “obedecem” a um dado conjunto de equações de movimento possa ser representado de uma infinidade de maneiras equivalentes não é uma característica dos sistemas físicos, mas sim uma característica de uma das nossas descrições deles. (Vale lembrar que são as *soluções* das equações básicas da física que podem ser empregadas para descrever os fenômenos, e não as próprias equações de movimento.) Assim, o enunciado metanomológico acima nada mais é do que uma asserção (demonstrável) acerca da *linguagem* que utilizamos para descrever um certo nível da natureza: ele afirma, com efeito, que a relação fenômenos—construtos não é um-a-um, mas sim um-a-infinito.

A inversão temporal coloca um problema semelhante: ele é mais refratário apenas de um ponto de vista psicológico, devido às dificuldades envolvidas no conceito de tempo. Essa questão, já bastante discutida, pode ser consideravelmente esclarecida se a transformação $t \rightarrow -t$ nas equações de movimento for considerada, não mais como algo que *acontece* no mundo

³ O original traz aqui “conseqüentes” [*consequents*], um termo legítimo da lógica, porém o contexto sugere que se trata de “conseqüências” [*consequences*], tal como aparece em outras passagens do texto. (N. do T.)

exterior, mas sim como uma troca de sinal sem significado, semelhante às transformações canônicas (e equivalente, na realidade, a uma transformação anticanônica). Mesmo a inversão temporal de Wigner (uma inversão do tempo acompanhada por uma conjugação complexa) possui essa natureza formal, embora ela seja chamada algumas vezes de inversão temporal “física”, em contraste com a inversão temporal “formal” anterior. Na verdade, a inversão temporal de Wigner nos permite obter os *movimentos* invertidos das partículas e ondas; e esses movimentos de trás para a frente levam as partículas e ondas para o passado tanto quanto a projeção de um filme ao contrário. No contexto da teoria das partículas elementares, a “inversão temporal” não significa o intercâmbio entre passado e futuro, mas sim a inversão das velocidades e das correntes — e isso também pode ser devido a uma mera mudança de “ponto de vista” ou representação.

A invariância de algumas variáveis e relações físicas básicas (p. ex. leis) sob inversão temporal não é uma propriedade da realidade física, mas sim uma característica de alguns construtos que foram inventados para a descrição e explicação dos fenômenos físicos. Assim, quando dizemos que a invariância sob inversão temporal (de Wigner) é “violada” em certos processos das partículas elementares, queremos dizer que a hamiltoniana de interação que entra na teoria correspondente não é invariante sob aquela operação conceitual. No contexto da mecânica newtoniana, podemos escolher descrever os fenômenos mecânicos quer empregando tempos crescentes quer utilizando tempos decrescentes, na medida em que as forças não forem de grau ímpar nas velocidades; isso tem a ver com a *nossa* maneira de marcar o tempo, e não com o fluxo objetivo dos fenômenos. Do mesmo modo, no contexto da teoria eletrodinâmica, podemos decidir contar o tempo de trás para a frente, e não para a frente; nesse caso, tudo o que temos que fazer é inverter os sinais usuais dos campos e das correntes. Pode parecer um procedimento desajeitado, mas é tão legítimo quanto o procedimento usual.

A teoria do elétron, tanto na sua forma clássica como na forma quântica, fornece outra ilustração da natureza da inversão temporal — ou melhor, da mudança de sinal da variável t . Os pósitrons podem ser descritos *como se* fossem elétrons indo para trás no tempo. Mas essa é uma possibilidade da linguagem [*in voce*], não das coisas [*de re*]: ela não implica a possibilidade física de os elétrons visitarem o passado. Se o fizesse, nós teríamos os meios para construir uma máquina do tempo e modificar o passado. Porém não podemos ir contra a correnteza dos eventos, não podemos desfazer aquilo que já aconteceu; tudo o que podemos fazer é construir relógios que andam ao contrário e formular teorias que são invariantes sob inversão temporal (ou sob inversão combinada de tempo e carga). Se o tempo nada mais fosse do que aquilo que lemos nos mostradores de relógios ideais sem atrito, não existiria flecha do tempo objetiva em cada sistema de referência. A simetria combinada de tempo e carga das equações de movimento não significa que o pósitron é meramente um elétron com o tempo próprio invertido; ela significa que, assim como as equações da mecânica e da teoria do campo eletromagnético permitem uma infinidade de descrições equivalentes dos fenômenos, assim também as equações de movimento das partículas carregadas podem ser utilizadas para descrever certos processos qualitativamente diferentes sem fazer quaisquer modificações nas equações. Ocorre que uma das descrições possíveis do pósitron é a imagem especular, no tempo e na carga, da nossa descrição usual do elétron; longe de indicar uma simetria da natureza, isso mostra que as nossas equações são ambivalentes. E também nos alerta para não confundirmos as propriedades dos sinais com as propriedades dos seus referentes.

Como se pode ver, o mero fato de estar cômico da existência dos enunciados metanomológicos constitui um lembrete eficaz de que nem todo enunciado científico se refere aos fatos. Vamos agora aplicar as distinções elaboradas até aqui ao problema da inversão espacial.

3. Aplicação: a não-conservação da paridade

Sugeriu-se em 1956 o surpreendente enunciado metanomológico de que a lei da conservação da paridade poderia não valer para certos processos físicos, tais como o decaimento beta de núcleos atômicos e múons. Ora, quando ouvimos dizer que a paridade não é conservada nas interações que se supõe levarem a processos desse tipo, devemos distinguir três significados diferentes, ligados respectivamente a: (1) a metateoria, (2) os enunciados de nível superior da teoria, (3) os enunciados de nível inferior da teoria. No nível metacientífico, o enunciado em questão pode ser formulado assim: “A hipótese (tácita) de que a lei da conservação da paridade (ou invariância sob inversão espacial) é universalmente válida deve ser abandonada”. Com relação ao nível mais alto da teoria (aquele onde os axiomas ocorrem), a expressão “não-conservação da paridade” significa que a hamiltoniana de campo que aparece nas equações básicas pelas quais esses processos são explicados não é invariante sob reflexões espaciais. Também neste caso, o que está em jogo é, claramente, um *meta-enunciado*, e não é necessário nenhum experimento para testá-lo, uma vez que se refere a uma propriedade *matemática* da hamiltoniana; o experimento é necessário para decidir entre hamiltonianas alternativas com diferentes propriedades de simetria.

Se descermos dos enunciados de nível mais alto da teoria para as suas conseqüências empiricamente testáveis, encontraremos, entre outras, a fórmula para a distribuição angular das partículas emitidas no decaimento beta. Essa fórmula de nível mais baixo é uma descrição dos fenômenos: é um enunciado-objeto. Se acontecer de essa fórmula não ser invariante de paridade (p. ex. porque ela contém uma quantidade pseudo-escalar, tal como $\sigma \cdot p$), teremos que distinguir: (a) enunciados acerca das propriedades matemáticas de simetria da fórmula em questão (que não serão invariantes sob reflexões espaciais se a lei-mãe não for, ela mesma, invariante); (b) enunciados acerca do significado físico da fórmula-filha. É esta última que é confrontada com os dados experimentais, os quais apresentam uma notável assimetria na distribuição angular dos elétrons emitidos. Por outro lado, os enunciados acerca das propriedades matemáticas das fórmulas de baixo nível são enunciados metanomológicos, cujo valor de verdade pode ser determinado por operações com lápis e papel.

O processo real de testar meta-enunciados acerca das propriedades de invariância das leis fundamentais é, então, o seguinte: (1) formula-se uma hamiltoniana que contém tanto termos P -invariantes como termos P -não-invariantes em proporções desconhecidas; (2) derivam-se matematicamente conseqüências experimentalmente testáveis a partir do enunciado de lei que contém a hamiltoniana sugerida; (3) projetam-se experimentos para testar algumas conseqüências novas, porém típicas, da hipótese básica; (4) são projetadas e executadas as observações e medidas correspondentes (p. ex. da distribuição angular dos elétrons emitidos por núcleos alinhados de Co^{60}); (5) os resultados experimentais são comparados com as predições teóricas; (6) os parâmetros (acoplamentos) que aparecem na lei básica (e, especificamente, na hamiltoniana contida na equação de onda), e que reaparecem na fórmula de baixo nível para a distribuição angular, são ajustados às descobertas experimentais.

O processo de validar os enunciados metanomológicos acerca das propriedades de simetria das leis básicas é, portanto, puramente analítico; somente o processo de validar as próprias leis básicas, que são enunciados-objeto, é que requer procedimentos empíricos. Os primeiros não descrevem os fatos; os fatos são relevantes apenas para o teste dos referentes dos enunciados metanomológicos, i.e. os enunciados-objeto de leis. Os enunciados metanomológicos sobre as propriedades de simetria das leis científicas são apenas assertivas acerca das propriedades de símbolos; eles não têm uma contraparte empírica direta e podem conter termos que não possuem definição operacional. Assim, a propriedade denominada paridade intrínseca (das funções de estado) não possui nem um análogo clássico nem um significado intrínseco, donde se segue que ela não pode ser considerada como uma propriedade física em pé de igualdade com a massa ou o tempo de decaimento. Na verdade, a paridade intrínseca é uma propriedade matemática das funções de onda, e não uma propriedade física dos sistemas materiais, do mesmo modo que o fato de ser hermitiano é uma propriedade formal dos operadores. A paridade intrínseca dos estados dos sistemas físicos não pode ser medida separadamente da teoria que os descreve: deve-se assumir primeiro uma equação de onda definida.

Se, para fins didáticos, forem necessários análogos familiares para a conservação e a não-conservação daquele operador tipicamente quântico denominado paridade, deve-se buscá-las em considerações outras, que não aquelas referentes às simetrias nas coisas ou nos fenômenos; pois o que as interações fracas “violam” é uma *hipótese* relativa a uma propriedade de símbolos físicos não-representacionais, que agem como funções fonte, a partir das quais se podem derivar símbolos representacionais, tais como a intensidade das emissões de partículas. Vejamos a seguir o que pode ser uma analogia adequada para a “violação” da paridade. Seja “ R ” a propriedade de uma variável física ser real no sentido matemático. Com relação a muitos processos R é conservada, i.e. se a variável era inicialmente real, ela continua sendo real o tempo todo; porém alguns processos envolvem a “violação da realidade”. Exemplos de não-conservação de R são: (a) se um solenóide for acrescentado a uma resistência ôhmica num circuito elétrico, a impedância total⁴ se torna um parâmetro complexo; (b) na passagem de raios X do vidro para o ferro, o índice de refração do meio passa de um número real para um número complexo; (c) no espalhamento de “projéteis” atômicos por núcleos atômicos, há um ponto no qual o potencial de espalhamento, que é real a baixas energias, passa a ser complexo. Em todos os casos acima, dizer que R é violada significa dizer que a *descrição* de certos processos requer a substituição de uma variável real por uma variável complexa porque ocorre um novo fenômeno (indução no primeiro caso, e absorção nos dois últimos), para cuja descrição se necessita uma nova variável complexa.⁵ O significado físico da frase “ R é violada” deve, então, ser procurado nos *enunciados-objeto* que descrevem esses novos fenômenos, dos quais a hipótese da R -invariância não dá conta.

O caso da P -invariância é semelhante, mas um pouco mais um pouco mais complicado do que o seu análogo em termos de R -invariância. Na verdade, no enunciado ambíguo “a paridade não é conservada nas interações fracas”, estão envolvidos dois conceitos de paridade: (a) uma propriedade analítica das funções de estado, que são construtos que se referem à realidade de uma maneira extremamente indireta; (b) uma

⁴ O original traz aqui “a resistência total” [*the total resistance*], provavelmente um engano que escapou à revisão, uma vez que, nos circuitos elétricos, a resistência é sempre real, sendo a *impedância* que pode ser complexa, caso também esteja presente no circuito uma *reatância* capacitiva ou resistiva (que é sempre imaginária). (N. do T.)

⁵ O original traz aqui “uma nova variável real” [*a new real variable*]. (N. do T.)

propriedade de certos processos físicos (p. ex. o decaimento beta). No primeiro caso, o enunciado em foco se refere às *leis* que se supõe descreverem o fenômeno em questão: ele é, portanto, um meta-enunciado e, mais especificamente, um enunciado enunciado *metanomológico*, visto que, em vez de dizer respeito a uma instância particular, ele descreve uma característica básica das leis envolvidas na descrição teórica das interações fracas. No segundo caso, o enunciado sobre a não-conservação da paridade se refere a certos fenômenos descritos pelo enunciado de lei em questão, e é portanto um *enunciado-objeto*.

Pode-se extrair várias morais da história da “violação da paridade”. (1) Pode-se evitar muita confusão se a ambigüidade for reduzida enunciando-se cuidadosamente *o que* deve ser considerado como simétrico (ou invariante) em um certo sentido: as coisas (p. ex. os corpos), os fenômenos (p. ex. a emissão de partículas), as propriedades dos sistemas ou fenômenos (p. ex. distribuição angular), os termos teóricos ligados mais ou menos estreitamente às propriedades (p. ex. as hamiltonianas de interação), os enunciados de leis básicas⁶ (p. ex. equações de movimento), ou, finalmente, os enunciados de leis derivadas que podem ser testadas pelo experimento (p. ex. fórmulas nas quais ocorrem tanto a direção de movimento como o sentido de “rotação” do spin). Quando se discute as simetrias (ou invariâncias), tal indicação explícita deveria bastar para determinar se o que se tem em mente são os enunciados-objeto ou os meta-enunciados. (2) Embora os nossos retratos da realidade sejam controlados por meio do experimento e da observação, os enunciados sobre enunciados que ocorrem nesses retratos não descrevem, eles mesmos, os fatos; em particular, os enunciados metanomológicos, sejam eles factuais ou não, definitivamente não são diretamente descritivos. (3) As suposições mais perigosas da ciência (talvez as únicas) são aquelas feitas tacitamente, como acontecia com o enunciado metanomológico “todas as leis físicas são invariantes sob inversão espacial”. Essa suposição generalizante, uma inferência indutiva, impediu vários desenvolvimentos teóricos durante trinta anos, tais como experimentar hamiltonianas de interação não-*P*-invariantes, e desenvolver a teoria do neutrino de duas componentes, a qual fora esboçada e abandonada em 1929, por não ser invariante de paridade. (4) O óbvio às vezes está errado, e os enunciados nomológicos e metanomológicos mais confiáveis podem falhar em algum domínio; todos eles continuam sendo hipóteses, mesmo após repetidos testes favoráveis.

4. O valor de verdade dos enunciados metanomológicos factuais de tipo analítico

Admitindo-se que existem enunciados metanomológicos, surge agora a questão de se eles podem ser verdadeiros, e quando. Depois de estabelecer que um enunciado pode ser verdadeiro — um problema sintático e semântico —, podemos perguntar como ele é testado — uma questão metodológica —, e, finalmente, se ele é de fato verdadeiro, dentro de uma boa aproximação — um problema científico.

Parece claro que os enunciados metanomológicos factuais, que têm a forma “As leis *L* possuem a propriedade *F*”, podem ser verdadeiros. Sempre podemos decidir, pelo menos em princípio, se um dado conjunto de enunciados (sejam eles nomológicos ou não) possui a propriedade atribuída a ele por outro enunciado, contanto que tanto os enunciados-objeto como o meta-enunciado sejam bem formados e não possuam termos demasiado vagos (tais como “significativo” ou ‘simples’).

⁶ O original traz aqui “basic law statements” em vez da expressão que seria de se esperar, i.e. “basic law statements”, provavelmente por um simples erro de revisão. (N. do T.)

Consideremos o notável recém-chegado que é o teorema de paridade combinada de Luders-Pauli, o qual pode ser formulado da seguinte maneira: “Se uma teoria de campo local é invariante de Lorentz, então ela também é invariante sob inversão combinada de carga (C), tempo (T) e paridade (P)”. (Na realidade ‘ T ’ representa a inversão temporal combinada com conjugação complexa.) Primeiro, vamos nos certificar se esse enunciado representa uma lei da natureza. À primeira vista, o teorema CPT trata de certas operações conceituais (inverter os sinais das cargas e das coordenadas espaço-temporais), que podem ser efetuadas sobre as fórmulas que expressam as leis da natureza que se supõe (caridosamente) que sejam reproduzidas num nível fundamental pelas equações básicas. Não se vê os núcleons, elétrons e outras entidades (que tentamos descrever por meio das teorias de campo) viajando para o passado, ou invertendo as direções dos seus movimentos, ou se transmutando espontaneamente nas suas antipartículas, somente porque decidimos registrar o tempo, as coordenadas de posição e os valores das cargas — antes positivos — como sendo negativos. Nas operações de inversão de CPT está envolvida apenas uma mudança no modo de descrição.

É claro que as inversões de sinal envolvidas no teorema CPT não se referem aos fenômenos descritos pelas teorias de campo, mas à sua *descrição* feita com o auxílio de tais construtos: o teorema afirma que a descrição dos fenômenos de partículas elementares pode ser feita de duas formas equivalentes, uma das quais é a imagem especular da outra. Na realidade, o teorema nada afirma sobre as simetrias encontradas nos fenômenos, que são descritos através das soluções das equações básicas. O teorema CPT é um enunciado sobre certas simetrias (ou invariâncias) encontradas nos *enunciados* de leis básicas; essas simetrias reaparecem em *algumas* das conseqüências⁷ de baixo nível das equações básicas: ele é, portanto, um *enunciado metanomológico*, mesmo que possa ser tomado por um enunciado-objeto e, em particular, por uma lei da natureza. O que é verdadeiro é que um outro enunciado de metalei, mais prontamente compreensível, pode ser inferido a partir do teorema CPT, tomado em conjunção com a hipótese adicional de uma invariância separada em T , mais a definição de “antimatéria” (composta por elétrons positivos, antiprótons, etc) — a saber, “A antimatéria obedece às mesmas leis que a matéria”. Está claro que esse também é um meta-enunciado: ele se resume à afirmação de que a “antimatéria” (que nome infeliz!) não requer (por enquanto) a invenção de novas teorias, uma vez que as teorias relativísticas disponíveis são bivalentes; elas funcionam tanto para o mundo usual como para o seu dual. A propósito, note-se a analogia desse enunciado de metalei com os princípios de dualidade em matemática (p. ex. na geometria projetiva); eles também são metateoremas e permitem economizar trabalho.

Por que se diz que o teorema CPT funciona? Os experimentalistas não o colocaram sob teste. O que eles submeteram ao experimento são os *enunciados-objeto* aos quais refere-se o teorema CPT. Como eles poderiam testar o teorema CPT no laboratório, se ele não fala sobre os fenômenos, mas sim, basicamente, sobre os modos de descrição? Tentar fazer o teste empírico do teorema de paridade combinada seria como tentar provar, pelo experimento, que qualquer conjunto dado de equações de movimento pode ser derivado a partir de uma infinidade de lagrangianas, que diferem entre si apenas pela divergência de um vetor arbitrário. Qualquer verdade que exista no teorema CPT decorre de procedimentos puramente matemáticos: ele é uma proposição *analítica*. Isso não significa que ele seja um enunciado arbitrário: afinal, ele se refere a enunciados-objeto que são empiricamente testados. Assim, o teorema permanece ou cai [*will stand or fall*] juntamente com o restante da teoria, isto é, em

⁷ Ver a explicação dada na nota 3 (N. do T.)

última análise, em virtude da evidência empírica, mesmo que ele não seja testado pelo experimento.

Como segundo exemplo de enunciado metanomológico analítico, considere o princípio heurístico “Todas as leis físicas são deriváveis a partir de princípios variacionais”, que fundamenta o convite para se descobrir enunciados de alto nível, de grande poder unificador, em todos os ramos das ciências físicas. Esse enunciado é verdadeiro em relação àquela importante subclasse dos enunciados de leis físicas que podem receber a forma de equações diferenciais (uma vez que toda equação variacional implica uma ou mais equações diferenciais). Porém é fato que as equações integrais e íntegro-diferenciais não podem ser derivadas desse modo, e contudo necessitamos delas para a descrição dos fenômenos hereditários. Portanto, o enunciado metanomológico acima, tal como está, não é totalmente adequado; em vez disso, ele deveria ser reformulado para ficar: “Todos os enunciados exprimíveis como equações diferenciais são deriváveis a partir de princípios variacionais”. E, desta forma, a sua natureza sintática ou formal fica aparente: é uma verdade metamatemática, e portanto uma proposição analítica. Ela pode funcionar como uma regra para guiar a pesquisa, mas a sua veracidade independe de qualquer suposição física.

Concluimos que alguns enunciados metanomológicos factuais são justificados por operações puramente lógicas ou formais; conseqüentemente, deveríamos chamá-los de *enunciados metanomológicos analíticos*.

5. O tipo sintético de enunciado metanomológico factual

Outros enunciados metanomológicos não se enquadram tão bem nas teorias científicas ou matemáticas quanto os enunciados metanomológicos analíticos; eles não podem ser demonstrados, embora possam ser justificados *a posteriori*. Esse é o caso dos enunciados metanomológicos que funcionam como postulados de uma teoria.

Considere o princípio da covariância geral, um postulado da relatividade geral. Ele pode ser formulado de várias maneiras, mais ou menos equipolentes: às vezes como um enunciado-objeto, ocasionalmente como um meta-enunciado, e freqüentemente de maneira ambígua. Um exemplo do primeiro tipo de formulação é: “Todos os sistemas de coordenadas transformáveis mutuamente através transformações ponto-a-ponto arbitrárias [*arbitrary point transformations*] são fisicamente equivalentes”. Por outro lado, “As equações que expressam leis físicas básicas são invariantes na forma [*form invariant*] com respeito a transformações contínuas gerais de coordenadas” é claramente um enunciado metanomológico. Ainda outras formulações podem ser interpretadas de qualquer um dos modos, por conterem a frase “leis da natureza”,⁸ que pode designar tanto um padrão objetivo (caso em que está em jogo um enunciado-objeto) quanto um enunciado nomológico — caso em que estamos diante de um enunciado metanomológico. Exemplos de tal ambigüidade são: “As leis da natureza não dependem de nenhum sistema de referência privilegiado”, “As leis da natureza valem para sistemas de referência em qualquer tipo de movimento”, e “As leis da natureza não dependem do sistema de referência do observador”.

A justificativa para se afirmar enunciados metanomológicos desse tipo está nos frutos que eles trazem, i.e. no êxito dos *enunciados-objeto* a que eles se referem; esse êxito, por sua

⁸ O original traz “laws *and* nature” em vez de “laws *of* nature”, provavelmente por falha de revisão. As frases seguintes do texto não deixam dúvida que é a segunda forma que deve ser preferida. (N. do T.)

vez, é medido, é claro, pela quantidade de predições verdadeiras e explicações abrangentes originadas pelo enunciado-objeto (em conjunção com outros enunciados de leis e com pedaços de informação empírica). Sendo um axioma de uma teoria factual, o princípio da covariância geral, na sua roupagem metanomológica, bem pode ser corrigido ou até abandonado, embora, no momento atual, uma mudança radical nele pareça ser improvável, devido ao seu profundo importe filosófico, na medida em que ele afirma, entre outras coisas, que as leis-objeto da física são independentes do observador (daí estarem fadadas ao fracasso as tentativas de interpretar a teoria da relatividade em termos operacionalistas).

Pode-se dizer algo semelhante em relação a outro enunciado metanomológico básico, a saber, “As teorias de campo corretas são invariantes de gauge”, que também pode ser formulado de uma maneira deôntica, que é esta: “As teorias de campo devem ser invariantes de gauge”. Note em primeiro lugar que aquilo que se requer que seja invariante sob certas transformações são as *teorias*, e em particular os seus enunciados básicos, as equações de campo fundamentais ou os princípios variacionais que as originam; não os campos, mas sim as *equações* de campo é que devem ser invariantes sob certas mudanças nas variáveis de campo (potenciais ou funções de onda). Note ainda que, desse modo, é asseverado que há infinitas descrições alternativas, equivalentes entre si, para cada conjunto de fatos. (Isso é compatível com a interpretação segundo a qual as funções submetidas às transformações de gauge, i.e. os potenciais eletromagnéticos, não possuem significado físico independente, no contexto da teoria de campos no vácuo [*free field theory*], mas são funções-fonte a partir das quais se pode derivar as funções com significado físico, como as intensidades de campo. Os potenciais adquirem um significado físico nas teorias hamiltonianas de partículas com carga, onde se pode ver que eles contribuem para o momento da partícula.)

Parece claro, então que o princípio de invariância de gauge é um enunciado metanomológico. É certo que ele não é um mandamento arbitrário: nós o aceitamos porque a sua violação teria conseqüências falsas, pelo menos na eletrodinâmica. Com efeito, a não-invariância⁹ das equações do campo eletromagnético com respeito às transformações de gauge iria implicar: (a) a não-conservação da carga elétrica, o que contradiz as melhores evidências empíricas; (b) a existência de uma massa do fóton, o que contradiz tanto as evidências empíricas quanto a teoria da relatividade restrita (a despeito dos muitos textos que atribuem uma massa ao fóton em virtude do teorema de equivalência entre massa e energia, que é deduzido na mecânica relativística de partículas).

Em resumo, os enunciados metanomológicos factuais são hipóteses a serem validadas, em última análise, pelo experimento e pela sua concordância com princípios metacientíficos aceitos (p. ex. princípios epistemológicos): eles não são simplesmente sentenças sintáticas do tipo “O termo ‘lei’ é um nome universal”. Tampouco eles são diretamente testáveis no laboratório: os enunciados metanomológicos factuais, se não forem analíticos, são hipóteses confirmadas ou infirmadas através do desempenho dos enunciados-objeto das leis às quais eles se referem.

6. Enunciados metanomológicos normativos

Estas são *condições extralógicas e extra-epistemológicas* impostas aos enunciados das leis, e funcionam como regras que restringem as suas possíveis escolhas. O representante mais bem

⁹ O original traz aqui “*nonconservation*”, porém em português estamos acostumados a atribuir a conservação ou não-conservação somente às *grandezas*, e a invariância ou não-invariância às *equações*. (N. do T.)

conhecido desse tipo de enunciado de alto nível é, provavelmente, o princípio da relatividade restrita, a saber: “As leis do movimento devem ser as mesmas em todos os referenciais em movimento de translação uniforme uns em relação aos outros”.

Os enunciados metanomológicos normativos não são requisitos de tipo filosófico, como a condição lógica (e controversa) de que todos os enunciados de leis devem ser implicações gerais da forma “Para todo x , se x é um F , então x é um G ”, ou como o requisito epistemológico (e igualmente controverso) de que todos os enunciados de leis devem conter somente predicados diretamente observáveis. A colocação e a discussão dos enunciados metanomológicos normativos é geralmente feita pelos cientistas, não pelos filósofos; além do mais, certos princípios regulativos desse tipo com frequência constituem os principais focos de luz de que se valem os físicos para construir as teorias, especialmente na pesquisa de ponta.