

O conceito de simetria na Física

The symmetry concept in Physics

MARCO ANTONIO MOREIRA*¹

¹Instituto de Física da UFRGS Caixa Postal 15051 91501-970 Porto Alegre, RS

Resumo

A ideia de simetria é abordada, inicialmente, como parte do cotidiano e depois como um conceito central na Física. São apresentados significados do conceito no contexto da Física e são dados exemplos. É destacada a relação entre simetria e leis de conservação, expressa no teorema de Noether. Boa parte do texto é dedicada ao conceito de quebra espontânea de simetria. A proposta do texto é a de enfatizar o papel da simetria na construção do conhecimento físico.

Palavras-chave: simetria. Física. Leis de conservação. Quebra espontânea de simetria.

*moreira@if.ufrgs.br

Abstract

The idea of symmetry is, initially, approached as part of everyday life and, after, as a central concept in physics. Meanings of the concept of symmetry are presented in the context of physics and examples are given. The relationship between symmetry and conservation laws, as expressed by Noethers theorem, is emphasized. A significant part of the text is dedicated to the concept of spontaneous symmetry breaking. The aim of this paper is to call attention to the role of symmetry in the construction of physics knowledge.

Keywords: *Symmetry. Conservation laws. Spontaneous symmetry breaking.*

I. INTRODUÇÃO

Simetria parece ser um conceito trivial. Estamos acostumados com simetrias. Tudo que é bem redondinho, bem quadradinho é simétrico. Tudo o que está bem arrumado, como uma mesa para quatro pessoas que tem quatro pratos, quatro pares de talheres, quatro copos, é simétrico e por aí vai. A simetria permeia o cotidiano e sempre tem a ver com ordem. Talvez por parecer senso comum esse conceito não receba atenção no ensino.

No entanto, o conceito de simetria permeia também as ciências. No caso da Física, suas leis básicas, os enunciados mais fundamentais que se pode fazer sobre a natureza, estão sedimentados na simetria (LEDERMAN; HILL, 2004, p. 13). Simetria é um conceito-chave na Física.

Diz-se que um sistema físico tem simetria se for feita uma mudança nesse sistema tal que após essa mudança o mesmo continue exatamente como era antes. Chama-se de *operação de simetria* ou *transformação de simetria* à mudança ocorrida. Se o sistema permanece igual quando sofre uma transformação, diz-se que ele é invariante sob essa transformação (op. cit., p. 15).

Em resumo, *simetria é uma invariância de um objeto ou sistema frente a uma transformação.*

Mas que transformação seria essa? Por exemplo, se leis físicas são invariantes frente a rotações de qualquer ângulo, diz-se, então, que essas leis têm *invariância rotacional*.

Além da invariância rotacional, leis físicas apresentam também *invariância de reflexão* ou *de paridade*, ou seja, são as mesmas à direita e à esquerda. Durante quase trezentos anos as invariâncias de rotação e reflexão eram os únicos exemplos de simetria de leis físicas que os físicos percebiam e, por isso, simetria não era ainda um conceito fundamental em Física (ZEE, 2007, p. 51).

Na Física Clássica, na Mecânica e no Eletromagnetismo, por exemplo, rotar um sistema por um certo ângulo ou deslocá-lo para a esquerda ou para a direita não altera a simetria das leis físicas aplicáveis, embora possa alterar a simetria das situações envolvidas.

Mas há outras simetrias, outras invariâncias, como a da *translação* que pode ser, por exemplo, *espacial* ou *temporal*. *Invariância espacial* significa que as leis da Física são as mesmas em qualquer lugar do espaço. *Invariância temporal* significa que as leis da Física são as mesmas em qualquer tempo, i.e., ontem, hoje, amanhã, daqui a alguns ou muitos anos.

Como já foi dito, simetria é um conceito muito importante na Física e implica a noção de invariância. No entanto, é importante não confundir simetria de leis físicas com simetria de situações físicas específicas. No uso da Lei de Gauss para a Eletricidade, por exemplo, costuma-se falar em simetria esférica, cilíndrica ou planar de determinadas distribuições de cargas elétricas, situações às quais a lei é facilmente aplicável para cálculo do campo elétrico. A integral que aparece na Lei de Gauss é facilmente resolvível se houver uma dessas simetrias na distribuição de cargas. *Mas simetria das leis físicas é outra coisa* (MOREIRA, 2011, p. 53).

II. SIMETRIA E LEIS DE CONSERVAÇÃO

Em Física, simetria tem a ver com leis de conservação, ou seja, com enunciados que dizem que o valor de uma certa quantidade física não muda mesmo que o sistema físico passe por transformações, mudanças. A mais conhecida das leis de conservação é a da *conservação da energia*, segundo a qual em qualquer processo físico pode-se definir uma quantidade chamada energia total (dada pela soma da energia cinética, energia potencial, energia térmica, energia elétrica e outras formas de energia) do sistema que permanece constante independente de quaisquer mudanças que ocorram nesse sistema (op. cit., p. 49).

Outras leis de conservação muito conhecidas, e importantes, na Física Clássica são as leis de *conservação do momentum* (linear e angular) e a lei de *conservação da carga elétrica*.

Na Física de Partículas, também há leis de conservação como, por exemplo, a *conservação do número bariônico* e a *conservação da estranheza*. Número bariônico é o número total de bárions presente em um sistema físico menos o número total de antibárions. Bárions são partículas compostas por quarks, como os prótons e os nêutrons, que interagem fortemente. Antibárions são as antipartículas dos bárions. Então, a lei de conservação do número bariônico diz que em todas as interações entre partículas elementares o número de bárions menos o número de antibárions permanece constante na interação (ibid.).

Outra lei de conservação na Física de Partículas é a da estranheza, uma propriedade de toda a matéria que possui um quark estranho. No Modelo Padrão há seis quarks e um deles recebe o nome de estranho por apresentar, na sua produção e decaimento, propriedades não usuais. Em uma interação forte a estranheza se conserva, ou seja, a estranheza total do sistema não muda. Estranheza é uma propriedade da matéria, análoga à carga elétrica, a qual algumas partículas têm e outras não. O que é, realmente, a estranheza não se sabe (assim como não se sabe, de fato, o que é carga elétrica ou o que é energia), mas isso não importa. O que importa é que físicos inventam conceitos e regras que lhes permitem prever o resultado de fenômenos naturais. Estranheza é um conceito inventado para prever quais reações ocorrerão e quais não ocorrerão. É um conceito que funciona muito bem, sem que se tenha que saber exatamente o que é (ibid.).

III. O TEOREMA DE NOETHER

Antes de prosseguir com outros exemplos de simetrias e conservações, cabe registrar um importante resultado matemático conhecido por Teorema de Noether (MARTINS, 1999), demonstrado pela grande matemática Amalie Emmy Noether (1882-1935): *para cada*

simetria das leis físicas (entendida como sua inabilidade em detectar, por exemplo, translações espaciais, rotacionais ou temporais) *existe uma correspondente lei de conservação* (LEDERMAN; TERESI, 1993, p. 350). Quer dizer, *simetria e conservação são conceitos físicos intrinsecamente relacionados*. Em outras palavras, o Teorema de Noether conecta diretamente simetria e Física e vice-versa (LEDERMAN; HILL, 2004, p. 15).

IV. SIMETRIA E CONSERVAÇÃO NA FÍSICA DE PARTÍCULAS

O fato de que não há diferença intrínseca entre esquerda e direita, de que um processo e sua imagem especular ocorram na mesma taxa de variação, é conhecido como *conservação da paridade* (simetria P). Na linguagem física, dizer que a natureza é invariante frente à simetria P significa que qualquer processo físico observado em um espelho segue as mesmas leis do processo não refletido. Parece uma coisa óbvia, mas essa simetria é quebrada na interação fraca envolvida em certos decaimentos radioativos (MOREIRA, 2011, p. 54).

Analogamente, processos físicos observáveis ocorreriam com a mesma probabilidade se todas as partículas fossem substituídas por suas correspondentes antipartículas. Esta simetria é conhecida como *conjugação de carga*, ou *reversão da carga* (simetria C) (ibid.).

Ao nível microscópico, as leis físicas para um processo e para sua reversão temporal (ou seja, a passagem do filme da realidade de trás para frente) são também equivalentes. É o caso da *reversão do tempo* (simetria T).

V. QUEBRA DE SIMETRIA

Até aqui falou-se muito em conservação e simetria, mas há quantidades que não se conservam como, por exemplo, a entropia e a massa (a equação de Einstein, $E = mc^2$, estabelece uma equivalência entre massa e energia; assim, o que se conserva continua sendo a energia, não a massa).

Na Física de Partículas, as simetrias mencionadas anteriormente são simetria P (conservação da paridade), simetria C (reversão da carga) e simetria T (reversão do tempo).

De um modo geral, em casos de quebra da simetria P (não conservação da paridade) mantém-se a simetria CP. Em raras ocasiões a simetria CP também é quebrada e isso pode ter a ver com a assimetria matéria-antimatéria no Universo, ou seja, a predominância da matéria sobre a antimatéria. A quebra de simetria CP teria permitido que partículas e antipartículas decaíssem em taxas diferentes (COLLINS, 2005, p. 58).

As primeiras evidências de quebra da simetria T em processos microscópicos foram obtidas há apenas alguns anos no CERN (Laboratório Europeu para Física de Partículas) e no Fermilab, em Batavia, Illinois, em reações envolvendo Káons (mésons K) neutros. Acredita-se, no entanto, que a simetria CPT tenha sido mantida.

No Modelo Padrão da Física de Partículas, a simetria CPT é uma propriedade fundamental do Universo. Violações significativas dessa simetria indicariam problemas conceituais no Modelo Padrão e sugeririam a necessidade de teorias que fossem além dele (Moreira, 2011, p. 55).

VI. QUEBRA ESPONTÂNEA DE SIMETRIA

Como deve ter ficado claro até aqui, simetrias são importantes, mas o Universo usualmente não apresenta perfeita simetria. Quando uma simetria não é exata os físicos dizem que houve uma *quebra de simetria* (RANDALL, 2013, p. 43). Essa quebra é dita espontânea quando a simetria quebrada é preservada pelas leis físicas, mas não pelo modo que as coisas, de fato, estão organizadas no mundo. *Uma quebra espontânea de simetria* ocorre quando o sistema não pode preservar a simetria que estaria presente segundo as leis físicas (op. cit., p. 46).

Por exemplo, suponhamos uma mesa de jantar preparada de modo que há um copo de água entre cada dois lugares nessa mesa. Há uma simetria, mas cada participante pode usar o copo que está a sua direita ou a sua esquerda. A simetria esquerda-direita existe até que alguém toma um desses copos. Nesse momento, a simetria esquerda-direita é espontaneamente quebrada. Mas essa simetria continua por trás da quebra. Ou seja, fica camuflada (ibid.).

Na prática, o nome quebra espontânea de simetria não é apropriado porque sugere que a simetria foi destruída, quando o certo é que ela continua existindo, embora não apareça, está escondida.

Vejamos o caso da quebra espontânea de simetria na interação fraca que era um problema para o Modelo Padrão.

No Modelo Padrão (a teoria da Física de Partículas) interações, campos e partículas mediadoras são elementos fundamentais. A cada campo está associada uma partícula mediadora da interação e esta deve ser entendida como uma excitação energética do campo. Na interação eletromagnética a partícula mediadora é o fóton. Na interação forte (nuclear) a mediação é feita por glúons e na interação fraca pelas partículas W e Z. (A interação gravitacional seria mediada por grávitons, mas estes nunca foram detectados e o Modelo Padrão não consegue incorporar a gravitação.)

O problema é que o Modelo Padrão está consistentemente apoiado por leis, equações matemáticas e simetrias que levam à conclusão de que todas as partículas mediadoras teriam massa nula, mas as partículas W e Z têm massa. Aí está o problema: fótons e glúons têm massa nula, mas as partículas W e Z, mediadoras da interação fraca, não têm massa nula.

O fato de as partículas W e Z terem massa é considerado uma quebra espontânea de simetria na interação fraca. Essa quebra passou a ser um problema do Modelo Padrão, para o qual foi proposta uma solução supondo a existência de um novo campo (de Higgs), uma nova interação (de Higgs) e uma nova partícula mediadora (o bóson de Higgs). Essa proposta foi feita em 1964 pelo físico escocês Peter Higgs e outros físicos. Depois de uma longa jornada, com muitos esforços, muitos experimentos e muitos recursos financeiros, essa nova partícula mediadora, o bóson de Higgs, foi detectada, com muita euforia, em 4 de julho de 2012.

O campo de Higgs ocuparia todo o espaço, inclusive o vazio. Seria, metaforicamente, semelhante a um líquido transparente viscoso com o qual, interagiriam partículas que tivessem a propriedade chamada carga fraca. Nessa interação experimentaríamos uma fricção, andariamos mais devagar, ficaríamos mais lentos. Essa vagarosidade, essa lentidão é que corresponderia à aquisição de massa, pois partículas sem massa viajam através do vácuo

com a velocidade da luz (RANDALL, 2013, p. 73).

Generalizando, a existência desse campo de Higgs permite entender porque a maioria das partículas elementares têm massa e outras não. As que têm massa são as que interagem com o campo de Higgs e as que não têm massa não interagem com esse campo.

O fato de que no Universo há muito mais matéria do que antimatéria é também interpretado como ocorrência de uma quebra espontânea de simetria. Ou seja, nos primórdios do Universo, nos primeiros momentos do Big Bang, houve uma quebra espontânea de simetria na produção de matéria e antimatéria ou uma quebra da simetria CP.

Ferromagnetismo é outro exemplo clássico de quebra espontânea de simetria na Física. Em temperaturas elevadas os spins atômicos apontam aleatoriamente no espaço e o sistema é dito estatisticamente simétrico rotacionalmente. Mas quando são magnetizados, em temperaturas baixas, os spins se alinham em qualquer uma de infinitas direções possíveis. Nesse caso, a simetria da invariância rotacional estatística parece ter sido quebrada por um sistema que parece conhecer uma direção preferida no espaço. Mas isso ocorre ao acaso. É uma seleção aleatória de uma direção no espaço. A simetria estatística rotacional continua subjacente ao sistema e pode voltar a aparecer em altas temperaturas (LEDERMAN; HILL, 2004, p. 197).

O diagrama apresentado na Figura 1 procura estruturar conceitualmente tudo que foi observado até aqui sobre simetria na Física. É um mapa conceitual (MOREIRA, 2010) sobre simetria.

VII. CONCLUINDO

Na seção anterior foi destacada a importância dos conceitos de quebra de simetria e quebra espontânea de simetria na Física, particularmente na Física de Partículas. Mas fiquemos com o conceito mais amplo de simetria:

Embora a teoria de tudo ainda nos iluda, a lição foi aprendida, sejam quais forem as novas respostas encontradas sobre o universo ou sua tecitura matemática, no centro estará simetria. (op. cit., p. 289)

Quer dizer, a Física vai crescer, surgirão novas perguntas e respostas, novas conjecturas, novos modelos e teorias. Cada vez saberemos mais sobre os 95% desconhecidos (matéria escura e energia escura) do Universo. Mas a ideia de simetria (e sua quebra espontânea) continuará permeando toda essa Física.

Paradoxalmente, no entanto, a importância deste conceito é minimizada, ou nem é trabalhada, nos livros de texto e nas aulas de Física. A modo de conclusão fica aqui o recado aos professores de Física e autores de livros didáticos: no ensino da Física é preciso dar mais atenção a conceitos estruturantes como simetria, quebra espontânea de simetria, leis de conservação e outros mencionados neste texto. Conceitos como estes implicam pensar, ao invés de decorar fórmulas. A Física pode ser apaixonante, mas dentro da cultura formulística, memorística, comportamentalista que predomina no seu ensino nas escolas preparatórias para exames nacionais e internacionais, isso raramente ocorre.

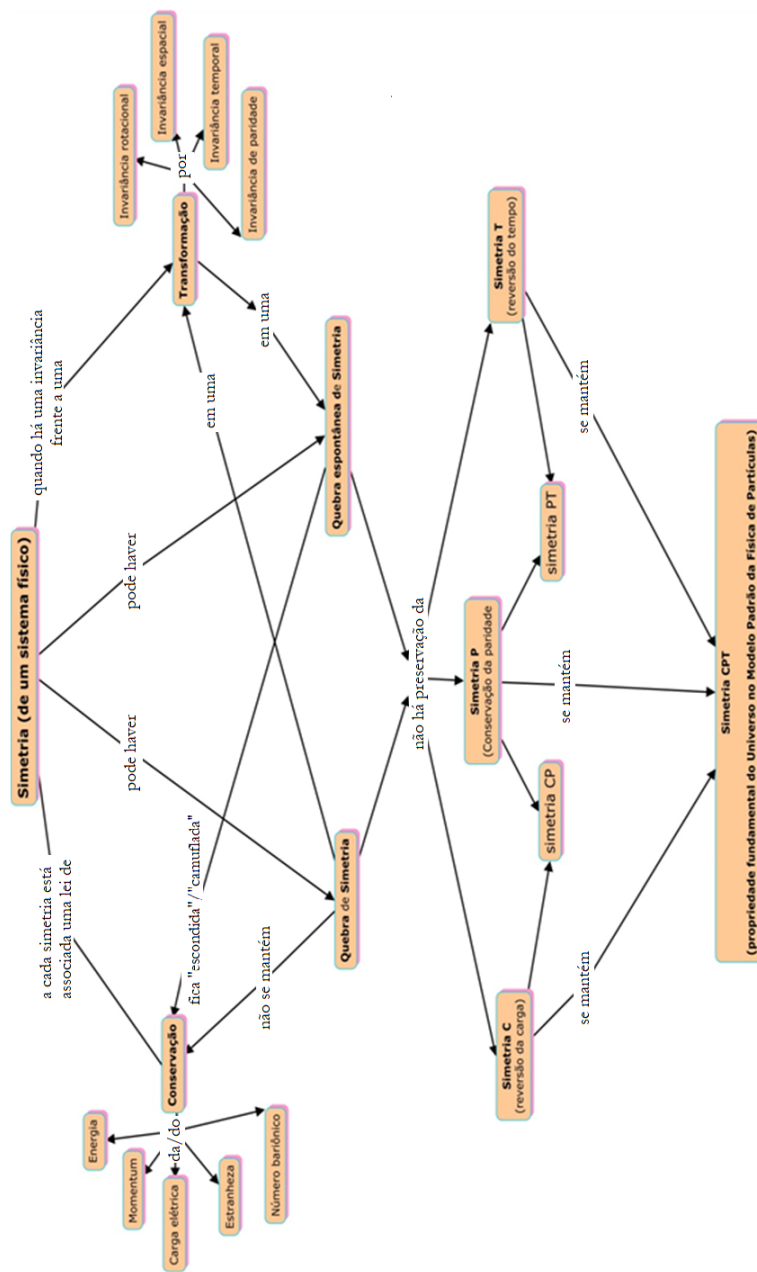


Figura 1: Um mapa conceitual para o conceito de simetria na Física

REFERÊNCIAS

- COLLINS, G. Making cold antimatter. *Scientific American*, p. 57–63, June 2005. 4
- LEDERMAN, L.; HILL, C. *Symmetry and the beautiful universe*. Amherst, N.Y.: Prometheus Books, 2004. 2, 4, 6
- LEDERMAN, L.; TERESI, D. *The God particle. If the universe is the question, what is the answer?* New York: Dell Publishing, 1993. 4
- MARTINS, A. Simetrias e leis de conservação na mecânica clássica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 21, n. 2, p. 33–39, 1999. 3
- MOREIRA, M. *Mapas conceituais e aprendizagem significativa*. São Paulo: Centauro Editora, 2010. 6
- MOREIRA, M. *Física de Partículas: uma abordagem conceitual e & epistemológica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011. 3, 4
- RANDALL, L. *Higgs Discovery: The power of empty space*. New York: Harper Collins Publisher, 2013. 5, 6
- ZEE, A. *Fearful symmetry. The search for beauty in modern physics*. Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2007. 2