

LEIS DE CONSERVAÇÃO E SIMETRIA

JOÃO DA PROVIDÊNCIA

Departamento de Física, Universidade de Coimbra

As leis de conservação desempenham em Física um papel primordial. Através de argumentos de carácter elementar mostra-se que estas leis são manifestações de propriedades de simetria dos sistemas físicos. Deste modo, surge a Simetria como o princípio unificador da grande variedade de leis de conservação.

As leis de conservação desempenham em Física um papel primordial. Recordemos, para apenas referirmos alguns exemplos familiares, a Conservação da Energia, a Conservação da Quantidade de Movimento, a Conservação do Momento Angular, a Conservação da Massa, a Conservação da Carga Eléctrica, etc. Na génese da formulação das leis de conservação encontra-se, como não podia deixar de ser, a adesão sem reservas ao método experimental, segundo o paradigma galiliano. São múltiplos os factores que contribuem para o progresso científico. Assim, importa, também, não ignorar a influência das concepções teórico-filosóficas dominantes. E não foi livre de escolhos o caminho que conduziu ao entendimento que hoje temos destas leis.

Admite-se, presentemente, que subjacente a uma lei de conservação se encontra sempre uma simetria do sistema físico. E o que é simetria? Segundo Weil, simetria «é uma ideia pela qual o homem através dos tempos tem tentado compreender e criar ordem, beleza e perfeição». Quando se refere a um sistema físico, significa invariância das suas propriedades face a determinada transformação. Os princípios de invariância e as leis de conservação estão intimamente relacionados. A célebre matemática alemã do princípio do século, Emmy Noether, provou um teorema famoso que sintetiza essa relação. Se uma certa simetria contínua é realizada em determinado sistema físico, então as propriedades desse sistema obedecem a uma

lei de invariância correlativa. O Teorema de Noether caracteriza precisamente a(s) quantidade(s) cuja conservação é implicada por determinada simetria.

Se aplicarmos uma translação ou rotação espaciais ao equipamento científico utilizado em determinada experiência de Física, e, em seguida, repetirmos essa mesma experiência, esperamos, naturalmente, que os resultados se não alterem. Assim acontece, de facto. Quando afirmamos que o espaço é homogéneo e isotrópico apenas queremos significar que as coisas se passam deste modo. E quando afirmamos que o tempo é homogéneo apenas queremos significar que voltaremos a obter os mesmos resultados se, volvidos segundos ou anos, repetirmos a experiência efectuada.

É sabido que a Conservação da Energia se encontra associada à homogeneidade do tempo. Afirmar que o tempo é homogéneo equivale a admitir que as propriedades dos sistemas físicos não dependem da origem dos tempos, isto é possuem simetria de translação no tempo. Consideremos, a título de exemplo, o modelo mecânico constituído por uma partícula de massa m sujeita à acção dum potencial externo $V(\mathbf{r}, t)$, função da posição \mathbf{r} e do instante t . Veremos que, se o tempo é homogéneo para este sistema, então o potencial não depende de t . Com efeito, se mudarmos a origem dos tempos do instante 0 para o instante t_0 o potencial passa a ser $V(\mathbf{r}, t - t_0)$. Mas, ser o tempo é homogéneo, significa que esta operação não vai

Leis de Conservação e Simetria

Translações, Rotações e Reflexões

Conservação de Energia

Conservação da Quantidade de Movimento

Conservação do Momento Angular

Conservação da Carga Eléctrica

alterar o potencial. Por conseguinte, $V(\mathbf{r}, t - t_0)$ não depende de t_0 . Isto é, $V(\mathbf{r}, t - t_0) = V(\mathbf{r}, t)$. Fazendo $t = t_0$, vem $V(\mathbf{r}, t_0) = V(\mathbf{r}, 0)$. O potencial tem no instante t_0 o mesmo valor que tinha no instante 0. De acordo com um resultado elementar, a energia mecânica, soma das energias cinética $\frac{1}{2}mv^2$ e potencial $V(\mathbf{r})$, conserva-se, isto é, não varia com o tempo.

Analogamente, a Conservação da Quantidade de Movimento, está associada à homogeneidade espacial (inexistência de origem preferencial das coordenadas espaciais) e a Conservação do Momento Angular está associada à isotropia do espaço, (inexistência de direcções espaciais preferenciais). Por exemplo, conserva-se o momento angular dum ponto material sujeito à acção dum campo central (campo isotrópico) e a quantidade de movimento dum ponto material livre.

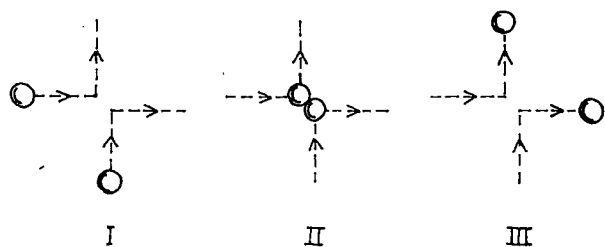


Fig. 1 — A quantidade de movimento conserva-se no choque de duas bolas de bilhar.

A homogeneidade e isotropia do Espaço são propriedades tão importantes que, sem elas, como observou Wigner, ficaria comprometida a própria existência do património científico que a humanidade usufrui. Com efeito, se as equações que descrevem as propriedades dos sistemas físicos flutuassem ao sabor do instante convencionalmente designado por inicial, ou do ponto arbitrariamente escolhido para origem das coordenadas, então careceria a Natureza da regularidade necessária à catalogação e à própria existência de leis científicas.

O estudo das relações entre Leis de Conservação e Princípios de Simetria assume uma importância crucial em Física, porque conduz a uma classificação natural dos fenómenos conhecidos e permite prever novos fenómenos.

Simetrias há que não são susceptíveis duma interpretação no contexto de transformações geométricas do espaço euclidiano ordinário. Embora as respectivas operações de simetria tenham lugar em espaços abstractos onde apenas o espírito nos permite penetrar, são bem palpáveis as respectivas consequências. Encontra-se neste caso a simetria isotópica. São manifestações desta simetria, característica das interacções fortes, a existência de certas famílias de partículas (ou de estados quânticos) que, embora apresentando cargas eléctricas diferentes, pos-

suem massas (energias) muito próximas. Por exemplo, a família do Nucleão com os seus dois membros, Protão e Neutrão, ou a família do mesão π com os seus três membros, π^+ , π^- e π^0 . São igualmente manifestações desta simetria as semelhanças notáveis entre as propriedades dos chamados «núcleos espelho» (mirror nuclei, por exemplo, o Lítio ${}^7\text{Li}$ (3 prótons e 4 neutrões) e o Berílio ${}^7\text{Be}$ (4 prótons e 3 neutrões)). Do mesmo modo que os multipletos atómicos, cuja existência é revelada pela presença de um campo magnético, constituem indícios seguros da conservação do momento angular e, portanto, da isotropia do espaço físico, assim também a existência dos multipletos de isospin constituem indícios da isotropia do espaço isotópico. Para que uma simetria se manifeste é necessário quebrá-la ligeiramente. Esse papel é desempenhado no caso atómico, relativamente à simetria de rotação, pelo campo magnético e no caso nuclear, relativamente à simetria isotópica, pelas interacções electromagnética e fraca.

O estudo das leis gerais que regem as reacções químicas conduziu à teoria atómica de Dalton e à classificação dos elementos de Mendeleev. Do mesmo modo, o estudo de reacções entre hádrões (designação genérica das partículas sujeitas à interacção forte, tais como nucleões, e mesões) conduziu à descoberta de novos hádrões em elevado número, de novas regularidades e de novas leis de conservação as quais, por sua vez conduziram à classificação desses mesmos hádrões, e daqueles que progressivamente iam sendo descobertos, revelando a surpreendente existência de famílias. Essas famílias puderam ser consideradas manifestações de novas simetrias até então desconhecidas. Inversamente, admitindo-se que determinada lei de simetria é obedecida, podem ser identificadas as famílias de partículas que lhe estão associadas, e previstas as propriedades dos seus membros. Deste modo Gell-Mann previu, em 1969, a existência duma partícula de vida curta até então desconhecida, a ressonância Ω^- . A simetria $SU(3)$ ¹ postulada por Gell-Mann conduziu à descoberta dos quarks, os «átomos» (isto é, os constituintes «indivisíveis») da estrutura dos hádrões.

Claro que importa submeter sempre à mais rigorosa ratificação experimental todas as leis de conservação, por mais convincentes que sejam os princípios de simetria em que se apoiam. Coincidirão as leis do mundo real com as respectivas reflexões num espelho?

Se substituirmos o equipamento científico utilizado em determinada experiência de Física por novo equipa-

¹ Designa-se por $SU(3)$ o conjunto das transformações de vectores de componentes complexas que preservam os comprimentos dos vectores. Essas transformações têm lugar em lugares que aos sentidos são inacessíveis. A descoberta do mundo subatómico é uma aventura empolgante onde a imaginação se torna realidade.

mento cujas peças são a imagem no espelho das peças iniciais, e, em seguida, repetimos essa mesma experiência, esperamos, naturalmente, que os resultados se não alterem, ou melhor, que os novos resultados sejam a reflexão no espelho, dos antigos. Quando se afirma que o espaço possui simetria de reflexão, apenas se quer significar que as coisas se passam deste modo. Nada fazia prever que assim não fosse.

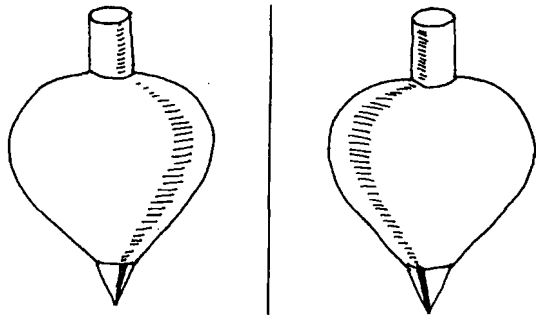


Fig. 2 — O pião em repouso não se distingue da sua imagem no espelho.

E, na verdade, a esta simetria obedecem as interações forte e electromagnética e não é fácil conceber que o mesmo se não passe com as restantes leis físicas. Foi por isso com viva surpresa e estupefacção que, em 1956, a comunidade científica tomou consciência, através de resultados experimentais respeitantes a processos dominados pela interação fraca, da assimetria da Natureza relativamente à operação de reflexão. O chamado enigma $\theta-\tau$, que consistia no facto de duas partículas então supostamente distintas, mas que possuíam massas e modos de formação idênticos, decaírem, uma em dois e outra em três mesões π . Tudo apontava para que o θ e o τ não passassem de dois modos de declínio distintos da mesma partícula. No entanto, tal interpretação, que por um lado parecia ser naturalmente imposta pela evidência experimental, não se coadunava com um pretensso princípio da conservação da paridade, já que os sistemas de dois e três mesões π constituídos pelos produtos do declínio possuíam paridades opostas. Se a paridade se conserva, um estado par ou simétrico (estado associado ao valor próprio $+1$ do operador paridade) não pode dar origem a um estado ímpar ou antissimétrico (estado associado ao valor próprio -1 do operador paridade). Do mesmo modo que a função $\sin x$ é ímpar, o mesão π tem paridade intrínseca -1 . A paridade da função $\sin^n x$, ou do sistema de n mesões π é $(-1)^n$. Não se compreendia que n pudesse ser ora par ora ímpar. Lee e Yang resolveram o enigma postulando que a paridade não era conservada nas interações fracas. Apesar da ausência de suporte experimental convincente, a fé na simetria de reflexão era tal que a maior parte da comu-

nidade científica rejeitou de início, a sugestão de Lee e Yang. Feynman fez uma aposta de 50 contra 1 na conservação da paridade. Não tardou que a conjectura de Lee e Yang fosse confirmada sem sombras para dúvidas por factos experimentais. Em 1957, Wu estudou o declínio β do Cobalto 60 que se dá segundo a reacção ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$. O cobalto da amostra utilizada na experiência estava polarizado, isto é, o seu spin encontrava-se orientado segundo uma direcção determinada. Observou-se que a emissão de electrões resultantes do declínio era claramente assimétrica em relação ao plano equatorial do Cobalto. Feynman perdeu a aposta.

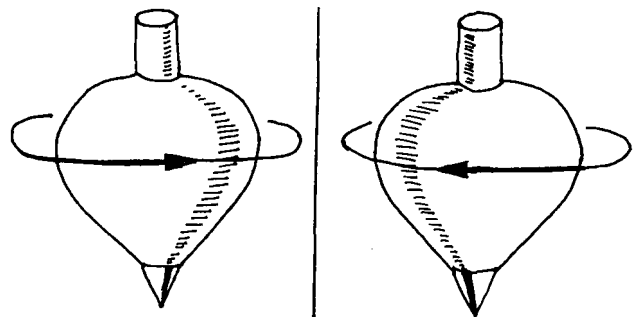


Fig. 3 — Quando o pião roda, o sentido da rotação permite distinguir o pião da sua imagem no espelho. Analogamente, o declínio β do Cobalto 60 não coincide com a reflexo no espelho.

Faremos agora uma breve referência à conservação da carga eléctrica. Que princípio de simetria está subjacente a esta lei de conservação? Nos finais do Sec. XIX, Maxwell unificou as teorias clássicas da electricidade e do magnetismo, mas para isso teve de as modificar e completar de modo a torná-las compatíveis com a equação de continuidade, que exprime a conservação da carga eléctrica. O estado electromagnético do vácuo é caracterizado por um potencial escalar ϕ e por um potencial vector \mathbf{A} . Estes campos, no entanto, não são univocamente determinados. Se a ϕ subtrairmos a derivada temporal dum campo escalar arbitrário χ e a \mathbf{A} adicionarmos o gradiente de χ , os novos campos, obtidos por meio desta transformação denominada transformação de calibre, descrevem o mesmo estado do vácuo. Dizemos que o vácuo electromagnético possui simetria de calibre. Esta propriedade generaliza o facto bem conhecido de ser irrelevante a origem dos potenciais (isto é, o valor arbitrariamente atribuído ao potencial de determinado ponto tomado para referência) e está intimamente relacionada com a conservação da carga eléctrica. Por sua vez, a invariância de calibre do electromagnetismo é completada pela invariância de calibre quântica que afirma a arbitrariedade da fase da função de onda (factor multiplicativo de módulo unitário). Prova-se que a invariância de calibre assegura a con-

servação da norma da função de onda, pelo que permite atribuir a esta função o significado de amplitude da densidade de probabilidade, ou, se preferirmos, da densidade de carga. A invariância de calibre determina, pois, a conservação da carga eléctrica. Admite-se presentemente que as forças fundamentais da natureza, electromagnética, fraca, forte e gravítica, são geradas por mecanismos análogos.

Em Física, o tema da Simetria é inesgotável. Esta nota apenas deve ser entendida como um convite à visita de uma área fascinante da Ciência. Lembramos que não nos detivemos a referir a relevância de muitas outras operações, tais como a conjugação de carga, relativa à troca entre matéria e antimatéria, a inversão no tempo, a transformação de Lorentz, etc. Em jeito de conclusão, diremos apenas que a Simetria é, por excelência, a chave dos segredos da Natureza.

BIBLIOGRAFIA

- WEYL, Hermann — *Symmetry*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1952.
- MORRISON, P. — *The overthrow of parity*, *Sc. American*, 196, no. 4, 45-53 (1957).
- WIGNER, E. P. — *Violations of Symmetry in Physics*, *Scientific American*, 213, no. 6, 26-36 (1965).
- NAMBU, Y. — *Quarks — Frontiers in Elementary Particle Physics*, World Scientific, Philadelphia, Singapore, 1985.
- BARROSO, A. — *De que são feitas as coisas*, Colóquio/Ciência 2 3 (1988), Fundação Calouste Gulbenkian.
- FEYNMAN, R. P. — *O que é uma lei Física?*, Gradiva 1989 (em especial caps. 3 e 4)

João da Providência é professor catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Física.

COMEMORAÇÕES DOS 100 ANOS DA DESCOBERTA DOS RAIOS X

SIMPÓSIO CIENTÍFICO

A Radiação X no Desenvolvimento Científico e na Sociedade

Lisboa, 28 a 30 de Setembro de 1995

No âmbito das Comemorações da descoberta de Röntgen, pretende-se congregar todos os utilizadores de radiação X para fins científicos e técnicos, dando divulgação ao trabalho realizado pelas diferentes instituições. As sessões decorrerão no Anfiteatro Manuel Valadares, Museu de Ciência da Universidade de Lisboa, Rua da Escola Politécnica.

O Simpósio incidirá essencialmente sobre os seguintes temas: 1. Aspectos históricos; 2. Espectroscopias de Raios X: absorção e emissão; 3. Análise química por fluorescência de Raios X; 4. PIXE e suas aplicações; 5. Difusão e difracção de Raios X, em monocristais, policristais, sistemas pouco ordenados; 6. Os Raios X na Arte e Arqueologia; 7. Os Raios X e a Química Forense; 8. Astronomia de Raios X; 9. Novas fontes de Raios X e novas tecnologias de aplicação; 10. Detectores de Raios X; 11. Radiografia e Fractografia; 12. Protecção contra radiação; 13. Outros.

Os temas serão tratados em conferência plenária, conferências convidadas, sessões orais (em número limitado) e painéis. Haverá ainda uma exposição de instrumentação. Pretende-se publicar um volume com as Actas do Simpósio, bem como o resultado de um levantamento sobre o trabalho científico realizado em Portugal neste domínio, nos últimos dez anos, e a instrumentação actualmente disponível, no País. No dia 29 de Setembro, sexta-feira, haverá um jantar-convívio, para o qual se devem inscrever todos os que desejarem participar.

Comissão Científica: Luís Alte da Veiga, Manuel Alves Marques, João Bessa Sousa, Fernando Bragança Gil, Ana Margarida Damas, Celso Figueiredo Gomes, José Lima Faria, José Lopes Nunes, Luís Roldán, Lídia Salgueiro.

Comissão Organizadora: L.Fraser Monteiro, Pres., M.Teresa Ramos, M.Ondina Figueiredo, M.Arménia Carrondo.

Boletim de Inscrição

Nome _____ Instituição _____

Morada _____

Código Postal _____

Pretende apresentar: Comunicação Oral Painel

Título _____

Tema n.º _____ (data limite para apresentação de resumos: 31 de Julho)

Desejo participar no jantar (5000\$00 por pessoa)

Inscrição: 7000\$00 (até 30 de Junho); 10 000\$00 (posterior); 5000\$00 estudantes

Devolução, em caso de desistência, até 31 de Julho.

Junto cheque n.º _____, sobre _____

no valor de _____

em nome de Maria Teresa Ramos (informações: fax 01 - 795 42 88).

Enviar para: Prof. Doutora M. Teresa Ramos, Centro de Física Atómica, Av. Prof. Gama Pinto, 1699 Lisboa Codex.