

Mais é diferente

Philip Warren Anderson
(1923-2020)



Original: “More is different”, *Science* 177 (1972) pp. 393-6.

“O autor é membro do corpo técnico do Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey 07974, e professor visitante de física teórica no Cavendish Laboratory, Cambridge, Inglaterra. Este artigo é uma versão expandida de uma palestra Regents’ Lecture dada em 1967 na University of California, La Jolla” (nota na p. 393). Nascido em Indianapolis, EUA, ganhou o Prêmio Nobel em Física de 1977 por sua pesquisa sobre a estrutura eletrônica de sistemas magnéticos e desordenados.

Tradução feita por Osvaldo Pessoa Jr. para a disciplina Filosofia da Física, Universidade de São Paulo, 2017.

Mais é diferente

Simetria quebrada e a natureza
da estrutura hierárquica da ciência

P.W. Anderson

[393] Pode ser que a hipótese reducionista ainda seja um tópico de controvérsia entre filósofos, mas para a grande maioria dos cientistas ativos parece-me que ela é aceita sem questionamento. Supõe-se que o funcionamento de nossas mentes e corpos, e de toda a matéria animada ou inanimada da qual temos qualquer conhecimento detalhado, seja controlado pelo mesmo conjunto de leis fundamentais, que achamos que conhecemos bem exceto sob certas condições extremas.

Parece ser inevitável procedermos de maneira acrítica para o que parece ser, à primeira vista, um corolário óbvio do reducionismo: de que se tudo obedece às mesmas leis fundamentais, então os únicos cientistas que estudam algo realmente fundamental seriam aqueles que trabalham com essas leis. Na prática, isso equivaleria a alguns astrofísicos, alguns físicos de partículas elementares, alguns lógicos e outros matemáticos, e alguns outros. Este ponto de vista, ao qual o presente artigo visa a se opor, é expresso em um trecho razoavelmente bem conhecido de Weisskopf¹:

Olhando para o desenvolvimento da ciência no século XX pode-se distinguir duas tendências, que chamarei pesquisa “intensiva” e “extensiva”, na falta de uma terminologia melhor. Sucintamente: a pesquisa intensiva busca as leis fundamentais, a pesquisa extensiva busca a explicação de fenômenos em termos das leis fundamentais conhecidas. Como sempre, distinções desta espécie não carecem de ambiguidades, mas elas são claras na maioria dos casos. A física do estado sólido, a física de plasmas e talvez também a biologia são extensivas. A física de altas energias e boa parte da física nuclear são intensivas. Há sempre muito menos pesquisa intensiva sendo feita do que extensiva. Quando leis fundamentais são descobertas, inicia-se uma atividade grande e cada vez maior visando aplicar as descobertas a fenômenos ainda não explicados. Assim, há duas dimensões na pesquisa básica. A fronteira da ciência se estende ao longo de uma longa linha, partindo da pesquisa intensiva mais nova e moderna, passando pela pesquisa extensiva recentemente gerada pela pesquisa intensiva de ontem, até a teia bem desenvolvida de atividades de pesquisa extensiva baseada em pesquisa intensiva de décadas passadas.

¹ WEISSKOPF, VICTOR F. (1965), “In defence of high-energy physics”, in Yuan, L.C.L. (org.), *Nature of matter: purposes of high-energy physics*, Brookhaven National Laboratory Publication 888 (T-360), pp. 24-27, republicado in *CERN Courier* 5(4): 54-57 (1965), disponível em <http://nemenmanlab.org/~ilya/images/a/a4/Weisskopf-1965.pdf>. A citação está na p. 54. Ver também, do mesmo autor, “The connection between physics and other branches of science”, *Supplemento al Nuovo Cimento* 4: 465 (1966) e “Nuclear structure and modern research”, *Physics Today* 20(5): 23-26 (1967).

A efetividade desta mensagem pode ser indicada pelo fato de que eu a escutei de um líder da área de ciência dos materiais, que exortou os participantes de um encontro dedicado aos “problemas fundamentais em física da matéria condensada” a aceitarem que havia poucos ou nenhum desses problemas [intensivos] e de que nada havia restado senão ciência extensiva, que ele parecia igualar à engenharia de dispositivos.

A principal falácia neste tipo de pensamento é que a hipótese reducionista de maneira nenhuma implica a “construcionista” [*constructionist*]: a habilidade de reduzir tudo a leis fundamentais simples não implica a habilidade de partir dessas leis e reconstruir o universo. De fato, quanto mais os físicos de partículas elementares nos falam da natureza das leis fundamentais, menos relevância elas parecem ter para os problemas muito reais do resto da ciência, e muito menos para aqueles da sociedade.

A hipótese construcionista rui quando confrontada com a dificuldade dupla da escala e da complexidade. Acontece que o comportamento de grandes e complexos agregados de partículas elementares não deve ser entendido em termos de uma simples extrapolação das propriedades de poucas partículas. Pelo contrário, a cada nível de complexidade surgem propriedades inteiramente novas, e a compreensão dos novos comportamentos requer pesquisa que considero tão fundamental em sua natureza quanto qualquer outra. Ou seja, parece-me que se pode ordenar as ciências, de maneira aproximadamente linear, em uma hierarquia de acordo com a seguinte ideia: as entidades elementares da ciência X obedecem as leis da ciência Y.

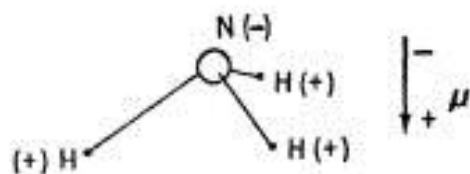
X	Y
física do estado sólido ou de muitos corpos	física das partículas elementares
química	física de muitos corpos
biologia molecular	química
biologia celular	biologia molecular
⋮	⋮
psicologia	fisiologia
ciências sociais	psicologia

Mas esta hierarquia não implica que a ciência X seja “apenas Y aplicada”. A cada estágio são necessários leis, conceitos e generalizações inteiramente novos, exigindo inspiração e criatividade em um grau tão grande quanto no anterior. A psicologia não é biologia aplicada, nem a biologia é química aplicada.

No meu próprio campo de física de muitos corpos, talvez estejamos mais próximos de nossas escoras intensivas e fundamentais do que em qualquer outra ciência em que ocorram complexidades não triviais, e como resultado disso começamos a formular uma teoria geral de como ocorre exatamente esta transição de uma diferenciação quantitativa para uma qualitativa. Tal formulação, chamada de teoria da “simetria quebrada” [*broken symmetry*], pode ajudar a tornar mais clara em geral a quebra do lado inverso construcionista do reducionismo. Fornecerei uma explicação elementar e incompleta dessas ideias, e depois passarei a tecer alguns comentários especulativos mais gerais sobre analogias [394] em outros níveis e sobre fenômenos semelhantes.

Antes de começar a fazer isso, gostaria de distinguir duas fontes possíveis de mal-entendidos. Em primeiro lugar, quando digo que uma mudança de escala causa uma mudança fundamental, não estou me referindo à ideia mais ou menos bem compreendida de que fenômenos em uma nova escala podem de fato obedecer a diferentes leis fundamentais – exemplificado pela relatividade geral, que é requerida na escala cosmológica, e pela mecânica quântica, que é requerida na atômica. Acho que se pode aceitar que toda matéria ordinária obedece à eletrodinâmica simples e à teoria quântica, e isso cobre realmente a maior parte do que irei discutir. (Como eu disse, precisamos todos começar com o reducionismo, que eu aceito integralmente.) Uma segunda fonte de confusão pode ser o fato de que o conceito de simetria quebrada foi tomado emprestado pelos físicos de partículas elementares, mas o seu uso do termo é estritamente uma analogia, sendo que resta entender se seria uma profunda ou ilusória.

Deixe-me então começar minha discussão com um exemplo no nível mais simples possível, um exemplo natural para mim, pois trabalhei com ele quando era aluno de pós-graduação: a molécula de amônia. Naquela época todo mundo conhecia a amônia e a utilizava para calibrar sua teoria ou seu aparelho, e eu não era uma exceção. Os químicos lhe dirão que a molécula de amônia “é” uma pirâmide triangular, com o nitrogênio carregado negativamente e o hidrogênio positivamente, de forma que ela tem um momento de dipolo elétrico (μ), negativo no sentido do ápice da pirâmide. Agora isso me parecia muito estranho, pois eu estava sendo ensinado que nada [isolado] tem um momento de dipolo elétrico. O professor estava na verdade provando que nenhum núcleo tem um momento de dipolo, porque ele estava ensinando física nuclear, mas como os seus argumentos estavam baseados na simetria do espaço e do tempo, eles deveriam ser corretos em geral.



Eu logo aprendi que, de fato, eles estavam corretos (ou talvez fosse mais acurado dizer não incorretos), porque ele tinha sido cuidadoso ao dizer que nenhum estado estacionário de um sistema (ou seja, um que não se altera com o passar do tempo) tem um momento de dipolo elétrico. Se o estado inicial da amônia for o estado assimétrico representado acima, ele não permanecerá nele por muito tempo. Por meio do tunelamento quântico, o nitrogênio pode vazar através do triângulo de hidrogênios até o outro lado, invertendo a pirâmide de dentro para fora, e isso pode ser feito muito rapidamente. Esta é a chamada “inversão”, que ocorre a uma frequência de aproximadamente $3 \cdot 10^{10}$ por segundo. Um estado verdadeiramente estacionário só pode ser uma superposição igual da pirâmide assimétrica e de sua inversa. Essa mistura [aliás, superposição] não tem um momento de dipolo. (Aviso novamente ao leitor que estou fazendo uma simplificação enorme, e peço que consulte um livro didático para maiores detalhes.)

Não farei a demonstração, mas o resultado é que o estado do sistema, se ele for estacionário, deve sempre ter a mesma simetria que as leis de movimento que o governam. Um motivo pode ser colocado de maneira muito simples: na mecânica quântica há sempre uma maneira, salvo quando alguma simetria proíba, de passar de um estado para outro. Assim, se sairmos de qualquer estado assimétrico, o sistema fará uma transição para outros, de maneira que é só somando todos os possíveis estados assimétricos de maneira simétrica que se pode obter um estado estacionário. A simetria envolvida no caso da amônia é a paridade, a equivalência entre a orientação da mão

direita e esquerda. (A descoberta dos físicos experimentais de partículas elementares, de certas violações da paridade, não é relevante a esta questão, pois esses efeitos são muito fracos para afetar a matéria ordinária.)

Tendo visto como a molécula de amônia satisfaz o nosso teorema de que não há momento de dipolo, podemos examinar outros casos e, em particular, estudar sistemas progressivamente maiores para ver se o estado e a simetria estão sempre relacionados. Há outras moléculas piramidais semelhantes, feitas de átomos mais pesados. O fosfeto de hidrogênio, PH_3 , que é duas vezes mais pesado do que a amônia, inverte, mas a uma frequência de um décimo em relação à da amônia. Em relação ao trifluoreto de fósforo, PF_3 , em que o flúor muito mais pesado substitui o hidrogênio, não se observa inversão a uma taxa mensurável, apesar de que se pode teoricamente ter certeza de que um estado preparado em uma orientação inverteria em um tempo razoável.

Podemos então prosseguir para moléculas mais complicadas, como o açúcar, que tem em torno de 40 átomos. Para estas não faz mais sentido esperar que molécula se inverta. Toda molécula de açúcar feita por um organismo vivo é uma espiral em um único sentido, e elas nunca invertem, quer por tunelamento quântico, quer mesmo por agitação térmica a temperaturas normais. A esta altura devemos esquecer da possibilidade de inversão e ignorar a simetria de paridade: as leis de simetria não foram anuladas, mas foram quebradas.

Se, por outro lado, sintetizarmos nossas moléculas de açúcar através de uma reação química mais ou menos em equilíbrio térmico, veremos que na média não haverá mais moléculas orientadas de acordo com a mão esquerda do que com a direita, ou vice-versa. Na ausência de qualquer coisa mais complicada do que uma coleção de moléculas livres, as leis de simetria não são nunca quebradas, na média. Precisamos de matéria viva para produzir uma assimetria atual nas populações.

Em realmente grandes, mas ainda inanimados, agregados de átomos, uma espécie diferente de simetria quebrada pode ocorrer, novamente levando a um momento de dipolo resultante [*net dipole moment*] ou a um poder de rotação óptica resultante, ou a ambos. Muitos cristais têm um momento de dipolo resultante em cada célula unitária elementar (piezoelectricidade), e em alguns este momento pode ser invertido por um campo elétrico (ferroelectricidade). Esta assimetria é um efeito espontâneo da busca do cristal por seu estado de menor energia. Claro que o estado com o momento oposto também existe e tem, por simetria, exatamente a mesma energia, mas o sistema é tão grande que nenhuma força térmica ou quântica consegue causar uma conversão de um para o outro em um tempo finito comparado, digamos, com a idade do universo.

Há pelo menos três inferências a serem feitas disso. A primeira é que a simetria é de grande importância na física. Por simetria queremos dizer a existência de diferentes pontos de vista a partir dos quais o sistema parece o mesmo. É apenas um leve exagero dizer que a física é o estudo da simetria. A primeira demonstração da força desta ideia pode ter sido feita por Newton, que pode ter se perguntado: e se a matéria que está aqui em minhas mãos obedecer às mesmas leis que a lá nos céus – ou seja, e se o espaço e a matéria forem homogêneos e isotrópicos?

A segunda inferência é que a estrutura interna de uma porção de matéria não precisa ser simétrica, mesmo que o estado total o for. Eu desafio o leitor a começar com as leis fundamentais da mecânica quântica e prever a inversão da amônia e suas propriedades facilmente observáveis sem passar pelo estágio de usar a estrutura piramidal assimétrica, apesar de nenhum “estado” jamais ter esta estrutura. É fascinante que foi só há algumas décadas² que a física nuclear parou de pensar no núcleo como

² BOHR, A. & MOTTELSON, B.R. (1953), “Collective and individual-particle aspects of nuclear structure”, *Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, Matematisk-fysiske Meddelelser* 27: 1-174.

uma bolinha simétrica e sem traços [*featureless*], e percebeu que enquanto ele realmente nunca tem um momento de dipolo, ele pode adotar a forma de uma bola de futebol americano [395] ou de um prato. Isso tem consequências observáveis nas reações e nos espectros de excitação que são estudados em física nuclear, apesar de ser muito mais difícil de demonstrar diretamente do que a inversão da amônia. Na minha opinião, quer se chame isso de pesquisa intensiva ou não, ele é tão fundamental na natureza quanto muitas coisas que podem ser assim chamados. Mas ele não precisou de nenhum conhecimento de leis fundamentais, e seria teria sido extremamente difícil de derivar sinteticamente a partir dessas leis; foi simplesmente uma inspiração, baseada é verdade na intuição cotidiana, que de repente fez tudo se encaixar.

A razão básica de porque este resultado teria sido difícil de derivar é importante para continuarmos a pensar. Se o núcleo é suficientemente pequeno, não há uma maneira real de definir rigorosamente seu formato: três ou quatro ou dez partículas girando em torno uma da outra não definem um “prato” ou uma “bola de futebol americano” em rotação. É só quando o núcleo é considerado um sistema de muitos corpos – no que é geralmente chamado de limite $N \rightarrow \infty$ – é que tal comportamento é rigorosamente definível. Dizemos a nós mesmos: um corpo macroscópico daquele formato teria tal-e-tal espectro de excitações rotacionais e vibracionais, o que teria natureza completamente diferente daquelas que caracterizariam um sistema sem traços. Quando vemos tal espectro, mesmo que não tão separado e um tanto imperfeito, reconhecemos que o núcleo não é, afinal de contas, macroscópico; ele está meramente se aproximando do comportamento macroscópico. Partindo das leis fundamentais e de um computador, teríamos que fazer duas coisas impossíveis – resolver um problema com um número infinito de corpos, e depois aplicar o resultado a um sistema finito – antes de sintetizar este comportamento.

Uma terceira sacada [*insight*] é que o estado de um sistema realmente grande não precisa de modo algum ter a simetria das leis que o governam; de fato, ele geralmente tem menos simetria. O destacado exemplo disso é o cristal: construído a partir de um substrato de átomos e espaço de acordo com leis que exprimem a perfeita homogeneidade do espaço, o cristal súbita e imprevisivelmente exhibe uma linda simetria inteiramente nova. A regra geral, no entanto, mesmo no caso do cristal, é que o sistema grande é menos simétrico do que a estrutura subjacente sugeriria: por mais simétrico que seja, um cristal é menos simétrico que a homogeneidade perfeita.

Talvez no caso de cristais isso pareça ser meramente um exercício de confusão. A regularidade de cristais pôde ser inferida semi-empiricamente em meados do século XIX sem um raciocínio muito complicado. Mas às vezes, como no caso da supercondutividade, a nova simetria – agora chamada de simetria quebrada porque a simetria original não está mais evidente – pode ser de uma espécie inteiramente inesperada e extremamente difícil de visualizar. No caso da supercondutividade, 30 anos se passaram entre a época em que os físicos estavam de posse de todas as leis fundamentais necessárias para explicá-la e a época em que isso de fato aconteceu.

O fenômeno da supercondutividade é o exemplo mais espetacular de simetrias quebradas a que são submetidos os corpos macroscópicos, mas é claro que não é o único. Antiferromagnetos, ferroelétricos, cristais líquidos e matéria em muitos outros estados obedecem um certo esquema um tanto geral de regras e ideias, que alguns teóricos de muitos corpos colocam sob a rubrica “simetria quebrada”. Não discutirei mais esta história, indicando uma pequena bibliografia em nota³.

³ Simetria quebrada e transições de fase: LANDAU, L.D. (1937), “Zur Theorie der Phasenumwandlungen. I. II.”, *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* 11: 26-47, 545-5 [tradução para o inglês em ter Haar, D. (org.) (1965), *Collected papers of L.D. Landau*, Pergamon, Oxford, pp. 193-216]. Simetria quebrada e

A ideia essencial é que no chamado limite $N \rightarrow \infty$ de sistemas grandes (a nossa própria escala macroscópica), não é só conveniente mas essencial perceber que a matéria passa por “transições de fase” matematicamente nítidas e singulares para estados nos quais as simetrias microscópicas, e mesmo as equações microscópicas de movimento, são em certo sentido violadas. A simetria deixa como traço de sua expressão apenas certos comportamentos característicos, por exemplo as vibrações de comprimento de onda grande, cujo caso familiar são as ondas sonoras; ou os fenômenos de condução macroscópica não usuais do supercondutor; ou, numa analogia profunda, a própria rigidez da rede cristalina, e portanto da maior parte do estado sólido. Não se trata, é claro, de o sistema estar realmente violando – em oposição a estar quebrando – a simetria do espaço e tempo, mas como é energeticamente mais favorável para suas partes manter certas relações fixas entre si, a simetria só permite que o corpo como um todo responda a forças externas.

Isso leva a uma “rigidez”, que é também uma descrição adequada para a supercondutividade e a superfluidez, apesar de seus comportamentos aparentemente “fluidos”. (No primeiro caso, London percebeu este aspecto desde cedo⁴.) De fato, para um hipotético cidadão gasoso mas inteligente de Júpiter ou de uma nuvem de hidrogênio em algum lugar no centro da galáxia, as propriedades de cristais ordinários poderiam ser uma charada mais espantosa e intrigante do que as do hélio superfluido.

Não pretendo dar a impressão de que tudo está resolvido. Por exemplo, acho que ainda há fascinantes questões de princípio sobre vidros e outras fases amorfas, que podem revelar tipos de comportamento ainda mais complexos. Mesmo assim, o papel desse tipo de simetria quebrada nas propriedades de corpos materiais inertes mas macroscópicos é hoje compreendido, pelo menos em princípio. Neste caso, podemos ver como o todo se torna não somente mais do que a soma de suas partes, mas muito diferente.

O próximo assunto logicamente é perguntar se uma destruição ainda mais completa das simetrias fundamentais do espaço e do tempo é possível, e se então surgem novos fenômenos, intrinsecamente diferentes da transição de fase “simples” representando uma condensação para um estado menos simétrico.

Já excluímos os casos aparentemente assimétricos dos líquidos, gases e vidros. (Em qualquer sentido real eles são mais simétricos.) Parece-me que o próximo estágio seja considerar o sistema que é regular mas contém informação. Ou seja, ele é em algum sentido regular no espaço, de maneira que possa ser “lido”, mas ele contém elementos que podem ser variados de uma “célula” para a próxima. Um exemplo óbvio é o DNA; na vida cotidiana, uma linha de tipo [de impressão] ou um filme de cinema têm a mesma estrutura. Esse tipo de “cristalinidade contendo informação” parece ser essencial para a vida. Não é claro se o desenvolvimento da vida requer alguma quebra de simetria adicional.

movimento coletivo, geral: GOLDSTONE, J.; SALAM, A. & WEINBERG, S. (1962), “Broken symmetries”, *Physical Review* 127: 965-70. ANDERSON, P.W. (1963), *Concepts in solids*, Benjamin, New York, pp. 175-82. JOSEPHSON, B.D. (1962), *Non-linear conduction in superconductors*, tese de doutorado, Trinity College, Cambridge University. Casos especiais, antiferromagnetismo: ANDERSON, P.W. (1952), “An approximate quantum theory of the antiferromagnetic ground state”, *Physical Review* 86: 694-701. Supercondutividade: ——— (1952), “Coherent excited states in the theory of superconductivity: gauge invariance and the Meissner effect”, *Physical Review* 110: 827-35. ——— (1958), “Random-phase approximation in the theory of superconductivity”, *Physical Review* 112: 1900-16. NAMBU, Y. (1960), “Quasi-particles and gauge invariance in the theory of superconductivity”, *Physical Review* 117: 648-63.

⁴ LONDON, F. (1950), *Superfluids*, vol. 1, Wiley, New York.

Seguindo em nossa tentativa de caracterizar tipos de simetria quebrada que ocorrem in coisas vivas, encontro que pelo menos mais um fenômeno parece ser identificável e ou universal ou muito comum, qual seja, ordenamento (regularidade ou periodicidade) na dimensão temporal. Várias teorias de processos vitais apareceram em que pulsamentos regulares no tempo desempenham um papel importante: teorias de desenvolvimento, de crescimento e limitação do crescimento, e de memória. A regularidade temporal é muito comumente observada em objetos vivos. Ela desempenha pelo menos duas espécies de papéis. Primeiro, a maioria dos métodos de extrair energia do ambiente com a finalidade de montar um processo contínuo e quase-periódico envolvem máquinas temporalmente periódicas, como osciladores e geradores, e os processos vitais funcionam da mesma maneira. Segundo, a regularidade temporal é uma maneira de manipular informação, semelhante à regularidade espacial contendo informação. A linguagem humana falada é um exemplo, e [396] é notável que todas as máquinas computacionais usam pulsamento temporal. Um possível terceiro papel é sugerido em algumas das teorias mencionadas acima: o uso de relações de fase de pulsos temporais para manipular informação e controlar o crescimento e desenvolvimento de células e organismos.⁵

Em algum sentido, a estrutura – estrutura funcional no sentido teleológico, em oposição à mera forma cristalina – deve também ser considerada um estágio, possivelmente intermediário entre cristalinidade e cadeias de informação, na hierarquia de simetrias quebradas.

Empilhando especulação sobre especulação, eu diria que o próximo estágio poderia ser a hierarquia ou a especialização de função, ou ambas. Em algum ponto temos que parar de falar em diminuição de simetria e começar a chamá-la de aumento de complicação. Assim, com aumento de complicação em cada estágio, ascendemos na hierarquia das ciências. Temos a expectativa de encontrar questões fascinantes, e creio que muito fundamentais, em cada estágio, ao encaixar peças menos complicadas dentro do sistema mais complicado, compreendendo os basicamente novos tipos de comportamento que podem resultar disso.

Pode ser que não haja um paralelo útil a ser traçado entre a maneira pela qual a complexidade surge nos casos mais simples, da teoria de muitos corpos e da química, e a maneira pela qual ela aparece nos casos verdadeiramente complexos da cultura e da biologia, salvo talvez para dizer que em geral a relação entre o sistema e suas partes é intelectualmente uma via de mão única. Espera-se que a síntese seja quase impossível; a análise, por outro lado, pode ser não só possível como frutífera de várias maneiras: sem uma compreensão da simetria quebrada na supercondutividade, por exemplo, Josephson provavelmente não teria descoberto seu efeito.⁶ Considerando outro exemplo, a biologia certamente adquiriu um aspecto totalmente novo com a redução da genética à bioquímica e à biofísica, que terá múltiplas consequências. Assim, não é verdade, como

⁵ COHEN, M.H. & ROBERTSON, A. (1971), “Wave propagation in the early stages of aggregation of cellular slime molds”, *Journal of Theoretical Biology* 31: 101-18.

⁶ Outro nome para o efeito Josephson é “fenômeno macroscópico de interferência quântica”: trata-se de efeitos de interferência observados entre funções de onda macroscópicas de elétrons em supercondutores, ou de átomos de hélio em hélio líquido superfluido. Esses fenômenos já estenderam enormemente a acurácia das medições eletromagnéticas, e pode-se esperar que desempenhem um papel importante em futuros computadores, entre outras possibilidades, de forma que a longo prazo eles possam levar a alguns dos maiores avanços tecnológicos desta década. Ver: CLARKE, J. (1969), “The Josephson effect and e/h ”, *American Journal of Physics* 38: 1071-95; ANDERSON, P.W. (1970), “How Josephson discovered his effect”, *Physics Today* 23 (nov.): 23-29.

colocado em um recente artigo⁷, que cada um de nós deve “cultivar nosso próprio vale, e não tentar construir estradas por sobre as cordilheiras [...] entre as ciências”. Pelo contrário, devemos reconhecer que tais estradas, enquanto geralmente o atalho mais rápido para outra parte de nossa própria ciência, não são visíveis do ponto de vista de uma única ciência.

A arrogância do físico de partículas e sua pesquisa intensiva pode já ter sido deixada para trás (o descobridor do pósitron [Paul Dirac] disse que “o resto é química”), mais ainda temos que nos recuperar daquela de alguns biólogos moleculares, que parecem determinados a tentar reduzir tudo sobre o organismo humano a “somente” a química, desde o resfriado comum e todas as doenças mentais até o instinto religioso. Certamente há mais níveis de organização entre a etologia humana e o DNA, do que entre o DNA e a eletrodinâmica quântica, e cada nível pode exigir uma estrutura conceitual toda nova.

Para finalizar, ofereço dois exemplos vindos da economia, para aquilo que espero ter dito. Marx falou que diferenças quantitativas tornam-se diferenças qualitativas, mas um diálogo em Paris, nos anos 1920, resume isso ainda mais claramente:

FITZGERALD: Os ricos são diferentes de nós.

HEMINGWAY: Sim, eles têm mais dinheiro.

⁷ PIPPARD, A.B. (1972), *Reconciling physics with reality*, Cambridge University Press, London.