

O problema que enfrentamos agora é que o modelo-padrão é muito elegante, muito vigoroso, explica tanta coisa — mas não é completo. Tem algumas falhas, e uma das maiores é estética. Tem demasiada quantidade de parâmetros arbitrários. Não podemos realmente imaginar o criador manipulando 17 botões para ajustar 17 parâmetros para criar o universo tal como o conhecemos. O quadro não é belo, e a busca da beleza, da simplicidade e da simetria tem sido uma orientação infalível sobre como proceder na física.⁹

Assim, os físicos do século passado ainda buscavam uma explicação mais simples e mais eficiente das interações fundamentais. O objeto de sua busca tinha o nome de teoria "unificada", significando isso geralmente uma teoria única que explicasse duas ou mais das forças então tratadas por teorias separadas. Foram guiados, na verdade, por dados experimentais e pelos desafios imediatos — o teórico se parece, como disse Einstein, a um "oportunistas inescrupuloso", que procura uma solução específica para um problema imediato com mais frequência do que procura formular uma explicação abrangente. Mas foram guiados também, como Lederman diz, pela esperança de que suas explicações da natureza pudessem aproximar-se mais da simplicidade elegante e da criatividade superlativa da própria natureza.

NOTAS

1. Planck, discurso do Prêmio Nobel, 1918, in Weaver, 1987, vol. II, p. 292.
2. In Moore, 1985, p. 127.
3. In Born, Max, 1971, p. 82. Grifos de Einstein.
4. Ibid., p. 91.
5. Ibid., p. 158.
6. In Clark, 1971, p. 34.
7. In Segrè, 1970, p. 69.
8. Veltman, palestra inédita feita no Caltech, 29 de abril de 1982.
9. Leon Lederman, entrevista com o autor, 24 de fevereiro de 1985.

RUMORES DE PERFEIÇÃO

Espírito do Belo, tu que consagraste
com tuas cores tudo o que iluminaste
no pensamento ou forma humanos, para onde foste?
Por que passaste, deixando este legado —
nosso vale de lágrimas, vazio e desolado?

Shelley, "Hino à beleza intelectual"

O universo está construído num plano cuja profunda simetria está, de alguma forma, presente na estrutura interna de nosso intelecto.

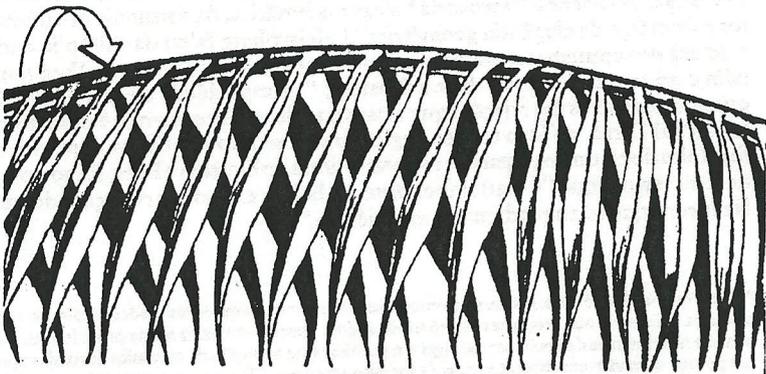
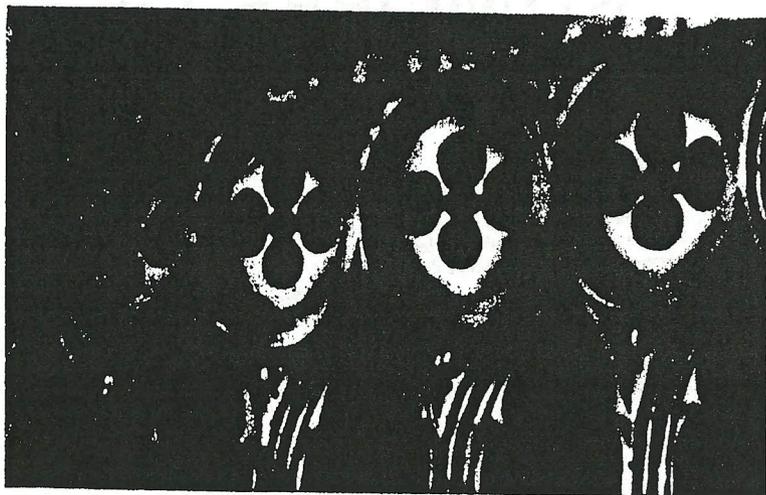
Paul Valéry

Os físicos teóricos, como os artistas (é-se tentado a dizer, como os outros artistas) são guiados em seu trabalho por preocupações tanto estéticas quanto racionais. "Para qualquer ciência, é necessário algo mais do que a pura lógica", escreveu Poincaré, que identificou esse elemento racional como a intuição, envolvendo "o senso da beleza matemática, da harmonia dos números e formas, e da elegância geométrica".¹ Heisenberg falou da "simplicidade e beleza dos esquemas matemáticos que a natureza nos apresenta. Você também deve ter sentido isso", disse a Einstein, "a simplicidade e a integralidade quase assustadoras das relações que a natureza de repente estende à nossa frente".² Paul Dirac, o físico teórico inglês cuja descrição relativista e quântico-mecânica do elétron equipara-se às obras-primas de Einstein e Bohr, foi ao ponto de lembrar-nos que "é mais importante ter beleza em nossas equações do que fazer com que se enquadrem na experiência."^{3*}

* Dirac queria dizer, é claro, não que devemos desconhecer totalmente os resultados empíricos, mas que uma bela teoria não precisa ser abandonada apenas porque não passa numa prova inicial. Ele pensava na relutância de Erwin Schrödinger em publicar suas equações da mecânica das ondas apenas porque entravam em choque com os dados experimentais. "É muito importante ter uma bela teoria", disse Dirac ao divulgador de ciência Horace Freeland Judson. "E se a observação não a confirmar, não nos devemos preocupar muito, e sim esperar um pouco para ver se não houve algum erro na observação."⁴

A estética é notoriamente subjetiva e a afirmação de que os físicos buscam a beleza em suas teorias só tem sentido se pudermos definir essa beleza. Felizmente isso é possível, até certo ponto, já que a estética científica é iluminada pelo sol central da *simetria*.

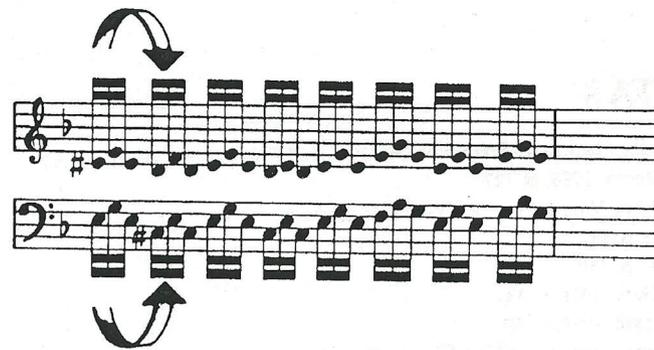
A simetria é um conceito venerável e infundável, com muitas implicações tanto na ciência como na arte. Muito depois de o físico sino-americano Chen Ning Yang ter ganhado um Prêmio Nobel pelo seu trabalho no desenvolvimento de uma teoria de campo de simetria, ele continuava a observar que "ainda não compreendemos *todo o âmbito* do conceito de simetria" (grifo de Yang).⁵ Em



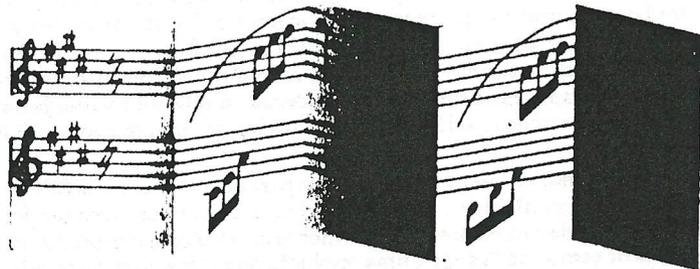
grego, a palavra significa "a mesma medida" (*sim* quer dizer "junto", com em "sinfonia", uma reunião de sons, e *metron*, de "medida"); sua etimologia nos informa, portanto, que simetria envolve a repetição de uma quantidade mensurável. Mas a simetria dos gregos também quer dizer "proporção devida", sugerindo que a repetição em questão devia ser harmoniosa e agradável. Isso sugere que a relação simétrica deve ser julgada por um critério estético superior, idéia à qual voltarei no final deste capítulo. Na ciência do século XX, porém, o aspecto antigo da velha definição é ressaltado: diz-se haver simetria quando uma quantidade mensurável permanece *invariável* (ou seja, inalterada) sob uma *transformação* (ou seja, uma alteração). Como esta definição tem grande relevância para o tema deste capítulo, vou utilizá-la no exame de todos os aspectos da simetria, inclusive os que estavam em uso geral antes de surgir a ciência.

A maioria das pessoas toma conhecimento da simetria, pela primeira vez, através de suas manifestações visuais na geometria e na arte. Quando dizemos, por exemplo, que uma esfera é rotacionalmente simétrica, indicamos que ela tem uma característica — no caso, a sua silhueta circular — que permanece invariável em todas as transformações provocadas pela sua rotação. A esfera pode ser girada em qualquer eixo e grau, sem perder sua silhueta, o que a torna mais simétrica do que, digamos, um cilindro, que só goza da simetria igual quando girado sobre seu eixo longo; se for girado em seu eixo curto, o cilindro se encolhe e sua silhueta passa a ser um círculo. As simetrias translacionais, como as encontradas em copas de palmeiras e fachadas de edifícios como o Palácio dos Doges em Veneza, ocorre quando uma forma permanece invariável se movida (transladada) a uma determinada distância ao longo de um eixo (ver ilustração, p. 236).

As simetrias são um lugar comum na escultura, a começar com o nu humano, que é (aproximadamente) de uma simetria bilateral visto de frente ou de costas, e na arquitetura, na planta térrea das catedrais medievais em forma de cruz, e surgem em tudo, desde a tecelagem até a dança da quadrilha. Há muitas simetrias na música. Bach, no trecho seguinte da *Tocata e fuga em mi menor* movimentada trios de notas, cujo formato é de uma tenda, para baixo e para cima, na pauta. Exceto por uma diferença ocasional numa nota aqui e ali, a construção é translacionalmente simétrica: se tirássemos um trio e o colocássemos sobre outro, o ajuste seria perfeito:



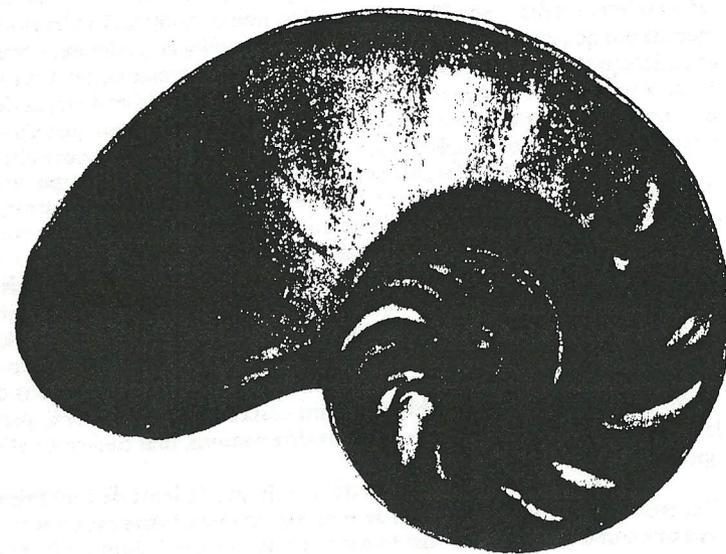
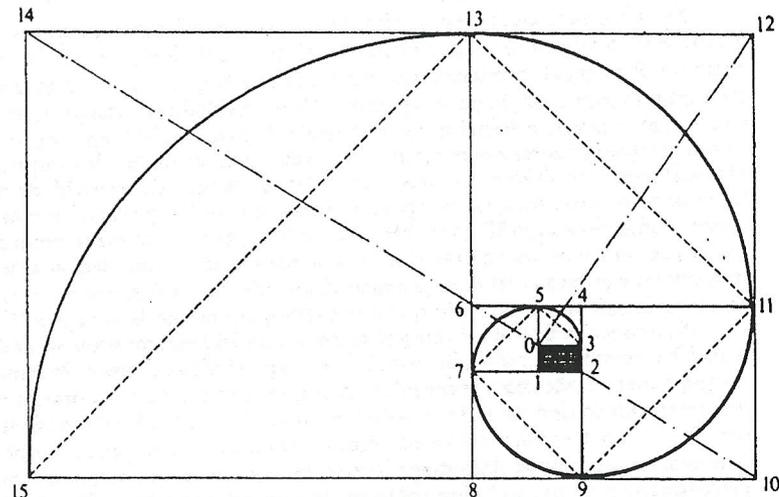
Os dois primeiros compassos dos *Deux arabesques* de Debussy são bilateralmente simétricos, tanto em si mesmos como mutuamente: a folha da partitura pode ser dobrada verticalmente no compasso, ou no meio de cada compasso, e as notas continuarão a se ajustar umas sobre as outras:



Sob essas manifestações visíveis e audíveis da simetria, estão invariâncias matemáticas mais profundas. Os padrões de espiral encontrados dentro do náutilo e na face dos girassóis, por exemplo, são aproximadamente da série Fibonacci, uma operação aritmética na qual cada unidade sucessiva é igual ao total das duas anteriores (1, 1, 2, 3, 5, 8 ...). A razão criada pela divisão de qualquer número nessa série pelo número que se segue a ele aproxima-se do valor 0,618* (ver p. 239). É essa, não incidentalmente, a fórmula da "proporção áurea", uma proporção geométrica que se evidencia no Partenon, na *Mona Lisa*, no *Nascimento de Vênus* de Botticelli, e é a base da oitava empregada na música ocidental desde a época de Bach. Toda a fecunda diversidade dessa simetria específica, expressa em múltiplas formas desde conchas marinhas e copas de pinheiros até o *Cravo bem temperado*, vem, portanto, de uma única invariância, a da série de Fibonacci. A compreensão de que uma simetria abstrata pode ter manifestações diversas e frutíferas provocou satisfação entre os eruditos do Renascimento, que citaram o fato como prova da eficácia da matemática e da sutileza dos desígnios de Deus. Mas isso foi apenas o começo. Muitas outras simetrias abstratas foram desde então identificadas na natureza — algumas intactas e outras "quebradas", ou falhadas — e seu efeito parece estender-se às próprias bases fundamentais da matéria e energia.

Isso nos traz de volta à ciência. Quando os matemáticos, em princípios do século XX, começaram a examinar mais de perto o conceito de simetria, compreenderam que as leis encontradas pela ciência na natureza são expressões de invariâncias — e podem, portanto, basear-se nas simetrias. Isso tornou-se evi-

* A razão é aproximada porque os números gerados pela série de Fibonacci são "irracionais", isto é, a razão pela qual convergem não pode ser expressa exatamente em termos de uma fração. Os pitagóricos descobriram os números irracionais, e conta-se que teriam ficado tão perturbados com eles que impuseram a pena de morte a qualquer membro da seita que revelasse a sua existência às multidões despreparadas. Hipaso foi banido por desafiar a proibição. Afogou-se no mar, sorte que os pitagóricos atribuíram ao castigo divino.



A série de Fibonacci, representada abstratamente (acima), é materializada na arquitetura do náutilo de várias câmaras (embaixo).

dente pela primeira vez em relação às leis de conservação. As leis da termodinâmica, por exemplo, identificam uma quantidade (energia) que permanece constante sob uma transformação (trabalho). O matemático alemão Emmy Noether demonstrou em 1918 que toda lei de conservação implica a existência de uma simetria. O mesmo ocorre, evidentemente, com as outras leis da natureza. Como disse o físico húngaro Eugene Wigner: "As leis da natureza não poderiam existir sem princípios de invariância",⁶ e a invariância, tenhamos sempre presente, é a assinatura da simetria.

Se as leis naturais expressam simetrias, então deveríamos ser capazes de buscar leis antes desconhecidas procurando relações simétricas (invariâncias) na natureza. Einstein absorveu esta lição e empregou a simetria como um guia no seu caminho para a criação de novas teorias. Na relatividade especial (que, lembramos, ele chamou originalmente de "teoria da invariância"), empregou as transformações de Lorenz para manter a invariância das equações de campo de Maxwell para observadores em movimento. Na teoria geral da relatividade ele fez mais ou menos a mesma coisa para observadores em campos gravitacionais fortes. Como seu amigo Wigner observou em 1949, falando numa solenidade em Princeton em honra de Einstein: "É hoje natural tentarmos derivar as leis da natureza e testar sua validade por meio das leis de invariância, e não deduzir as leis da invariância a partir do que acreditamos serem leis da natureza."⁷

Se o conceito de simetria era poderoso na relatividade, mostrou-se ainda mais forte quando aplicado à física quântica das partículas e campos. Podemos compreender a razão disso se considerarmos que as partículas subatômicas de um determinado tipo são indistinguíveis entre si. Todos os prótons são idênticos. Também o são os nêutrons e elétrons. O mesmo acontece com os campos: se tivermos dois campos eletromagnéticos e gravitacionais com os mesmos números quânticos, e um galhoifeiro os trocar quando não estivermos olhando, jamais poderemos dizer que fomos enganados, pois os campos são idênticos. Na medida em que a identidade é uma forma de invariância, podemos, portanto, considerar o elétron ou o próton, individuais, como representantes de um grupo de simetria que abrange todas as partículas do gênero. Além disso, podemos buscar simetrias maiores que poderiam ligar os vários grupos em questão — revelando, digamos, uma invariância antes não percebida que liga fótons e elétrons.

É esse, muito simplificado, o conceito básico da teoria do campo unificado, que não constitui simples exercício intelectual: Wigner, entre outros, descobriu que aplicando as invariâncias relativistas à mecânica quântica podia organizar todas as partículas subatômicas em grupos de simetria, classificando-as de acordo com sua massa de repouso e seu *spin*. Um exemplo ainda mais dramático da capacidade desbravadora da simetria ocorreu em 1928, quando Dirac derivou a equação quântica relativista do elétron, preservando as simetrias tanto da relatividade especial quanto da mecânica quântica, e descobriu que sua equação determinava a existência de um elétron de carga positiva. Era o primeiro indício de que poderia haver alguma coisa como a *antimatéria*, partículas com massa e *spin* idênticos aos da matéria comum, mas com carga elétrica oposta.

Dirac era matemático até a medula, epítome do lema de Karl Friedrich Gauss de que sempre que possível deve-se contar; quando passeava com um colega que comentou haver no lago 14 patos, Dirac corrigiu: "Quinze. Vi um mer-

gulhar."⁸ Era também um empirista de marca maior; certa vez em que um recém-chegado a Cambridge arriscou-se a dizer, para entabular conversaço: "Está ventando muito, professor", Dirac levantou-se, foi à porta, abriu-a, olhou para fora, voltou, sentou-se, refletiu por um momento, e então respondeu: "Está."⁹ Mas o conceito de antimatéria parecia tão estranho que até mesmo Dirac a princípio negou o veredicto de suas próprias equações. Tentou mostrar as novas partículas apenas como prótons já conhecidos, mas essa saída lhe foi fechada quando o matemático alemão Herman Weyl (autor de um tratado clássico sobre simetria) demonstrou que se a teoria de Dirac sobre o elétron não era um absurdo, teria de haver a antimatéria. A questão foi resolvida em favor da simetria em 1932, quando os antielétrons (chamados "positrons") previstos pela equação de Dirac foram descobertos por Carl Anderson, numa câmara úmida no Caltech. Antes de terminar a década, Dirac e Anderson tinham ganho o Prêmio Nobel.

Assim como a simetria pode ser usada para discernir a identidade de partículas antes desconhecidas, pode guiar a busca de campos desconhecidos. A aplicação mais destacada desse conhecimento ocorreu com o desenvolvimento da teoria de campo de "gauge", uma revolução que tem sido considerada, juntamente com a relatividade e a física quântica, como terceiro grande avanço teórico da física no século XX.

A primeira teoria de campo de "gauge" além do eletromagnetismo (o termo "gauge" tem uma história complexa e, de qualquer modo, é inadequado) foi formulada por Yang e seu colega Robert Mills no Laboratório Nacional de Brookhaven em 1954. Yang, filho de matemático, cresceu na China em meio à miséria da guerra. Estudou estatística e mecânica quântica em K'un-ming, tomando notas em salas de aula não aquecidas e subsistindo com um mínimo de alimentação; certa vez, teve de desenterrar seus manuais escolares entre as ruínas da casa alugada por sua família, que foi destruída por uma bomba japonesa. (A família, que estava no abrigo, sobreviveu.) Ainda estudante, Yang fascinou-se pelo que é chamado de invariância "gauge" do campo eletromagnético — a simetria implícita da qual Einstein deduziu que a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores.

Yang tinha esperanças de identificar uma invariância semelhante para a força nuclear forte. Um indício de que isso era possível estava no fato de que a força forte trata prótons e nêutrons da mesma maneira, embora os prótons tenham uma carga elétrica e os nêutrons, não — ou seja, a força forte é invariante sob transformações da carga elétrica. Essa simetria, notada primeiro na década de 1930, tinha sido codificada como um número quântico chamado isospin. Foi sob esse disfarce que as duas partículas chegaram a ser consideradas como apenas variedades de um mesmo tipo de partícula, o *núcleon*, sendo suas diferenças atribuídas a diferença de isospin.

Yang tentou, durante anos, generalizar a invariância "gauge" formulando uma equação simétrica adequada para a força forte, e falhou sempre. Não obstante, a idéia não o abandonava. Sua linha de raciocínio, embora bastante técnica, pode ser retratada em termos da relação entre a simetria *global*, significando uma simetria que se aplica a toda parte, com uma simetria *local*, que se aplica a um determinado sistema num determinado lugar e tempo. A pergun-

ta de Yang era a seguinte: Como pode o sistema local "conhecer" a simetria global? Como, em outras palavras, é a simetria global transmitida a um sistema local?

Estabelecendo um símile com a infância de Yang, podemos dizer, em termos econômicos, que a pobreza imposta pela guerra à família Yang e seus vizinhos era uma invariância local, enquadrada na invariância global da pobreza geral da China na guerra. Ali, o meio de comunicação era o meio de intercâmbio — dinheiro ou troca — que propagava localmente as condições globais: as economias de toda a vida feitas pelo pai de Yang foram corroídas pela inflação de guerra, pois estavam num meio (moeda numa conta bancária) que transmitia a desvalorização geral do yuan chinês. Qual poderia ser o meio de intercâmbio na física, pensou Yang, a agência que liga invariâncias locais com as invariâncias mais amplas que formam o esqueleto da lei natural universal?

A resposta, como Yang acabou compreendendo, foi que o meio de comunicação entre as invariâncias local e global é apenas a própria força. Era uma idéia totalmente nova. Antes de Yang e Mills, a força tinha sido vista como algo admitido. A teoria de "gauge" de Yang-Mills deu-lhe uma razão de ser. Propunha ser a *simetria* o princípio excessivo, e que a força é apenas a maneira que a natureza tem de expressar as simetrias globais em situações locais — que a força, para falarmos teleologicamente, existe para manter as invariâncias em virtude das quais há algo como a lei natural.

O trabalho escrito originalmente por Yang e Mills era limitado, falho e incompleto, e ainda não se harmonizava com os resultados experimentais. Com o tempo, porém, seus problemas foram solucionados, e sua beleza e vigor potenciais começaram a ser percebidos. A teoria de "gauge" de Yang-Mills oferecia uma nova abordagem à prática da física teórica. O que se podia fazer agora era, primeiro, identificar uma invariância, o indício de uma simetria; depois, construir, matematicamente, um campo de "gauge" capaz de manter tal invariância localmente; depois derivar as características das partículas que podiam transmitir esse campo; em seguida verificar (ou mandar que os experimentalistas verificassem) se tais partículas realmente existiam na natureza. Vistos dessa perspectiva, os fótons de Einstein, os transportadores da força eletromagnética, são partículas "gauge", mensageiras da simetria. Assim, acredita-se que os grávitons sejam portadores da gravitação. Mas o que eram as partículas "gauge" das forças forte e fraca?

Essa questão foi estudada por um dos que primeiro compreenderam a beleza da abordagem Yang-Mills, o físico norte-americano Murray Gell-Mann. Alguns cientistas inteligentes (Dirac, Bohr e o velho Einstein) são modestos. Outros são presunçosos. (Wolfgang Pauli interrompeu a primeira exposição de Yang sobre a invariância "gauge" com tanta freqüência que J. Robert Oppenheimer finalmente teve de dizer-lhe que se calasse e ficasse sentado.) Gell-Mann era muito inteligente — falava mais idiomas do que seus amigos podiam contar, demonstrava um conhecimento de especialista de tudo, desde a botânica até a tecelagem de tapetes do Cáucaso, e se dizia, com perdoável exagero, que ele se incluiu entre os grandes físicos não porque tivesse nenhuma aptidão particular para a física, mas simplesmente por se ter dignado a incluir a física entre os seus muitos interesses — e muito presunçosos. Não se dispunha a rejeitar a presunção popular de que era o homem mais inteligente do mundo. Quando ganhou o Prêmio Nobel observou (fazendo eco ao comentário de Newton de que, se ti-

nha visto mais do que os outros, era porque estava nos ombros de gigantes), que se ele, Gell-Mann, podia ver mais do que outros, era por estar cercado de anões. Como um lutador intelectual que podia rebaixar-se a ser grosseiro, ele corrigia estrangeiros quanto à ortografia e pronúncia de seus próprios nomes, enquanto pronunciava os termos estrangeiros com um sotaque tão impecável que por vezes não conseguia fazer-se entender.* Se tais hábitos tendiam a formar um fosso à volta de Gell-Mann, talvez, como Newton, ele precisasse de um fosso.

Sobre a capacidade científica de Gell-Mann e o seu amor pela natureza não havia dúvidas, e quando ele pôs a teoria do campo de "gauge" em ação sobre a força forte, o resultado foi uma sinfonia. Combinando o conceito Yang-Mills com a teoria de grupo — um grupo é um conjunto de entidades matemáticas ligadas por uma simetria — Gell-Mann descobriu um arranjo simétrico de hádrons (partículas que respondem à força forte) que chamou de: "The eight-fold way" (O caminho óctuplo). (O físico israelense Yuval Ne'eman tinha chegado independentemente à mesma conclusão.) O caminho óctuplo teve uma verificação experimental quando um bárion até então não detectado, cuja existência ele previa, o ômega menos, foi subseqüentemente identificado num experimento de câmara de ebulição em Brookhaven.

O grupo de simetria em questão foi designado como "SU(3)" — "SU" significa grupo de unidade especial [special unit], um de uma série de grupos de simetrias identificadas pelo matemático francês Elie-Joseph Cartan, e "(3)" significa que a simetria funciona num espaço interno tridimensional.** Investigando SU(3) melhor, Gell-Mann chegou à idéia de que os prótons e nêutrons são compostos, cada, de trios de partículas ainda menores. Assim, a teoria do *quark* surgiu da cabeça da simetria.

As equações indicavam que os glúons, as partículas "gauge" que transmitem a força forte e com isso prendem os *quarks* dentro dos núcleons, devem ser sem massa, como os fótons e grávitons. Por que, então, a força forte só se faz sentir a curto alcance, quando a luz e a gravitação têm um alcance infinito? A resposta, segundo a cromodinâmica quântica, a nova teoria da força forte, é que essa força aumenta de intensidade quando os *quarks* que aprisiona tentam afastar-se, em lugar de tornar-se mais fraca, como o eletromagnetismo e a gravidade. Foi essa a origem do conceito do confinamento dos *quarks* e do rendi-

* Richard Feynman, principal concorrente de Gell-Mann ao título de "Homem mais Inteligente do Mundo", mas homem sem pretensões, certa vez o encontrou no corredor, junto de sua sala no Caltech, e perguntou-lhe onde tinha andado, em viagem recente. "Munrei-algh!" respondeu, com um sotaque francês tão pesado que parecia estar sendo estrangulado. Feynman, que como Gell-Mann nasceu em Nova York, não fez a menor idéia do que ele estava dizendo. "Não lhe parece", perguntou a Gell-Mann, quando finalmente descobriu que estava dizendo "Montreal", "que o objetivo da linguagem é a comunicação?"

** As interações quânticas habituais são mostradas como se ocorressem não no espaço convencional que constitui o teatro dos fatos macroscópicos, mas num espaço complexo de avaliação descrito em parte pelas funções de ondas quânticas. Os *quarks*, por exemplo, são, por uma questão de conveniência, retratados como se existissem num espaço de "cor" tridimensional descrito pela cromodinâmica quântica — a cor é o número quântico que tem um papel na força forte, análogo ao da carga em eletrodinâmica — enquanto os elétrons ocupam normalmente um espaço unidimensional cujas duas direções representam as cargas elétricas positiva e negativa.

lhado de glúons de que falamos no último capítulo. A cromodinâmica quântica esclarece também o funcionamento da força fraca: o fenômeno da degeneração radioativa beta podia ser agora interpretado como a conversão de um *quark* "inferior" para um *quark* "superior", transformando o nêutron, que é feito de dois *quarks* inferiores e um superior, num próton, que consiste de dois *quarks* superiores e um inferior.

A simetria, como iremos ver, teria um papel sempre importante no desenvolvimento da teoria de campo quântico, até mesmo mostrando o caminho para uma teoria unificada, "supersimétrica", que pudesse reunir todas as partículas e campos sob um conjunto único de equações. "A natureza", como escreveu Yang,

parece aproveitar-se da representação matemática simples das leis da simetria. A elegância intrínseca e a bela perfeição do raciocínio matemático em questão, e a complexidade e profundidade das conseqüências físicas são grandes fontes de estímulo para os físicos. Aprendemos a esperar que a natureza tenha uma ordem que possamos aspirar a conhecer.¹⁰

Mas nem todas as simetrias da natureza são evidentes. Vivemos num mundo imperfeito, no qual muitas das simetrias que se revelam nas equações são quebradas. O próprio Yang, trabalhando com Tsung Dao Lee, identificou uma simetria discreta na força fraca chamada violação da paridade. Em 1956 Yang e Lee previram, em bases teóricas, que o *spin* das partículas oriundas da degeneração beta revelaria uma leve preferência por uma direção — isto é, que a força fraca não funciona simetricamente em relação ao *spin*. Experimentos realizados por Chien-Shiung Wu e outros confirmaram imediatamente a previsão, proporcionando o Prêmio Nobel no ano seguinte a Lee e Yang (embora não a Wu, por alguma razão) e voltando uma renovada atenção para a questão da razão pela qual a natureza é simétrica em certos aspectos, e assimétrica em outros.

Foi investigando as assimetrias que Steven Weinberg, Sheldon Glashow e Abdus Salam formularam a teoria eletrofraca unificada que revelou um parentesco entre as forças fraca e eletromagnética. Weinberg ficou intrigado com o fato de estar a natureza cheia de simetrias rompidas — relações assimétricas que surgiram do funcionamento de leis naturais simétricas. A questão, observou ele, era como "problemas simétricos podem ter soluções assimétricas".¹¹ Suponhamos que tomamos um punhado de lápis apontados, reunindo-os num feixe perfeitamente cilíndrico, equilibremos o feixe nas pontas dos lápis e o soltemos. Por um momento, a disposição permanece rotacionalmente simétrica: olhando para baixo, do alto, podemos caminhar à volta dela, e tudo o que vemos é um círculo feito das borrachas dos lápis. Mas é melhor olhar depressa, pois a simetria é instável. Num instante os lápis cairão e o resultado será uma mistura assimétrica como a encontrada no começo de um jogo de pauzinhos. Neste símile, o monte de lápis caídos é o universo hoje, e o feixe original é o estado simétrico em que se supõe que ele tenha começado. A tarefa do físico é identificar a simetria profunda escondida sob a simetria rompida existente. Esta poderia ser, na verdade, a chave para a formulação das teorias unificadas de amplo âmbito. "Nada na física", escreveu Weinberg em 1977, "parece-me tão espe-

rançoso quanto a idéia de que é possível a uma teoria ter um grau muito alto de simetria, que nos está oculto na vida comum."¹²

Os confusos caminhos do mundo que proporcionaram a Weinberg, Glashow e Salam a vitória da teoria unificada eletrofraca estavam impregnados das tensões e simetrias quebradas que animam as questões humanas. Nascido no Bronx, em Nova York, 1933, Weinberg frequentou a Escola Secundária de Ciência do bairro, onde seu maior amigo foi Shelly Glashow. Os dois foram juntos para Cornell, depois se separaram quando Weinberg foi para Princeton, e Glashow para Harvard. À parte o fascínio de ambos pela ciência e pela ficção científica, eram estudos contrários, e as diferenças de suas personalidades foram ainda mais intensificadas quando entraram no mundo adulto da física teórica. Weinberg era intensamente curioso, rigorosamente estudioso e compulsivamente trabalhador. Decidiu-se a estudar ramos inteiros da física, menos por ver neles qualquer aplicação imediata às questões que mais o preocupavam do que por achar que um físico *deve* saber tais coisas. Embora sendo principalmente um físico de partículas, e não relativista, escreveu certa ocasião um manual sobre a relatividade, em parte, disse ele, para ajudar a superar a lacuna entre a relatividade geral e a teoria das partículas elementares. Sua autodisciplina estendia-se além da física: quando ingressou no corpo docente da Universidade de Texas, e descobriu que a casa mobiliada que alugara em Austin tinha um escritório cheio de livros sobre a guerra civil norte-americana, ele simplesmente leu-os todos, transformando-se num entendido no assunto. Embora dolorosamente individualista, cultivava a arte da comunicação, chegando a ser um orador eloqüente e autor de um livro de ciência popular que vendeu muito, *The First Three Minutes* (Os três primeiros minutos).

Glashow, por sua vez, era naturalmente gregário, despreocupado ao ponto de indolência, e um estranho aos rigores do estudo. Se Weinberg brilhou em Cornell, não chegando ao Phi Beta Kappa apenas por ter falhado em educação física, Glashow mal conseguiu ser aprovado; ao receber o Prêmio Nobel, ele agradeceu aos "meus amigos da escola secundária, Gary Feinberg e Steven Weinberg, por me fazerem aprender demais, e cedo demais, coisas que sem isso eu jamais teria aprendido".¹³ Falava com pouca clareza, em frases fragmentadas construídas com um vocabulário simples, e sorria perpetuamente, como se pensasse numa pilhéria só sua. A física parecia ocorrer-lhe naturalmente, sem esforço, como um sonho.

Glashow estudou em Harvard com o elegante e imaginoso Julian Schwinger, chamado "o Mozart da física", tanto pelo seu brilho como pela maneira despreocupada pela qual brilhava. Menino prodígio, quando adulto Schwinger mostrou-se impaciente com o estado fragmentado da física quântica, e implorava aos seus alunos e colegas que não descansassem nunca até terem chegado a teorias unificadas capazes de descrever um âmbito muito maior de fenômenos através de menos preceitos. Até mesmo na década de 1950, quando a eletrodinâmica quântica que ele tinha ajudado a criar era o sol nascente da teoria do campo quântico, Schwinger escrevia que

um entendimento completo ... só pode existir quando a teoria das partículas elementares tiver chegado a um estado de perfeição inimaginável atualmente... Nenhuma solução final pode ser prevista até que a ciência física

tenha resolvido o desafio heróico de compreender a estrutura do mundo submicroscópico.¹⁴

Glashow absorveu de Schwinger a convicção de que as interações fraca e eletromagnética podiam ser explicadas por uma teoria de "gauge" única, unificada.* "Uma teoria plenamente aceitável" das duas forças, escreveu Glashow em sua tese de conclusão de curso, fazendo eco a Schwinger: "...só pode ser formulada se forem tratadas juntas."¹⁵

Concluída a tese, Glashow foi para Copenhague estudar com Niels Bohr. Ali, montou uma teoria das forças fraca e eletromagnética unificada de Yang-Mills. O problema gritante com essa teoria, como aconteceria com Weinberg e outros mais tarde, era que suas equações produziam infinitivos absurdos. Glashow tentou resolver este problema "renormalizando" suas equações. A renormalização é um procedimento matemático que envolve o cancelamento dos infinitivos indesejados introduzindo-se outros. Isso parece um truque matemático, mas quando manipulada devidamente a renormalização pode apresentar resultados desejados, definidos. Entre outras credenciais, a renormalização teve um papel essencial no aperfeiçoamento da eletrodinâmica quântica — que tinha feito algumas das previsões mais precisas já confirmadas pela experimentação, e se tinha tornado um modelo daquilo que uma teoria do campo quântico deve ser.** Em fins de 1958 Glashow achou que tinha renormalizado sua teoria unificada, e apresentou um trabalho afirmando isso, na primavera seguinte, em Londres.

Entre o público estava o físico paquistanês Abdus Salam, mais velho sete anos do que Glashow, mas aparentando mais idade, um homem de ar distinto, bem-apegoado, em quem fortes correntes intelectuais fluíam sob um exterior de calma oceânica. Nascido em 1926, filho de um professor secundário de inglês que pedia todas as noites a Alá um filho intelectualmente brilhante, Salam, aos 14 anos, obteve as mais altas notas da história dos exames vestibulares da Universidade de Punjab, feito que atraiu uma barulhenta multidão para recebê-lo quando voltou de bicicleta para casa, na pequena cidade de Jhang, no que é hoje o Paquistão. Enquanto estudava para o seu Ph.D., Salam conseguiu provar a renormalização da eletrodinâmica quântica aplicada aos mésons, feito que lhe granjeou uma reputação de especialista em renormalização. Desde então, ele e um colega, John Ward, dedicaram considerável trabalho à renormalização de uma teoria unificada das interações eletromagnética e fraca, sem sucesso. Assim, quando Glashow afirmou ter resolvido o problema, chamou a atenção de Salam.

* As ligações entre as interações fraca e eletromagnética tinham sido notadas antes: Fermi em 1933 formulou o primeiro modelo da força fraca por analogia com o eletromagnetismo. Mas muitos desses fios tecem seu caminho para a história da física, e este livro não é o lugar para mencionar senão uns poucos.

** Compare-se, por exemplo, o valor de g , a razão giromagnética do elétron, tal como prevista pela teoria da eletrodinâmica quântica e tal como testada experimentalmente.

Teoria: $g = 1,00115965241$

Experimento: $g = 1,00115965238$, * $0,00000000026$

"Meu Deus! Este jovem está afirmando que esta teoria era renormalizável!", lembrou-se Salam em uma entrevista de 1984 com Robert Crease e Charles Mann.

Isso me atingiu! Nós ambos nos considerávamos o entendido em renormalização, lutando por meses com o problema — e ali estava aquele rapazi-nho que pretendia ter renormalizado toda a coisa! Naturalmente, eu queria mostrar-lhe que ele estava errado — e estava. Estava totalmente errado. Em conseqüência, eu nunca mais li nada de Glashow, o que naturalmente foi um equívoco.¹⁶

Glashow, porém, não desanimava facilmente, e apesar da situação embaraçosa que possa ter sofrido por ter erroneamente anunciado a solução do problema de renormalização, continuou a buscar ligações entre o eletromagnetismo e a força fraca. Foi estimulado por Gell-Mann, e talvez por uns poucos outros. ("O que você está fazendo é bom", Gell-Mann lembra-se de ter dito a Glashow num almoço de frutos do mar em Paris, "mas as pessoas vão ter atitudes muito idiotas a respeito disso.")¹⁷ Em 1961 Glashow divulgou um trabalho, "Simetrias parciais das interações fracas",¹⁸ que chamava a atenção para "paralelos notáveis" entre o eletromagnetismo e a força fraca, descrevendo-os como ligados por uma simetria quebrada, e previa a existência das partículas W e Z portadoras de força — mais tarde conhecidas como W^+ , W^- e Z^0 . Essas partículas até então não detectadas iriam ter um papel importante nos testes experimentais da teoria eletrofraca unificada, mas Glashow não pôde prever suas massas, o que deixava os experimentadores sem base para continuar. Glashow e Gell-Mann escreveram então um artigo demonstrando que todas as simetrias evidenciadas nos grupos conhecidos como não comutativos ou Cartan correspondiam aos campos "gauge" de Yang-Mills. Seus esforços para identificar um grupo de simetria de "gauge" que abrangesse tanto a força forte como as forças eletrofracas proto-unificadas de Glashow, porém, deram em nada. Desanimado, Glashow pôs de lado seu trabalho sobre a teoria eletrofraca unificada.

Enquanto isso, em 1959, Salam e Ward tinham, como Glashow, chegado a certas verificações sobre os elos entre as forças fraca e eletromagnética, mas tinham, ainda como Glashow, sido recebidos com indiferença pela comunidade científica, e também desanimaram. "Uma simetria quebra nos quebra o coração", disse Salam.¹⁹

A situação melhorou então, graças a novas descobertas no mecanismo do rompimento espontâneo da simetria, apresentadas pela primeira vez por Yoichiro Nambu, Jeffrey Goldstone e outros, e culminando no trabalho publicado por Peter Higgs em 1964 e 1966. Essa pesquisa demonstrou que os fatos que rompiam a simetria podiam criar novos tipos de partículas portadoras de força, algumas delas com massa. (As partículas imaginadas pela teoria de "gauge" de Yang-Mills não tinham massa.) Se as partículas que transportam as forças fraca e eletromagnética estivessem relacionadas por uma simetria rompida, essas novas ferramentas talvez possibilitassem o cálculo das massas das partículas W e Z características da forma unificada, mais simétrica, da qual se acreditava que as duas forças tinham nascido.

Weinberg, em particular, foi conquistado pelo conceito do rompimento espontâneo da simetria. "Apaixonei-me por esta idéia", disse ele no discurso do

Prêmio Nobel em 1979, "mas como acontece com frequência nos casos de amor, a princípio fiquei muito confuso com as suas implicações."²⁰ Inicialmente, ele tentou aplicar as novas ferramentas rompedoras da simetria à força forte. Isso funcionou bem nas simetrias globais — especificamente, Weinberg descobriu que podia fazer previsões bem-sucedidas da dispersão dos mésons pi — mas quando tentou estender a técnica às simetrias locais, os resultados foram decepcionantes. "A teoria fazia previsões absurdas que não se pareciam com as interações fortes", recordou-se Weinberg numa entrevista em 1985. "Eu podia alterá-la e fazer com que desse certo, mas então ela se tornava demasiado feia para ser tolerada."²¹ O pior problema era que as massas das partículas previstas pelo rompimento do grupo de simetria desejado por Weinberg não correspondiam às massas das partículas envolvidas nas interações fortes.

Mas então, de acordo com as recordações de Weinberg: "a certa altura do outono de 1967, enquanto eu ia de carro para meu escritório no MIT, ocorreu-me que eu vinha aplicando as idéias certas ao problema errado."²² As descrições de partículas que continuavam surgindo de suas equações — uma série com massa, a outra sem massa — não se pareciam com coisa alguma na força forte, mas enquadravam-se perfeitamente nas partículas que transportam as forças fraca e eletromagnética. A partícula sem massa era o fóton, portador do eletromagnetismo; as partículas com massa eram as Ws e Zs. Além disso, Weinberg descobriu que podia calcular as massas aproximadas das Ws e Zs. Ali estava finalmente uma teoria eletrofraca que fazia uma previsão verificável. Salam chegou independentemente a uma conclusão semelhante no ano seguinte — testemunho, disse Weinberg, da "naturalidade de toda a teoria".²³

Com isso, o trabalho que conquistaria o Prêmio Nobel de 1979 em física estava concluído. Não obstante, despertou pouca atenção a princípio. O trabalho de Weinberg, a primeira exposição completa da teoria eletrofraca, não foi citado uma única vez na bibliografia científica durante quatro anos depois de sua publicação. A principal razão disso era que a teoria ainda não se tinha mostrado renormalizável. Quando isso foi feito — em 1971, quando seus dolorosos infinitivos foram cauterizados num esforço heróico pelo físico holandês Gerard 't Hooft — o interesse pela teoria eletrofraca cresceu, e o foco da atenção voltou-se para a questão de testá-la com experimentos. Isso exigia a participação daquelas materializações da ciência em ponto grande, que são os aceleradores das partículas.

Os aceleradores de partículas são para a física o que os telescópios e espectrógrafos são para a astrofísica — tanto uma ferramenta de exploração para descoberta de coisas novas como um supremo tribunal para a comprovação das teorias existentes. Seu princípio operacional baseia-se na equação $E = mc^2$, de Einstein. As partículas são aceleradas até quase a velocidade da luz, ao serem impelidas ao longo de uma frente de onda eletromagnética criada por eletroímãs pulsantes; em seguida são bombardeados contra um alvo, criando-se pequenas explosões de intensa potência. Novas partículas condensam-se da pequena bola de fogo, como pingos de chuva precipitando-se numa nuvem de tempestade, e são registrados pelos detectores, à saída. Os detectores originais eram chapas fotográficas, mais tarde substituídas por sensores eletrônicos acoplados a computadores.

Empenharam-se na corrida para testar a teoria eletrofraca pesquisadores

de dois dos mais poderosos aceleradores do mundo — o CEPN (Centro Europeu de Pesquisa Nuclear) perto de Genebra, e o Fermilab, assim chamado em homenagem ao físico Enrico Fermi, nas planícies de Illinois, a oeste de Chicago. Ambos são aceleradores de prótons.* Os prótons vêm de um pequeno recipiente de gás de hidrogênio, que pode ser levado às costas de uma pessoa, e que contém um abastecimento de átomos para um ano. Válvulas controladas pelos computadores liberam o gás em pequenos jatos, tão minúsculos quanto a respiração de um bebê, mas contendo mais prótons do que estrelas na galáxia da Via Láctea. O gás entra na cavidade eletricamente carregada do que é chamado de gerador Cockroft-Walton.** O campo separa os elétrons dos átomos de hidrogênio e lança os prótons por um túnel a grande velocidade, e depois por um cano do tamanho de uma mangueira de jardim, que descreve um círculo enorme — 5 km mais ou menos de circunferência, no caso dos Fermilab. Os prótons são acelerados em volta do anel por pulsões enviadas através dos eletroímãs, enquanto ímãs focalizadores os reúnem num feixe mais fino do que o grafite de um lápis. Quando atingem uma velocidade próxima da luz — altura em que, graças aos efeitos da relatividade especial sua massa aumentou em cerca de 300 vezes — são desviados do anel e lançados contra um alvo estacionário dentro de um detector. Suas trilhas, submetidas ainda a outro campo magnético no detector, revelam sua carga e massa e, com isso, a sua identidade.

Embora parecidos, os aceleradores CEPN e Fermilab exemplificaram estilos bastante diferentes de praticar a ciência em grande escala. O Fermilab, construído sob a direção do físico e escultor norte-americano Robert Wilson, foi concebido e executado como uma obra de arte, uma materialização da estética da ciência. Uma escultura de Wilson, um conjunto de arcos de aço suspensos chamado "Simetria quebrada", foi colocada na entrada principal. O túnel do acelerador, subterrâneo, foi delineado, por motivos puramente estéticos, como a berma de uma terraplenagem. Dentro do anel, búfalos pastavam; cisnes nadavam nas águas empregadas para resfriar os eletroímãs. O edifício da administração, uma torre circular convexa, foi colocado junto da berma como um diamante num anel de noivado. Wilson modelou-a dentro das proporções da catedral de Beuvais, na França. Eis como expôs suas razões para isso:

Achei que havia uma notável semelhança entre a pequena comunidade de construtores de catedrais e a comunidade de construtores de aceleradores. Ambos foram inovadores ousados, ambos foram muito competitivos em linhas nacionais, mas basicamente internacionalistas... Consideravam-se orientados pela técnica; um de seus lemas era *Ars sine scientia nihil est!* (*A arte sem ciência nada é*).²⁴

* Os elétrons, já que também levam uma carga elétrica, também podem ser usados; as explosões resultantes são mais limpas e, portanto mais fáceis de estudar, mas os elétrons têm menos massa do que os prótons e se chocam com menos violência; assim sendo, os aceleradores de elétrons produzem colisões mais fracas em relação ao seu consumo de energia.

** Em homenagem a Ernest Walton, físico irlandês, e John Cockroft, o físico inglês que num belo dia, em 1932, podia ser visto abordando estranhos nas ruas de Cambridge, exclamando: "Dividimos o átomo!".

Wilson defendeu a estética de sua criação — que, devemos acrescentar, foi concluída dentro do orçamento previsto — estabelecendo novos paralelos entre a arte e a ciência:

A maneira pela qual a ciência descreve a natureza baseia-se nas decisões estéticas. A física está muito próxima da arte, no sentido de que quando examinamos a natureza em pequena escala vemos diversidade, vemos simetria, vemos formas que proporcionam prazer. Por fim, da mesma maneira como olham para a escultura ou a arte, as pessoas começaram a olhar para esses grandes fatos simples.²⁵

O CEPN, por sua vez, parecia tão esteticamente compacto quanto uma fábrica bolchevique de caldeiras. Seu edifício de administração, montado com painéis de plástico pré-fabricados e janelas de alumínio das quais escorriam corrosivos acinzentados com a chuva, lembrava menos a catedral de Beauvais do que os projetos de casas populares da suburbana Gorki. Seus laboratórios estavam espalhados pela paisagem, tão desordenadamente quanto pedaços de um caminho acidentado, numa área que cruzava a fronteira franco-suíça nas proximidades de Genebra. O estilo predominante era o de fim da Torre de Babel, com cientistas passando do francês para o alemão e o inglês em meio às frases, ao almoçarem nas lanchonetes dos laboratórios, uma das quais só aceitava moeda francesa, e a outra, moeda suíça. Não obstante o seu ar de desordem, o CEPN funcionava tão bem quanto o Fermilab, e em princípios da década de 1970 estava começando a superá-lo.

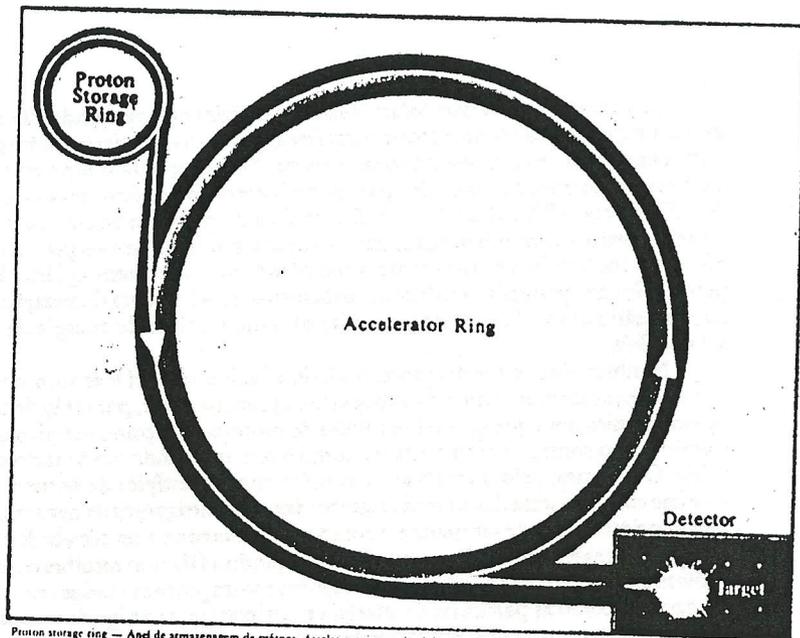
Foi nesse contexto febril que os dois laboratórios empenharam-se numa corrida para testar as previsões da teoria eletrofraca. As novas partículas portadoras de força postuladas por essa teoria, as W^+ , W^- e Z^0 tinham massa, significando isso que seria necessária muita energia para dar-lhes existência numa colisão de acelerador. Em 1971 nenhum acelerador era ainda capaz de dispor de energia suficiente para criar partículas W e Z , se é que elas existiam. Enquanto isso, porém, os experimentalistas podiam alimentar esperanças de perceber a existência de Z indiretamente, identificando os efeitos, nas colisões de acelerador, de "correntes neutras". Isso consistia em buscar, em milhares de eventos do acelerador, indícios das poucas interações de correntes neutras nas quais a Z^0 poderia ter desempenhado um papel. Estimulados pela estimativa de Weinberg de que tais eventos "estão exatamente no limite do que é observável", um grupo dirigido pelo físico experimental Paul Musset começou, no acelerador CEPN, a passar as noites acordado, examinando milhares de fotografias de interações de partículas. Depois de um ano de trabalho, foram finalmente recompensados quando o míope Musset, que examinava as trilhas das partículas com o nariz roçando a foto, percebeu uma estranheza na trajetória registrada de uma partícula que revelava sua identidade com um *píon* e não um *múon*, indicando isso que ela havia saído de uma reação de corrente neutra. Salam foi informado do resultado pouco depois de chegar a Aix-en-Provence, para uma conferência sobre física. Estava levando a mala para uma hospedaria de estudantes perto da estação quando um carro parou junto dele. Musset olhou para fora e disse: "Você é o Salam?" Respondeu que sim. "Entre no carro", disse Musset. "Tenho uma notícia para dar-lhe. Encontramos as correntes neutras."²⁶

Era uma boa notícia para Salam, Glashow e Weinberg, mas ainda não chegava a comprovar totalmente a teoria eletrofraca, pois outras teorias também previam a existência de correntes neutras. A teoria Weinberg-Salam superava suas antecessoras ao prever a massa dos transportadores da força eletrofraca — cerca de 80 GeV para as W s e 90 GeV para a Z . (um GeV é um bilhão de elétron-volts; neste contexto, é conveniente expressar a massa em termos de energia.) As W s e Z s eram conhecidas coletivamente como bósons de vetor intermediário. Para produzi-los em quantidade suficiente para tornar provável a sua detecção, seria necessário um acelerador de partículas com um mínimo de energia de 500 a 1.000 GeV.

Nenhum dos dois aceleradores poderia atingir esse nível mas ambos estavam sendo rapidamente modificados para se aproximar dele, por meio de uma ousada técnica nova que envolvia a colisão de prótons, não como um alvo estacionário, mas contra uma corrente de antiprótons avançando em sentido contrário. O universo, pelo que sabemos, contém apenas vestígios de antimatéria — e isso constitui uma das simetrias quebradas mais intrigantes da natureza — mas a antimatéria pode ser criada em colisões de acelerador, e na década de 1970 os especialistas em aceleradores estavam começando a falar em recolher os antiprótons por eles criados e em seguida lançá-los contra prótons vindos em sentido oposto. Como as partículas de matéria e antimatéria se aniquilam mutuamente ao se encontrarem, o resultado seria um grande aumento na potência efetiva do acelerador.

O Fermilab abordou o problema metodicamente. Primeiro, instalaram novos ímãs para aumentar o poder do acelerador para 1.000 GeV (igual a um teralétron volt, ou um TeV) e só depois realizar o trabalho mais arriscado de tentar fazer e armazenar antimatéria. O CEPN procedeu com mais ousadia, procurando logo um colisor matéria-antimatéria. Wilson, com sua habitual cordialidade, desejou-lhes boa sorte: "Que possam alcançar a luminosidade significativa e que possam encontrar o elusivo bóson intermediário", escreveu. "Exultaremos com eles, se o conseguirem."²⁷ Os funcionários do Centro, com igual delicadeza, descreveram o plano do Fermilab como "um projeto de grande visão, atacado com coragem e entusiasmo".²⁸ Atrás das frases amáveis, porém, havia uma feroz competição entre equipes rivais dos mais brilhantes e egocêntricos cientistas e engenheiros do mundo.

Dentre eles, poucos seriam mais brilhantes — e nenhum mais egocêntrico — do que Carlo Rubbia, a força propulsora do CEPN. Nascido no norte da Itália, de pais austríacos, em 1934, Rubbia era por natureza um internacionalista. "Tenho sotaque em todas as línguas" — disse, que se sentia à vontade lisonjeando e amedrontando as dezenas de cientistas que formavam seus enormes grupos de pesquisadores, entre os quais havia italianos, franceses, ingleses, alemães, chineses, um finlandês, um galês e um siciliano. Homem compulsivo, Rubbia viajava incessantemente, voando do Centro para Harvard, Berkeley, Fermilab, Roma, com tanta frequência que os amigos que acompanhavam suas andanças calcularam que tinha uma velocidade média na vida de 65 km/h. ("Ah!", disse ele certa manhã ao instalar-se na poltrona do avião, "meu primeiro voo do dia!") Corpulento, enérgico e sempre em movimento, ele se parecia muito a um próton humano: como Rutherford, que disse ao seu alfaiate: "Todo ano aumenta a minha cintura e o meu intelecto", Rubbia engordou até que, em



Proton storage ring — Anel de armazenagem de prótons. Accelerator ring — Anel do acelerador. Detector — Detetor. Target — Alvo.

O acelerador envia partículas subatômicas — no caso, prótons — a grandes velocidades em torno de um anel, para em seguida desviá-las para um alvo dentro de um detector.

1984, gabava-se de que seu corpo se estava aproximando da perfeição de uma esfera platônica.

Suas esperanças de ganhar o Prêmio Nobel baseavam-se numa concepção criada por um austero engenheiro do Centro, chamado Simon van der Meer, que estava convencido da possibilidade de se fazerem antiprótons (embora ao ritmo de apenas um centésimo-bilionésimo de um grama por dia) e mantê-los armazenados até acumular quantidade suficiente para colidi-los com prótons em números significativos. Armazenar antimatéria era difícil, parecido com o velho problema de como engarrafar um solvente universal: se um antipróton estabelecesse contato com uma partícula de matéria comum, ambos se aniquilariam imediatamente. Van der Meer pretendia resolver o problema com a construção de um acumulador antipróton, um pequeno anel no qual os antiprótons pudessem ser mantidos em circulação durante dias, suspensos num vácuo num campo eletromagnético. Para manter os antiprótons concentrados em grupos compactos e firmes, Van der Meer propôs a técnica chamada de resfriamento estocástico — estocástico significa estatístico, e resfriamento significa a redução dos movimentos randômicos entre as partículas. Enquanto pequenos blocos de antiprótons giravam em torno do anel de armazenagem, sensores detectariam o movimento daqueles que se desviassem, e computadores enviariam então uma

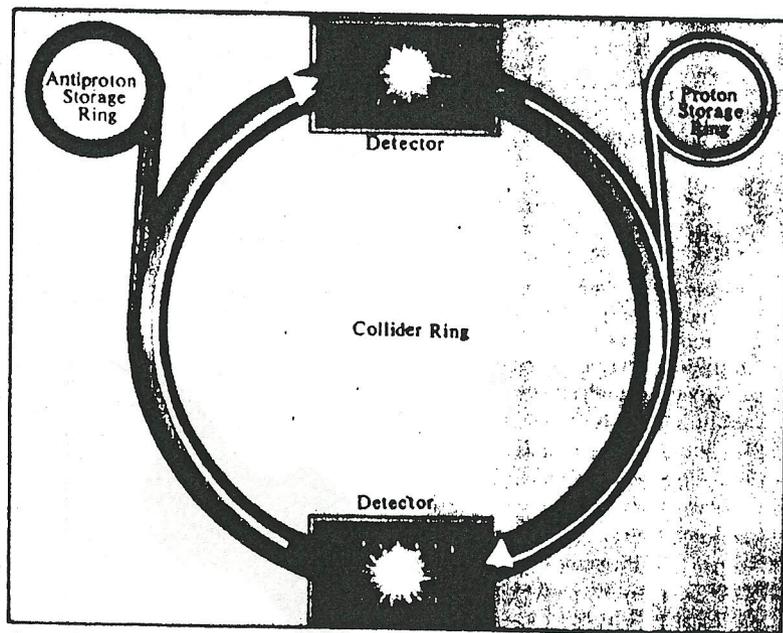
ordem corretora pelo anel, para ajustar os ímãs do lado oposto, a fim de corrigir o desvio. Como os antiprótons se movimentavam a uma velocidade próxima da luz, a computação teria de ser feita muito rapidamente, com o que a ordem seria enviada a toda pressa através do diâmetro do anel de armazenagem, a tempo exato de configurar os ímãs antes que o bloco de antiprótons chegasse pelo percurso circular mais longo. Uma vez recolhido e concentrado um suprimento suficiente de antiprótons, eles poderiam ser soltos no anel principal, acelerados até a velocidade terminal, e dirigidos para uma colisão frontal com grupos de prótons vindos da direção oposta.*

A construção de um colisor próton-antipróton alimentado via resfriamento estocástico representou uma das empresas mais audaciosas numa era de alta tecnologia. Van der Meer considerou a idéia tão radical que a princípio nem sequer tentou publicá-la. Muitos especialistas em aceleradores predisseram que o resfriamento estocástico não funcionaria, e que se funcionassem, os feixes de matéria e antimatéria se explodiriam mutuamente a primeira vez que se choçassem, em lugar de produzir as colisões repetidas — cerca de 50.000 por segundo — necessárias para expulsar os bósons de vetor intermediário. (O acelerador chegaria apenas à gama de energia dos bósons de vetor intermediário, e os físicos teriam de depender das probabilidades quânticas para obter uma detecção.) Houve risos quando Rubbia propôs pela primeira vez a construção de um colisor de antimatéria; quando sugeriu a idéia ao Fermilab, foi convidado a retirar-se; e quando ele e dois colegas apresentaram um artigo sobre isso, os diretores da *Physical Review Letters*, uma revista importante, recusaram-no. Mas Rubbia insistiu, apesar dos altos riscos — US\$ 100 milhões para construir o acumulador e modificar o acelerador, mais outros US\$ 30 milhões para construir os detectores — e adquiriu o hábito de dar uma impressão de segurança, guardando para si mesmo as dúvidas. “Sejamos sérios”, disse mais tarde. “Se tivéssemos manifestado essas dúvidas antes de o projeto ser iniciado, ninguém nos teria dado o dinheiro para ele... Eu tinha um medo de morte que a coisa não desse certo.”²⁹

Por fim, o CEPN correu o risco. Durante três anos, enquanto o anel antipróton estava sendo construído, Rubbia dedicou-se à criação do detector, um instrumento do tamanho e do peso de uma casa forte de um banco de Wall Street, com 10m × 5m, e 2.000t., enterrado como se cavalgasse o túnel do acelerador. Trabalhou ao ponto de exaustão e por duas vezes quase foi eletrocutado, mas raramente hesitou, e continuou aprendendo à medida que avançava. “Vejam este lugar”, disse com orgulho, quando o gigantesco detector foi construído: “Conheço a função de cada interruptor, aqui.”³⁰

Os testes do colisor próton-antipróton começaram em 1982 e para surpresa de quase todos, a coisa funcionou. Os prótons e antiprótons colidiram como deviam, produzindo minúsculas e intensas explosões de energia, e as partículas

* Como os antiprótons têm carga elétrica oposta, a mesma seqüência de pulsões magnéticas que mantém os prótons num movimento circulatório pelo anel na direção dos ponteiros do relógio manterá o movimento dos antiprótons na direção contrária. Uma maneira um pouco mais exótica de ver a situação, proposta por Feynman anos antes, era dizer que as partículas de antimatéria movem-se num tempo inverso.



Antiproton Storage Ring — Anel de armazenagem de antiprótons. Proton storage ring — Anel de armazenagem de prótons. Detector — Detector. Collider Ring — Anel colisor.

O colisor envia as partículas de matéria a grandes velocidades numa direção, e partículas de antimatéria na direção oposta, fazendo com que se choquem nos locais do detector, onde os feixes se cruzam.

subatômicas se projetaram dessas explosões, crivando as camadas semelhantes a peles de cebola do detector. De um bilhão dessas interações saíram cinco que encerraram evidências claras da existência da elusiva partícula *W*. A 20 de janeiro de 1983 Rubbia estava no auditório do Centro, em frente a um comprido quadro-negro descorado com os palimpsestos coloridos de milhares de equações apagadas, e disse aos colegas que a partícula *W* tinha sido detectada e, com isso, confirmada a teoria eletrofraca. A detecção da *Z* seguiu-se logo depois, e as massas de ambos os bósons correspondiam às previsões da teoria unificada eletrofraca. Weinberg, Glashow e Salam estavam certos; vivemos num universo de simetrias quebradas, onde pelo menos duas das forças fundamentais da natureza, o eletromagnetismo e a força nuclear fraca, divergiram de um mesmo pai, simétrico.

A batalha dos grandes aceleradores continuou nos anos seguintes. Enormes escavadeiras trabalhavam numa penumbra rembrandtesca sob o campo francês, abrindo um túnel de 27km em circunferência para um acelerador do CEPN que colidiria elétrons com seus opostos antimatéria, os pósitrons. Os aceleradores de prótons também continuaram a crescer. A máquina próton-antipróton original do Centro tinha atingido uma energia de 640GeV; na América, o colisor de próton-antipróton, que começou a funcionar em 1985, atingia dentro

em pouco uma energia de mais de 1TeV. Dois anos depois, os Estados Unidos começaram a planejar um "supercolisor supercondutor" que poderia atingir a energia de 20TeV, expelindo partículas 40 vezes mais maciças do que quaisquer outras detectadas antes. Com um anel de 80km ou mais de circunferência, o supercolisor seria a maior máquina jamais construída.

Enquanto isso, os teóricos continuavam a remexer o zoo das partículas em busca de novas simetrias ocultas. Várias teorias, pomposamente chamadas de "teorias unificadas gerais" (TUG em abreviatura), foram formuladas com a pretensão de identificar as forças nucleares eletrofraca e forte como parceiras de um mesmo grupo de simetria de "gauge" quebrada. As TUGs fizeram uma previsão curiosa: deixavam implícito que o próton, que sempre se supôs ser estável, degenerava. Sua meia-vida foi calculada em cerca de 10^{12} anos. É muito tempo — mil bilhões de vezes a idade do universo — mas a previsão podia ser testada observando-se 10^{12} prótons, um dos quais deveria então degenerar a cada ano, em média. Para testar as teorias unificadas gerais, os prótons foram devidamente reunidos, na forma de milhares de toneladas de água filtrada, num tanque numa mina de sal perto de Cleveland e numa mina de chumbo em Kamioka, no Japão, num bloco de concreto de 35t, numa mina de ferro em Minnesota, em placas de ferro numa mina de ouro na Índia, e montes de barras de aço adjacentes a um túnel de rodovia sob o Mont Blanc. (Os experimentos foram realizados em subterrâneos profundos para reduzir a contaminação pelos raios cósmicos.) Aparelhos sensores de luz foram acoplados a computadores programados para registrar o relâmpago revelador que seria produzido pela desintegração espontânea do próton.

Era uma vida dura, ficar anos à espera em minas de chumbo e minas de sal. ("É o que conseguem por querer ser físicos experimentais", brincou um teórico impiedoso.) Além disso, os resultados foram nulos, e com o passar dos anos sem que fosse observada a degeneração de nenhum próton, tomou-se evidente que os teóricos das TUGs tinham escolhido as simetrias quebradas erradas: Enquanto isso, buscando alguma coisa para fazer enquanto esperavam, os experimentalistas puseram seus instrumentos para trabalhar na detecção de neutrinos, alguns dos quais revelaram sua presença chocando-se com átomos nas vastidões da água e dos montes de concreto e metal reunidos para se procurar a degeneração do próton. Ela ocorreu de forma cômoda em 1987, quando uma supernova fulgurou na Grande Nuvem de Magalhães e uma onda de neutrinos foi logo detectada nas instalações de Kamioka e do lago Erie destinadas à degeneração do próton. A observação confirmou a teoria (da qual foi autor, em parte, Bethe, o infatigável estudioso das estrelas) de que as supernovas geram enormes quantidades de neutrinos, e deu origem à nova ciência da astronomia observacional dos neutrinos.

O ocaso das teorias unificadas gerais não foi muito lamentado. Faltava-lhe a abrangente simplicidade que deve ser o objetivo de todas as teorias unificadas; como o modelo padrão, estavam cheias de parâmetros arbitrários e, é claro, deixavam de lado a gravidade. O que os teóricos realmente queriam era uma teoria "superunificada" que identificasse relações familiares simétricas entre todas as quatro forças.

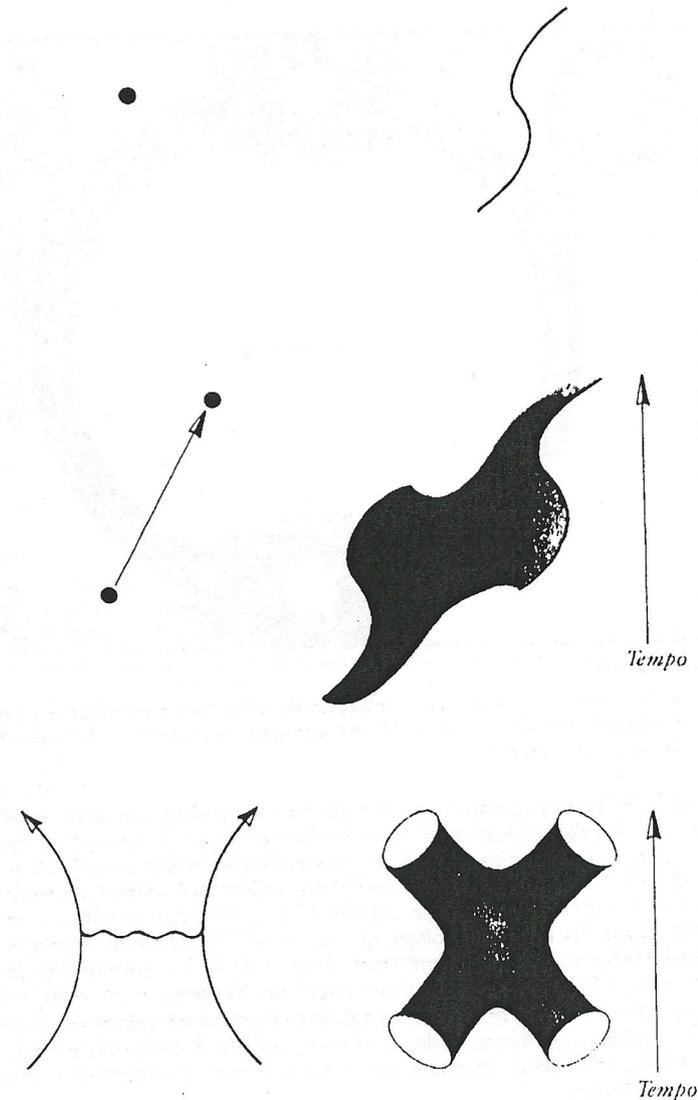
Elementos dessa teoria começaram a aparecer, primeiro na União Soviética e depois, independentemente, no Ocidente, na década de 1970. Chama-

das coletivamente de "supersimetria", essas novas teorias identificavam uma simetria que unia os bósons, os portadores de força, com férmions, o estofa da matéria. A gravitação foi incluída na teoria em 1976, fato que gerou uma animação generalizada. Ainda assim, no princípio da década de 1980 a supersimetria tinha começado a encontrar dificuldades. Em si mesma, ela não podia gerar todos os *quarks*, léptons e partículas "gauge" conhecidas, e introduzia ainda mais termos inexplicados do que o tinham feito as teorias unificadas gerais e o modelo padrão. Estava faltando alguma coisa.

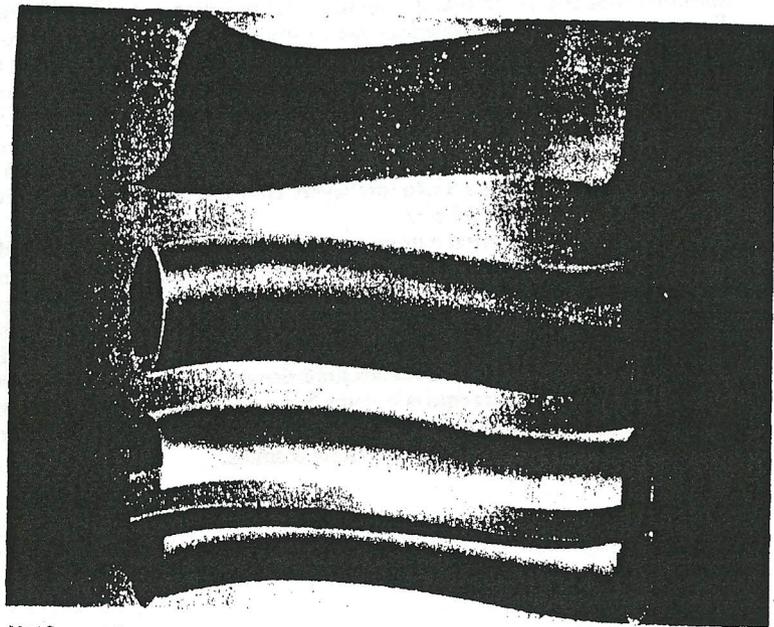
Alguns jovens teóricos sugeriram que essa "alguma coisa" eram *strings* (cordas). Tradicionalmente, partículas elementares, como o elétron, tinham sido consideradas como pontos sem dimensões. Na teoria de *string*, as partículas são, em lugar disso, descritas como objetos extensos, mais compridos do que largos — em suma, como cordas. Podem ser tomados por objetos infinitesimais porque são muito pequenos — apenas cerca de um Planck de extensão, o mínimo de tamanho que alguma coisa pode ter. As perspectivas de que as partículas são antes *strings* do que pontos faz uma diferença enorme na interpretação do seu comportamento. *Strings* podem vibrar, e o ritmo em que vibram, como se constatou, pode gerar as propriedades de todas as partículas conhecidas — e de uma variedade infinita de outras partículas também. A espantosa diversidade das miríades de partículas foi súbita, embora apenas potencialmente, unificada por um golpe tão simples quanto uma corda vibrada na lira de Pitágoras: são todas apenas harmonias diferentes de *strings*, diz a teoria.

A teoria de *strings* oferecia respostas potenciais a algumas das mais perturbadoras questões que vêm sendo enfrentadas pelos teóricos que se dedicam à unificação. Por que versões anteriores da teoria de campo quântico geravam, com tanta frequência, infinitos, que tinham de ser "renormalizados"? Porque consideravam as partículas elementares como dotadas de dimensão zero: isso significava que ela podia ajuntar-se de maneira infinitesimal, e nesse caso o nível de energia da força trocada entre elas podia elevar-se ao infinito. Como as *strings* têm extensão, o problema dos infinitos não surgia na teoria de *strings*. Por que são os grávitons *spin 2*, e as outras partículas portadoras de força são *spin 1*? Porque, dizia a teoria, uma *string* pode estar aberta, querendo dizer que tem duas pontas, ou fechada, querendo dizer que as pontas estão unidas, formando um *loop*. *Strings* abertas podem ser de *spin 1*, e as fechadas, podem ser *spin 2*. Por que o conceito do campo de "gauge" de Yang-Mills desfrutou de uma aplicabilidade tão ampla no entendimento das forças? Porque uma *string*, em seu mais baixo estado de energia — reta e sem girar — age como uma partícula sem massa, de *spin 1*, sendo essa a descrição das partículas "gauge" que transmitem os campos Yang-Mills. A teoria de *strings* abriu até mesmo a porta para o entendimento da distância conceitual entre a relatividade e a mecânica quântica. Na verdade, a teoria de *strings* não poderia funcionar *sem* incluir a gravidade. Era uma concepção inerentemente unificadora.

O conceito de *string* foi invocado originalmente na década de 1960, por teóricos que tinham em mente *strings* maiores cujas harmonias podiam explicar o comportamento dos hádrons de rotação rápida. Nessa tarefa ele não se saiu bem, e a maioria dos físicos abandonou logo a idéia. Um dos poucos a apreciar o seu potencial foi (novamente) o perspicaz Murray Gell-Mann, que estimulou o físico norte-americano John Schwarz, dizendo-lhe que embora a teo-



Partículas subatômicas, tradicionalmente vistas como pontos, são retratadas na teoria de strings como objetos extensos (alto). As partículas em movimento traçam linhas do mundo; strings, lâminas do mundo (centro). Um diagrama Feynman de interações de partículas semelhantes a pontos consiste de linhas; para strings fechados (isto é, como laços) o diagrama Feynman é tubular (embaixo).



Unificação da mecânica quântica e da relatividade geral, há muito um enigma, parece ser inerente à teoria de strings. Isso significa que a gravitação, explicada na relatividade, é produzida por strings abertos (ao alto), enquanto as outras forças quânticas são produzidas pelos strings fechados (centro). Cortando-se um string fechado, produzem-se dois strings abertos (embaixo), o que sugere uma afinidade natural entre as duas classes de forças.

ria de *string* parecesse estéril no momento, "de alguma forma, em algum momento, em algum lugar, ela ainda seria útil".³¹

Uma saída ocorreu em 1974, quando Schwarz e o jovem físico francês Joël Scherk compreenderam que uma partícula indesejada que continuava a aparecer nas equações de *string* — sua massa, zero, seu *spin* 2 — poderia ser nada menos do que o gráviton, o bóson que encerra a gravitação. Schwarz e Scherk começaram então a pensar nas *strings* como tendo apenas 10^{-33} do metro de comprimento, a "extensão Planck" na qual a gravitação se torna tão forte quanto as outras forças e, portanto, começa presumidamente a funcionar de uma maneira obviamente quantizada. Embora essas idéias a princípio não provocassem muito entusiasmo na comunidade científica, Schwarz continuava, teimosamente, a voltar ao conceito de *string*, trabalhando nele em colaboração com Michael Green, que visitava o Caltech, vindo da Universidade de Londres. O conceito era tão pouco popular que Schwarz e Green eram, ao que tudo indica, as duas únicas pessoas no mundo a realizarem pesquisas sobre *strings* naquela época. Mas seus esforços começaram a dar frutos, e no verão de 1984 puderam demonstrar que as anomalias que tinham perturbado outras teorias do campo unifica-

do desapareciam na teoria de *string*. Isso chamou a atenção, e em 1987 *strings* eram o assunto mais "quente" na física teórica das partículas.

Formular uma teoria unificada é algo como armar uma barraca no meio de um vento forte: enquanto se enterram os ferros, a barraca drapeja. A relatividade de Einstein exigia o abandono dos conceitos clássicos de espaço e tempo; a mecânica quântica exigia uma redução da causalidade clássica. O que havia de estranho na teoria *string* era realmente muito estranho: exigia que o universo tivesse pelo menos dez dimensões. Como vivemos num universo de apenas quatro dimensões (três de espaço e uma de tempo), a teoria postulava que as outras estavam "compactuadas", significando isso que se tinham colapsado em estruturas tão pequenas que não as percebemos. Weinberg aceitou essa idéia, e foi ridicularizado por isso quando Howard Georgi, conhecido pelo seu trabalho numa teoria unificada geral, abriu uma conferência em Harvard escrevendo no quadro os seguintes versos humorísticos:

Steve Weinberg, voltando do Texas,
Traz muitas dimensões para nos espantar,
Mas todas as dimensões extras
Estão enroladas numa bola
Tão pequena que nunca nos há de afetar.³²

A hiperdimensionalidade tinha sido introduzida na teoria unificada por Theodor Kaluza, na Alemanha, em 1919. Kaluza escreveu a Einstein, propondo que o sonho deste, de encontrar uma teoria unificada da gravitação e eletromagnetismo, poderia realizar-se se ele desenvolvesse suas equações no espaço-tempo de cinco dimensões. A princípio Einstein não gostou da idéia, mas reconsiderou-a mais tarde e ajudou Kaluza a publicar seu trabalho. Alguns anos depois disso, o físico sueco Oskar Klein publicou uma versão quântica do trabalho de Kaluza. A teoria Kaluza-Klein que disso resultou parecia interessante, mas ninguém soube o que fazer com ela até a década de 1970, quando mostrou-se útil no desenvolvimento da supersimetria. Dentro em pouco Kaluza-Klein estava nos lábios de todos (com Gell-Mann, em seu papel de sentinela lingüística, corrigindo os colegas que não dissessem "Ka-uu-sha").

Embora tanto a teoria de *string* em particular, como a supersimetria em geral, invocassem dimensões superiores, as *strings* estabeleciam a dimensionalidade necessária: a teoria de *strings*, como logo se tornou evidente, só funcionava em 2, 10 ou 26 dimensões, e só invocava dois grupos de simetria possíveis — ou $SO(32)$, ou $E_8 \times E_8$. Quando uma teoria é assim tão taxativa, os cientistas prestam atenção, e em fins da década de 1980 dezenas deles estavam trabalhando em strings. Um grande trabalho estava pela frente, mas as perspectivas eram brilhantes. "As próximas décadas", escreveram Schwarz e seus colaboradores na superstring, Green e Edward Witten, "constituirão provavelmente um período excepcional de aventura intelectual."³³

Esse otimismo pode vir a ser, é claro, inoportuno. A história da física do século XX está cheia de ossos esbranquiçados de teorias que num dado momento pareceram aproximar-se da solução final. Einstein dedicou grande parte da segunda metade de sua carreira à tentativa de encontrar uma teoria de campo unificada da gravitação e eletromagnetismo, com tal expectativa popular que as equações do seu trabalho em evolução eram colocadas em vitrines da Quinta Aveni-

da, em Nova York, onde eram examinadas por multidões curiosas, embora incapazes de compreendê-las. Mas nada resultou disso. (Einstein não levou em conta o princípio quântico.) Wolfgang Pauli colaborou com Werner Heisenberg numa teoria unificada durante algum tempo, mas alarmou-se ao ouvi-lo dizer, num programa de rádio, que uma teoria unificada Pauli-Heisenberg estava na iminência de ser concluída, faltando apenas resolver uns poucos detalhes técnicos. Desconcertado com o que considerou uma hipérbole de Heisenberg, Pauli enviou a George Gamow e outros colegas uma página na qual tinha desenhado um quadrado em branco, com a seguinte legenda: "Isto é para mostrar ao mundo que posso pintar como Ticiano. Faltam apenas detalhes técnicos."³⁴

Os críticos do conceito de superstring observaram que o seu pretensão vigor baseava-se quase que exclusivamente em sua beleza interior. A teoria ainda não tinha sequer repetido as realizações do modelo padrão, nem tinha feito uma única previsão que pudesse ser testada pela experiência. A supersimetria dizia que o universo deve conter famílias inteiras de novas partículas, entre as quais "selétrons" (contrapartidas supersimétricas dos elétrons) e "fotinos" (contrapartidas do fóton), mas não postulava as massas das partículas hipotéticas. A ausência de indícios nas primeiras buscas de partículas supersimétricas, como os realizados no acelerador PEP em Stanford, e PETRA, em Hamburgo, nada provaram: sempre se podia supor que as partículas tinham massa demasiado grande para serem produzidas nessas máquinas, ou mesmo em qualquer máquina mais nova e mais poderosa que viesse a ser construída. As perspectivas de realizar experimentos para testar a teoria de *string* eram ainda mais remotas: as supostas *strings* tinham uma massa teórica de mais de 10^{21} vezes a acessível aos aceleradores existentes, significando isso que a sua detecção, usando-se a tecnologia existente, exigiria a construção de um acelerador maior do que o sistema solar. As teorias da supersimetria e de *string* eram elegantes, mas se os teóricos que nelas trabalhavam tivessem de continuar indefinidamente sem a vantagem do que Weinberg chamou de "aquela maravilhosa fertilização que normalmente obtemos com um experimento",³⁵ então pareciam correr o perigo de se perderem nas alturas inonossféricas do pensamento puro, abstrato. Se isso acontecesse, argumentaram Glashow e seu colega de Harvard Paul Ginsparg, sem papas na língua, "a contemplação das superstrings pode evoluir para uma atividade tão distante da física de partículas convencional quanto a física de partículas está da química, para ser feita em escolas de teologia por futuros equivalentes dos teólogos medievais." E acrescentaram sardonicamente que: "pela primeira vez desde a Idade Média podemos ver como terminará a nossa nobre busca, com a fé substituindo novamente a ciência."³⁶

Não obstante, continuou havendo muita esperança de que há um princípio fundamentalmente belo, simétrico, na natureza, que gerou as partículas e forças, e que talvez possa ser percebido pela mente humana. "Talvez não seja verdade", admitiu Weinberg. "Talvez a natureza seja fundamentalmente feia, caótica e complicada. Mas se assim for, desisto."³⁷

Isso nos leva de volta à outra definição grega da simetria — "a devida proporção". Para os gregos, a simetria consistia não simplesmente da invariância, mas de um *tipo* esteticamente agradável de invariância. Isso significa a existência de uma ordem superior de perfeição, um mundo mais perfeito, do qual percebemos pelas janelas oferecidas pela simetria, e pelas quais a elegância de qual-

quer teoria de simetria pode ser avaliada. A supersimetria retrata essa perfeição final como um universo hiperdimensional, do qual o nosso pobre e imperfeito universo é uma pálida sombra. Isso significa que os físicos — ao identificarem, digamos, as forças eletromagnéticas fracas como oriundas do rompimento de uma força eletrofraca mais simétrica, ou ao descobrirem simetrias ocultas nos compactos limites nucleares onde a força forte exerce sua atividade — estão na realidade juntando os cacos desse mundo perfeito. Na verdade, a teoria indica que pode haver um número incontável desses cacos, na forma de "matéria obscura", partículas supersimétricas que ainda não foram detectadas porque só interação de maneira fraca, ou não interação, com as partículas de que somos feitos e que chegamos a conhecer.

Onde, então, encontrar o universo hiperdimensional da simetria perfeita? Certamente, não aqui e agora; o mundo em que vivemos está cheio de simetrias quebradas, e conhece apenas quatro dimensões. A resposta vem da cosmologia, segundo a qual o universo supersimétrico, se existiu, pertenceu ao passado. Isso significa que o universo começou num estado de perfeição simétrica, do qual evoluiu para o universo menos simétrico em que vivemos. Se assim é, a busca da simetria perfeita equivale a uma busca do segredo da origem do universo, e a atenção de seus acólitos pode, com boa razão, voltar-se como as flores, ao amanhecer, para a luz branca da gênese cósmica.

NOTAS

1. Poincaré, 1958, p. 19; Poincaré, 1908, p. 59. Para uma análise dessas observações, ver Wechsler, 1978, p. 5.
2. Heisenberg, 1971, p. 68.
3. Dirac, "The Evolution of the Physicist's Picture of Nature", *Scientific American*, maio de 1963, p. 47; in Wechsler, 1978, p. 5.
4. In Judson, 1980, p. 198.
5. Yang, 1983, p. 82.
6. Wigner, 1967, p. 29.
7. *Ibid.*, p. 5.
8. Behram Kursunoglu, in Mehra, 1973, p. 818.
9. *Ibid.*
10. Yang, 1961, p. 53.
11. Weinberg, "The Forces of Nature", *American Scientist*, vol. 65, n.º 2, mar-abr. de 1977, pp. 171-176.
12. *Ibid.*

13. Glashow, discurso do Prêmio Nobel, *Review of Modern Physics*, vol. 52, n.º 3, jul. de 1980, p. 543.
14. Schwinger, 1958, p. xvii.
15. Glashow, discurso do Prêmio Nobel, *Review of Modern Physics*, vol. 52, n.º 3, jul. de 1980, p. 540.
16. In Crease e Mann, 1986, p. 224.
17. *Ibid.*, p. 225.
18. Glashow, "Partial Symmetries of Weak Interactions", *Nuclear Physics*, vol. 22, n.º 4, fev. de 1961, p. 579.
19. In Hassan e Lai, 1984, p. 17.
20. Weinberg, *Review of Modern Physics*, op. cit., p. 515.
21. Weinberg, entrevista com o autor, Austin, Texas, 28 de fevereiro de 1985.
22. Weinberg, *Review of Modern Physics*, op. cit., p. 517.
23. *Ibid.*, p. 518.
24. In Hilts, 1982, p. 86.
25. Wilson, entrevista a Linda Dackman, *Arts and Architecture*, vol. 3, n.º 1, 1984.
26. Abdus Salam, discurso do Prêmio Nobel, *Review of Modern Physics*, op. cit., p. 530.
27. In Ne'eman e Kirsh, 1986, p. 250.
28. *CERN Courier*, jan./fev. de 1985, p. 5.
29. In Taubes, 1986, p. 39.
30. Rubbia, entrevista com o autor, CEPN, dez. de 1984.
31. *Engineering and Science*, set. de 1985, p. 20.
32. In Crease e Mann, 1986, p. 417.
33. Green, Schwarz e Witten, 1987, p. 55.
34. Gamow, 1966, p. 163.
35. Weinberg, entrevista com o autor, Austin, Texas, 5 de abril de 1982.
36. Sheldon Glashow e Paul Ginsparg, "Desperately Seeking Superstrings?", *Physics Today*, maio de 1986, p. 7.
37. Weinberg, entrevista com o autor, Austin, Texas, 5 de abril de 1982.

O EIXO DA HISTÓRIA

Todo estado atual de uma substância simples é naturalmente consequência de seu estado anterior, de tal modo que seu presente está impregnado do seu futuro.

Leibniz

Aquele que viu as coisas presentes viu tudo, tudo o que ocorreu desde toda a eternidade e tudo que ocorrerá pelo tempo sem fim; pois todas as coisas são de uma mesma família e de uma mesma forma.

Marco Aurélio

O final do século XX pode ser lembrado na história da ciência como a época em que a física das partículas, o estudo das menores estruturas da natureza, uniu suas forças à cosmologia, o estudo do universo como um todo. Juntas, essas duas disciplinas iriam delinear a história cósmica, investigando a ascendência das estruturas naturais através de um âmbito enorme, desde o núcleo dos átomos até os aglomerados de galáxias.

Foi um casamento forçado entre duas disciplinas muito diferentes. Os cosmólogos tendem a ser pessoas solitárias, com os olhos fixos nos horizontes distantes do espaço e tempo, e seus dados são ternamente recolhidos do piscar das luzes estelares antigas; nenhum deles jamais tocará numa estrela. Os físicos de partículas, em contraste, são relativamente gregários — têm de ser: nem mesmo um Einstein sabe bastante física para fazer tudo sozinho. E são físicos — são, por tradição, estudiosos práticos do aqui e agora, inclinados a torcer coisas, a fazer explodir coisas, a desmontar coisas.* Os físicos trabalham com afincos e de-

* Há exceções, é claro, notadamente os matemáticos que chegam à física com pouca ou nenhuma formação em ciência experimental. Mas de modo geral, os melhores físicos teóricos estão dispostos, ainda que apenas durante sua fase de estudantes, a sujar as mãos no laboratório. Lembremos que o jovem Einstein quase *perdeu* uma das mãos, dessa maneira.