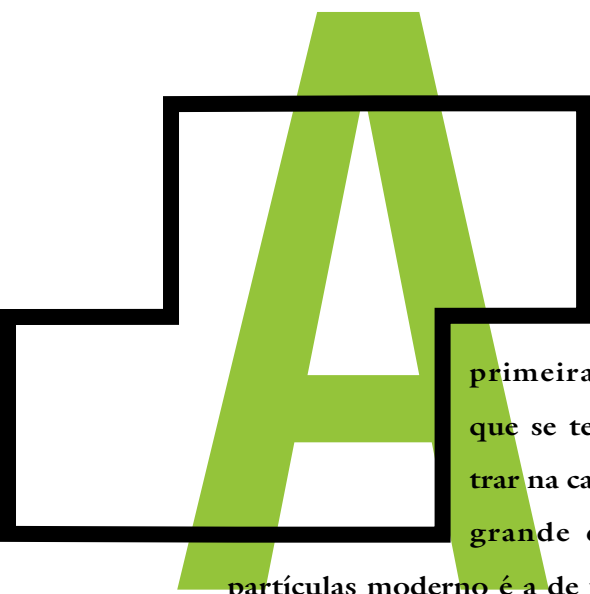




RONALD C. SHELLARD

Partículas, aceleradores e detectores

RONALD C. SHELLARD
é professor do Centro
Brasileiro de Pesquisas
Físicas, do Rio de Janeiro.



primeira impressão que se tem ao se entrar na caverna de um grande detector de partículas moderno é a de uma cena de ficção científica. Uma imensa quantidade de cabos saindo de um cilindro, uma complexa estrutura de aço, vidro, alumínio e plásticos. Cada cabo tem uma etiqueta colorida com dizeres criptográficos. É difícil acreditar que instrumentos gigantescos assim possam medir acontecimentos microscópicos ou, no linguajar dos físicos, eventos que resultam da colisão de partículas com dimensões infinitesimais no seu centro.

Um detector de partículas é um imenso quebra-cabeça, formado por partes que são construídas em lugares diferentes, geralmente em laboratórios universitários. Ao lado dos cilindros, há edifícios com alguns andares de salas, parecidas a contêineres industriais, onde estão instalados os equipamentos eletrônicos que

coletam e fazem o processamento inicial das informações geradas pelo detector.

Uma colisão de partículas a altas energias pode ser imaginada como uma explosão na qual inicialmente duas partículas – por exemplo, prótons ou um elétron e sua antipartícula, o pósitron –, viajando em direção contrária, com velocidades muito próximas à da luz, se encontram, se fundem e explodem em dezenas de outras partículas. O papel de um detector de partículas é registrar essa explosão, medindo as características de cada um dos estilhaços dela. Os físicos as estudam e delas inferem as leis que governam o comportamento da matéria.



Num detector de partículas moderno, há centenas de milhões – sim, milhões, não é erro de digitação – de dólares investidos em equipamento. Construir um acelerador de partículas moderno é um investimento ainda maior, que, hoje, está além da capacidade de um único país. O problema não é apenas o volume de recursos, mas também de *expertise*, de disponibilidade de recursos humanos capazes de levar a cabo a construção desses instrumentos. Um acelerador é uma ferramenta muito complexa, e a experiência e o *know-how* (ou *know how to do*) em cada detalhe dos componentes que formam o sistema estão espalhado pelos países avançados.

O planejamento, a construção e a operação de um detector de partículas oferecem um bom caso para um estudo sobre a sociologia de estruturas complexas. Os grupos de cientistas que se unem para construir um detector são muito díspares. Nos países europeus, com frequência, emulam as diferenças e as idiosincrasias regionais. Tensões associadas a nacionalidades afloram com mais intensidade do que nós, cientistas, gostaríamos de deixar transparecer. O período do planejamento até a entrada em operação de um detector pode levar uma dezena de anos. O processo envolve um programa complexo de planejamento, pesquisa e desenvolvimento, bem como avaliações críticas rigorosas.

O elemento central para a evolução do processo é sempre a relevância do programa científico que será desenvolvido com o detector. É isso que mantém o foco do trabalho. Não é incomum que um programa seja interrompido, após anos de trabalho, quando surge um elemento novo que diminua a relevância científica dele.

A organização para a construção de um detector envolve uma estrutura formal, a “colaboração”, formada pelas instituições acadêmicas, os departamentos de universidades e os laboratórios de pesquisa. Normalmente, cada instituição participante assina um compromisso, responsabilizando-se pelo financiamento e a construção de componentes e contribuindo para um fundo comum do grupo e também para ativida-

des como o desenvolvimento de *software*. Idéias novas carregam prestígio para seus proponentes, mas há o ônus de demonstrar que elas funcionam dentro do cronograma de construção. Um detector é único. Todos os seus principais componentes são desenvolvidos dentro da colaboração. A excelência do desenho e das idéias inovadoras será o elemento que dará vantagem a um determinado detector na corrida para novas descobertas. Nessa competição, não há medalhas de prata.

O espírito reinante no período de construção de um detector é frenético, mas – num estilo muito peculiar – é característico de cientistas, ou seja, envolve colaboração e competição. Tarefas não cumpridas não são repreendidas, mas a punição é bastante pesada. Grupos responsáveis por determinada tarefa, se não as cumprem, são substituídos por outros, uma suprema aflição para os cientistas. O período que precede a entrada em operação de um detector é caótico, com enorme número de pessoas passando longas horas no laboratório para finalizar determinado instrumento. No entanto, o que é surpreendente quando se acompanha e se participa desse processo – a despeito do caos das disputas acadêmicas e das idiosincrasias das pessoas – é que os detectores funcionam!

A transformação da física das partículas no que é chamado, por muita gente, de *big science* ocorreu com o fim da Segunda Guerra Mundial. O sucesso dos físicos em criar o monstro da bomba atômica deu-lhes enorme prestígio nos Estados Unidos, criando um acesso quase ilimitado a recursos. Criaram-se, nesse período de pós-guerra, alguns aceleradores de grande porte que precederam os primeiros laboratórios nacionais, como o Brookhaven, no estado de Nova York, e o SLAC (Stanford Linear Accelerator Center), na Califórnia. Esses dois laboratórios foram muito bem-sucedidos, tendo gerado experimentos que resultaram em mais de dez prêmios Nobel. Na década de 1970, foi criado o Fermi National Laboratory (Fermilab), no estado de Illinois, que durante muito tempo foi um laboratório de referência na área da física das altas energias. Muitos

cientistas brasileiros trabalharam ou ainda trabalham lá. Os laboratórios norte-americanos tiveram papel relevante na manutenção de um canal de contato científico entre os cientistas dos Estados Unidos e os da antiga União Soviética durante todo o período da Guerra Fria.

Na Europa, o esforço de reconstrução das economias e das instituições políticas após a guerra induziu muitos líderes a verem na ciência a semente da integração daquele continente. Assim, em 1954, foi criado o Cern, o centro europeu para a física das partículas (a sigla Cern vem do seu nome original, Centre Européen pour la Recherche Nucléaire). Já em 1959, essa instituição operava o maior acelerador à época. O Cern iniciou suas atividades com 12 estados-membros e hoje já conta com 20 deles, todos europeus. Apesar do seu caráter europeu, ele de fato é um laboratório internacional. Instituições de pelo menos 34 países participam de seus programas experimentais, entre eles o Brasil. Em 2007, será inaugurado, em Genebra, sede do Cern, o Large Hadron Collider (LHC), um acelerador de prótons com 27 km de extensão, num túnel circular a 100 m abaixo da terra. Nesse túnel, operou, de 1989 a 2000, o LEP, um acelerador que colidia elétrons contra pósitrons e fez medidas de alta precisão, verificando com grande acurácia as previsões do modelo padrão das interações fundamentais da natureza.

A natureza das partículas e suas relações são descritas com grande precisão por um modelo que engloba quase todas as interações fundamentais. O “quase” deve-se à ausência nesse esquema da gravitação, a força mais ubíqua no nosso cotidiano. Apesar da imensa variedade de fenômenos que encontramos na natureza, podemos reduzir toda essa complexidade a quatro forças elementares. A gravitação, apesar de aparentemente ser a mais presente em nossa vida, é a mais fraca das forças. O eletromagnetismo, outra dessas forças, regula o comportamento de átomos, moléculas e grande parte dos fenômenos naturais. Associamos a eletricidade à tomada na parede ou às ondas de rádio ou de TV, no entanto, ao

movermos um músculo, são forças elétricas que estão em ação. A luz é um fenômeno eletromagnético.

As duas outras forças são a forte e a fraca, mais distantes de nossa intuição, mas vitais para nossa existência. Força forte é a nuclear, que mantém os prótons e nêutrons juntos num núcleo atômico. A fraca media os processos radioativos da natureza. Mas, para se ter uma idéia menos vaga sobre elas, é conveniente fazer um levantamento sobre quem são as partículas elementares, aquelas que constituem os tijolos da matéria. Os físicos há muito têm uma certa relutância em usar a palavra “elementar” para descrever partículas. Isso porque, com a evolução dos instrumentos para investigá-las, descobriu-se que um grande número delas, como o próton e o nêutron, que já foram classificados como elementares, tem estruturas internas bastante complicadas.

Há duas classes de partículas que ainda são consideradas elementares, mas, daqui a décadas, talvez não o sejam mais: os *quarks* e os léptons. Os primeiros foram inventados por Murray Gell-Mann em 1964 para explicar a grande diversidade de partículas parecidas com o próton e o nêutron. O nome *quark* vem de uma referência a uma passagem do livro *Finnegans Wake*, de James Joyce. Na época, muitos cientistas não os tomavam como partículas reais, vendo-os apenas como um mecanismo mnemônico útil para classificar a variedade de partículas que estavam sendo descobertas. Um elemento importante que gerava descrença era a carga elétrica atribuída aos *quarks*, uma fração da carga do elétron. Os *quarks* têm cargas iguais a 1/3 ou 2/3 daquela do elétron. No entanto, o modelo de *quarks* tinha poder de previsão, tendo apontado para a existência de novas partículas, que foram logo mais descobertas.

A evidência experimental para a realidade dos *quarks* começou a se tornar clara em 1968, com os experimentos realizados no SLAC. *Quarks* têm uma propriedade inusitada: não existem em forma livre na natureza. Eles aparecem sempre em grupos, ou seja, em pares formados por um *quark* e sua antipartícula, o antiquark,

ou então em trios de *quarks*. As partículas formadas por pares *quark*-antiquark são os mésons, todos com vida muito breve, mas longa o suficiente para deixar rastros nos detectores. O melhor exemplo deles é o pión, em cuja descoberta, em 1947, teve papel relevante o físico brasileiro Cesare Mansueto Giulio Lattes (1924-2005). Os trios são bárions, tendo como representantes típicos o próton e o nêutron. Por outro lado, quando examinados muito de perto, os *quarks* parecem estar livres – os físicos dizem que os *quarks* são assintoticamente livres. A expressão “examinados muito de perto” merece qualificação. Examinar um objeto num microscópio significa jogar luz e observar a luz de volta, porém isso só funciona quando os objetos são muito maiores do que o comprimento de onda da luz. Se os objetos são menores, temos que usar comprimentos de onda menores, como raios-X ou raios-gama. Partículas funcionam como a luz, ou seja, têm também comprimentos de onda, e estes estão diretamente associados à energia delas. Quanto maior a energia, menor o comprimento de onda. Então, para examinar estruturas como a dos *quarks*, com dimensões muito pequenas, é necessário criar feixes de partículas com muita energia e, por essa razão, quanto menor a distância a ser investigada, maior o acelerador necessário.

Léptons, nome derivado da palavra grega para leve, são formados pelo elétron e seus parentes mais pesados, o múon e o tau, bem como os neutrinos. Enquanto os *quarks* sofrem os efeitos de todas as interações – ou seja, da forte, da eletromagnética, da fraca e da gravitacional –, os léptons carregados (o elétron, o múon e o tau) sofrem os efeitos das interações eletromagnética, fraca e gravitacional. Os neutrinos, que não têm carga elétrica, são sensíveis apenas à interação fraca e à gravitacional.

O paradigma das interações é o eletromagnetismo, cuja versão clássica foi formulada em 1868 por James Clerk Maxwell. Essa teoria teve um imenso sucesso e suas aplicações tecnológicas tornam um mundo hoje sem eletricidade, inimaginável. A aplicação do eletromagnetismo aos átomos e

moléculas, ou seja, ao mundo regido pelas regras da mecânica quântica, tomou seus contornos iniciais no final da década de 1920. No entanto, rapidamente os físicos reconheceram que essa teoria, ou seja, o eletromagnetismo quântico, tinha inconsistências matemáticas sérias. Foi só depois da Segunda Guerra Mundial que uma teoria consistente, a chamada eletrodinâmica quântica (QED, iniciais do nome inglês), tomou sua forma final. Ainda no início da década de 1930, o físico italiano Enrico Fermi construiu uma teoria para as forças fracas, que funcionava de forma bastante satisfatória e descrevia os fenômenos então conhecidos. O próprio Fermi reconhecia sua teoria como provisória, adequada para explicar os processos em que a força fraca é dominante, mas que, quando aplicada a outros cuja energia era mais alta do que as disponíveis então, estava fadada ao insucesso. Passaram-se 25 anos desde a construção da QED até que as interações fortes e fracas pudessem ter uma formulação em pé de igualdade com a eletrodinâmica.

A combinação dessas três teorias (forte, fraca e eletrodinâmica) forma o modelo padrão das interações fundamentais da natureza. Nesse modelo podemos separar a matéria, formada por *quarks* e léptons, de um outro tipo de partícula que tem um papel especial, o de agente das forças. A ação das forças entre duas partículas, sejam *quarks* ou léptons, se dá através da troca dessas partículas especiais com um nome meio críptico: bósons de *gauge*. Bóson é um nome dado em homenagem ao físico indiano Satyendra Nath Bose (1894-1974), que trabalhou com Einstein na análise das características dessa classe de partículas. *Gauge*, ou calibre, como muitas vezes é usado em português, é um termo técnico, que essencialmente identifica a classe de partículas que é trocada nas interações básicas. Cada uma das forças tem os seus bósons de *gauge* próprios. Um deles, o bóson de *gauge* da QED, nos é muito familiar. É o fóton. Os agentes das interações fracas são os bósons W^+ , W^- e Z^0 . Já as forças fortes têm como agentes uma classe de partículas chamadas glúons. Todas as três forças

são descritas por uma classe especial de teorias, as teorias com simetria de *gauge*, ou de calibre. Uma das características importantes dessa classe de teorias é de que os bósons de *gauge* não podem ter massa. O fóton preenche bem essa característica. Os limites experimentais sobre a possibilidade de que o fóton tenha massa estabelecem que, se existir, ela é tão pequena que se a Terra, ao invés de prótons e nêutrons, fosse feita do mesmo número de partículas, mas fótons, sua massa seria menor do que 400 gramas. No entanto, os bósons W_{\pm} e o Z^0 , agentes da interação fraca, têm massa cerca de 100 vezes maior do que a do próton, um paradoxo. A solução para esse enigma foi proposta pelo físico inglês Peter Higgs, ao sugerir que, quando as simetrias, que dão nome à classe especial, não são manifestas no mundo real, ocorre uma conspiração sutil, em que os bósons de *gauge* se travestem de partículas maciças. O fenômeno deixa um rastro na forma de uma partícula, que tem propriedades parecidas com as do píon, mas com uma massa muito alta. Até hoje a existência dessa partícula não foi comprovada experimentalmente, mas sabe-se que, se existir, será pelo menos 130 vezes maior do que a do próton. Cálculos teóricos, baseados em resultados que dependem indiretamente da massa do bóson de Higgs, indicam que sua massa não deve ser muito maior do que os limites experimentais existentes até o presente. Portanto, a próxima geração de aceleradores, que será inaugurada com o LHC, terá grande chance de produzir essas partículas, validando de forma definitiva o modelo padrão. A possibilidade de uma grande surpresa, porém, que viria com a ausência de indícios do Higgs nos dados experimentais, não pode ser inteiramente descartada. Ela traria, como consequência, uma reformulação radical nas concepções embutidas no modelo padrão.

A versão, dessa classe de teorias, para a interação forte leva o nome de cromodinâmica quântica (QCD), na qual os *quarks* têm uma característica especial, aparecendo em três variedades (ou três cores) diferentes. Cores, aqui, são um termo inventado, não tendo nenhuma relação com as cores que

percebemos com os olhos. Em comum, apenas o fato de que podem ser sempre decompostas em três elementos básicos. A QCD explica o comportamento paradoxal dos *quarks*. Por um lado, eles não podem ser separados, não há *quarks* livres na natureza, ou, pelo menos, eles nunca foram observados. Poderíamos formular um quadro, imaginando um próton, onde usamos uma pinça especial de modo a pegar apenas um dos três *quarks* e o puxamos para fora. O que perceberíamos seria a formação de uma espécie de elástico, que, quanto mais puxássemos, mais se esticaria, acumulando energia. Esse elástico virtual seria formado pelos glúons, o equivalente aos fótons, na QCD. Eles têm a peculiaridade de serem os agentes de troca de cores entre os *quarks*, e eles mesmos terem a qualidade de cor, em contraste com os fótons, que, embora agentes da carga elétrica, não as têm. Num certo ponto o elástico arrebentaria e a energia acumulada seria transformada num par formado por um *quark*, que voltaria para o próton, e um antiquark, que se juntaria ao *quark* na pinça formando um píon. No mundo real, quando dois prótons colidem com grande energia, de certa forma é isso que ocorre. Na colisão, os *quarks* espirram para todos os lados e sua energia é transformada em pares *quark*-antiquark, ou seja, na colisão entram dois prótons e saem dois prótons – ou seus parentes próximos, como o nêutron – e mais dezenas de mésons, dos quais o píon é um exemplo. Por outro lado, quando vistos de perto, ou seja, por projéteis com energias altíssimas, parecem estar completamente livres, sem interação. O termo técnico usado é o de que os *quarks* são assintoticamente livres, no qual o qualificativo de livres significa no “limite de grandes energias”. A demonstração de que a QCD leva à liberdade assintótica deu aos físicos David Gross, Frank Wilczek e H. David Politzer o Prêmio Nobel de Física de 2004.

A teoria das interações fracas está integrada à QED, numa estrutura matemática única, formando a teoria das interações eletrofracas. A reunião das interações eletrofracas e da QCD forma o modelo padrão para

as forças fundamentais da natureza. Nesse quadro, omiti a quarta força, a gravitação, que, apesar de muito mais fraca do que as outras, é onipresente no nosso cotidiano. Uma teoria consistente para a gravitação, incorporando a mecânica quântica e associada ao modelo padrão, ainda não existe, apesar de um grande esforço teórico dedicado ao assunto nas últimas décadas.

O modelo padrão oferece um quadro elegante sobre a organização da matéria e suas interações, porém está fora do seu escopo explicativo uma série de mistérios sobre a estrutura da matéria. Um deles: a carga do elétron e a do próton são exatamente iguais, pelo menos dentro da sensibilidade dos instrumentos atuais, mas eles são partículas muito diferentes e que não têm nenhuma relação entre si. É verdade que, se assim não fosse, não teríamos o universo na forma como o conhecemos. Cada um dos seis tipos de *quarks* conhecidos tem massa diferente quando comparados entre si. O mesmo ocorre para os três léptons e provavelmente para os três neutrinos. Desvendar esses mistérios manterá a agenda dos experimentos em física de altas energias repleta nas próximas décadas.

Há uma pergunta que sempre vem associada à discussão sobre a física experimental em altas energias. Mas, afinal, para que serve isso? É difícil antever possíveis conseqüências tecnológicas advindas do conhecimento mais profundo da estrutura da matéria. Certamente, elas ocorrerão, mas provavelmente numa época em que apenas nossos descendentes poderão usufruí-las. Porém, toda tecnologia desenvolvida para construir os aceleradores e os detectores de partículas tem impactos bastante palpáveis em nosso cotidiano. O exemplo mais citado – mesmo que grande parte da população não se dê conta – é o da WWW, inventada no Cern no início da década de 1990. Essa ferramenta foi desenvolvida para permitir que os cientistas – na época, já centenas deles –, trabalhando nos experimentos do LEP, pudessem ter mecanismos eficientes para a troca de informações, documentos, figuras, programas de trabalho, etc. A primeira vez que esse tema foi discutido no

Brasil foi no final de novembro de 1990, por Christian Jones, chefe da equipe que desenvolveu o processo no Cern, numa palestra no *workshop* sobre Computação de Alto Desempenho, realizado no Rio de Janeiro. O impacto econômico dessa invenção é bastante difícil de calcular, mas ele, por si, é suficiente para justificar o investimento feito pelos países europeus naquela instituição.

As aplicações derivadas da física das altas energias são bastante amplas. Os equipamentos modernos de imageamento para diagnóstico médico são derivados de detectores de partículas. Exemplos recentes são a tomografia axial computadorizada ou a tomografia por emissão de pósitrons. Aceleradores de prótons são usados hoje para o tratamento de câncer com grande sucesso, expondo o paciente a doses menores de radiação, focalizando os feixes diretamente no tumor. Aceleradores de elétrons são usados em muitos hospitais para a esterilização de equipamentos e roupas. Laboratórios de luz síncrotron, uma ferramenta usada hoje em aplicações muito variadas, indo de estudos biológicos a aplicações industriais, nada mais são do que aceleradores de elétrons de grande energia adaptados para as novas funções. Novos materiais são constantemente inventados para aplicações especiais em detectores, que depois encontram outras aplicações na indústria. A tecnologia para a fabricação de cabos supercondutores está sendo desenvolvida para os magnetos do LHC.

No Brasil, a expansão inicial da física esteve associada a essa área, com os avanços nas pesquisas em raios cósmicos, na década de 1940, culminando com o grande sucesso de Cesar Lattes, tendo papel fundamental na descoberta do pión na Inglaterra e a primeira observação dessa partícula em aceleradores, nos EUA. Esses eventos foram centrais para a formação do CBPF e do CNPq no início da década de 1950, associados a planos ambiciosos de construir aceleradores de partículas no país. Em paralelo, o sucesso na formação de uma geração de excelentes físicos teóricos. O final da Era Vargas esterilizou esses planos. Já no período militar,

uma parte importante das lideranças nessa área foi para o exílio. Essa época coincidiu também com a expansão da física da matéria condensada, que veio a dominar a agenda da física brasileira. Lattes concentrou-se no estudo dos raios cósmicos, expondo emulsões fotográficas em Chalcataya, na Bolívia, um processo bastante artesanal, em contraste com o desenvolvimento de sensores que usam eletrônica rápida para a aquisição de dados, que passou a dominar a física nos aceleradores. Foi só no meio da década de 1980 que novas gerações de físicos formaram grupos para trabalhar nas grandes colaborações internacionais, primeiro nos aceleradores e, mais tarde, em

experimentos para medir raios cósmicos. Hoje, esses grupos têm papel importante nos experimentos dos quais participam. Têm também histórias de sucesso para contar sobre o desenvolvimento de instrumentos e a utilização da indústria brasileira na construção de equipamentos usados nos detectores. A participação de grupos brasileiros nesses experimentos é de grande interesse estratégico para o país, pois freqüentemente permite o acesso a tecnologias que normalmente não estão disponíveis. Mas a grande atração para os cientistas que participam dessas atividades é a possibilidade de fazer parte de uma das grandes aventuras intelectuais da humanidade.

BIBLIOGRAFIA

FRASER, Gordon. *The Quark Machines, How Europe fought the Particle Physics War*. Bristol, IOP, 1997.

LEDERMAN, Leon; HILL, Christopher T. *Symmetry and the Beautiful Universe*. Amherst, Prometheus, 2004.

PAIS, Abraham. *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford, Clarendon Press, 1986.

PENROSE, Roger. *The Road to Reality*. Nova York, A. A. Knopf, 2004.

PICKERING, Andrew. *Constructing Quarks, a Sociological History of Particle Physics*. Chicago, U. Chicago Press, 1999.

TAUBES, Gary. *Nobel Dreams*. Redmond, Tempus, 1986.

WEINBERG, Steven. *Dreams of a Final Theory*. London, Vintage, 1993.
