Gaz. Fís., Vol. 11, Fasc. 4, 1988

O Universo da Física Subnuclear

JOÃO PULIDO
Centro de Física da Matéria Condensada
Av. Prof. Gama Pinto, 2, 1699 Lisboa, Codex, Portugal

1. Das moléculas às partículas elementares

Se considerarmos a evolução da Física no nosso século poderemos talvez, como faz H. Pagels, identificar cinco níveis evolutivos distintos do conhecimento: moléculas, átomos, núcleos, nucleões e «quarks». Muitas moléculas (a porção mais pequena destacável de uma substância) podem ser observadas ao microscópio óptico. Mas ao passar ao nível seguinte — o átomo — tal possibilidade desaparece por mais poderoso que seja o microscópio, porque só podemos «ver» um objecto se as suas dimensões forem maiores que um comprimento de onda da radiação usada. Ora o microscópio óptico usa luz visível: daí a sua limitação. Para prosseguir para além do nível molecular precisamos de diminuir os comprimentos de onda da radiação incidente. A maneira de o conseguir é usar feixes de partículas, como é o caso do microscópio electrónico, pois que a radiação associada aos electrões tem um comprimento de onda, mesmo para velocidade baixas, inferior ao da luz visível. Portanto, para observarmos a matéria a dimensões menores, precisamos de comprimentos de onda mais curtos, os quais se obtêm por aceleração de partículas até velocidades próximas das da luz. Assim, vai a matéria revelando a sua estrutura interna — primeiro o átomo com Ernest Rutherford em 1911, depois o núcleo e os seus constituintes, os nucleões (protões e neutrões) — graças à construção dos primeiros aceleradores de partículas em 1932 com Sir John Cockroft e E. S. Walton. O aperfeiçoamento e a progressiva sofisticação dos aceleradores de partículas permite nos anos 60 atingir o nível seguinte de estrutura — o dos constituintes dos nucleões que são os «quarks». Repare-se na longa marcha percorrida na compreensão da estrutura da matéria: a imensa diversidade de milhões de moléculas reduzida a cerca de uma centena de elementos atómicos e, num passo seguinte, a redução destes a três partículas (protões e neutrões no núcleo e electrões à volta). Nesta fase, em fins da década de 30, parecia restar apenas explicar a força nuclear que tão fortemente ligava protões e neutrões no núcleo. O caminho para o conhecimento da matéria parecia para alguns ter atingido o seu nível último de perfeição, por ter alcançado a característica mais desejada: a simplicidade. Mas eis que com o desenvolvimento tecnológico do pós-guerra este quadro simples e belo é destruído: novas partículas são descobertas e a sua proliferação parece não parar mais. É o começo da Física das Partículas.

Com a hipótese dos quarks e a sua confirmação experimental nos anos 60 atingiu-se um novo nível fundamental, a partir do qual toda a evolução é por agora apenas conjectural. Os quarks, que parece não existirem como partículas livres, são os constituintes dos chamados hadrões, de que o protão e neutrão eram os únicos exemplos conhecidos até 1947. Para além dos hadrões (partículas com estrutura interna), outra classe de partículas constituintes existe no estado livre e que não revelou até agora componentes internas — são os leptões, mais leves em geral, não afectados pelas interacções nucleares e de que o electrão é um exemplo. O nível fundamental até hoje atingido subdivide-se em dois grupos: os quartks e os leptões.

A interacção que liga os quarks para formar os nucleões e hadrões em geral é a mesma que liga os nucleões no núcleo. A única diferença está, como vimos atrás, na escala a que ela é observada: para certas gamas de comprimentos de onda vemos no núcleo protões e neutrões, para gamas mais baixas vemos distâncias mais pequenas, ou seja, só vemos quarks. Tal como

as forças eléctricas e magnéticas se podem considerar associadas a uma partícula — o fotão (partícula de luz que se move à velocidade de 3×10^5 km s^{-1}), também a força nuclear está associada a uma outra partícula: o gluão. Fotões e gluões, mediadores de interacções (electromagnética e forte), são partículas muito especiais: têm massa nula e só podem portanto existir movendo-se à velocidade da luz, de acordo com a Relatividade Restrita de Einstein. Não são constituintes da matéria: são os bosões, por oposição aos fermiões atrás mencionados. Bosões e fermiões são distinguíveis uns dos outros pelas suas propriedades quânticas. Os bosões sem massa, dos quais se conhecem até agora apenas o fotão e o gluão, foram associados a um conceito muito importante da Física Moderna: o conceito de simetria que vamos seguidamente examinar.

2. Simetrias, complementaridade, simetrias de «gauge»

O conceito de simetria pode ser tornado claro através de um exemplo: a experiência da difracção de electrões através de duas fendas, que é também a melhor demonstração da natureza ondulatória da matéria. Nesta experiência um feixe de electrões proveniente, por exemplo, de um filamento de tungsténio aquecido passa através de duas fendas num alvo, contando-se depois o número de electrões que atingem um segundo alvo (Fig. 1). Se mantivermos apenas um dos orifícios aberto, a distribuição de electrões obtida no segundo alvo é E_1 ou E_2 consoante o orifício. Se no entanto abrirmos simultaneamente os dois orifícios, a distribuição de electrões forma um padrão de difracção (curva E) com picos e vales alternados, ou seja uma interferência, característica exclusiva dos fenómenos ondulatórios. Note-se que se os electrões se comportassem como projécteis macroscópicos, a sua distribuição no alvo seria $E_1 + E_2$. Eles são de facto detectados como partículas reais e após muitas detecções individuais, verifica-se que a distribuição é E, evidenciado o comportamento dos electrões como ondas. É fácil reconhecer que as curvas E_1, E_2 e E, obtidas à custa da detecção de muitos electrões, representam em cada caso a probabilidade (ou mais exactamente a densidade de probabilidade) de se encontrar um electrão num dado ponto do alvo. Se no entanto quiséssemos testar o carácter corpuscular do electrão para saber se de facto o que passou nos orifícios foi uma partícula ou uma onda, em qualquer momento poderíamos fazê-lo: bastaria colocar um detector junto de qualquer um dos orifícios para «ver» os electrões. Mas assim destruiríamos o padrão de interferência E e obteríamos $E_1 + E_2$; o electrão é agora uma partícula! É este o dualismo onda-corpúsculo: há uma complementaridade, não podemos ter uma partícula e uma onda simultaneamente. O princípio em que se baseiam os aceleradores de partículas que brevemente referimos atrás é precisamente este: ao se acelerarem partículas a energia cada vez mais altas, a onda associada adquire comprimentos de onda cada vez menores permitindo ver distâncias cada vez mais curtas.

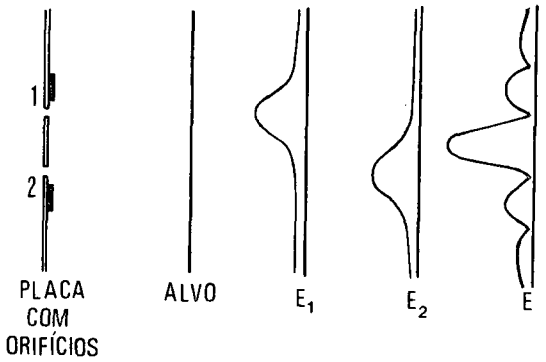

Fig. 1 — A experiência dos dois orifícios evidenciando o carácter ondulatório do electrão.

Mas voltemos à experiência dos orifícios e ao conceito de simetria: vimos que a interpretação desta experiência é a de que a onda electrónica se separa em duas ao passar pelo primeiro alvo e estas duas interferem entre si da mesma maneira que as ondas provocadas pela queda de duas pedras nas águas calmas de um lago. Onde as ondas estão em fase, a interferência é construtiva e muitos electrões são

contados no segundo alvo; onde as ondas estão em oposição de fase, a interferência é destrutiva e menos electrões são contados. Se as fases de ambas as ondas fossem adicionadas da mesma quantidade igualmente em todo o espaço, a diferença de fase em cada ponto não seria afectada e o mesmo padrão de interferência seria observado. Há portanto uma permanência do padrão, desde que a transformação das fases seja a mesma em todo o espaço da experiência. A invariância de uma propriedade perante uma transformação chama-se uma simetria. Note-se que se mudarmos a fase de uma das ondas apenas, já a figura de interferência vem alterada. A simetria deste sistema, que só se manifesta se a mesma transformação for aplicada nas fases em todo o espaço, é uma simetria global. Se pelo contrário a mudança de fase puder ser feita de modo arbitrário no espaço e no tempo, e verifica-se ainda a invariância do sistema, estaremos em presença de uma simetria local.

Suponhamos agora que queremos ir mais longe e pretendemos uma teoria que contenha uma simetria local: propriedades invariantes para transformações arbitrárias da fase das ondas electrónicas. É possível contruir uma tal teoria, mas ao fazê-lo introduz-se necessariamente um novo campo, ou seja uma nova partícula na teoria. Este campo, interactuante com o electrão, compensará as variações na diferença de fase, como que «absorvendo-as», de forma que o todo é localmente simétrico. Além disso o novo campo terá de ter alcance infinito, uma vez que não há limite para a distância a que as alterações de fase podem ser reconciliadas. Tal novo campo é precisamente o fotão. Esta simetria local, associada a uma partícula sem massa, chama-se uma simetria de «gauge» sendo o fotão o seu bosão de «gauge». É o mediador da interacção. A teoria de «gauge» do fotão em ligação com o electrão é a Electrodinâmica Quântica que descreve a interacção electromagnética.

A electrodinâmica quântica, estabelecida desde a década de 50, está pois associada a uma simetria local e exacta que traduz a invariância dos sistemas físicos envolvendo fotões e electrões, perante transformações locais feitas na fase do campo associado ao electrão — as transformações de «gauge». A electrodinâmica quântica foi testada com imensa precisão, o que constituiu um encorajamento para o desenvolvimento e aplicação das teorias de «gauge». O princípio das teorias de «gauge» foi então aplicado às interacções nucleares ou fortes (assim chamadas visto o acoplamento ou «força» da interacção ser muito superior ao da electromagnética). Surgiu assim a cromodinâmica quântica, teoria baseada numa simetria de «gauge» exacta, cujo bosão de «gauge», sem massa, é o gluão. A cromodinâmica quântica trata das interacções entre quarks e gluões, desempenhando os primeiros o papel homólogo aos electrões na electrodinâmica quântica. A nova teoria, criada nos anos 70, é bem mais complexa e não está tão bem compreendida como a anterior, sobretudo nos regimes de distâncias grandes, comparadas com as dimensões dos quarks: é o fenómeno atrás referido de os quarks não poderem aparentemente existir no estado livre — problema do confinamento. Os quarks são assim as únicas partículas capazes de sentir a interacção forte. Eles são os constituintes, como vimos anteriormente, dos chamados hadrões, partículas consideradas fundamentais até à década de 50 mas que mais tarde perderam o seu carácter privilegiado. A hipótese dos gluões, mais recente, data como vimos dos anos 70, tendo sido finalmente confirmada a sua existência em 1977. Embora a interacção forte fosse conhecida dos físicos desde muito antes, ela não era descrita em termos duma teoria de «gauge» com invariância local. Tudo se passava ao nível dos hadrões e o mediador da interacção era um deles — o *pião* ou *mesão* π, descoberto em 1947.

As peças fundamentais constituintes da matéria são pois, para os físicos deste final da década de 80, os quarks e os leptões, estes últimos, como o electrão, «insensíveis» às interacções fortes. Mas enquanto que o electrão é uma partícula electricamente carregada, por-

tanto com interacções electromagnéticas, há leptões que por serem electricamente neutros nem esta interacção sentem: são os enigmáticos neutrinos, já conhecidos desde os anos 30. Não está ainda estabelecido, meio século depois, se os neutrinos têm massa. Se a têm é extremamente reduzida — provavelmente são no máximo 20000 vezes mais leves do que o electrão, a partícula de menor massa conhecida. Não foi portanto devido à sua massa que o neutrino foi descoberto, nem à sua carga, pois não a tem. Mas que interacção é sentida por esta partícula, condição essencial para poder ser detectada? É a interacção fraca.

A hipótese do neutrino foi proposta em 1931 pelo físico Wolfgang Pauli para explicar a diferença de energia medida entre o neutrão e os produtos do seu decaimento quando no estado livre. Era então sabido que os neutrões livres não são estáveis «preferindo» desintegrar-se num protão e num electrão (declínio β, responsável pelo fenómeno da radioactividade):

$$n \rightarrow p + e^- + ?$$

A energia total do protão e electrão não era exactamente igual à energia (massa) contida no neutrão em repouso, mas sim ligeiramente inferior. O neutrino compensaria essa diferença reabilitando assim o princípio de conservação da massa-energia. A interacção em jogo é chamada interacção fraca.

A fim de entendermos um pouco o funcionamento desta interacção ao nível dos quarks, notemos em primeiro lugar que os protões e neutrões, os primeiros hadrões a serem descobertos, são compostos de três quarks, dois de tipo u e um de tipo d (no protão) e dois de tipo d e um de tipo u (no neutrão; Tabela I, pág. 144).

protão ~ u u d
neutrão ~ u d d

A carga eléctrica de u é $+2/3$ da carga do protão e a carga de d é $-1/3$ da carga do protão. Assim, o que se passa nesta interacção é antes de mais a passagem de um quark d a um quark u, o que traduz um aumento da carga de uma unidade. Mas a carga não pode ser gerada espontaneamente: a carga eléctrica total nos dois lados da reacção tem de ser a mesma. Ao criar-se uma carga positiva (correspondente à passagem de um quark u a um quark d) terá de criar-se simultaneamente uma negativa: é o electrão. A interacção em jogo terá de ser portanto mediada por uma partícula carregada e o facto de envolver o electrão como peça essencial permite-nos concluir não se tratar de interacção forte. Desde cedo se admitiu que o bosão mediador desta interacção (bosão W) teria de ter massa, na realidade uma massa bem mais elevada que a das partículas intervenientes. No entanto o facto de haver uma partícula de interacção com massa (ao contrário dos fotões e gluões) trazia problemas graves relacionados com a calculabilidade da teoria, uma vez que os acoplamentos das partículas entre si dependiam de uma massa. O ideal seria um bosão sem massa ligado a uma simetria exacta, de que a electrodinâmica quântica era o paradigma, mas tal possibilidade estava excluída. O modelo da electrodinâmica quântica levou mais uma vez a admitir que esta misteriosa interacção estaria também relacionada com uma simetria de «gauge», mas forçosamente não exacta, visto que o bosão W e o Z, seu correspondente neutro, têm massa. Tal facto tem a ver com o alcance extremamente curto da interacção fraca. Simetrias aproximadas são lugar comum na natureza (a simetria bilateral do corpo humano é apenas aproximada). Estas simetrias de «gauge» não exactas ou «quebradas» não têm alcance infinito, mas pelo contrário, numa situação limite de distâncias muito pequenas, tornam-se cada vez melhores, isto é, descrevem com maior precisão a realidade. Para essas distâncias muito pequenas (à escala das dimensões do protão e do neutrão), correspondendo a energias muito elevadas e comprimentos de onda muito baixos, o bosão W deverá parecer sem massa e ser pois tratado em pé de igualdade com o fotão. Ao fim de uma epopeia que durou quase três décadas, W e Z foram finalmente observados

em 1983 no CERN (Laboratório Europeu de Investigação Nuclear) em Genebra, Suíça.

Um novo conceito foi assim introduzido na formulação das teorias de «gauge»: a quebra espontânea da simetria, que partindo do pressuposto de uma simetria de «gauge» exacta para energias muito elevadas é alterada quando reduzimos a energia. Para altas energias, fotões (mediadores da interacção electromagnética) e W's e Z's (mediadores da interacção fraca) devem ser os bosões intermédios de uma única interacção unificada e diferirem apenas na carga. Porém, para energias mais baixas, uma componente desta interacção liga-se a uma simetria que se perde e o seu bosão intermédio deixa de ter massa, enquanto a outra componente se mantém ligada a uma simetria exacta e portanto a um bosão sem massa — o fotão. Na realidade a simetria não é destruída, mas apenas «escondida»: a teoria retém a sua simetria, mas os objectos por ela descritos não. A técnica segundo a qual é possível atribuir massa a alguns campos de «gauge», retendo embora uma simetria de «gauge» exacta ao nível da teoria, é o mecanismo de Higgs. Desta técnica resulta a introdução de uma nova partícula na teoria: o bosão de Higgs, electricamente neutro e que apenas sente a interacção fraca. O campo associado ao bosão de Higgs é um campo especial que tem a propriedade específica de não ser nulo no vácuo. Normalmente pensa-se ser o vácuo um espaço inteiramente vazio, mas na Física o vácuo é definido mais precisamente como um estado em que todos os campos têm a sua energia mais baixa possível. Para a maioria dos campos a energia é minimizada quando o valor do campo é zero em todos os pontos, por outras palavras, quando o campo é «desligado». Um campo de electrões, por exemplo, tem a sua energia mínima quando não há electrões. O campo de Higgs é invulgar a este respeito. Reduzi-lo a zero custa energia: a sua energia é a mais baixa possível quando o campo tem um valor uniforme em todos os pontos do espaço.

O modelo da realidade física prevalecente neste final dos anos 80, que acabámos de descrever sumariamente, é o chamado modelo «standard» (Tabelas I e II). A confirmação completa da teoria do modelo «standard» requer a observação experimental do bosão de Higgs.

TABELA I—*Os fermiões do modelo «standard». Os neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ), os mais enigmáticos, são neutros e podem não ter massa ou ser extremamente leves. As suas propriedades devem ter profundas consequências para a física das altas energias e para a Astrofisica/ /Cosmologia. Dos quarks, (u=up, d=down, c=charm, s=strange, t=top, b=bottom), o «top» não foi ainda observado experimentalmente, o mesmo acontecendo com o neutrino do τ. A unidade de carga eléctrica é a carga do protão.*

	1.ª geração	2.ª geração	3.ª geração	Carga eléctrica
Quarks	u	c	t(?)	+2/3
	d	s	b	−1/3
Lepitões	ν_e	ν_μ	ν_τ (?)	0
	e	μ	τ	−1

TABELA II—*Os bosões do modelo «standard». Os bosões fracos ($W^\pm$, Z^o) são respectivamente 87 e 99 vezes mais pesados que o protão e estão associados a uma simetria quebrada através do fenómeno de quebra espontânea ao qual se liga o Higgs, a grande incógnita do sistema. Gluões e fotões estão associados a uma simetria exacta.*

Bosão	Carga eléctrica	Interacção de que é mediador	Massa
Gluão	0	Forte	0
W+, W−, Z°	+1, −1, 0	Fraca	90 a 100 vezes a massa do protão
Fotão	0	Electro-magnética	0
Higgs	0	—	?

3. O Modelo «Standard»

O que se designa correntemente por modelo «standard» é, no sentido restrito, uma teoria consistente das interacções electromagnéticas e fracas e sua unificação a energias elevadas. É vulgar incluirem-se também as interacções fortes que representam no entanto um sector distinto da teoria e que, sobretudo no regime de grandes distâncias à escala dos quarks, carece ainda de compreensão — o problema do confinamento, como vimos. O mecanismo da quebra espontânea de simetria, solução engenhosa para o problema da massa dos bosões das interacções fracas (W e Z), não se encontra ainda experimentalmente testado, pois falta encontrar a sua peça essencial, o bosão Higgs. Existem alternativas para o caso de esta partícula não existir, sem comprometer o essencial do modelo «standard» restrito. Recorrem no entanto a estruturas teóricas bem mais elaboradas e acabam por prever a existência de estados físicos mais complexos.

Os bosões (W, Z, fotões, gluões e Higgs) representados na Tabela II são pois, no modelo «standard», os mediadores de interacção (caso dos quatro primeiros) ou ligam-se à geração de massa (Higgs). As «peças estruturais» do modelo «standard» são os fermiões (Tabela I) subdivididos em quarks e leptões, de que falámos atrás. Os primeiros são sensíveis a todas as interacções, os segundos apenas às fracas e electromagnéticas, excepto o caso dos neutrinos que, sendo leptões neutros, apenas são sensíveis às interacções fracas.

Resta referir um aspecto essencial no modelo «standard»: a enigmática repetição das gerações fermiónicas. Vimos que os quarks de tipo u e d são os constituintes dos protões e neutrões. No declínio β intervinham além disso os neutrinos e os electrões. Este conjunto de quatro fermiões (quarks u, d, neutrino e electrão) constitui a primeira geração completa de fermiões. Ainda nos anos 60, ao tempo da hipótese dos quarks e dos seus primeiros testes, foi em simultâneo apresentada a hipótese de um terceiro quark, o quark s ou estranho, constituinte fundamental dos hadrões estranhos. O modelo de quarks contava assim desde a sua origem com três quarks, u,d,s. Só bem mais tarde (1970) foi apresentada a hipótese dum quarto quark, o quark c ou «charm», para explicar a supressão relativa, ou seja a raridade, de certos processos físicos. Com o «charm», descoberto em 1974, o electrão pesado ou muão (partícula instável descoberta nos anos 40 nos raios cósmicos), um novo neutrino a ele associado (distinto do neutrino do declínio β) e o próprio quark s, forma-se uma segunda geração de fermiões que comporta apenas partículas instáveis. Possível excepção à instabilidade é o sempre enigmático neutrino — neste caso o neutrino do muão descoberto em 1962. O quark s, que a princípio parecia juntar-se a u e d no primeiro modelo de quarks, era assim visualizado diferentemente. Mas não era o fim da caminhada: a necessidade de uma nova geração não se fez tardar e em 1977 o quinto quark, o quark b ou «bottom», foi experimentalmente confirmado. Entretanto, pela mesma época um novo leptão carregado, mais pesado que o electrão e o muão tinha sido descoberto: o τ. Por consistência da teoria e para que a terceira geração seja homóloga da primeira e segunda, aguarda-se hoje com alguma expectativa a confirmação do quark «top» e do neutrino do τ. Tudo converge para que se observem. Poderão assim ficar completas três famílias homólogas de fermiões, das quais apenas a primeira é constituída pelas partículas estáveis que são também as mais leves.

Mas porquê esta repetição de famílias homólogas? Não ficaria o Universo completo com apenas uma família, tanto mais que as outras são instáveis? E haverá uma quarta família ou mais, eventualmente? Enquanto no passado dispunhamos de modelos que explicavam as massas dos hadrões, não dispomos hoje de nenhuma indicação para entender o espectro de massa dos quarks e leptões. O modelo «standard» não dá qualquer resposta para estas interrogações e chegamos assim ao seu limite: ele não pode ser a teoria última do Universo.

4. Para além do Modelo «Standard»

Os sucessos verificados com a unificação das interacções electromagnéticas e fracas, o comportamento dos acoplamentos forte e electro-fraco que para muito altas energias parecem aproximar-se e, dever-se-á dizê-lo, a paixão da mente humana pelas unificações, levaram ao aparecimento em 1973 do primeiro modelo para unificação das três interacções: fortes, fracas e electromagnéticas. Este modelo para a chamada grande unificação, devido a Sheldon Glashow, que muito contribuira para o modelo «standard», e ao seu discípulo Howard Georgi, tinha o mérito de apresentar uma previsão revolucionária e susceptível de verificação experimental: o decaímento do protão.

É fácil entender a ideia mestra da grande unificação: sendo a interacção forte e a electro-fraca descritas, como vimos, por teorias de «gauge» e aproximando-se os valores das respectivas constantes de acoplamento à medida que a energia aumenta (Fig. 2) é de esperar

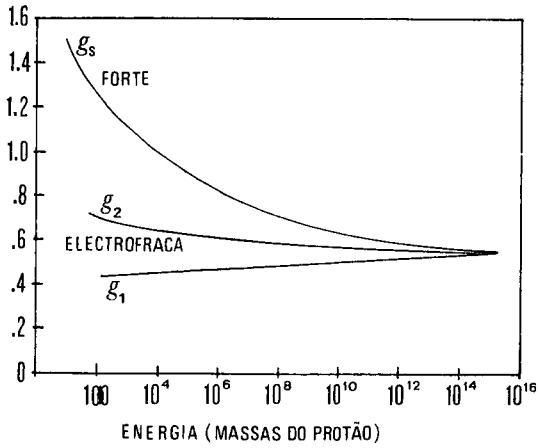

Fig. 2 — A grande unificação das interacções forte, electromagnética e fraca aqui representada na convergência das três constantes de acoplamento.

que os dois acoplamentos se possam unir. Para isso terá de haver algures. no sector de energias muito altas, uma nova teoria de «gauge» com bosões de «gauge». Essa teoria sofrerá uma quebra espontânea à escala da grande unificação e, tal como no modelo «standard», alguns dos seus bosões adquirirão massa enquanto que outros, entre os quais os gluões, fotão, W e Z permanecem sem massa. Esses bosões, de massa extremamente elevada, deverão assim ser os mediadores de uma interacção entre quarks e leptões que tem lugar a distâncias extremamente curtas. Por terem massas muito altas, a simetria associada a estes bosões de «gauge» é extremamente remota às distâncias a que conseguimos ver com os aceleradores do presente, tão remota que não é observável. Por via dos aceleradores é provável que jamais se consiga atingir tais distâncias. Estamos pois a descrever uma física possível a uma escala à qual interacções fortes, electromagnéticas e fracas perderam a sua individualdade, restando apenas uma interacção única, perante a qual quarks e leptões são necessariamente indistinguíveis. A escala a que tal ocorre era no modelo de Georgi-Glashow 5×10^{14} GeV (*) (1 GeV $\Leftrightarrow$ 1.782×10^{-24} g), equivalente a uma distância de 10^{-29} cm. Um tal fenómeno tem como consequência o possível desaparecimento dos quarks e a sua transformação em leptões, resultando assim no decaimento do protão. Toda a matéria, tal como a conhecemos, pode pois não ser estável. O tempo de vida médio de um protão, calculado no modelo de Georgi-Glashow, era de 10^{29} anos, muito maior portanto que a idade do Universo que é cerca de 10^{10} anos. Em princípio o decaimento do protão será pois observável: bastará para isso dispor de uma grande quantidade de determinada substância cujo número de protões se poderá calcular, colocar um detector em volta e aguardar a «assinatura» do acontecimento, isto é, a detecção do decaimento. Os resultados de mais de uma dezena de experiências realizadas ao longo da última década são inconclusivos e apenas permitem estabelecer que o tempo de vida do protão é superior a 6×10^{31} anos, excluindo assim o modelo de Georgi-

(*) A massa do protão corresponde aproximadamente a 1 GeV.

Glashow. A hipótese da grande unificação prevalece no entanto e será difícil alguma vez excluí-la.

Com o abandono do modelo mínimo para a grande unificação, muitos outros modelos têm proliferado, os quais evitam a perspectiva assaz desagradável para os físicos de não existir nenhum fenómeno, nenhuma física observável entre a escala de unificação electro-fraca e a de grande unificação. No entanto todos aqueles modelos são igualmente «bons» na medida em que estão de acordo com a fenomenologia observada e preservam aspectos essenciais da teoria, mas nenhum prevalece sobre qualquer outro.

As teorias de grande unificação sofriam de um problema essencial derivado da coexistência de escalas de energia completamente díspares: da escala do W e Z à escala da grande unificação existe um fosso correspondente a um factor 10^{13} no mínimo. Havia problemas de calculabilidade insolúveis, do tipo de a escala mais baixa sofrer correcções da ordem da escala mais alta, a menos que se fizessem ajustamentos nos parâmetros da teoria, afectando muitas casas decimais. Uma tal situação é verdadeiramente «flagelante» pois põe em causa a própria validade da teoria. A dificuldade foi resolvida pela introdução em 1981 de mais uma simetria matemática: a super-simetria que liga por uma correspondência biunívoca bosões e fermiões. Assim, se o mundo for supersimétrico, cada partícula conhecida terá de ter o seu parceiro supersimétrico: a cada bosão conhecido corresponderá um fermião e a cada fermião um bosão. Infelizmente não foi possível até agora fazer previsões únicas e consistentes sobre a massa dos parceiros supersimétricos e não há nenhumas indicações experimentais no sentido da sua existência. Todos os resultados obtidos pela experiência são compatíveis com o modelo «standard» aqui descrito.

Não fizemos até agora referência à quarta interacção conhecida no mundo físico, pois que não desempenhou papel relevante no desenvolvimento da física das altas energias, mas que foi de longe a primeira a ser conhecida: a interacção gravitacional. O velho sonho da unificação, aliado a progressos recentes (1984) na teoria de campo das «superstrings» (supercordas — entidades matemáticas unidimensionais) levou ao projecto extremamente ambicioso de estabelecer um esquema único, unificando as quatro interacções: gravitacional, fraca, electromagnética e forte. Embora tal realização parecesse inicialmente ao alcance quase imediato dos físicos, o caminho apresenta-se hoje bem mais espinhoso e tortuoso, caso ele seja possível. O problema reside fundamentalmente na multiplicidade quase ilimitada de modelos possíveis e sua arbitrariedade, todos eles compatíveis com a Física observada e incapazes, ao contrário do modelo «standard», de produzirem previsões específicas e testáveis pela experiência. As «superstrings» poderão descrever o mundo à escala da unificação das quatro interacções (escala de Planck de 10^{19} GeV) que é possivelmente superior à escala da grande unificação simples, mas a sua ligação com a física fenomenológica, ao contrário do que acontecia com a grande unificação, permanece ainda obscura.

5. Conclusão

Dispomos hoje de um edifício interpretativo das partículas elementares e suas interacções — o modelo «standard» — que funciona, na opinião de muitos, surpreendentemente bem. Falta, relembremos, testar uma peça essencial: o bosão de Higgs ou uma sua alternativa. Mas o modelo «standard» não prevê, como vimos, o número de gerações fermiónicas, não explica a sua repetição nem a sua massa, nem tão pouco nos revela porque funciona tão bem.

A descoberta do bosão Z°, partícula instável, foi para a primeira destas questões particularmente importante. Sendo electricamente neutro, pode decair em pares de neutrinos e anti-neutrinos de todas as gerações. O seu tempo de vida é uma medida do número de famílias, porque quanto mais gerações houver,

mais opções existem para o seu decaimento. Um grande número de gerações significará um tempo de vida mais curto. Uma medida muito cuidadosa do tempo de vida do Z° poderá ser feita no acelerador LEP (Large Electron-Positron Collider) em construção no CERN. Entretanto há resultados cosmológicos que sugerem ser o número de gerações quando muito de quatro.

Os novos aceleradores que, esperamos, hão-de ter os seus dias gloriosos na década de 90, vão explorar a Física desconhecida em duas frentes: a da precisão e a da energia. A medida rigorosa do tempo de vida do Z° é um exemplo do possível alargamento da fronteira da precisão. O trabalho de pesquisa do Higgs é outro. O LEP e o SLC (Stanford Linear Collider em Stanford, Califórnia que utiliza uma máquina preexistente, o SLAC) são aceleradores que vão explorar a fronteira de precisão. A fronteira da energia será explorada pelo LHC (Large Hadron Collider) que possivelmente utilizará as instalações do LEP e pelo SSC (Superconducting Super Collider) nos Estados Unidos, o maior a ser provavelmente alguma vez construído, ambos ainda em fase de estudo. Estes aceleradores deverão atingir uma escala de energia de 10 000 a 40 000 vezes a energia correspondente à massa do protão (Tabela III).

São estas as fronteiras da Física das Altas Energias. Uma discussão detalhada da Física a energias muito mais elevadas, como a da grande unificação ou a da escala de Planck, leva-nos necessariamente muito longe e é de utilidade prática questionável. Lembremo-nos que o desenvolvimento do conhecimento do universo físico mostra-nos que houve introdução de ideias novas, sempre que as anteriormente estabelecidas se revelavam incapazes de explicar fenómenos observados. Essas ideias novas produziam previsões testáveis pela experiência para além desses fenómenos observados. O caso do modelo «standard» é exemplar mas restam, como vimos, lacunas. Muitas teorias recentes constituem pelo contrário verdadeiros «saltos para a frente» pois que, sendo embora exercícios brilhantes, não explicam as lacunas

TABELA III—*Os principais aceleradores em construção e em projecto. São anéis de colisão de partícula-antipartícula com excepção do SLC que é um acelerador linear. Note-se que a energia máxima atingida é, no caso dos aceleradores electrão-positrão, muito mais baixa, permitindo no entanto estes um varrimento muito mais preciso do espectro da energia, dada a simplicidade estrutural do electrão relativamente ao protão.*

Acelerador	Laboratório	Partículas Aceleradas	Comprimento	Energia Máxima (1)	Data de Início
Tevatron	Fermilab, Batavia, Illinois, USA	Protões-antiprotões	7 Km	2 000	1987
SLC	SLAC, Stanford, Califórnia, USA	Electrões-positrões	3 Km	50	1988
UNK	Serpukhov, URSS	Protões-antiprotões	21 Km	6 000	⩾ 1994
LEP	CERN, Genebra, Suíça	Electrão-positrão	27 Km	200	1990
LHC (2)	CERN, Genebra, Suíça	Protão-antiprotão	27 Km	17 000	⩾ 1995
SSC (2)	USA, Dallas, Texas	Protão-antiprotão	85 Km	40 000	⩾ 1997

(1) Em unidades de massa do protão.

(2) Em projecto.

observadas e introduzem conceitos cuja ligação à realidade física não pode sequer ser testada. Julgamos que, mais do que nunca, a física teórica sofre hoje, no final dos anos 80, deste mal. Vale a pena, para terminar, citar Werner Heisenberg: «A teoria moderna (*) não se desenvolveu a partir de ideias revolucionárias que tivessem sido, por assim dizer, introduzidas nas ciências exactas a partir do exterior. Pelo contrário, as ideias novas surgiram a partir da investigação que tentava cumprir de uma forma consistente o programa da física clássica — elas são uma consequência da própria natureza desta».

BIBLIOGRAFIA

A seguinte lista de obras de divulgação científica não é de algum modo completa mas cobre totalmente os assuntos tratados neste artigo.

H. GEORGI — «A Unified Theory of the Elementary Particles and Forces», *Scientific American*, Abril (1981).

S. WEINBERG — «The Decay of the Proton», *Scientific American*, Junho (1981).

C. RUBBIA e S. VAN DER MEER — «The Search for Intermediate Vector Bosons», *Scientific American*, Março (1982).

E. BLOOM e G. FELDMAN — «Quarkonium», *Scientific American*, Maio (1982).

K. ISHIKAWA — «Glueballs», *Scientific American*, Novembro (1982).

C. REBBI — «The Lattice Theory of Quark Confinement», *Scientific American*, Fevereiro (1983).

H. HARARI — «The Structure of Quarks and Leptons», *Scientific American*, Abril (1983).

A. VILENKIN — «Cosmic Strings», *Scientific American*, Dezembro (1987).

D. SCHRAMM e G. STEIGMAN — «Particle Accelerators Test Cosmological Theory», *Nature*, **314**, 4 Abril (1985).

D. PERKINS — «Introduction to High Energy Physics», segunda edição, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1982).

H. PAGELS — «O Código Cósmico», Gradiva, Lisboa (1986); versão original: «The Cosmic Code», Pelican Books (1984).

(*) Referia-se à teoria quântica dos anos 20.

APEF — Associação Portuguesa dos Engenheiros Físicos

Mais uma sigla a fixar: Associação Portuguesa dos Engenheiros Físicos. Teve lugar no 23.º Cartório Notarial de Lisboa, a sua escritura pública no passado dia 30 de Setembro. Composta de entidades privadas (licenciados em Engenharia Física e alunos dos Cursos de Engenharia Física), a nível nacional, propõem-se ao desenvolvimento, cooperação e solidariedade inter-membros e inter-associações já existentes; ao fomento e defesa de interesses dos Engenheiros Físicos nos campos profissional, social e cultural; à promoção, reconhecimento e divulgação do ramo Engenharia Física como impulsionador de actividades técnico-científicas específicas, à luz dos países industrializados onde esta profissão aparece como dinamizadora das novas tecnologias; desenvolver relações com associações congéneres nacionais e estrangeiras, podendo para o efeito aderir a Uniões e Federações internacionais.

É portanto uma associação com vista ao progresso da Engenharia Física, estimulando os esforços dos seus associados em todos os domínios de actividade. Compõe-se de órgãos sociais (núcleos regionais e comissões especializadas) e tem a sua sede no concelho de Almada, instalada no «*campus*» da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Se do seu interesse contacte-nos:

Associação Portug. dos Engenheiros Físicos
Campus da FCT — Univ. Nova de Lisboa
Quinta da Torre, 2825 Monte da Caparica
Tel. 01-2954464 (ext. 0105), Telex 14542,
Fax 01-2955561