

# Da Grande Unificação à Superforça final

JORGE DIAS DE DEUS

Instituto Nacional de Investigação Científica/Instituto Superior Técnico

## 1. Introdução

Em Março de 1980 decorria na cidade do Porto o Encontro Nacional de Física da Sociedade Portuguesa de Física, organizado pela Delegação nortenha da Sociedade. O tema da primeira sessão, a ter lugar após os oficiais discursos de abertura, era o de: A Grande Unificação das Forças da Natureza.

Glashow, Weinberg e Salam tinham ganho o prémio Nobel da Física de 1979, poucos meses antes. O assunto da Unificação já era pois coisa da moda. De facto, a teoria da unificação das interacções electromagnéticas e fracas tinha um apelo estético irresistível. A que não resistiram, por exemplo, os membros da Comissão de atribuição do prémio Nobel. Se é verdade que a existência de correntes neutras — condição necessária para a validação da teoria — tinha ficado em 1974 experimentalmente demonstrada, e que as várias determinações do ângulo de Weinberg — que mede, digamos assim, o grau de mistura da corrente fraca com a corrente eléctrica — eram todas consistentes, também é verdade que não havia na altura a prova provada de que a teoria estava certa. A Comissão de atribuição do prémio Nobel correu pois um risco ao atribuir o prémio a Glashow, Weinberg e Salam. Se o risco foi pequeno ou grande é difícil de dizer. Para a comunidade de Física de Altas Energias era claro que a teoria tinha de ser aquela. Tão certa estava a comunidade que conseguiu convencer os países membros do Centro Europeu de Pesquisa Nuclear (CERN) a construir o acelerador e sistema de aniquilação prótão-antiprotão com energia de 540 GeV (600 vezes a massa do protão) no centro de massa, que levou à demonstração física, isto é, experimental, do triunfo da teoria. A descoberta dos bosões W e Z em 1982/83, com massas iguais às previstas teoricamente, veio consagrar, sem vestígio de dúvidas, a

teoria electro-fraca de Weinberg — Salam e veio provar também que a Comissão do prémio Nobel de 1979 não se enganara e que o gasto de milhões de francos suíços no acelerador SPS e no anel de colisões prótão-antiprotão não fora inglório.

Em 1980, porém, nada disto era ainda claro. A unificação electro-fraca, embora não testada, estava praticamente aceite. Avançava-se rapidamente — com demasiada rapidez, como se verá — na via da Grande Unificação, englobando na unificação as interacções fortes. A gravitação, a interacção mais querida a Einstein, permanecia então ainda em estado de abandono, parecendo desligada do resto.

O que é que mudou e não mudou desde 1980?

Para responder, talvez seja melhor começar pelo princípio.

## 2. As interacções

No contacto com o mundo físico observamos uma quantidade infinitamente variada de fenómenos: a maçã que cai, a ave que voa, o cometa que passa, o planeta que roda e parece preso ao sol, a estrela que morre explodindo, a molécula que se forma, as moléculas que se encadeiam, o gelo que se funde, a bússola que se orienta, a onda que se propaga, a partícula que decai, o núcleo atómico que se desintegra. A lista de exemplos não tem fim. O que é notável é ter sido possível, no começo deste século, reduzir a física de toda essa infinidade de fenómenos à física de quatro interacções fundamentais: GRAVITACIONAL, ELECTRO-MAGNÉTICA, FRACA e FORTE. Enquanto toda a estrutura do Universo, nas grandes escalas de espaço e de tempo, nos fala da gravitação; a Química, a Biologia, a Biofísica constroem-se essencialmente com base no electromagnetismo; a estabilidade dos núcleos e de todas as coisas

com que lidamos revelam a presença da interacção forte; e o fluxo cósmico existente de neutrinos e a instabilidade de muitas partículas nos dizem que há ainda que acrescentar a interacção fraca.

O que é uma interacção? É uma força, uma força recíproca entre objectos materiais. Como se aprende aliás numa das leis de Newton. Supondo que as interacções resultam dum potencial  $V$  (Força = gradiente de  $V$ ) podemos escrever:

$$V = -\alpha e^{-\mu r} / r$$

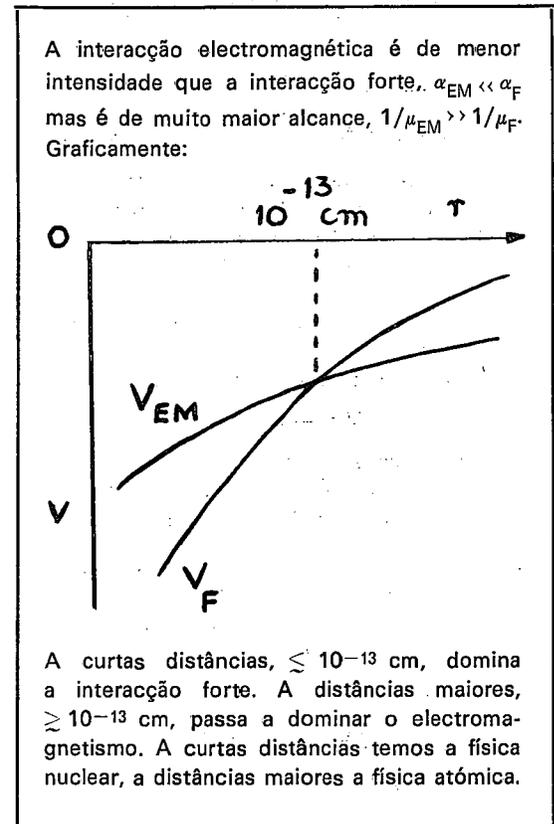
em que  $r$  é a distância entre os objectos em interacção. Este potencial é o chamado potencial de Yukawa e contém dois parâmetros  $\alpha$  e  $\mu$ . O parâmetro  $\alpha$  mede a intensidade da interacção ou, dizendo doutra maneira, mede as cargas dos objectos em interacção. Existem cargas eléctricas, cargas gravitacionais mais conhecidas por massas, cargas fracas e cargas fortes. Quanto maior for  $\alpha$ , com  $\alpha > 0$ , maior será a força atractiva. O parâmetro  $\mu$  mede o alcance da interacção. O factor exponencial  $e^{-\mu r}$ , com  $\mu > 0$ , faz com que a interacção desapareça rapidamente quando a distância aumenta. Quanto maior é  $\mu$  menor é o alcance da interacção. Para  $\mu = 0$  o alcance é infinito e temos os conhecidos potenciais de Newton (gravitação) e Coulomb (electromagnetismo).

As interacções gravitacionais (G), electromagnéticas (EM), fracas (f) e fortes (F) diferem muito quanto aos parâmetros  $\alpha$  e  $\mu$ :

	G	EM	f	F
$\alpha$	$10^{-40}$	$10^{-3}$	$10^{-5}$	10
$1/\mu$	$\infty$	$\infty$	$10^{-16}$ cm	$10^{-13}$ cm

Há interacções que são mais fortes, as interacções fortes, e há outras que vão mais longe, como a interacção electromagnética. A física do átomo, envolvendo distâncias da ordem de  $10^{-8}$  cm é determinada pelo electromagnetismo (átomo de Rutherford-Bohr), mas já a física do núcleo atómico, com distâncias

da ordem de  $10^{-13}$  cm, é controlada pela interacção forte. (ver caixa).



A muito grandes distâncias, entre as grandes massas das galáxias, estrelas e planetas, já que estes objectos são feitos de matéria electricamente neutra, domina absolutamente a interacção mais débil, a gravitação.

Se as quatro interacções são tão diferentes umas das outras, umas vão longe outras são mais intensas, como dar sentido a uma unificação?

### 3. A ideia de unificação

Um primeiro aspecto a ter em conta, antes de se entrar propriamente na ideia de unificação, é o da universalidade das interacções. Quando se diz que maçãs, peras, laranjas, pessoas, aviões caem devido à acção da gravidade está-se a fazer uma afirmação sobre a universalidade da gravitação. Um salto gigantesco no sentido da universalidade foi dado por Newton no século XVII ao propor que as forças terrestres gravitacionais (as que fazem cair à superfície da Terra maçãs e

outros objectos) tinham a mesma origem que as forças cósmicas responsáveis pela estabilidade e movimento no sistema solar (ver caixa junta).

### Unificação das forças terrestres e cósmicas

A diferença de energia potencial entre um objecto de massa  $m$  à altura  $h$  e o mesmo objecto na superfície da Terra é

$$\Delta V = mgh$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade ( $g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$ ).

Segundo a lei da gravitação universal

$$V = -GmM/r$$

onde  $G$  é a constante de gravitação universal,  $M$  a massa da Terra e  $r$  a distância do objecto ao centro da Terra:  $r = R + h$ ,  $R$  sendo o raio da Terra ( $R \approx 6370 \text{ km}$ ). Vem

$$\Delta V = -GmM/(R+h) + GmM/R$$

e, para alturas relativamente pequenas,  $h/R \ll 1$ ,

$$\Delta V \approx GmM/R \cdot [1 - (1+h/R)^{-1}]$$

$$\Delta V \approx GmMh/R^2$$

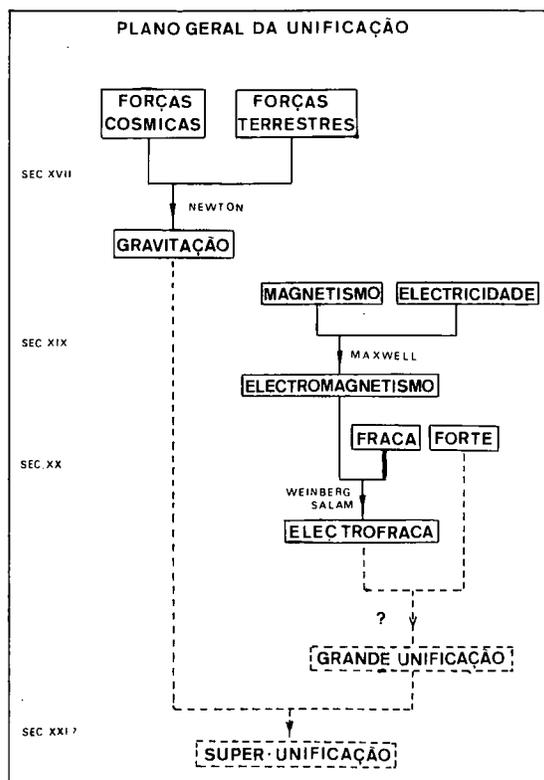
Finalmente  $g = GM/R^2$ .

Duas constantes,  $g$  e  $G$ , aparentemente sem ligação e obtidas com medições experimentais completamente distintas, estão relacionadas de forma muito simples graças à ideia de universalidade das forças terrestres e das forças cósmicas.

Com a unificação propriamente dita pretende-se tratar conjuntamente interacções que à partida pareciam ter origem diversa, correspondendo a físicas diferentes. O exemplo histórico mais importante é o da unificação da electricidade com o magnetismo. Ao longo dos séculos XVIII e XIX desenvolveram-se, de costas uma para a outra, duas ciências separadas, a electricidade e o magnetismo. Com os trabalhos de Ampere, Oersted, Faraday, ficou claro que os fenómenos eléctricos tinham uma correspondência em fenómenos magnéticos e vice-versa. Correntes eléctricas criavam campos magnéticos e as variações nos campos magnéticos criavam correntes eléctricas. De facto, a electricidade e o magnetismo são as duas faces duma mesma ciência: o electro-

magnetismo. O casamento unificador do magnetismo com a electricidade formalizou-se em definitivo com as famosas equações de Maxwell e viu a sua consagração com a descoberta por Hertz, no princípio do século, das ondas electromagnéticas.

A unificação das teorias electromagnética e fraca, realizada com a teoria electrofraca de Weinberg e Salam, corresponde a uma unificação equivalente à operada por Maxwell. O plano visionário de Einstein dum campo unificado está hoje, na década de 80, actual e podemos mesmo pensar num plano geral da unificação (ver caixa).



#### 4. Os problemas essenciais da unificação

As questões que é preciso resolver para que a unificação faça sentido e tenha possibilidade de êxito são pelo menos as seguintes:

1 — Terão todas as interacções a mesma forma? Haverá um princípio unificador para todas as interacções? Tal princípio parece realmente existir: todas as interacções satisfazem o princípio de *invariância de padrão*.

2 — Como é que se podem unificar interacções com intensidades tão diferentes? Essa diferença nas intensidades poderá ser um acidente de «baixas» energias e temperaturas. À medida que se aumente a energia nos processos físicos assistir-se-á à convergência dos valores dos diferentes  $\alpha$ . No passado do nosso Universo, quando as temperaturas eram da ordem dos milhões de graus, a unificação teria sido algo evidente (só que nenhum humano podia existir nessas condições para observar tal unificação!).

3 — Como é que se pode falar de unificação quando os alcances  $1/\mu$  das interacções são tão diferentes? A resposta parece estar na possibilidade das partículas portadoras das interacções poderem, nalguns casos, adquirir massa. Tal massa, que é essencialmente proporcional a  $\mu$ , controla o alcance da interacção, mas não afecta propriamente a natureza da interacção. Da mesma forma que, para uma mesma interacção, um magneto pode estar em dadas condições desmagnetizado (massa zero) ou, noutras condições, adquirir uma magnetização espontânea (massa diferente de zero). A este último fenómeno, que no caso das interacções fundamentais corresponde a potenciais de curto alcance, dá-se em geral o nome de *quebra espontânea de simetria*.

Vamos agora ver, em linhas gerais, como são tratados estes três problemas.

## 5. O princípio unificador: a invariância de padrão

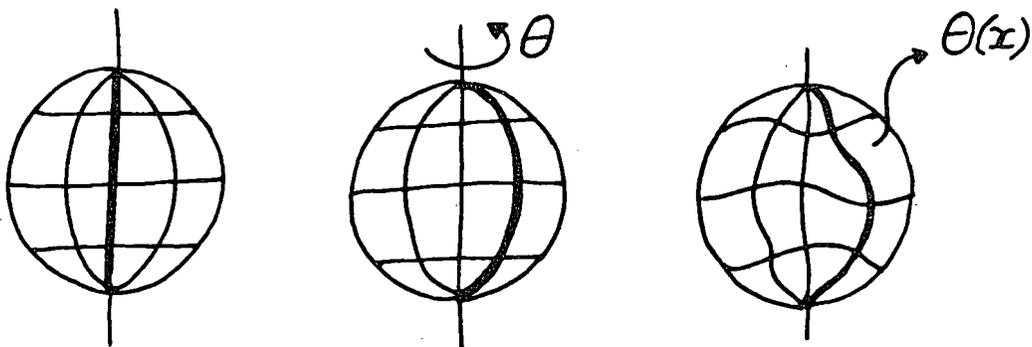
Sempre que, relativamente a dada operação de simetria, a física não se altera diz-se que há uma invariância do sistema em estudo e que uma lei de conservação é obedecida. Invariância dum sistema físico no que respeita à translação espacial leva à conservação do momento linear. Invariância em relação a translação temporal conduz à conservação da energia.

Na descrição das interacções fundamentais há a necessidade de recurso a uma descrição em termos de campos físicos. A cada ponto  $x$  do espaço-tempo associa-se uma função  $\psi(x)$  que pode ter várias componentes  $\psi^i(x)$ . Invariância de translação, por exemplo, significa que a física não se altera se se fizer nos campos a transformação  $\psi(x) \rightarrow \psi(x + a)$ . Uma transformação importante é a «transformação de fase» em campos complexos:

$$\psi \rightarrow \psi' = \psi e^{i\theta}$$

e a invariância a ela associada. Esta transformação é o que se chama uma transformação de padrão («gauge»). O parâmetro  $\theta$ , que pode ter várias componentes dependendo das componentes de  $\psi$ , pode depender ou não da coordenada espaço-temporal  $x \equiv (x^0, x^1, x^2, x^3)$ . Se  $\theta = \text{constante}$  a transformação chama-se *global*, e é o equivalente a uma «rotação» do sistema em seu conjunto. Se  $\theta$  depende de  $x$ ,  $\theta(x)$ , a transformação diz-se *local* (ver quadro).

### TRANSFORMAÇÃO GLOBAL E LOCAL



A transformação global deixa claramente o sistema invariante e isso conduz à conservação da carga (que está ligada ao parâmetro  $\alpha$ ). A transformação local introduz deformações que são compensadas por tensões, ou campos adicionais A, campos de padrão, necessários para assegurar que a física continue invariante.

O princípio unificador que buscávamos é o princípio que diz que todas as interações são mediadas por campos de padrão, de «gauge», que asseguram a invariância de padrão.

Em conclusão: para além dos *campos materiais*  $\psi$  é preciso introduzir os *campos de padrão* A. Os campos  $\psi$  têm a ver com as cargas e o parâmetro  $\alpha$ , os campos A têm a ver com a propagação e o alcance  $\mu$  das interações. Há partículas, que ao nível mais elementar são os electrões e os quarks, que são os portadores das cargas, e há outras como o fóton, que desempenham o papel de mensageiros da interacção.

Embora o princípio de invariância de padrão seja comum a todas as interações fundamentais, há uma diferença importante entre o electromagnetismo, interações fracas e forte, por um lado, e a gravitação, por outro. Nos primeiros casos o campo de «gauge» é

vectorial (spin 1), na gravitação ele é tensorial (spin 2, gravitão). Nesta perspectiva é mais fácil pensar na unificação primeiro das interações electromagnética, fraca e forte e só depois incluir a gravitação. Exactamente o que está a acontecer.

Um resumo da situação no que respeita às interações electromagnética, fraca e forte é o que se segue:

Para cada interacção, como se disse, há campos materiais (partículas de spin 1/2) e campos de padrão (partículas de spin 1). As interações são tais que existem invariâncias em determinadas transformações de grupo («rotações» num espaço complexo). O electrão ao emitir um fóton fica sempre electrão: isto corresponde a uma transformação no grupo U(1). Já nas interações fracas, como há três campos de padrão, pode haver mudanças de identidade nas transformações, por exemplo,  $d \rightarrow u + W^-$ . O grupo de transformações que é gerado pelos três bosões fracos  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , é o grupo SU(2). No caso das interações fortes deparamos com um espaço novo, o chamado espaço de cor, onde as interações são mediadas por oito campos de padrão. Estas partículas são os gluões e o grupo é o SU(3).

SITUAÇÃO				
INTERACÇÕES ELECTROMAGNÉTICA, FRACA E FORTE				
	Campo material spin=1/2	Campo padrão spin=1	Grupo de transformação	Unificação
EM	e electrão	1 fóton	U(1)	$SU(2) \times U(1)$ (Weinberg - Salam) ? SU(5) SO(10)
f	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} e \\ \nu \end{pmatrix}$ quarks    leptões	3 bosões fracos $W^+$ , $W^-$ , $Z^0$	SU(2)	
F	$\begin{pmatrix} \text{azul} \\ \text{amarelo} \\ \text{vermelho} \end{pmatrix}$ quarks com cor	8 gluões $G_i, i=1, \dots, 8$	SU(3)	

## 6. A unificação das cargas

A carga eléctrica, por exemplo positiva, tende a provocar à sua volta a formação de dipolos, de tal maneira que a distância grande a carga parece ser menor (isto é o que se chama efeito de blindagem). Por outro lado, aumentar a energia nas interações físicas corresponde a ser-se capaz de estudar o que se passa a distâncias cada vez mais pequenas. Basta pensar que aumentar a energia dum feixe é aumentar a frequência e aumentar a frequência é diminuir o comprimento de onda e, portanto, diminuir as distâncias exploradas por esse feixe. Nas interações a carga  $\alpha$  que é observada depende assim da energia  $E$  do processo:  $\alpha = \alpha(E)$ . No caso da carga eléctrica, devido ao efeito de blindagem, a carga medida aumenta com a energia (distâncias mais pequenas).

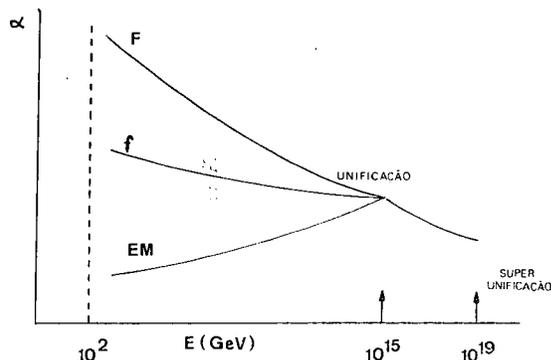
Porém, com as interações fortes tudo se passa ao contrário. Não só os quarks com a sua carga de cor actuam criando um efeito de blindagem, mas os próprios gluões, e diferentemente do fóton que é electricamente neutro, têm uma carga de cor de tal forma que nas suas interações entre si produzem um efeito, que é dominante, de anti-blindagem. Nas interações fortes, a curta distância a carga de cor é muito menor do que a grandes distâncias. A dependência de  $\alpha$  com  $E$ ,  $\alpha(E)$ , é ao contrário; a função  $\alpha(E)$  é decrescente. Nas interações fortes há o que se diz «liberdade assintótica», isto é, a distâncias muito curtas a carga tende para zero e deixam de se fazer sentir as interações: os quarks embora aprisionados dentro dos prótons comportam-se a curtas distâncias como se fossem livres.

Embora às energias actuais as várias cargas sejam muito diferentes,  $\alpha_f \neq \alpha_{EM} \neq \alpha_F$ , devido à maneira também diferente como as várias cargas dependem da energia,  $\alpha_f(E) \neq \alpha_{EM}(E) \neq \alpha_F(E)$ , é possível encontrar uma energia  $E_U$  tal que

$$\alpha_f(E_U) = \alpha_{EM}(E_U) = \alpha_F(E_U).$$

A energia a que a igualdade ocorre,  $E_U$ , é a energia de grande unificação:  $10^{15}$  GeV. De notar que a massa do protão é  $\approx 0.9$  GeV e

que as máximas energias que deverão ser alcançadas em aceleradores até ao fim do século são da ordem de  $10^5$  GeV. A energia de unificação é uma energia extremamente elevada.

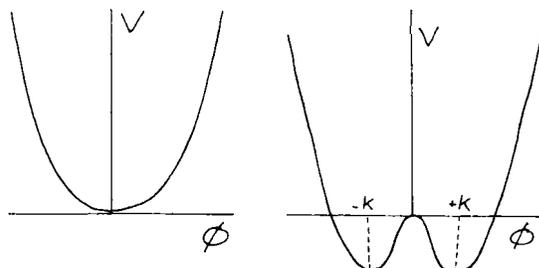


## 7. O problema dos diferentes alcances das interações

Vimos que a energias muito elevadas as cargas elementares das interações fundamentais  $f$ , EM e F podem de facto ser iguais,  $\alpha_f(E_U) = \alpha_{EM}(E_U) = \alpha_F(E_U)$ , e uma das dificuldades da unificação fica assim facilitada. Resta-nos ainda o problema dos diferentes alcances das várias interações.

A resolução do problema dos diferentes alcances no caso das interações electromagnéticas ( $1/\mu = \infty$ ) e fracas ( $1/\mu = 10^{-16}$  cm) constituiu o passo decisivo — passo que levou cerca de 20 anos a ser dado — na construção da teoria electrofraca de Weinberg-Salam. Se o fóton (com massa zero) e os bosões fracos (com massas da ordem de 80 vezes a massa do protão) são tão diferentes como é possível unificar o electromagnetismo com a interacção fraca?

Imaginemos um problema físico onde se coloque o estudo dum potencial  $V(\phi)$  nos dois casos representados:



O potencial, tanto num caso como no outro, possui claramente a simetria  $\phi \rightarrow -\phi$ , isto é, fica invariante nessa transformação. No primeiro caso, da esquerda, a solução mais estável, mínimo do potencial, corresponde a  $\phi = 0$ . Esta solução, tal como o potencial, é invariante na transformação  $\phi \rightarrow -\phi$ , pois zero fica sempre igual a zero. No caso da direita a solução  $\phi = 0$  é instável. As soluções estáveis são duas: ou  $\phi = +k$  ou  $\phi = -k$ . Tanto num caso como no outro, a solução escolhida viola a simetria do potencial.

Suponhamos uma bola que role no interior das paredes do potencial. No caso da esquerda a bola acaba por parar em  $\phi = 0$ . No caso da direita a bola acaba em  $+k$  ou em  $-k$ . Não há razão especial para ir para uma solução ou para a outra, devido à simetria do problema. No entanto esta mesma simetria é violada na solução escolhida. Há o que se diz, violação espontânea de simetria.

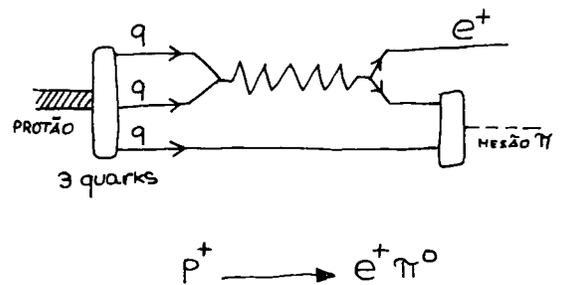
Em teorias com invariâncias de padrão há soluções semelhantes à dos dois exemplos de potenciais acima indicados. Nuns casos, electromagnetismo, o estado mais estável corresponde ao caso em que os campos se anulam,  $\phi = 0$  (o vácuo é um vácuo simples). Noutros casos, interações fracas, o estado padrão de energia mais baixa acontece com  $\phi \neq 0$  (o vácuo não tem a simetria da teoria). No primeiro caso o fóton não tem massa, no segundo caso os bosões vectoriais adquirem uma massa (que tem a ver com o parâmetro  $k$ ). Mas nada disso é muito importante: o que é essencial é que a teoria, o potencial, mantém a simetria de padrão. É essa invariância da teoria, do potencial, que é essencial à unificação.

### 8. Escalas de massa e grande unificação

Devido ao fenómeno de quebra de simetria e ao facto das partículas dos campos de padrão adquirirem massa a descrição da teoria fica dependente da escala de energias e massas a que o estudo é feito. No caso das interações fortes, como se supõe que os glúões não têm massa, e no caso do electromagnetismo, como

o fóton tem massa zero, a teoria realiza-se plenamente a qualquer energia. No caso das interações fracas só para energias da ordem da massa experimental dos  $W^\pm$  e  $Z \sim 10^2$  GeV/c<sup>2</sup>, ela deixa de se comportar como uma teoria efectiva (teoria de Fermi) e aparece como teoria com invariância de padrão. Na grande unificação das interações electromagnéticas, fracas e fortes outras partículas de padrão, com massas da ordem de  $E_U \sim 10^{15}$  GeV/c<sup>2</sup>, geradoras das transições partículas fortes (protão, pião)  $\rightarrow$  partículas electromagnéticas (electrão, neutrino) devem surgir. Só acima de  $10^{15}$  GeV/c<sup>2</sup> será a grande unificação das interações electromagnéticas, fracas e fortes transparente.

Seja qual for o grupo de transformações da grande unificação (SU(5), SO(10)), ele contém com certeza os geradores das transições entre quarks (do protão) e o positrão (electrão de carga positiva). A partícula de padrão mediadora da transição é o bosão X de massa  $M_X \sim 10^{15}$  GeV/c<sup>2</sup>. Como o protão é mais pesado do que o electrão, o protão pode decair. Isto é: a grande unificação leva necessariamente ao problema do decaimento do protão. Por exemplo, segundo o esquema



O parâmetro essencial que controla este decaimento do protão é a massa da grande unificação  $M_X \sim 10^{15}$  GeV/c<sup>2</sup> a que corresponde um tempo médio de vida do protão da ordem de  $10^{30}$  anos (recordar que o tempo que passou desde o Big-Bang é só da ordem de  $10^{10}$  anos). Até ao momento, e contrariando um optimismo reinante há 4 ou 5 anos atrás, não existe ainda qualquer evidência experimental para a morte do protão (ver caixa).

### Medição experimental do decaimento do prótão

Uma vez que todos os materiais com que tratamos são feitos à base de protões não parece à primeira vista grande problema detectar uma reacção de decaimento do prótão (por exemplo:  $p \rightarrow e^+ \pi^0$ ). Porém, como o tempo de vida é enorme,  $\sim 10^{30}$  anos, a probabilidade do decaimento ocorrer é muito pequena. O que se faz é estudar um enorme número de protões ao mesmo tempo. Na prática estuda-se um tanque com água (7000 toneladas de água no caso da experiência IMB) que contém um enormíssimo número de protões (quantos?). O segundo problema difícil de resolver é o da radiação cósmica que constantemente atravessa a Terra e que provoca reacções que podem simular o decaimento do prótão. O que se faz é isolar o tanque de água o mais possível do fluxo dos raios cósmicos. A solução encontrada tem sido a de construir o tanque de água no fundo de minas abandonadas. Aí há uma protecção que pode ser de quilómetros de material da crosta terrestre. O decaimento  $p \rightarrow e^+ \pi^0$  é então, em princípio, fácil de detectar pois o  $\pi^0$  transforma-se em dois fotões que são identificados com fotomultiplicadores.

Os resultados de duas experiências, IMB (numa mina de sal perto de Cleveland, Estados Unidos) e Kamioka (numa mina de zinco no monte Ikenayama, Japão) não são conclusivos.

Modo de decaimento	N.º de acontecimentos/Limite no tempo de vida (anos)			
	Kamioka		IMB	
$P \rightarrow e^+ \pi^0$	0	$> 3 \times 10^{31}$	0	$> 2 \times 10^{32}$
$P \rightarrow \mu^+ \pi^0$	0	$> 2 \times 10^{31}$	0	$> 1 \times 10^{32}$
$P \rightarrow \mu^+ K^0$	1	$> 1 \times 10^{31}$	1	$> 6 \times 10^{31}$
$P \rightarrow \mu^+ \eta$	1	$> 8 \times 10^{30}$	0	$> 9 \times 10^{31}$
$P \rightarrow \nu K^+$	2	$> 7 \times 10^{30}$	3	$> 1 \times 10^{31}$

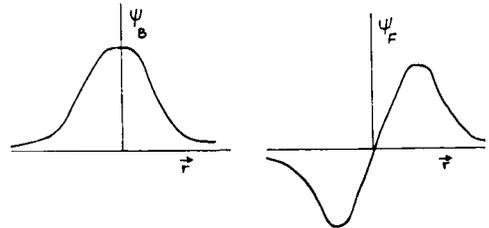
Quando se aumenta ainda mais a escala de energias, até aos  $10^{19}$  GeV/c<sup>2</sup>, coloca-se imediatamente a questão da suprema unificação com a gravidade. Nos anos recentes, de 1980 até agora, grande parte dos esforços dos crentes nas virtudes da unificação têm ido no sentido de englobar desde já a gravitação. Nasceram assim as supersimetrias e as modernas ideias sobre as dimensões «escondidas» de espaço-tempo (teorias de Kaluza-Klein).

### 9. Supersimetrias

Até agora, sempre que nos referimos às várias interacções, temos falado por um lado em partículas de «matéria» (de spin 1/2) e por outro lado em partículas de «campo» (de spin 1). As partículas de spin semi-inteiro chamam-se fermiões e as partículas de spin inteiro chamam-se bosões. Em geral fermiões e bosões têm físicas bem distintas, (ver discussão ao lado).

#### Funções de onda de bosões e fermiões

A maneira como bosões e fermiões se distribuem no espaço é bem distinta. A função de onda  $\psi$  de dois bosões ou dois fermiões, que dá a probabilidade de encontrar as duas partículas a uma distância relativa  $r$ , é muito diferente. A função de onda de bosões é simétrica e a função de onda de fermiões é anti-simétrica na troca das duas partículas, isto é, na mudança  $r \rightarrow -r$ .



Em consequência, os bosões podem ocupar a mesma posição ( $r=0$ ) e os fermiões não. Esta propriedade dos fermiões é essencial na estrutura electrónica dos elementos do quadro periódico.

Com a supersimetria tem-se a ambição de colocar no mesmo pé bósons e férmions, «campo» e «matéria», tratando unificadamente propriedades do espaço-tempo e propriedades internas das partículas. Os geradores das transformações super-simétricas naturalmente que irão poder transformar bósons em férmions e vice-versa. Se a supersimetria fosse realizada exactamente, sem quebras, então cada férmion teria o seu parceiro bosónico e cada bóson o seu parceiro fermiónico. Por exemplo:

Partícula	Parceiro supersimétrico
quark, spin 1/2	squark, spin 0
leptão, spin 1/2 (eléctron)	sleptão, spin 0
bosões de «gauge» $\gamma$ , $W^+$ , $Z$ , spin 1	gauginos, spin 1/2 $\tilde{\gamma}$ , $\tilde{W}^+$ , $\tilde{Z}$
gravitão, spin 2	gravitino, spin 3/2

Esta duplicação de partículas tem grandes vantagens do ponto de vista técnico (extrema simplificação nos cálculos, tempo de vida do próton mais longo) mas coloca o problema de onde encontrar tantos parceiros. Pode-se argumentar, recorrendo a mais uma quebra de simetria, que eles serão muito mais pesados do que as partículas usuais (massas de ordem de 100 GeV/c<sup>2</sup>) e propostas tem havido de os identificar nas colisões próton-antipróton com o anel de colisões do CERN a energias de 540 GeV e, muito recentemente (Maio de 1985), 900 GeV. Não há até agora evidência para a existência de parceiros supersimétricos e a unificação bósons-férmions continua a ser só uma bela ideia especulativa.

## 10. As dimensões escondidas (Kaluza-Klein)

Com a Relatividade Geral, em 1915, Einstein introduziu a ideia de geometrização da Física e, em especial, da gravitação. A noção

de força da gravidade Einstein contrapôs a noção de deformação do espaço-tempo. Duma forma simplificada: enquanto ausência de corpos materiais e da força gravitacional neles centrada correspondente a um espaço simples, linear, plano; a presença de corpos materiais e força gravitacional implica a existência de deformações, curvaturas, rugas no espaço-tempo. De algum modo, portanto, Einstein reduziu o estudo da interacção gravitacional ao estudo da geometria do espaço-tempo quadridimensional com as 3 dimensões de espaço e 1 de tempo.

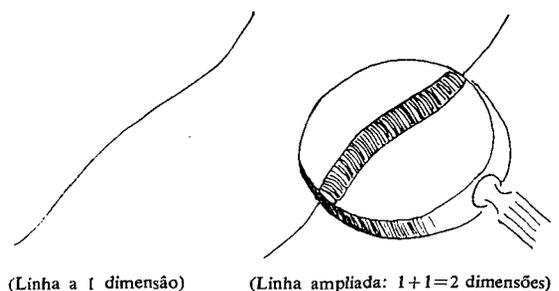
Mas não há só a interacção gravitacional. Como geometrizar as outras interacções?

Nos anos 20 a outra interacção que estava bem identificada era a interacção electromagnética. Em 1921 um físico polaco pouco conhecido, Theodor Kaluza, inspirado no programa de geometrização da gravitação de Einstein, imaginou uma forma de geometrizar o electromagnetismo. O que ele sugeriu é que num «espaço-tempo» a 5 dimensões (4 dimensões de espaço mais 1 dimensão de tempo) a «gravitação» geometrizada contém de facto as equações da gravitação usual de Einstein (4 dimensões) mais as equações de Maxwell do electromagnetismo (1 dimensão). As interacções electromagnéticas, no esquema de Kaluza, são dobras, curvaturas na quinta dimensão.

Porém, toda a experiência humana nos diz que vivemos num mundo com três dimensões de espaço e uma dimensão de tempo. Onde está a extra-dimensão de Kaluza?

O físico sueco Oscar Klein em 1926 sugeriu a resposta à pergunta: a quinta dimensão está lá, só que não somos ainda capazes de nos apercebermos dela (ver esquema).

As dimensões que não se vêem.



As escalas de observação que temos não nos permitem observar a 5.<sup>a</sup> dimensão. Da mesma forma que um risco num papel parecer 1 dimensão, quando observado com uma lupa surge com 2 dimensões. A quinta dimensão está comprimida, ou enrolada e essa é a razão pela qual não nos apercebemos dela.

A teoria de Kaluza-Klein permaneceu como curiosidade durante 50 anos com pouco interesse para a física, sem que grande atenção lhe fosse prestada. De facto, com o reconhecimento da existência de outras interacções fundamentais, as interacções fraca e forte que na primeira metade do século ficaram estabelecidas, a unificação a partir da gravitação e electromagnetismo, com que Einstein sonhara, perdeu interesse. Só no fim dos anos 70, quando pareceu ficar claro que era a altura de voltar à gravitação, é que a comunidade científica se lembrou de ir desenterrar, as ideias de Kaluza e Klein.

Hoje em dia o problema é não o da geometrização da gravitação e do electromagnetismo, mas o da geometrização das quatro interacções fundamentais. Quanto à ideia base, ela não é mais do que a ideia original de Kaluza posta em dia. Para incluir as interacções adicionais há que acrescentar mais dimensões ao espaço tempo usual. Todas elas escondidas, claro. Assim se chega a um Universo com 11 dimensões 7 delas enroladas e, até agora, invisíveis. Tal como em relação às massas das partículas de padrão, o Universo sofreu quebras de simetria (ligadas a diferentes escalas de energia) que deixaram só quatro dimensões transparentes às escalas de energia hoje alcançadas. Para penetrar nas dimensões escondidas energias muito mais elevadas e aceleradores muito mais potentes seriam necessários. Só assim, possivelmente, se chegará à super-força super-unificadora final. Ou, talvez esteja fora do nosso alcance a capacidade de reproduzir os momentos altamente energéticos que sucederam o esplendoroso instante do big-bang. O Universo, na sua infância tinha as escalas de energia necessárias para a super-unificação de todas as forças. Só que a existência de seres vivos e inteligentes requereu primeiro que esse Universo se expandisse e arrefecesse. E hoje, a super-unificação talvez

seja só, afinal, um sonho perdido da Humanidade, sonho que nunca realmente existiu.

#### BIBLIOGRAFIA

- GERARD'T HOOFT — «Gauge Theories of the Forces Between Elementary Particles», *Scientific American*, June 1980, pp. 104-137.
- HOWARD GEORGI — «A Unified Theory of Elementary Particles and Forces», *Scientific American*, April 1981, pp. 48-63.
- STUART RABY, RICHARD SLANSKY, GEOFFREY WEST — «Particle Physics and the Standard Model», *Los Alamos, Science*, 11, 2, 1984.
- RICHARD SLANSKY — «Toward a Unified Theory: An Essay on the Role of Supergravity in the Search for Unification», *Los Alamos, Science*, 11, 72, 1984.
- L. M. SIMMONS, JR. — «Science Underground-The Search for Rare Events», *Los Alamos, Science*, 11, 160, 1984.
- PAUL DAVIES — «Superforce: The Search for a Grand Unified Theory of Nature», *Simon and Schuster Edts.*, New York, 1984.

---

## Conferência GIREP-86: COSMOS-an educational challenge

A Conferência GIREP (Groupe International de Recherche sur l'Enseignement de la Physique) será dedicada, em 1986, ao tema «COSMOS — um desafio educacional».

A Conferência terá lugar em Elsinore (Dinamarca), de 18 a 23 de Agosto de 1986. O número de participantes é limitada a 150, sendo dada preferência a membros do GIREP; o custo por participante é de 2.500 coroas dinamarquesas (abrangendo todas as despesas de participação, alimentação e alojamento em quarto duplo).

Exemplos de tópicos que serão tratados: Cosmologia e visão científica do Universo; Estrelas e Galáxias; Sistema Solar (cometa Halley); Laboratórios espaciais, e uso para fins educativos; Materiais para ensino (haverá uma exposição de material e demonstração de equipamento para planetário); etc. A língua utilizada será o inglês.

Endereço: GIREP 86, The Royal Danish School of Educational Studies Department of Physics, Emdrupvej 115 B, DK-2400 Copenhagen NV, Dinamarca.