

NOVAS IDEIAS SOBRE AS ORIGENS DO UNIVERSO

CARLOS FIOLHAIS

Como o Universo que estudam, assim continuam em expansão as teorias que procuram conjugar a física de partículas e a cosmologia. O que a seguir se propõe é um ponto da situação, ponto de passagem que nos permite entrar de vez na "realidade".

Um dos aspectos mais notáveis do desenvolvimento das ciências físicas nos últimos anos tem sido o alargar do interesse pelas questões cosmológicas. Com efeito, o número de artigos sobre temas de cosmologia incluídos nos "Physics Abstracts" (resumos de todos os artigos publicados em revistas de física reconhecidas internacionalmente) passou de cerca de 50 em 1965 para mais de 750 em 1984. Pode-se mesmo afirmar que dois ramos do conhecimento aparentemente tão distantes um do outro como a física de partículas e a cosmologia se interrelacionaram de tal modo, que já há quem fale em "casamento". J. Ellis, físico do CERN, declarou em 1983, durante uma conferência que reunia físicos e astrónomos:

"Muitos de nós físicos de partículas e astrofísicos temos mantido uma relação cosmológica ilícita desde há algum tempo. Este encontro parece constituir uma consagração oficial dessa relação, uma espécie de cerimónia de casamento. Saudemos pois o noivo e a noiva e esperemos que não se divorciem muito cedo!"

A sua comunicação intitulava-se "Um passado brilhante à nossa frente", sugerindo que era o estudo do universo primitivo que fazia reunir os físicos do muito pequeno e do muito grande.

Vamos passar em revista, de modo sucinto, a história da física de partículas e da cosmologia. Discutimos em seguida quais foram os motivos do seu enlace e apresentamos finalmente alguns dos frutos que essa união já

produziu.

A busca do que é elementar é tão antiga como a própria ciência. Demócrito, no século IV a.C., já falava do átomo, aquilo que é indivisível. Hoje sabemos que o átomo é a base da constituição da matéria e, para R. Feynman, esta é mesmo a verdade mais importante do nosso corpo de ciência, aquela que deveria ser salvaguardada mesmo que o resto se perdesse nalguma catástrofe. Mas

sabemos também que o átomo não é indivisível. O electrão foi a primeira partícula elementar a ser identificada (G. Thomson, em 1897) e hoje ele continua elementar, isto é, sem estrutura. Rutherford em 1911 revelou a existência do núcleo atómico, criando assim a física nuclear. O resultado mais essencial da experiência de Rutherford consistiu na forte repulsão experimentada por algumas partículas, quando embatem numa placa metá-

HISTÓRIA DAS PARTÍCULAS

TEORIA

EXPERIÊNCIA

1897 e^-		THOMSON
1905 γ	EINSTEIN	
1911 p^+		RUTHERFORD
1927 ν_e	PAULI	COWAN e REINES, 1956
1928 e^+	DIRAC	ANDERSON, BKACKETT e OCCHIALINI, 1932
1932 η		CHADWICK

MUNDO SIMPLES: 4 partículas de matéria úteis, fóton e antipartículas

1935 π	YUKAWA	LATES, OCCHIALINI e POWELL, 1947
1936 μ		ANDERSON e NIDDERMEYER
1947 χ^0, K^0		ROCHESTER e BUTLER
1955 p^-	CHAMBERLAIN e SEGRÉ	

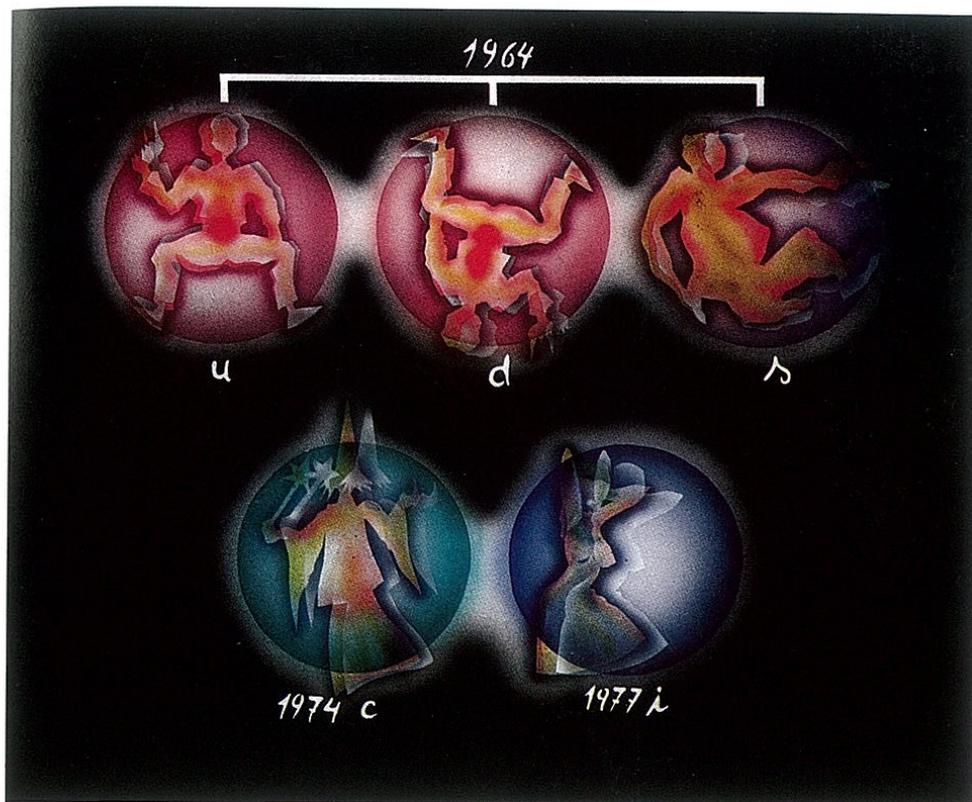
MUNDO COMPLICADO: "Zoo" de partículas (\approx 100 harões)

1964 u, d, s, Ω	GEELLMANN e ZWEIG	(Brookhaven)
------------------------	-------------------	--------------

MODELO DE QUARKS

1976 ψ/Υ		RICHTER e TING
1983 W^+, Z^0	WEINBERG,	RUBBIA e V. DER MEER

QUARKS



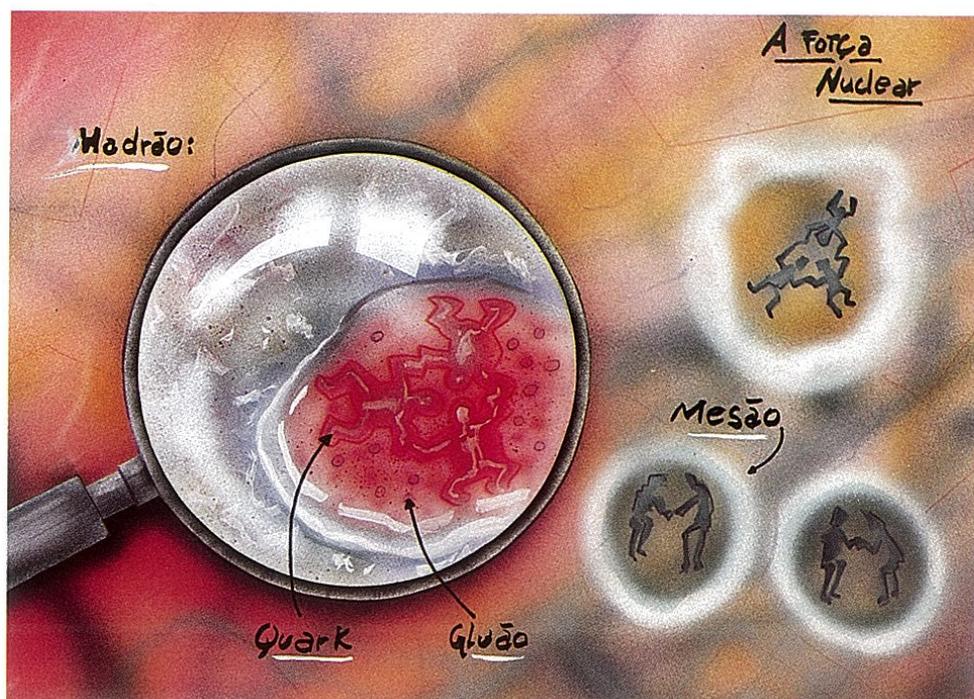
lica muito fina. Essa constatação foi tão surpreendente, relativamente às concepções anteriores de um átomo contínuo, que até já foi comparada ao rechaçar de um obus para a cara do atirador, depois de ter sido disparado contra uma folha de papel! O núcleo veio a revelar-se mais tarde (Chadwick, 1932) ser constituído por prótons e neutrões (genericamente nucleões). O neutrão pode decair num próton, com emissão de um positrão (eléctron positivo) e de um neutrino. Este último foi introduzido por Pauli em 1925 para evitar a violação da lei de conservação da energia no processo em causa. A descoberta das partículas estranhas em 1947 pode ser considerada o início da física de partículas. Esta começou por ser uma fenomenologia, baseada na detecção de partículas na radiação cósmica e em aceleradores rudimentares. Em breve, porém, o número de novas partículas se revelou tão grande, que só a muito custo se poderia admitir a sua elementaridade. Uma nova ordem, à semelhança daquela que Mendeleev no século XIX tinha estabelecido na química para os átomos, tornava-se imperiosa. Com efeito, o mundo das partículas era então comparável a um "jardim zoológico", cheio de espécimes exóticos, e as tentativas preliminares de ordenamento de partículas por famílias tinham de ter um fundamento simples.

Gellmann, em 1964, propôs, com

base em considerações de simetria, a existência de três partículas constituintes dos nucleões e de todas as partículas que interaccionavam entre si do mesmo modo que os nucleões. O nome das novas entidades, "quarks", foi retirado de um romance de James Joyce, não tendo qualquer significado. A verificação experimental da validade do modelo de quarks não demorou, com a identificação de uma nova partícula, o s , cuja estrutura se podia explicar com base nos

três quarks postulados. Mais tarde, em 1968, experiências de colisão de electrões sobre prótons realizadas em Stanford revelaram a existência de três grãos duros no interior do próton, embora tenham sido baldados todos os esforços para isolar um quark. Os quarks aparecem só em grupos de três ou dois, assemelhando-se assim a escravos agrilhoados, que são livres dentro do que é permitido pelo raio de acção das suas correntes, mas que estão irremediavelmente condenados a não se poderem afastar uns dos outros. A experiência, ela ainda, veio trazer em 1974 um quarto quark, que foi baptizado de quark com "charm". Hoje conhecem-se seis modalidades diferentes de quarks, dos quais só os primeiros dois parecem ser necessários para a constituição dos nucleões normais. Do mesmo modo, existem seis modalidades de partículas leves (leptões), que não participam nas interacções nucleares. No entanto, só os dois primeiros, o electrão e o neutrino electrónico, parecem ser úteis para a constituição da matéria conhecida. "Deus é subtil, mas não é malicioso", afirmou um dia Einstein. A que propósito teria Ele criado partículas inúteis, parecidas com as partículas úteis mas mais pesadas?

O mundo é portanto constituído por partículas. Mas o que é que mantém todas essas partículas juntas ou afastadas na organização da grande "máquina do mundo"? São as chamadas forças ou interacções. A força conhecida há mais tempo é a força gravitacional, introduzida por Newton no século XVII. Foi com Newton que nasceu a física como ciência do universo todo, quando ele se apercebeu



MODELO PADRÃO

PARTÍCULAS

LEPTÕES				QUARKS			
NOME DA PARTÍCULA	SÍMBOLO	MASSA EM REPOUSO (MeV)	CARGA ELÉCTRICA	NOME DA PARTÍCULA	SÍMBOLO	MASSA EM REPOUSO (MeV)	CARGA ELÉCTRICA
Electrão Neutrino Electrão	ν_e e^-	Cerca de 0 0.551	0 -1	Acima Abaixo	u c	310 310	+ 2/3 -1/3
Miu Neutrino Miu	ν_μ μ^-	Cerca de 0 106.6	0 -1	Encanto Desconhecida	c s	1500 505	+ 2/3 -1/3
Tau Neutrino Tau	ν_τ τ^-	Menos de 164 1.784	0 -1	Máximo/Real Máximo/Belo	t b	22.500 Partícula hipotética cerca de 5000	+ 2/3 -1/3

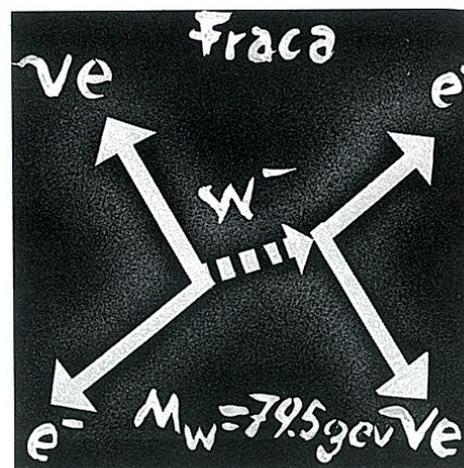
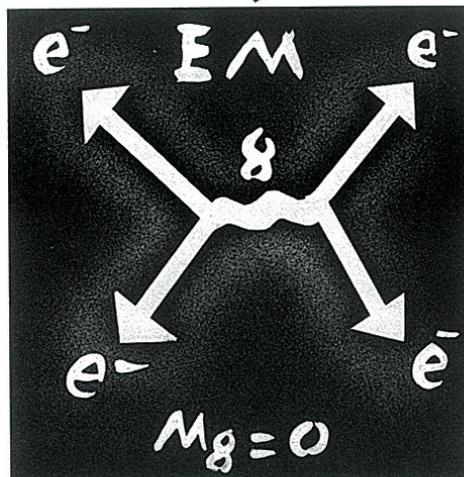
FORÇAS

Força	Alcance	FORÇA a 10^{-13} por centímetro comparado com força forte	Portador	Massa em repouso (G e V)	Voltas	Carga eléctrica	Notas
Gravidade	Infinito	10^{-38}	Gravitão	0	2	0	Conjecturas
Electromagnetismo	INFINITO	10^{-2}	FOTÃO	0	1		Obs. direct.
FRACA	Menos de 10^{-16} 10^{-16} por centímetro	10^{-13}	SECTOR W^+ FRACO: W^- Z^0	81 81 93	1 1 1	+ 1 -1 0	Obs. direct. Obs. direct. Obs. direct.
INTERNA	Menos de 10^{-13} por centímetro	1	Gluões	0	1	0	Permanente-mente confinado

que os fenómenos da Terra eram regidos pelas mesmas leis que os fenómenos do céu. A meio do século XIX, Faraday e Maxwell estabeleceram uma unificação das forças eléctricas e magnéticas. Em breve se reconheceu que as forças moleculares, responsáveis pelas reacções químicas, não passavam de um resultado (resíduo) das forças electromagnéticas entre os electrões atómicos. A partir dos anos 20 do nosso século introduz-se a força forte, responsável pela manutenção do núcleo, e a força fraca, responsável pelo decaimento de um neutrão num próton. Yukawa formulou em 1935 uma primeira tentativa de compreensão da força forte. Assim, os nucleões manter-se-iam juntos no núcleo devido à troca de mesões. Tudo se passaria como num circo: o próton e o neutrão malabaristas exímios a trocar bolas entre si, com a particularidade de, neste processo de troca, o próton e o neutrão trocaram também de identidade.

Na década de 60 as forças electromagnéticas foram unificadas com as forças fracas, no quadro das chamadas teorias de invariância de padrão ("gauge"). A electrodinâmica quântica, que é hoje a teoria mais exacta de toda a física, interpreta a interacção entre electrões, por exemplo, como troca de fotões ou "grãos de luz". De modo semelhante, a interacção fraca é explicada pela participação de partículas intermediárias, as

FORÇAS



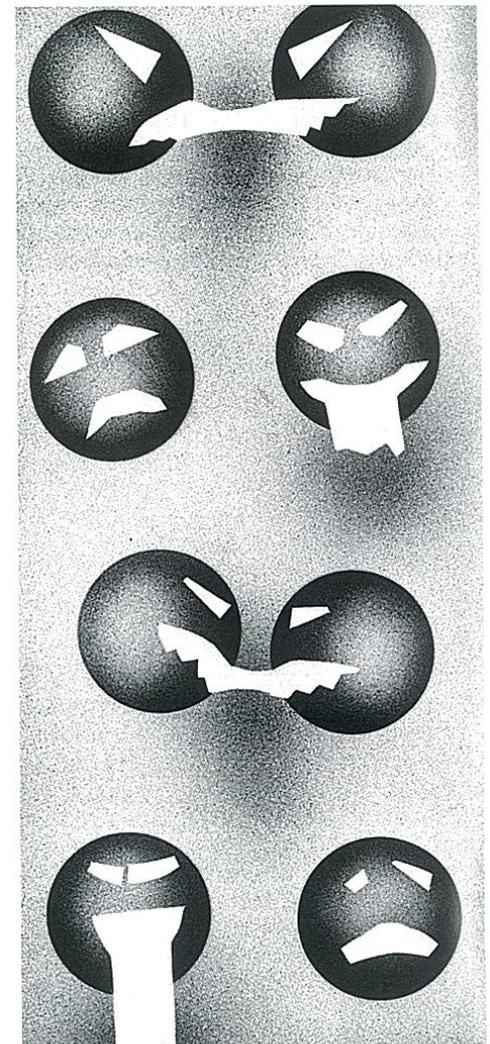
A força electromagnética e a força fraca

partículas W^+ , W^- e Z , que foram encontradas num acelerador do CERN em 1983.

No quadro do mesmo tipo de teorias, a interacção entre quarks é modernamente explicada através da chamada força de cor, da qual são intermediários os gluões, em número de oito. A força forte entre nucleões não é mais do que uma manifestação residual da força de cor entre os quarks constituintes, do mesmo modo que as forças intermoleculares são no fundo do tipo electromagnético.

A gravidade tem escapado até agora a uma explicação definitiva em termos de troca de quanta. Tal facto deve-se à inexistência de uma teoria completamente consistente que conjugue a teoria da relatividade geral com a teoria quântica. No entanto, há fortes razões para admitir a existência de uma partícula intermediária, sem carga nem massa, entre os objectos que interaccionam gravitacionalmente.

O conceito fundamental que actualmente os físicos têm sobre as interacções é portanto o conceito de "troca". Gamow, a propósito da teoria de Yukawa, caricaturou a situação, falando de dois cães que se



As forças segundo Gamow

mantêm juntos por ambos disputarem o mesmo osso. As três interações fundamentais (a gravitacional, a electrofraca e a interacção de cor), são todas explicáveis em termos de troca.

O sucesso da unificação das forças electromagnéticas e fracas e o facto de as duas últimas se basearem no mesmo tipo de teorias, sugere fortemente a possibilidade de se poder concretizar o sonho maior de Einstein, que consistia na unificação de todas as forças da natureza. Uma primeira teoria de grande unificação efectuou diversas previsões, que estão a ser verificadas em laboratórios:

I) Decaimento do protão. O protão não seria eterno, devendo decair com um tempo de vida de 5×10^{29} anos.

II) Existência de monopólos magnéticos.

III) Os neutrinos podem ter massa, embora muito pequena.

No entanto, as experiências mais recentes levam a invalidar essas teorias mínimas:

I) O tempo de vida do protão é superior a 5×10^{32} anos.

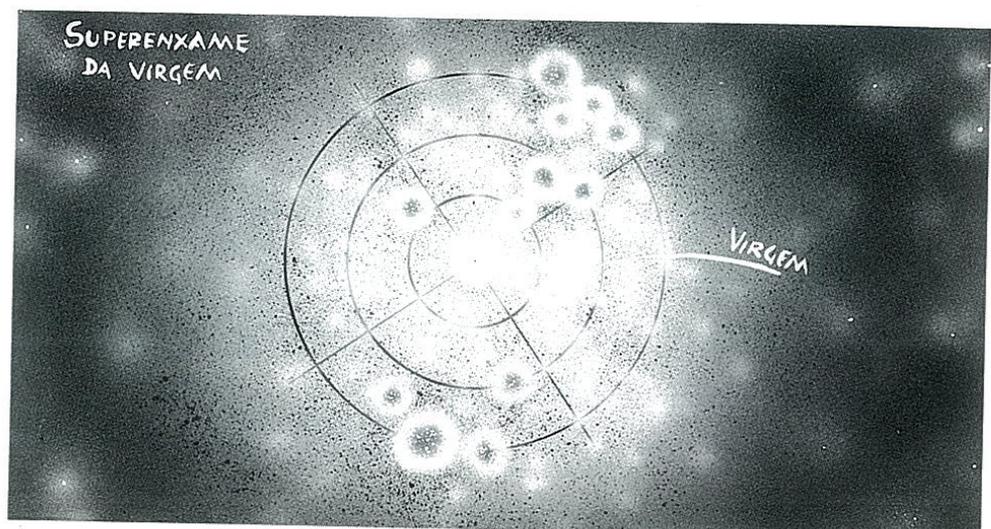
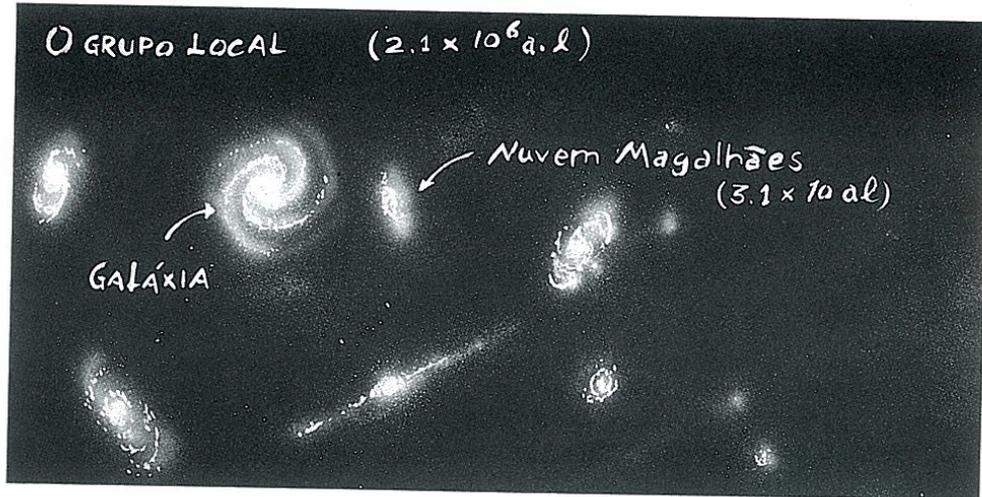
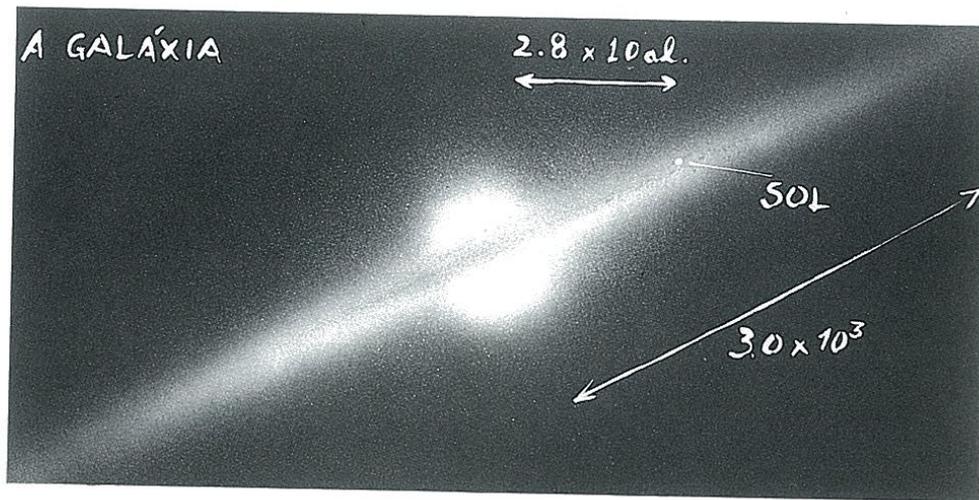
II) Dos monopólos, previstos por Dirac em 1931, só se encontrou um (Cabrera, em 1982), tendo esse resultado sido posto em causa, pelo seu carácter único...

III) Quanto à massa dos neutrinos, persistem as maiores incertezas (ela deve ser menor que 15 eV).

Mesmo antes da invalidação experimental desta teoria, já os físicos teóricos se tinham dado conta de algumas dificuldades conceptuais: existência de demasiados parâmetros, num total de 22, não-explicação da hierarquia de massas das partículas, problema do número de famílias (porquê três?) e, "last but not the least", o problema da unificação com a gravidade. Orientaram-se então para teorias de supersimetria. De acordo com estas teorias, deve existir uma correspondência entre partículas que jogam e partículas de troca, que são jogadas. Duplica-se assim o número de partículas. Além dos quarks existirão squarks, além dos leptões, existirão sleptões, além de fótões fotinos, além de gluões gluinos, etc. Esta aparente complexidade devida à proliferação de novas partículas tem no entanto vantagens evidentes. Nomeadamente, existe um princípio fundamental de simetria que preside à unificação e, se se admitir que essa simetria que preside à unificação e, se se admitir que essa simetria é local, então a teoria da supergravidade, na qual se introduzem o gravitão e o gravitino, surge naturalmente.

Estas teorias de unificação confrontam-se com um grande óbice. Só podem ser testadas experimental-

A GALÁXIA



mente através do recurso a aceleradores cuja construção é difícil senão mesmo impossível, uma vez que, só para dar um exemplo, os orçamentos de todos os países do mundo não chegam para subsidiar uma máquina que pudesse atingir a escala de energias envolvida por exemplo na supergravidade (nem, de resto, existem meios técnicos para tanto).

A cosmologia permite uma solução para esta dificuldade e daí o seu casamento, de grande conveniência, com a física das partículas. Como não há laboratórios na Terra, devem estes ser procurados nos céus. Com efeito, admite-se hoje que o universo teve um princípio, que foi assinalado por uma "grande explosão" ("Big Bang"). Nessa explosão ocorreram energias e temperaturas elevadíssimas, sendo por isso o universo primitivo o cenário ideal para uma verificação das teorias mais ou menos sofisticadas de unificação ou de superunificação.

Mas vejamos com mais pormenor como se chegou à teoria do Big Bang. Que sabemos hoje sobre o início do universo?

Desde a primeira luneta de Galileu, a observação do cosmos tem sido desenvolvida com instrumentos cada vez mais poderosos, permitindo perscrutar distâncias cada vez maiores. Assim, para termo de comparação, tomemos o Sol, que está a oito minutos-luz da Terra. O sistema solar faz parte da Galáxia ou Via Láctea, que está a 2800 anos luz do seu centro (o raio da galáxia é de 3000 anos luz). Se a Terra demora um ano a completar uma revolução completa em volta do sol, o Sol demora $2,3 \times 10^8$ anos em volta do centro galáctico (o Sol desde que nasceu já deu 25 voltas desse tipo). A estrela mais próxima de nós é a Próxima do Centauro, que está a 4,22 anos luz do Sol. A galáxia mais próxima da nossa é a Nuvem de Magalhães, a $3,1 \times 10^5$ anos-luz. A seguinte é uma galáxia muito maior, a Andrómeda, que está a $2,1 \times 10^6$ anos-luz. Estas e outras galáxias, num número total de 20, formam um enxame de galáxias conhecido por Grupo Local. O diâmetro desta estrutura é de 5×10^6 anos-luz. Por sua vez o Grupo local reúne-se com outras estruturas do mesmo género, a maior das quais é o grupo da Virgem, para formar o chamado Super-Enxame da Virgem, a cerca de 10^7 anos luz do Sol. Não se conhecem estruturas hierarquicamente superiores aos super-enxames.

Os melhores radiotelescópios conseguem ver objectos a mais de 10^7 anos-luz. São os chamados quasares, o mais distante dos quais, designado por QSO Pks 200-300, está a

HISTÓRIA DA COSMOLOGIA

1915-1917	EINSTEIN	RELATIVIDADE GERAL E EQS. COSMOLÓGICAS
1922	FRIEDMAN	UNIVERSO DINÂMICO
1927	HUBBLE	DESVIO PARA O VERMELHO DAS GALÁXIAS
1927	LEMAÎTRE	EXPANSÃO DO UNIVERSO
1945	GAMOW	RADIAÇÃO DE FUNDO
1963	PENZIAS & WILSON	OBSERVAÇÃO DA RADIAÇÃO DE FUNDO
1960-70	FOWLER et al	SÍNTESE DOS ELEMENTOS
1980	GUTH	INFLAÇÃO

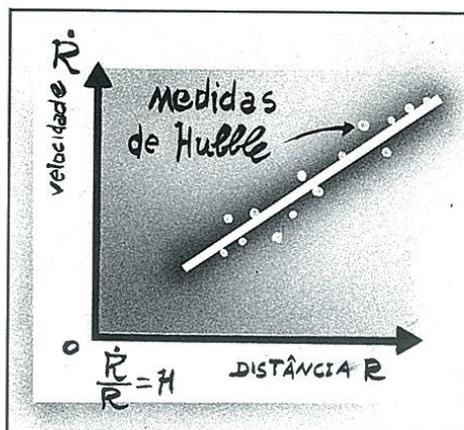
$1,45 \times 10^7$ anos-luz. Os quasares estão a afastar-se da nossa Galáxia a uma velocidade de cerca de 0,9 da velocidade da luz.

Toda a estrutura cósmica tem uma dinâmica própria, que é afinal regulada pela lei da gravidade. Assim, a nossa Galáxia aproxima-se da de Andrómeda, e o Grupo Local desloca-se a uma velocidade de 200-500 km/s para o grupo da Virgem. As colisões galácticas, embora extremamente improváveis, não são acontecimentos impossíveis de todo no grande "carrocel cósmico". No entanto, E. Hubble, astrónomo norte-americano, conseguiu em 1927 constatar uma lei empírica de afastamento das galáxias umas das outras, que contraria a atracção universal. Tal fenómeno só se pode explicar por condições iniciais muito particulares realizadas no Big Bang. O afastamento dos quasares a uma velocidade vertiginosa é assim testemunho desse acontecimento singular.

Mas a teoria precedeu a experiência, na interpretação da dinâmica cósmica. Assim Einstein, que formulou a sua teoria da relatividade geral em 1915, publicou em 1917 as equações cosmológicas que daí resultam. O seu preconceito de que o universo em

larga escala era um sistema essencialmente estático, fez-lhe introduzir "com a mão" um termo, a constante cosmológica, de modo a obter soluções estacionárias dessas equações. Foi Friedmann, matemático soviético, o primeiro, em 1922, a aperceber-se da incorrecção de Einstein. Baseando-se nas equações cosmológicas correctas, foi o precursor do conceito de universo dinâmico.

Coube a Hubble o mérito indiscutível de ter identificado claramente uma dinâmica de larga escala do universo, por meio da observação cuidadosa de um grande número de galáxias. Para isso, ele baseou-se no fenómeno conhecido como "desvio para o vermelho", verificando que as galáxias mais distantes se afastam com maior velocidade de nós. O desvio para o vermelho é um caso particular do efeito Doppler, que se pode observar por exemplo ouvindo um sinal acústico de um comboio perto de uma linha de caminho de ferro. Quando o comboio se afasta o seu silvo torna-se mais agudo do que quando está parado. Algo semelhante acontece com a luz emitida pelas estrelas, cujo comprimento de onda se torna maior se o objecto emissor estiver a afastar-se do detector. Se num gráfico se representar a velocidade das galáxias, medida pelo respectivo desvio para o vermelho, em função da distância destas, as observações de Hubble caem sobre uma recta. O declive dessa recta é a chamada "constante de Hubble". Note-se que em boa verdade não se lhe devia chamar constante, pois esse valor muda com o tempo. O Padre Lemaître, astrofísico belga, foi um dos primeiros investigadores a levar a sério a interpretação mais imediata das observações de Hubble, falando em expansão de todo o universo. Deve notar-se que o afastamento das galáxias em relação à Terra não significa de forma alguma



o regresso a qualquer concepção geocêntrica. O que acontece de facto é que todas as galáxias se estão a afastar uma das outras. Tudo se passa como na superfície bidimensional de um balão, com vários pontos marcados. Se se insuflar o balão, esses pontos têm tendência a afastar-se uns dos outros não havendo sobre a superfície do balão qualquer ponto privilegiado.

Extrapolando os resultados de Hubble para o passado, é inevitável concluir que houve uma altura em que todos os objectos galácticos coincidiam num "ponto". Nesse "ponto", estava contido o universo, que por expansão e arrefecimento, havia de conduzir a tudo o que hoje é observado. O momento da grande explosão é também o início do tempo, não fazendo sentido falar de tempos anteriores. As concepções modernas estão neste aspecto próximas das de Santo Agostinho, que não admitia que Deus tivesse esperado uma eternidade para depois, num instante particular,

ter criado o univeso. A origem dos tempos seria para ele coincidente com a origem dos espaços.

A ideia da grande explosão inicial ganhou conteúdo físico com Gamow e Alpher, que num artigo muito curioso publicado em 1 de Abril de 1948, na "Physical Review Letters", e assinado por Alpher, Bethe e Gamow (Bethe não colaborou no artigo, tendo o seu nome apenas aparecido, porque Gamow, um físico muito brincalhão, achou que um artigo sobre a origem do universo devia ter autores, cujos nomes fossem semelhantes as primeiras letras do alfabeto grego: $\alpha \beta \gamma$). Nesse artigo conjecturava-se que o universo primitivo teria atingido temperaturas muito elevadas, tendo ficado como estígio dessa era uma radiação de fundo no cosmos, corespondente a uma temperatura que eles estimaram em 5 K.

Foi um pouco por acaso que a radiação de fundo veio a ser detectada. Penzias e Wilson, em 1965, quando estavam, por conta da Bell

de fundo de Gamow. A temperatura dessa radiação era de 3 K, um pouco abaixo do valor de Gamow, mas a explicação física então dada estava essencialmente correcta. Com efeito, sabe-se hoje que a radiação de fundo é um fóssil do universo primitivo. Este consistia a certa altura de um "caldo" (plasma) de electrões e núcleos. Quando os átomos nasceram, com os electrões a combinarem-se com os núcleos, foi libertada energia, sob a forma de radiação, em todo o universo, radiação essa que depois do arrefecimento progressivo, corresponde hoje a uma temperatura de 2,7 K. Penzias e Wilson mais não foram do que os Sherlock Holmes, que encontraram uma pista importantíssima de um acontecimento remoto.

Nos anos 60, Fowler e outros investigadores a síntese dos elementos, nomeadamente as reacções que no universo primitivo deram origem aos núcleos dos elementos conhecidos. Atendendo à pequena probabilidade de formação de núcleos pesados, o universo é essencialmente constituído por hidrogénio (75%) e hélio (cerca de 25%).

Pode-se dizer que os principais suportes experimentais da teoria hoje padrão do Big Bang consiste na:

1 - Lei de Hubble. O valor da constante de Hubble $H = 500-100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ corresponde a uma idade do universo de 10 a 20 x 10⁹ anos.

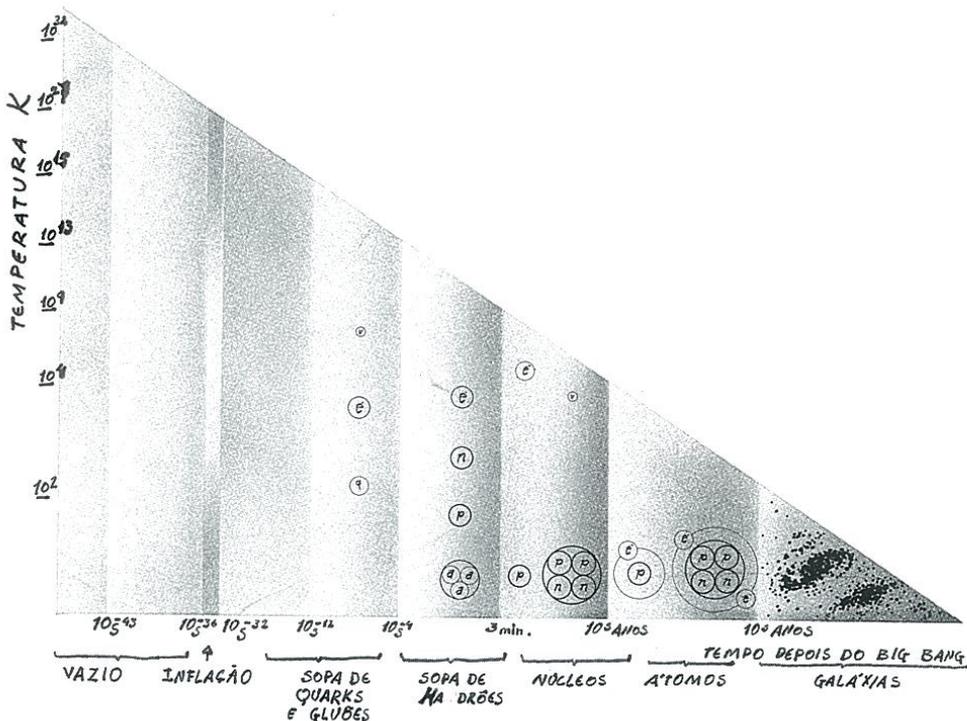
2 - A radiação de fundo encontrada por Penzias e Wilson, que apresenta uma notável isotropia (1 parte em 10 000).

3 - Percentagem relativa dos elementos, em concordância com as conclusões teóricas.

Pode-se pois dizer que o universo teve um início, há cerca de 15-20 mil milhões de anos. A luz dos distantes quasares que agora chega até nós foi emitida quando o universo ainda era uma crinça! No entanto, a história do universo só a partir do primeiro segundo se encontra mais ou menos bem conhecida. Há poucos anos, foi publicado um livro de divulgação científica, da autoria de S. Weinberg, Prémio Nobel da Física de 1979, que relata a infância do universo, desde 0,01 s até ao fim dos primeiros três minutos. Essa obra alcançou tiragens de best-seller ("The first three minutes", Basic Books, N. York, 1977), com traduções em vários países (entre nós, na Gradiva, Lisboa, 1987).

O segundo inicial do universo permanece envolto em mistério, embora progressivamente algo se vá desvendando sobre ele. A figura procura dar uma ideia da evolução do universo. Tomemos uma máquina do

HISTÓRIA COMPLETA DO UNIVERSO



FORÇAS

E = Força electromagnética

f = Força fraca

F = Força forte

G = Força gravitacional

Ef = Força electrofraca

EFF = Força unificada (electrofraca nuclear)

EFFG = Força superunificada

(electrofraca nuclear gravitacional?)

Telephones, a trabalhar com grandes antenas para rastreio de satélites artificiais, verificaram a existência de uma radiação de microondas, à primeira vista muito estranha. Depois de todas as explicações mais triviais se terem gorado (chegaram inclusivamente a mandar limpar as antenas, com receio que o "defeito" tivesse sido obra de alguns pássaros), reconheceu-se que se tratava da radiação

continua na página 57