

Humanidades



COSMOLOGIA

36

A HISTÓRIA DA



É uma história que precisaria de milhões de folhas para ser contada. A Companhia Vale do Rio Doce é a maior produtora e exportadora de minério de ferro do mundo. Mas não é só isso. É uma empresa diversificada com atuação nas áreas de ouro, manganês, bauxita, alumina, alumínio, ferro-ligas, celulose, papel, caulim, cloreto de potássio, transporte ferroviário e transporte transoceânico.



Além disso, a Vale possui 560.000 hectares de florestas comerciais,

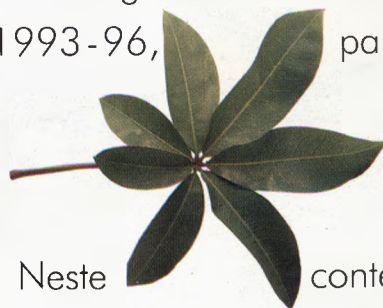
COMPANHIA VALE DO RIO DOCE

49.000 hectares de reservas florestais e é responsável pela manutenção e vigilância de 1.200.000 hectares de florestas tropicais. Consciente de que suas atividades podem causar impactos ao meio ambiente, a Vale procura equilibrar o seu trabalho com a preservação da natureza. Após ter aplicado mais de US\$ 500 milhões em várias ações produtivas e corretivas ao longo dos últimos anos, a Vale está implementando o Programa Ambiental 1993-96,

NÃO



CABE



EM

jetos diferentes, totalizando cerca de US\$ 100 milhões. Neste contexto a atuação da Vale está plantada em quatro linhas de ação: controle ambiental, recursos naturais, pesquisa e tecnologia ambiental, e desenvolvimento sócio-ambiental. Uma história escrita diariamente com carinho e competência. Uma história de quem ama e preserva a natureza. Uma história de milhões de folhas, árvores, rios, pássaros animais.

UMA



FOLHA



SÓ.



MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA



Companhia
Vale do Rio Doce

Chega a noite... É o fim de ansiedade e aflições. Ficamos diante da imagem do silêncio que dilacerou Pascal e do falso perene que nos encanta. Estamos diante do universo. Podemos nos mostrar a ele sem o medo de sermos reconhecidos, posto que nos enxerga com os olhos de quem sobreviverá a nós.

Nossas dúvidas afloram e especulam sobre um dos maiores problemas cosmológicos da atualidade. Espaço! Inúmeras odes foram escritas para você. Aberto e infinito ou fechado e finito? Os homens ainda escreverão muito, pensarão muito até poder tocar o réquiem às nossas dúvidas sobre o universo. Até lá, temos a ciência e a filosofia. São nossas armas, são nossas ferramentas. Pensemos.

O homem observa o espaço, lança-se a ele, para aprender, conhecer, conquistar e prostrar-se ...

Essa especial viagem se iniciou em um dia como outro qualquer, num perdido 12 de abril em 1961. O local: a antiga União Soviética. Um jovem de 27 anos — Gagarin — prepara-se para entrar para história, sob um frio de 40 °C abaixo de zero. Sua missão: fora escolhido pelos “deuses” para a primeira visita ao céu. Do alto de seu foguete de 40 m, ele aguarda a partida.

Dezessete mil metros depois, a Terra mostra-se, nua e azul, aos primeiros olhos humanos capazes de tal indiscrição.

Lá de cima, o mais leve dos homens, o Ícaro moderno, voou bem alto, desafiou o Sol e o céu... e suas asas não derreteram! O homem cresce e sai do berço.

Sete anos se passam. Em 1968, os deuses visitados foram vencidos pela saudade e o chamam para eles, Gagarin nos deixa sob os lamentos do planeta.

O caminho, no entanto, fora aberto. Muitos o seguiram, muitos ainda o seguirão. Este ano, completando 25 anos que pousamos na Lua, ainda temos várias perguntas iguais àquelas de 1969. Dúvidas básicas ainda existem. Sabemos que o Sol nos dá sua luz e calor; a Terra, seu ar e seu chão. Cada um dos pontos no céu existe como se nós fôssemos a razão de tal existência. Se ainda não podemos ter todas as respostas, podemos tirar lições advindas do cosmo e de sua observação: a humildade com que o universo se apresenta a nós — a humildade que somente um senhor que se apresenta como servo é capaz de ensinar.

Infinito! Lá habita nossa razão, o nosso saber; lá habita o homem que ainda vem.

Do alto do Olimpo, os deuses observam sua criação, observam os Titãs que criaram e que, um dia, serão adultos. Adultos cheios de criança que, então, não terão pressa de crescer. A perda dessa pressa é como uma libertação. E essa liberdade somente chegará com a certeza de nossa prisão.

Um dia, as estrelas nos abandonarão... em definitivo. Nesse dia, quando ouvirmos o réquiem ainda não tocado, estaremos prontos para aguardar o fim, com a tranquilidade do saber. Chegaremos ao limite da existência, não com a angústia de vítimas, mas com a força de um edelvais... e com a certeza de que, agora, conhecemos “o preço da vida e a doçura de deixá-la...”

O Editor.

A revista *Humanidades* é uma publicação da Editora Universidade de Brasília

Editor responsável

Airton Lugarinho

Conselho Editorial

Ana Maria Fernandes, Airton Lugarinho de Lima Camara, Emanuel Araújo, José Geraldo de Sousa Júnior, Victor Paes de Barros Leonardi e Paulo César Coelho Abrantes.

Preparação de originais e revisão

Teresa Cristina Brandão

Edição de arte

Célia Matsunaga e Marcelo Terraza

Ilustração da capa

Ana Lúcia Pompeu de Sousa Brasil e

fotografia Iracema Malheiros

Ilustradores

Ana Lúcia Pompeu de Sousa Brasil

Pesquisa Iconográfica [A Semana de Arte Moderna e a Imprensa]

Ana Cristina Campos

Editor convidado

Odylio Aguiar (INPE)

Acompanhamento gráfico

Antônio Batista Filho e Elmano Rodrigues Pinheiro

Preço

R\$6,63 (exemplar avulso)

R\$22,50 (assinatura: quatro números)

Propaganda e publicidade

(061) 226-6874 Ramal: 31

Atendimento ao assinante

Rosa Maria Dantas de Oliveira

(061) 226-6874 Ramal: 32

Divulgação

Ana Cristina Luz

(061) 226-6874 Ramal: 27

Endereço

Revista *Humanidades*

Editora Universidade de Brasília

SCS Edifício OK, quadra 2 n. 78

70300-500 Brasília, DF

(061) 226-6874 Ramais 21 e 22

FAX: (061) 225-5611

Impressão

Coronário Editora Gráfica Ltda.

Fotolitos

Verano Editora

Os artigos são de inteira responsabilidade de seus autores

Editora Universidade de Brasília:

Alexandre Lima *Diretor*

Universidade de Brasília:

João Cláudio Todorov *Reitor*

- 107** **Porque o universo é assim como o vemos?**
ODYLIO AGUIAR
- 108** **A topologia do universo**
HELIO V. FAGUNDES
- 116** **Buracos Negros**
FERNANDO KOKUBUN
- 124** **O passado e o futuro do universo**
SAMUEL ROCHA DE OLIVEIRA
- 134** **Gravitação bidimensional: aprendendo com outros universos**
AYRTON ZADRA
- 142** **A radiação cósmica de fundo em microondas e a formação de estruturas no universo: uma visão atual**
CARLOS ALEXANDRE WUENSCHÉ
- 152** **Cosmologia e geometria não-euclidiana**
ALBERTO SAA
- 162** **Cosmologia**
MÁRIO NOVELLO
- 170** **Medindo a temperatura do universo**
THYRSO VILLELA NETO
- 186** **As advertências dos pensadores latino-americanos em face do poderio dos Estados Unidos**
SARA ALMARZA
- 192** **A semana de arte moderna e a imprensa**
RUBEM DE AZEVEDO LIMA
- 200** **SIC
Sobre o Infinito,
o universo e os mundos**
GIORDANO BRUNO

POR QUE O UNIVERSO É ASSIM COMO O VEMOS?

Desde os tempos mais remotos, o homem procura desvendar os segredos do Cosmo, entre outros, sua origem, sua idade, sua evolução e seu destino. Apesar de, até hoje, não os conhecer completamente, ele vem fazendo progressos consideráveis, principalmente neste final de milênio.

Quando Galileu Galilei apontou para Júpiter (e suas luas) um telescópio que havia construído, ele inaugurou a astronomia moderna. Este fato, juntamente com a Teoria Heliocêntrica (o Sol no centro do Sistema Solar) de Copérnico e a Lei da Gravitação de Newton, lançou as bases de uma nova cosmologia (a ciência que estuda o universo como um todo). Neste século, com a Teoria da Relatividade Geral de Einstein, a descoberta da expansão do universo por Edwin Hubble e a descoberta da radiação cósmica de fundo, que apresenta uma isotropia impressionante, o quebra-cabeças do universo começou a tomar forma, e o homem ficou mais próximo de revelar os seus segredos. Algumas perguntas, contudo, permanecem um mistério. Entre elas, uma das mais misteriosas é: "Por que o universo é assim como o vemos?"

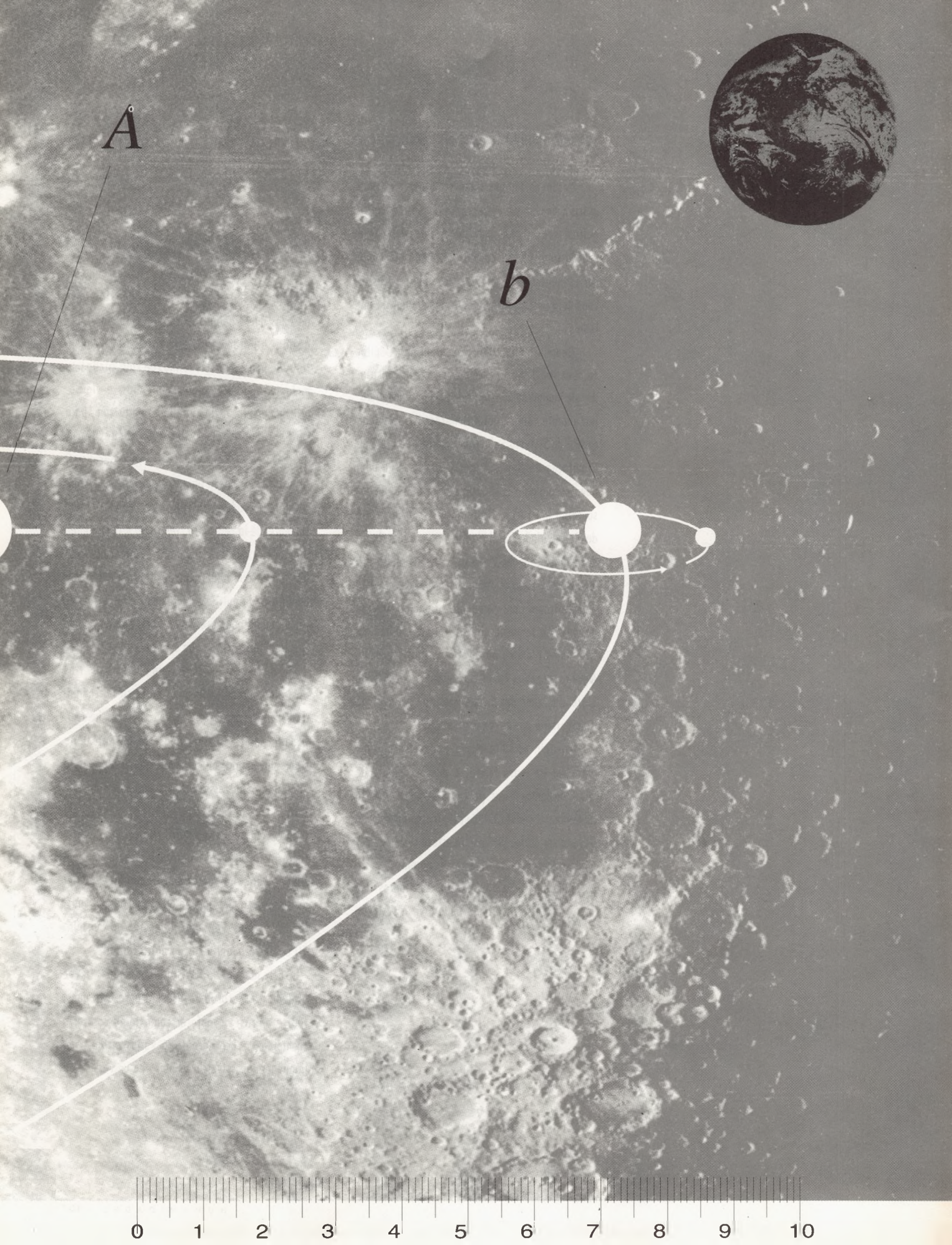
Einstein acreditava que o universo não poderia ser de outra forma, e que o conjunto de leis e constantes físicas, por causa de algum princípio fundamental (talvez ditado pela matemática), não poderia ser outro. Se Einstein estava certo ou não, ainda não sabemos. Uma coisa, porém, é clara, se mudarmos o valor de certas constantes físicas, o universo resultante poderá vir a ser com-

pletamente diferente deste que conhecemos. Talvez, neste outro universo as estrelas não fossem mais capazes de sintetizar elementos químicos mais pesados que o hélio, tais como o carbono, o oxigênio e o nitrogênio. Neste caso, provavelmente, seria impossível que formas de vida inteligente pudessem aparecer algum dia. Aliás, a vida e, principalmente, a vida inteligente precisam, para suas existências, que as leis e constantes físicas do universo tenham valores muito especiais. O fato de que o nosso universo permite a existência de observadores inteligentes, capazes de ouvir entendê-lo, portanto, restringe a diversidade de maneiras que ele poderia ter começado e de leis físicas que poderiam ter determinado a sua evolução. Em outras palavras, o universo tem as propriedades que observamos hoje, porque se elas fossem diferentes nós não estaríamos aqui e agora como observadores. O princípio que está por trás deste método de análise cosmológica foi chamado de Princípio Antrópico, do grego *anthropos*, homem. Poderia parecer, então, que este mistério teria sido solucionado, ou seja, a resposta à pergunta "por que o universo é assim como o vemos?" seria: "Porque se ele não fosse assim, não estaríamos aqui para observá-lo". Na verdade, entretanto, esta resposta nos transfere para uma outra pergunta, muito mais difícil, que é: "Será por acaso que estamos aqui para observá-lo e entendê-lo?" Aí, então, voltamos à questão de Einstein: "O universo poderia ser de outra forma?"

Este número da Revista Humanidades talvez o ajude a esboçar uma resposta para esta questão, e outras, ao enfocar como tema central a cosmologia. Você encontrará vários artigos, em linguagem acessível, a respeito do universo e de seus mistérios.

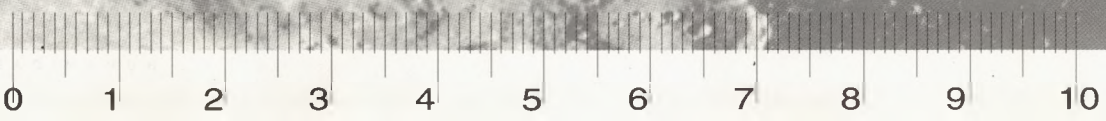
Dr. Odyllo D. Aguiar (INPE)

Editor Convidado



A

b



HELIO V. FAGUNDES

O esforço dedicado
ao estudo e ao desen-
volvimento da ques-
tão da topologia po-
de levar a uma com-
preensão muito mais
rica e detalhada do
universo.

A TOPOLOGIA DO UNIVERSO

ILUSTRAÇÃO ANA LÚCIA POMPEU

A Teoria da Relatividade Geral pode também ser chamada teoria einsteiniana da gravitação. Foi criada por Albert Einstein na segunda década deste século com o objetivo de conciliar a força da gravidade com a teoria especial da relatividade, também descoberta por ele em 1905. Essa teoria, portanto, substitui a lei de Newton (“a força de atração gravitacional entre duas partículas é proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional à distância entre elas”) como lei fundamental. Na prática, a mecânica de Newton continua valendo para os processos onde normalmente era aplicada — engenharia mecânica e astronomia do sistema solar, por exemplo. As duas teorias dão o mesmo resultado nesses casos, portanto usa-se naturalmente a newtoniana, que é muito mais simples e estabelecida que a relativística.

Mas uma nova teoria é necessária para processos onde a força da gravitação é muito intensa, como na astrofísica dos pulsares e quasares, que são astros com altíssima densidade de matéria. Também na cosmologia, que estuda a evolução e os movimentos das grandes estruturas do cosmo, uma nova teoria é essencial. Além da relatividade geral existem várias teorias alternativas da gravitação. Mas a preferência dos profissionais é pela teoria einsteiniana, com seus atrativos de formalismo razoavelmente completos e bem-conhecidos (embora de difícil aprendizado) e grande beleza matemática.

As famosas equações do campo gravitacional de Einstein relacionam dados da geometria do espaço-tempo com a densidade e o movimento da matéria em cada ponto da região. No caso da

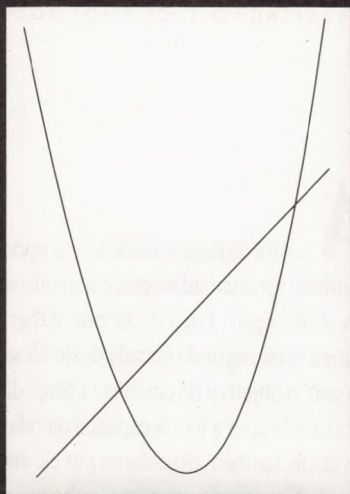


FIGURA 1. UMA RETA E UMA PARÁBOLA COMO EXEMPLOS DE LINHAS INFINITAS. IMAGINAR SUAS PONTAS DESLOCANDO-SE INDEFINIDAMENTE EM SENTIDOS OPOSTOS

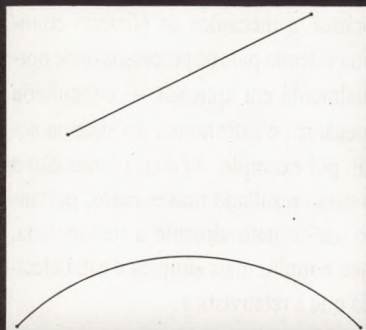


FIGURA 2. SEGMENTOS DE RETA E DE CÍRCULO SÃO LINHAS FINITAS COM BORDA, QUE SÃO SEUS PONTOS EXTREMOS, MOSTRADOS EM DESTAQUE

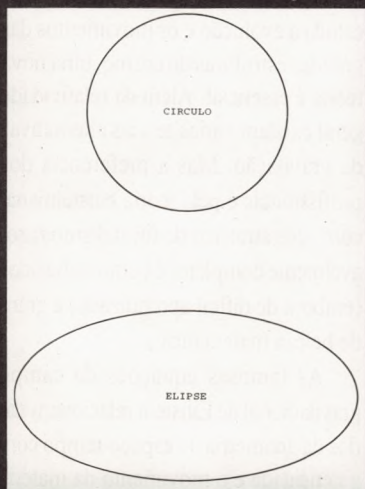


FIGURA 3. O CÍRCULO E A ELIPSE SÃO EXEMPLOS DE LINHAS FINITAS, SEM COMEÇO NEM FIM — PORTANTO FECHADAS, NA NOMENCLATURA DO TEXTO

cosmologia, a região é todo o universo físico, visto na escala de suas grandes estruturas, como os aglomerados e superaglomerados de galáxias. O que, diga-se de passagem, é um projeto ambicioso, que ilustra a grandeza do espírito humano.

Entretanto, as equações do campo deixam em aberto a questão da *topologia global* do cosmo, ou seja, qual é a forma do espaço como um todo, o que tentarei explicar a seguir, através de exemplos geométricos simples. Essencialmente, três tipos de topologia serão explicados desta maneira: (I) as figuras infinitas, (II) as figuras finitas com fronteira ou borda e (III) as figuras finitas sem fronteira. As duas primeiras são de fácil apreensão, mesmo em três dimensões. Elas servem de contraste para focalizarmos o terceiro caso, que em três dimensões não é intuitivo, mas é justamente ele que queremos aplicar à cosmologia. Se o leitor já tem uma noção de topologia, ou se estiver apressado para ver aplicações físicas, poderá saltar essas seções abstratas, indo diretamente para as duas últimas, onde darei noções de modelos cosmológicos e algumas hipóteses que têm sido feitas sobre a topologia do espaço cósmico. Se confirmadas, algumas dessas hipóteses poderão revolucionar a cosmologia observacional e teórica.

Topologia em uma dimensão

Em uma dimensão temos as linhas retas e curvas, e seus segmentos, que são figuras geométricas facilmente captadas pela nossa intuição. Não podemos desenhar uma linha infinita, como a reta e a parábola, mas podemos imaginá-la. A figura 1 representa uma reta e uma parábola, se imaginamos que seus pontos extremos são deslocados indefinidamente, em ambos os sentidos. Também é possível imaginar a reta feita de um fio flexível, e fazê-la coincidir com a parábola. Esta última propriedade se expressa tecnicamente dizendo que a reta e a parábola têm a mesma topologia.

Analogamente podemos deformar um segmento de reta em um segmento de curva, por exemplo a letra S. Porém, esses segmentos têm pontas, seus pontos extremos, enquanto a reta e a parábola não os têm. Sua fronteira ou borda são as duas pontas. Além disso, os segmentos são finitos, isto é, têm comprimento finito. Mesmo supondo tal segmento suficientemente elástico, não podemos transformá-lo em uma reta, pois essa linha tem comprimento infinito e não tem pontos extremos. (Dizer que os extremos estão no infinito não resolve o problema, ao menos neste nível.) Portanto, os segmentos têm topologia diferente da das linhas infinitas. A figura 2 representa um segmento de reta e um segmento de círculo, ambos com os pontos extremos enfatizados.

Uma terceira topologia é a das curvas fechadas, que não têm começo nem fim, como o círculo ou a elipse (vide figura 3). Elas podem ser deformadas entre si, mas não em uma reta ou um segmento (não vale cortar as curvas para comparar topologias, apenas deformá-las por alongamento ou compressão elástica). O círculo, a elipse, o contorno de um quadrado são diferentes dos segmentos acima por não terem fronteira, e também da reta, por serem de comprimento finito. Uma figura finita e sem fronteira é chamada figura *fechada* em nosso presente contexto. (Um alerta aos estudiosos de matemática: a palavra “fechada” tem também um outro sentido em topologia geral.) Esta designação é importante em cosmologia, como veremos adiante.

Em resumo, vimos os três exemplos de topologia para figuras lineares: figuras infinitas e sem fronteira, como a reta; figuras finitas e com fronteira, como os segmentos; e figuras fechadas (isto é, finitas e sem fronteira) como o círculo.

Topologia das superfícies

As superfícies também são basicamente intuitivas, embora, como as linhas, não sejam representações fiéis de objetos da natureza. Por exemplo, uma concha assemelha-se a uma superfície geométrica, digamos um hemisfério, porém aquela tem espessura, enquanto este não a tem. Por outro lado, assim como imaginamos a linha como um fio de finíssimo calibre, temos a imagem do hemisfério como uma concha cuja espessura é mínima, ou se aproxima de zero (vide figura 4). O hemisfério é finito (área finita) e tem borda ou fronteira, assim se assemelha aos segmentos lineares. Já a esfera completa (figura 5) é uma superfície finita, mas sem fronteira, portanto, segundo nossa designação acima, é uma figura fechada. (Não confundir a esfera com a bola, que é o volume sólido limitado pela esfera; esta é então a fronteira da bola.)

Analogamente às retas temos os planos, como figuras infinitas e sem fronteira. Outro exemplo desse caso é o parabolóide de rotação, que pode ser imaginado como uma antena parabólica estendida indefinidamente. A figura 6 representa uma seção deste parabolóide; intuímos o parabolóide completo imaginando a borda circular deslocando-se indefinidamente para cima.

Os topólogos evitam, se possível, falar da métrica das figuras, isto é, suas medidas como comprimento, área, volume. Mas em cosmologia a métrica está estreitamente ligada à topologia, e aqui uso esse fato para facilitar a exposição. Aliás, os geômetras contemporâneos têm descoberto importantes relações entre métrica e topologia (vide Thurston e Weeks, 1984). Também interessante — mas um pouco técnico — é o livro de Weeks (1985).

Topologia do espaço

Agora a intuição já não ajudará tanto como para as figuras de uma e duas dimensões acima. Concebemos facilmente um espaço finito com fronteira, como o de uma bola, citado acima, cuja fronteira é uma esfera. Outros

exemplos de espaços finitos com fronteira são uma barra de ouro, um tronco de árvore, o espaço ocupado pelo corpo humano. É também intuitiva, por nossa capacidade de imaginação, a idéia do espaço infinito, que se estende sem fim em todas as direções. Essa idéia certamente tem sido alimentada, desde que o homem começou a pensar, pela contemplação de um magnífico céu noturno, livre por milhões de anos da poluição luminosa que os astrônomos contemporâneos tanto lamentam.

Mas não temos a imagem de um espaço finito e sem fronteira, ou seja, o análogo tridimensional da superfície esférica ou elipsoidal. Entretanto, os geômetras definem esse tipo de

espaço (que eles preferem chamar *variedades*) com precisão. Talvez o melhor modo de começarmos a apreender mentalmente essas figuras seja através de poliedros com faces identificadas, ou “coladas”.

Voltando um pouco a duas dimensões, consideremos a superfície limitada pelo retângulo ABCD na figura 7: partindo do retângulo no topo da figura, os lados AD e BC são colados (os matemáticos preferem dizer *identificados*, pois nem sempre a imagem da colagem é intuitiva como aqui; vide adiante). Assim obtemos o pedaço de cilindro no meio da figura. Se

agora este último é deformado de modo a podermos colar os círculos AB e CD obtemos um toro (semelhante a uma câmara de ar de pneu, a uma bóia salva-vidas, ou à superfície de um donut), representado embaixo na figura 7. Agora bem, estaremos interessados em traçar linhas sobre o toro, e a representação deste na parte

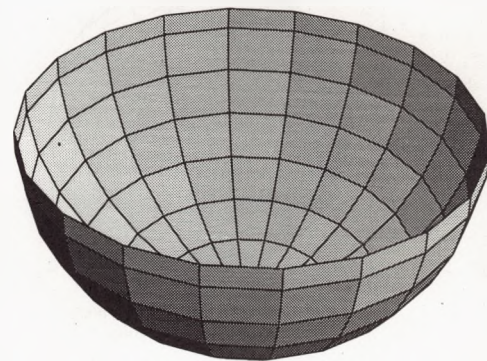


FIGURA 4. HEMISFÉRIO COMO EXEMPLO DE SUPERFÍCIE FINITA COM BORDA

**Mas uma nova
teoria é necessária
para processos
onde a força
gravitacional é
muito intensa ...**

inferior da figura 7 não ajuda nesta tarefa, sobretudo se queremos linhas com posições precisas. É mais fácil trabalharmos com o retângulo no topo da figura 7, com a condição de lembrarmos as faces e pontos identificados. Assim, por exemplo, na figura 8 temos as linhas fechadas $EFF'E$, que é realmente um círculo, pois os pontos F e F' são colados no toro da figura 7. Analogamente $GHH'G$, pois H é o mesmo ponto H' no toro. Aliás, as crianças fazem intuitivamente essa identificação nos videogames: o aviãozinho que desaparece em uma borda do vídeo reaparece na mesma posição da borda oposta, o que significa um movimento contínuo.

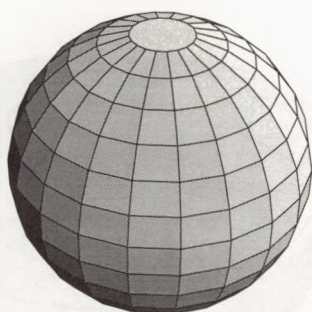


FIGURA 5. A ESFERA É UMA SUPERFÍCIE FECHADA: FINITA E SEM BORDA

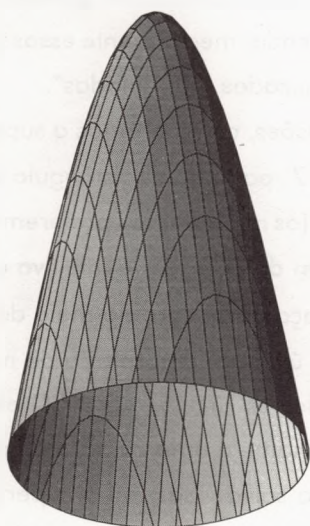


FIGURA 6. O PARABOLÓIDE É UMA SUPERFÍCIE INFINITA. IMAGINAR QUE A BORDA NA FIGURA SE DESLOCA PARA O INFINITO

Aqui já podemos antecipar como essas idéias são aplicáveis à cosmologia. Suponhamos um universo que tenha só duas dimensões, digamos largura e comprimento mas não altura. Existe uma extensa literatura sobre estas *flatlands* — vide o livro citado de Weeks e suas referências. Aqui supomos um tal universo na forma de toro, portanto representado pela figura 8 com as colagens indicadas acima. Se nesse universo uma galáxia ocupa a posição G , e no passado emitiu o raio GH , este raio dá uma volta (em milhões ou bilhões de anos) e agora retorna a um observador em G pelo outro lado ($H'G$). Em consequência da nossa ilusão de ótica de percebermos um raio como uma linha reta, não quebrada (lembramos a ilusão do espelho, em que nossa imagem parece provir de trás da moldura), um observador humano em G teria a impressão de que a imagem provém do ponto G' . Isto é, o observador estaria vendo uma imagem antiga de sua própria galáxia, em uma posição aparente G' fora de seu universo real, que é o toro representado por $ABCD$. Voltando a nossa designação anterior, vemos que o toro é uma figura fechada, pois não tem fronteira como superfície (novamente, não confundir a superfície sem fronteira com o espaço do qual ela própria é fronteira: por exemplo, o

toro é a superfície externa do *donut*, e é a fronteira da *massa* daquele doce).

O uso da figura 8 para trabalharmos sobre o toro é uma conveniência, mas não é essencial. Alguém com disposição e paciência pode preferir trabalhar sobre um modelo realista do toro, como a câmara de ar, e aí traçar os círculos EFF'E, GHH'G e outras linhas.

Mas para espaços fechados em três dimensões, essa técnica se torna essencial. Por exemplo, o paralelepípedo ABCDEFGH da figura 9 pode ser imaginado como um espaço fechado se identificarmos as faces nos pares de faces



opostas: ABCD com EFGH, ADHE com BCGF, ABFE com DCGH. Pode-se dizer, como acima, “colando” as faces opostas, mas a nossa imaginação não visualiza essa colagem tripla. Assim, temos de nos contentar com a figura 9 e as regras de pontos identificados, como por exemplo J e J' nos círculos IJJ'I e KLL'K. Notem que o espaço é realmente fechado: não há como ir para fora dele, pois a saída por um lado implica a reaparição imediata no lado oposto. E isto deve ser sentido pelo viajante como um processo contínuo, isto é, ele ou ela não percebe que está atravessando a

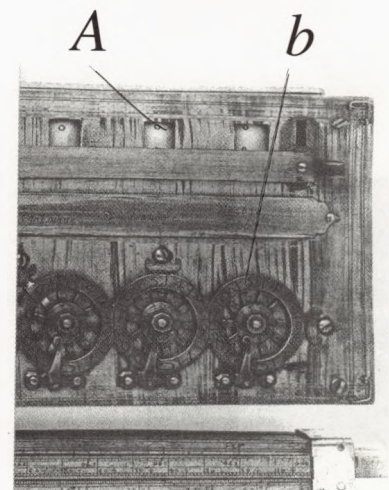
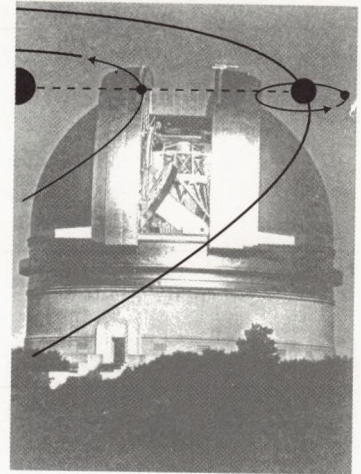
“zona de colagem”, que é um mero artifício de representação. Por analogia com o toro, esse espaço de três dimensões é chamado tri-toro.

Voltando à cosmologia, agora com o espaço nas três dimensões de direito, se por exemplo a Galáxia (isto é, nossa própria galáxia; os astrônomos grafam-na com maiúscula para distingui-la das demais) ocupa a posição I, o raio circular IJJ'I faz aparecer sua auto-imagem do passado, na posição aparente I'.

Modelos cosmológicos

Em ciência a palavra *modelo* tem um sentido bastante lato. Refere-se não só a modelos materialmente representativos, como uma maquete para os arquitetos, mas também a conceitos matemáticos às vezes difíceis ou mesmo impossíveis de representação intuitiva, seja porque são idéias puramente algébricas, seja porque pertencem a áreas da geometria moderna, longe da apreensão da geometria euclídeana de nosso dia-a-dia. Assim, por exemplo, no início do século XX apareceu um modelo para os átomos semelhante ao sistema heliocêntrico da astronomia, com o núcleo no centro como o Sol e os elétrons em órbitas como os planetas. Esse modelo aparece ainda hoje em textos escolares e obras populares, e dá alguma idéia das relações de forças intra-atômicas, mas não é suficientemente preciso nem teoricamente consistente. Daí ter sido substituído pela visão bem mais abstrata da teoria quântica moderna; esse novo modelo é altamente bem-sucedido em explicar a física atômica, mas é de visualização difícil, com idéias não-intuitivas como complementaridade e indeterminismo. Em cosmologia observacional os problemas de visualização dizem respeito às noções da geometria não-euclídeana e da topologia global.

A cosmologia atual tem como precursoras as mitologias das culturas primitivas, passando pelos modelos de esferas de Pitágoras e Aristóteles, e pelos sistemas de Copérnico e Kepler, que levaram à grande síntese teórica de Isaac Newton. A partir de Galileu Galilei o uso do telescópio expandiu enormemente os horizontes da observação celeste, e portanto a percepção do cosmo como inimaginavelmente extenso e grandioso. A maior descoberta astronômica dos últimos cem anos foi talvez a realização de que a Galáxia (vi-



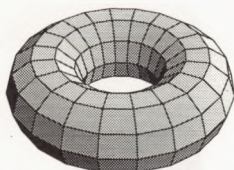
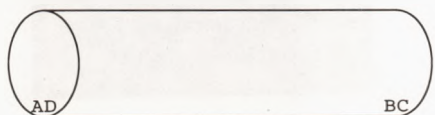
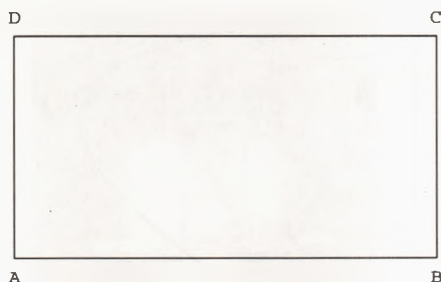


Figura 7. O retângulo ABCD (no topo) dá origem a um pedaço de cilindro (no meio) por colagem das arestas AB e DC, e finalmente ao toro (embaixo) por colagem das bordas circulares AD e BC. As linhas angulosas da figura do toro devem-se às limitações de representarmos uma superfície curva sobre o plano do papel.

sível em um céu escuro como a Via-Láctea) contém bilhões de estrelas semelhantes ao nosso Sol, e de que o cosmo está repleto de galáxias semelhantes à nossa.

Os modelos atuais são predominantemente baseados na chamada teoria geral da relatividade. O próprio Einstein usou — e até refinou — sua teoria para construir um modelo adaptado à crença da época (1917) de que o cosmo, em grande escala (isto é, descontando “pequenos movimentos” localizados, como as órbitas de corpos que se atraem), seria estático. Poucos anos depois foi descoberta a expansão do universo, pelo americano Edwin Hubble (hoje um nome conhecido, graças ao magnífico telescópio espacial que o homenageia), e portanto o modelo estático de Einstein perdeu seu interesse observacional. Mas mantém grande interesse teórico, além de histórico e educacional. Algumas de suas características aparecem nas topologias cósmicas fechadas. Pois o espaço daquele modelo é uma *hiperesfera*, isto é, pode ser definido como o análogo de uma superfície esférica, só que em um espaço de quatro dimensões (não confundir com o espaço-tempo da relatividade). Assim como a esfera pode ser imaginada como um mundo de seres bidimensionais, como as *flatlands* citadas acima, a hiperesfera representaria nosso espaço cósmico de três dimensões. Como a superfície esférica, esse espaço é finito e não tem borda, ou seja, é um espaço fechado, sendo impossível escapar dele. Um raio de luz emitido de uma fonte em “linha reta” regressaria ao ponto de partida depois de uma volta completa — um grande círculo na hiperesfera. Há quem ache que nossa dificuldade em visualizar tal processo não é muito maior que a dos marujos de Colombo em acreditar na teoria de seu capitão, e portanto pode ser superada.

Levando em conta a expansão de Hubble das galáxias, inferiu-se que o universo teve um início no tempo, começando a crescer a partir de um pequeno ponto ou “bola” de dimensões microscópicas. Sendo essa bola inicial extremamente quente, a expansão assemelha-se a uma explosão, daí o termo popular *Big Bang* para designar a crença atual sobre a origem do universo. As teorias que incorporam essas idéias giram em torno de uma grande família de modelos, chamada de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW), segundo os cientistas que os desenvolveram e sistematizaram.

Dentro da família FLRW, destaca-se o modelo de Einstein-de Sitter (EdS) de 1932, não pela co-autoria famosa, mas pela relativa simplicidade de cálculos e estimativas nele baseados, e porque o pensamento dominante na última década o postula como representando o universo real. Pois bem, no modelo EdS o espaço é infinito, só que não podemos

observá-lo além de certa distância ou horizonte, pois a luz leva tempo para chegar até nós. Os objetos mais distantes observáveis atualmente são aqueles cuja radiação levou praticamente toda a idade do universo para nos atingir.

Por outro lado, é possível explicar os dados da observação astronômica por meio de modelos fechados: espaços finitos e sem fronteira, como o modelo estático de Einstein, mas agora dentro da família FLRW. O modelo de Einstein-de Sitter pode ser adaptado à topologia espacial do tri-toro, descrito acima como um poliedro com faces identificadas, e representado na figura 9. Passamos agora a examinar essa hipótese e suas conseqüências observacionais.

...essas hipóteses
revolucionariam a
ciência do universo.

Efeitos topológicos na cosmologia

Se o espaço cósmico tem a forma de um tri-toro, vários efeitos importantes poderão vir a ser observados. Atualmente os dados das observações são ambíguos, podendo ser interpretados tanto do modo tradicional (universo EdS infinito) como supondo um espaço do tipo tri-toro. Neste último caso, as galáxias distantes seriam reinterpretadas como imagens aparentes de galáxias reais, mais próximas. Enquanto estas últimas estariam dentro do espaço, como o ponto I na figura 9, as primeiras teriam posição aparente *fora* do espaço, como o ponto I' na mesma figura. Como a luz (e outros tipos de radiação eletromagnética hoje detectados nos vários tipos de astronomia) de uma fonte celeste poderia dar muitas voltas em tal universo antes de ser captada por nós, existiria a possibilidade de vermos e estudarmos imagens múltiplas de cada galáxia e de outros objetos celestes. Essas imagens, produzidas por raios vindos de várias direções do espaço, mostrariam cada fonte sob vários ângulos de observação, revelando possíveis assimetrias em sua estrutura. Além disto, corresponderiam a diferentes épocas de emissão da radiação pela fonte, como um álbum fotográfico que mostra o crescimento de uma pessoa. Tudo isso é contrastado com a idéia do universo infinito, que permite apenas uma imagem de cada fonte, correspondente a apenas uma época de sua existência. Teríamos assim um excelente meio para estudar a formação e a evolução das grandes estruturas que compõem o universo físico, que são basicamente os aglomerados e superaglomerados de galáxias.

Na realidade, existem infinitos tipos de topologia que os espaços fechados podem assumir. Por exemplo, vimos o tri-toro na figura 9 e foi mencionada a hipersfera na seção anterior, que têm topologia diferente (comparar com a esfera e o toro em duas dimensões, figuras 5 e 7: essas figuras não podem ser transformadas uma na outra, na regra que definimos acima para a equivalência de formas topológicas). Muitas dessas infinitas topologias podem ser assumidas em modelos cosmológicos como sendo a forma do espaço cósmico. Só o futuro, com observações mais precisas e detalhadas do cosmo, poderá decidir qual dessas é a real topologia do universo, e se a questão está bem formulada dessa maneira. Os dados atuais ainda deixam muita incerteza até mesmo quanto à *geometria* do cosmo, e mais ainda quanto a sua topologia, pois cada geometria é compatível com várias topologias (vide Thurston e Weeks, 1984).

Além de efeitos fascinantes como as múltiplas imagens mencionadas acima, os espaços fechados ajudam a eliminar certas dificuldades teóricas, como a aparente uniformidade da distribuição de galáxias em larga escala e o nascimento do universo como processo quântico. A teoria do *Big Bang* descreve a evolução cósmica a partir do universo recém-nascido. A esperança atual é que a teoria quântica possa ir além, e explicar a própria geração e o nascimento do universo a partir de princípios mais gerais. Os espaços finitos (e portanto fechados, já que não podemos imaginar um universo com fronteira) tornam as tenta-

tivas da cosmogênese quântica bastante atraentes.

Por tudo isso, e mais que não é possível explicar de modo simples, dissemos no fim da primeira seção que, se confirmadas, essas hipóteses revolucionariam a ciência do universo. E portanto vale a pena o esforço que muitos de nós dedicamos ao estudo e ao desenvolvimento dessas idéias, tentando prever de que modo elas poderão se manifestar concretamente, com o desenvolvimento dos meios de observação e de análise astronômica e astrofísica.

Hélio V. Fagundes é professor e pesquisador do Instituto de Física Teórica da Universidade Estadual Paulista.

Referências bibliográficas

- GRIBBIN, J. Astronomers chew on Brazilian doughnut. *New Scientist*, 1597, 1988, p. 34.
- HARRISON, E. R. *Cosmology: the science of the universe*. Cambridge, Cambridge University Press, 1981.
- ROTHMAN, T. e ELLIS, G. Has cosmology become metaphysical? *Astronomy* 15(2), 1987, pp. 6-22.
- THURSTON, W. P. e WEEKS, J. R. The mathematics of three-dimensional manifolds. *Scientific American*, 251(1), 1984, pp. 94-106.
- WEEKS, J. R. *The shape of space*. Nova York, Marcel Dekker, 1985.

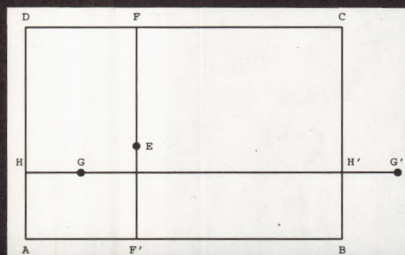


FIGURA 8. O TORO REPRESENTADO PELO RETÂNGULO ABCD COM LADOS OPOSTOS IDENTIFICADOS, MOSTRANDO OS DOIS CÍRCULOS EFF'E e GHH'G. O PONTO G' É A IMAGEM DE G PRODUZIDA POR UM RAI QUE TIVESSE A TRAJETÓRIA GHH'G

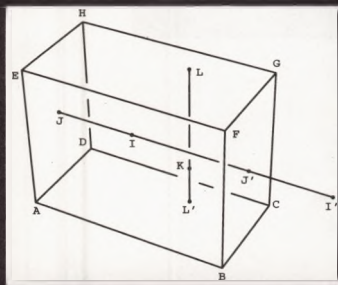
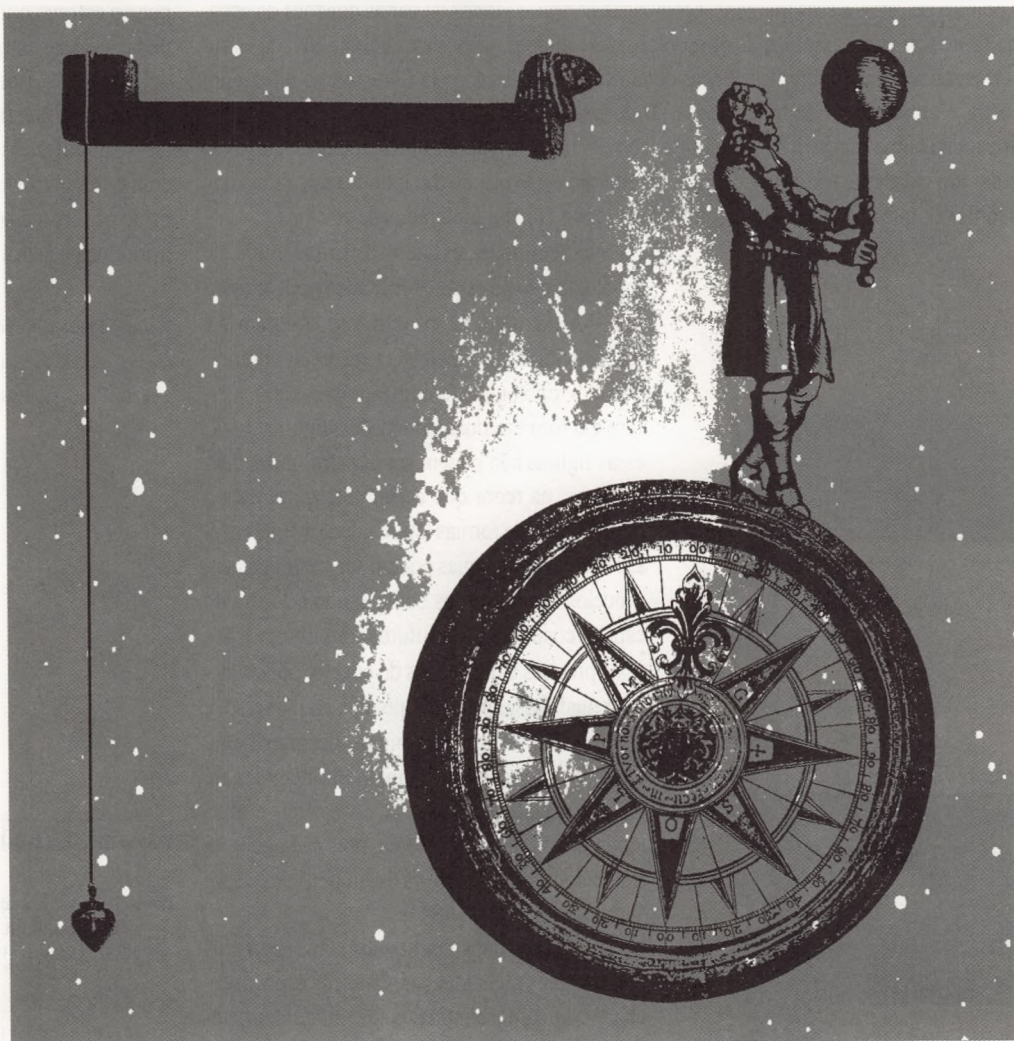


FIGURA 9. O TRI-TORO ABCDEFGH COM FACES OPOSTAS IDENTIFICADAS. KLL'K e IJJ'I SÃO CÍRCULOS (COMO OS DA FIGURA 8) E I' É IMAGEM DE I (COMO G' NA FIGURA 8)



BURACOS NEGROS

FERNANDO KOKUBUN

A compreensão da natureza está ligada ao estudo e à observação dos buracos negros — uma teoria desafiadora.

ILUSTRAÇÃO ANA LÚCIA POMPEU

Em 1905, Albert Einstein, na época trabalhando em um escritório de patentes na Suíça, enunciou a teoria da relatividade restrita, que é considerada um dos grandes pilares da física moderna. Nesse trabalho foi apresentado o conceito de que a velocidade da luz no vácuo é a velocidade máxima para a transmissão de quaisquer tipos de informações. Essa concepção mudou drasticamente o conceito de espaço e de tempo até então vigente, e introduziu a noção de espaço-tempo como uma entidade unificada. Com a introdução de uma velocidade máxima para a propagação de informações no espaço-tempo, a gravitação

newtoniana, na qual a interação gravitacional se propaga instantaneamente, necessitava ser modificada. Esse objetivo foi perseguido por vários eminentes pesquisadores do início do século, e com o trabalho de A. Einstein, que enunciou em 1915 a Teoria da Relatividade Geral, o objetivo foi alcançado. Nessa teoria a presença da matéria faz com que o espaço-tempo seja distorcido, de maneira que a luz siga uma trajetória curva. Dessa forma o espaço-tempo deixa de ser um mero palco no qual os fenômenos físicos se desenvolvem, ou como dizem Charles Misner, Kip Thorne e John Archibald Wheeler no livro *Gravitation*:

O espaço age na matéria, dizendo como se mover. Em contrapartida, a matéria reage no espaço, dizendo como deve se curvar.

Essa teoria nas regiões de campo fraco apresenta resultados compatíveis com a gravitação newtoniana, introduzindo apenas pequenas correções que são confirmadas experimentalmente. Mas os efeitos mais surpreendentes surgem quando se estudam campos gravitacionais em regiões muito extensas, como no caso da cosmologia, ou nas regiões de campos muito intensos, tais como os gerados por buracos negros.

Em 1916 o físico alemão K. Schwarzschild estudou o campo gravitacional de corpos esféricos usando as equações de Einstein. A idéia era obter uma descrição relativística de uma estrela. Para corpos muito densos, os resultados obtidos foram considerados tão estranhos que Einstein em um trabalho publicado em 1939 diz:

O resultado essencial destas investigações é do porque a singularidade de Schwarzschild não existe como realidade física, sendo que singularidade de Schwarzschild era a maneira pela qual os buracos negros eram conhecidos. Além de Einstein, uma outra grande autoridade em relatividade, o cientista inglês Arthur Eddington, também descartava como sendo irreal a solução obtida por Schwarzschild. Por uma grande fatalidade, Karl Schwarzschild não pôde acompanhar o debate gerado pelo seu trabalho, pois faleceu alguns meses após a sua publicação. Por serem Eddington e Einstein considerados as grandes autoridades em relatividade geral, a idéia da existência de um buraco negro seria colocada no limbo por um longo período. Os buracos negros somente voltariam à tona no final dos anos 1950, após intensos estudos da evolução de estrelas. A relação entre a evolução de estrelas e os buracos negros está ligada ao fato de a gravitação ser sempre atrativa para a matéria ordinária. Na ausência de forças que sejam opostas à interação gravitacional, a matéria existente tende a se concentrar sob a ação do campo gravitacional. Com a compressão da matéria, há um aumento da temperatura no seu interior. Para massas acima de um certo valor, a temperatura obtida por esse processo é suficientemente alta, dando início a processos de fusões nucleares, fazendo com que o gás se "acenda" dando origem a uma estrela. A radiação liberada por essas reações nucleares exerce uma forte pressão oposta à contração da estrela, evitando momentaneamen-

te o seu colapso. Esse equilíbrio é mantido por um longo período, que depende da massa da estrela: quanto maior a massa, maior a temperatura em seu interior e mais rapidamente o combustível nuclear é consumido, conseqüentemente menor é o período de estabilidade da estrela. Para estrelas com massa equivalente à do Sol (cerca de dois bilhões de bilhões de toneladas), esse processo pode levar bilhões de anos sendo que, após a queima do combustível nuclear, a estrela se torna um corpo escuro e sem brilho. Ao longo do seu processo evolutivo, antes da sua "morte", essas estrelas dão origem a objetos tais como anãs brancas, com raio típico da ordem de 6.000 quilômetros e estrelas de nêutrons com raio típico da ordem de 10 quilômetros (o raio do Sol é cerca de 700.000 quilômetros). Nessas estrelas o processo de colapso gravitacional é detido por uma força de origem quântica, que faz com que a pressão devida aos elétrons e os nêutrons sejam os responsáveis pela estabilidade final, respectivamente da anã branca e da estrela de nêutrons. Para estrelas com uma massa algumas vezes maior que a do Sol, o final do processo evolutivo é diferente. Nesse caso, a relatividade geral prevê que a estrela colapsará sob a ação do campo gravitacional, e toda a massa estará concentrada num único ponto em seu centro, denominado singularidade. Em torno dessa singularidade será criada uma região na qual o campo gravitacional é tão intenso que nem mesmo a luz pode escapar. Por esse motivo, o físico americano John Wheeler no final dos anos 1960 batizou tais corpos de *buracos negros*. Podemos ter uma idéia de quanto a matéria precisa ser comprimida para se tornar um buraco negro notando que para que o Sol se torne um buraco negro, seria necessário reduzir o seu raio para cerca de 3 quilômetros!

Além dos buracos negros originários da evolução de estrelas, existe a possibilidade de formação também no início do universo. O modelo mais aceito para descrever o universo é conhecido como o modelo do *Big Bang*. Este modelo é obtido como solução das equações da relatividade geral, e foi elaborado em 1922 por Alexandre Friedmann. Um dos resultados mais interessantes desse modelo é de que o universo está em expansão, tendo essa expansão sido confirmada observacionalmente em 1929, com os trabalhos de Edwin Hubble, por meio da determinação da velocidade com que as galáxias distantes se afastam da nossa galáxia. É importante ressaltar que a nossa galáxia também se afasta das outras galáxias, não sendo de maneira alguma o centro dessa expansão. Isso pode ser visualizado pela seguinte analogia: imagine um balão com pontos desenhados em sua superfície, cada ponto representando uma galáxia. O afastamento que se observa entre as galáxias do nosso universo pode ser visto como o distanciamento entre os pontos na superfície do balão quando o inflamos, notando que todos os pontos se afastam um dos outros. Nesse sentido, o *Big Bang* que fisicamente deve ser visto como o surgimento do espaço e do tempo corresponde em nossa analogia ao surgimento do próprio balão. Estando atualmente o universo em expansão,

temos a consequência imediata de que no passado a matéria deveria estar em um estado extremamente denso, e com temperatura extremamente alta. Nessa etapa da evolução do universo, devem ter existido flutuações na distribuição da energia e da matéria, que são necessárias para que as galáxias atualmente observadas possam ser formadas. No entanto, além das flutuações que levaram à formação das galáxias, podem ter existido flutuações que formaram buracos negros. Estes, denominados buracos negros primordiais, podem ter massas e tamanhos os mais variados, ao contrário dos formados ao final da evolução de estrelas que necessitam ter uma massa maior que a do Sol. Buracos negros formados nessa época com massa correspondente à de uma montanha (cerca de um bilhão de toneladas) são exemplos de miniburacos negros, sendo o seu raio da ordem de 1 milionésimo de milionésimo de milímetro, que é aproximadamente o raio do núcleo do hidrogênio. Não se sabe exatamente qual é a densidade desses buracos negros no universo, pois é necessário que tenhamos um conhecimento mais detalhado das flutuações primordiais existentes no universo primitivo. Mas é possível estabelecer certos limites à sua densidade, mesmo sem esse conhecimento prévio, através da análise da taxa de expansão do universo. A densidade de buracos negros primordiais não pode ser muito alta, caso contrário a taxa de expansão do universo seria menor do que a observada.

Apesar de os buracos negros serem consequências da Teoria da Relatividade Geral, no século XVIII já se especulava sobre a existência de corpos suficientemente massivos com um campo gravitacional intenso a ponto de impedir que a luz pudesse escapar da sua superfície. Essa discussão ocorria numa época em que se acreditava que a luz era composta de partículas, portanto sujeitas à ação do campo gravitacional. Essas previsões foram efetuadas pelo cientista inglês John Michell, em 1783, e também de maneira independente pelo físico-matemático francês Pierre Simon de Laplace, em 1789, que em seu trabalho expôs esse conceito da seguinte maneira:

Uma estrela luminosa com a mesma densidade da Terra e cujo diâmetro seja 250 vezes maior que o do Sol não permitiria, em consequência de sua atração, que qualquer raio chegasse até nós; é possível então que os maiores corpos luminosos no universo sejam, devido a essa causa, invisíveis.

É curioso notar que com o advento da teoria ondulatória para explicar os fenômenos luminosos, a idéia de um corpo massivo que pudesse impedir que a luz escapasse da sua superfície foi totalmente abandonada. De fato, dentro do contexto das teorias então vigentes, não havia a possibilidade de que a luz como fenômeno ondulatório pudesse ser influenciada pelo campo gravitacional. Apenas com o advento da Teoria da Relatividade Geral, tornou-se possível conceber a interação da luz com o campo gravitacional

de maneira consistente. Em relação à natureza da luz, a mecânica quântica por meio da dualidade onda—partícula, introduzida por Louis de Broglie em 1925, mostrou claramente que a descrição como fenômeno ondulatório ou corpuscular era consistente e expressava uma nova realidade física. No entanto, uma ligação entre a mecânica quântica e a relatividade geral somente seria obtida nos anos 1970, resultando em uma nova visão para o buraco negro. Mais tarde voltaremos a esse assunto.

Um buraco negro ao se formar cria ao seu redor o que chamamos de *horizonte de eventos*. O raio do horizonte de eventos, sendo maior quanto maior for a massa do objeto que originou o buraco negro, recebe o nome de *raio de Schwarzschild*. Um raio de luz passando a cerca de três vezes o raio de Schwarzschild é desviado por um ângulo de 45º da sua trajetória, e um raio passando a cerca de uma vez e meia o raio de Schwarzschild será mantido em

uma órbita perfeitamente circular, formando um anel luminoso em torno do buraco negro. Uma das características do horizonte de eventos é de que qualquer objeto que o ultrapasse em direção ao buraco negro não pode mais retornar. Nem mesmo a luz pode escapar ao passar pelo horizonte de eventos. Para visualizar melhor o que ocorre nas vizinhanças de um buraco negro, vamos considerar dois astronautas, sendo que um efetua uma viagem em direção ao buraco negro e o outro fica ao longe observando o que ocorre. O astronauta-explorador que viaja em direção ao

buraco negro sentirá um aumento da força gravitacional ao se aproximar mais e mais do buraco negro. Mas fora esse efeito não sentirá nada de novo, e poderá cruzar o horizonte de eventos sem grandes problemas, e nem notará o momento que isso ocorrer. Na realidade, dependendo da massa do buraco negro, em algum ponto da trajetória do astronauta-explorador, a intensidade do campo gravitacional pode ser suficientemente alta para destruir qualquer objeto. Para buracos negros com massa próxima da solar isso ocorre nas vizinhanças do horizonte de eventos, enquanto que para buracos negros com massa da ordem de milhões de massas solares pode-se cruzar o horizonte de eventos sem que o objeto seja destruído. Por outro lado, o astronauta-observador que ficou ao longe irá observar um fenômeno curioso. Quanto mais próximo do horizonte de evento o astronauta-explorador se aproxima, mais avermelhada e tênue torna-se a sua imagem e mais lentamente passa a se aproximar do horizonte de eventos. Para o astronauta-observador, restará uma imagem do astronauta-explorador cada vez mais fraca e movendo-se cada vez mais lentamente quanto mais ele se aproxima do horizonte de eventos, sendo impossível seguir a jornada do astronauta-explorador através do horizonte de eventos em direção à singularidade. O horizonte de eventos é considerado como o limite além do qual não podemos obter nenhuma

NEM MESMO A LUZ PODE ESCAPAR AO PASSAR PELO HORIZONTE DE EVENTOS.

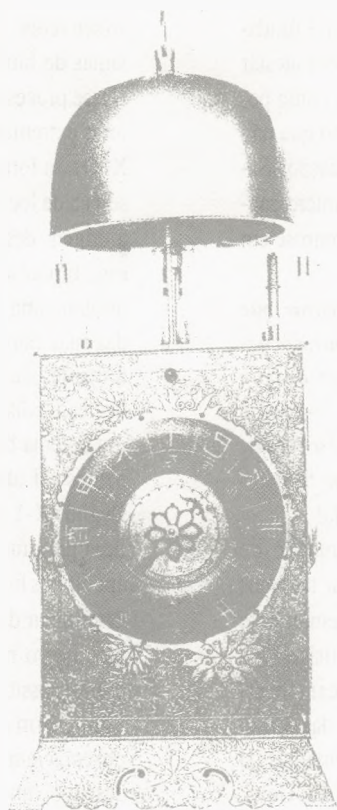
informação. Isso implica que a eventual singularidade formada durante o colapso não influenciará em nada os observadores externos ao horizonte de eventos, e portanto não podem ser observadas. O fato de não podermos observar a singularidade levou o físico inglês Roger Penrose a conjecturar a existência de um *censor cósmico* que impede que possamos observar uma singularidade nua, isto é, sem estar “vestida” com o horizonte de eventos. É importante ressaltar que sendo o horizonte de eventos a região limite além da qual não podemos obter nenhuma informação, quando falamos em raio de um buraco negro, estamos nos referindo ao tamanho do horizonte de eventos.

As décadas de 1960-1970 são consideradas como a “era de ouro” no estudo dos buracos negros, período no qual uma série de resultados importantes foi obtida. Entre esses resultados estão os que demonstram que os buracos negros são completamente determinados pela sua massa, carga elétrica e momento angular. Fora essas grandezas físicas, nenhuma outra informação do corpo que originou o buraco negro pode ser obtida por observadores externos. Por exemplo, se o corpo original fosse formado de antimatéria, o buraco negro não seria diferente de outro formado com a mesma massa de matéria ordinária, a mesma carga elétrica e momento angular. O conjunto desses teoremas é resumido de uma maneira curiosa, na afirmação de que um buraco negro *não tem cabelo*, ou seja, todas as particularidades — os *cabelos* — do corpo que originou o buraco negro são perdidas, restando apenas as grandezas anteriormente citadas. O momento angular de um buraco negro é uma grandeza que está diretamente relacionada com sua rotação. A solução de Schwarzschild descreve corpos esféricos sem rotação, ou seja, com momento angular nulo, e os buracos negros obtidos por essa solução são denominados “buracos negros estáticos”. No entanto, se existirem buracos negros de origem estelar na natureza, esperamos que eles tenham momento angular significativo, mas carga elétrica quase nula, pois acredita-se que as estrelas que lhes dão origem são eletricamente neutras e que possuem momento angular não-nulo. A solução que descreve um buraco negro em rotação foi obtida por R. Kerr em 1963, e em sua homenagem os buracos negros com momento angular não-nulo são denominados buracos negros de Kerr. Se além do momento angular a carga elétrica for também diferente de zero, o buraco negro é conhecido como de Kerr-Newman. Diferentemente do caso estático, em um buraco negro de Kerr, além da formação do horizonte de evento, existe a formação de uma nova região denominada *limite estático*, que é externo ao horizonte de eventos. Essa região recebe tal nome porque é o limite além do qual nenhum objeto pode ficar parado. A região entre o horizonte de eventos e a região do limite estático recebe o nome de *ergosfera*. Dentro dessa região, obrigatoriamente tudo gira no mesmo sentido de rotação do buraco negro. A ergosfera comporta-se como se fosse um redemoinho irresistível: um foguete dentro da ergosfera ainda pode escapar do buraco negro se tiver motores suficientemente poten-

tes, mas nunca girar na direção contrária a ele. Vários fenômenos interessantes estão associados à rotação de buracos negros. Um dos mais bizarros talvez seja o descoberto por Penrose, de que seria possível extrair energia de um buraco negro às custas de sua energia de rotação. O processo por ele concebido baseia-se na emissão de uma partícula na direção da ergosfera. Uma vez na ergosfera a partícula poderia ser rompida e haveria a possibilidade de que uma das partes fosse engolida pelo buraco negro, enquanto que a outra seria expelida para longe com energia superior do que a da partícula original; a energia excedente sendo obtida da energia de rotação do buraco negro, fazendo com que a sua velocidade de rotação seja diminuída. Esse processo pode continuar até que toda a energia de rotação seja extraída, levando o buraco negro a uma configuração estática além da qual, segundo a relatividade geral, nada mais poderia ser extraído. Outros resultados importantes, obtidos na “era de ouro”, indicam que os buracos negros não podem se dividir em pedaços ou diminuir de tamanho. Com isso, uma vez formado um buraco negro, ele jamais poderá ser destruído. Numa eventual colisão entre dois buracos negros, o resultado seria um único buraco negro, cuja área seria maior do que a soma das áreas iniciais. Na relatividade geral o buraco negro não pode perder a sua massa, e sendo a área do horizonte de eventos proporcional à massa do buraco negro, a sua tendência é sempre aumentar com a captura de matéria ao seu redor.

Além da teoria da relatividade, a mecânica quântica desenvolvida no início deste século é um outro pilar da física moderna. Ambas as teorias a sua maneira revolucionaram a visão até então existente da natureza. A mecânica quântica é utilizada para o estudo da microfísica, no estudo da natureza da matéria. A importância de tais teorias é justificada por uma grande gama de previsões confirmadas experimentalmente, sob as mais diversas condições. No entanto, existe um ponto crucial que ainda não foi solucionado: a relatividade geral é uma teoria que não incorpora os efeitos quânticos, o que torna as teorias incompatíveis entre si. Nesse sentido, a relatividade geral é considerada uma teoria não-quântica, ou uma teoria clássica. Um possível caminho para a elaboração de uma gravitação quântica foi obtido no início dos anos 1970, por meio do estudo dos buracos negros. Analisando o resultado de que a área do horizonte de evento não poderia diminuir, Jacob Bekenstein sugeriu em 1973 que a área do horizonte de eventos estava associada à entropia do buraco negro. Esse resultado causou na época uma série de intensos debates, pois se essa associação fosse realmente correta, o buraco negro deveria emitir algum tipo de radiação, em direta contradição com a opinião vigente de que o buraco negro *não* poderia emitir nenhum tipo de radiação. Numa tentativa de demonstrar que os resultados obtidos por J. Bekenstein estavam errados, Stephen Hawking, em 1973, ao introduzir efeitos quânticos no estudo do colapso gravitacional, fez a inesperada descoberta de que buracos negros poderiam evapo-

rar ao contrário do que a teoria clássica previa. No mesmo período, os resultados obtidos por um grupo de físicos soviéticos, entre os quais Yakov B. Zeldovich e Igor Novikov, indicavam que buracos negros em rotação deveriam emitir radiação, em virtude da criação de partículas nas suas vizinhanças. Mas o resultado obtido por Hawking era relativo a um buraco negro estático. Esse resultado foi tão surpreendente que a princípio o próprio Hawking relutou em apresentá-lo, acreditando que havia cometido algum erro nos seus cálculos. Essa emissão, conhecida como *emissão Hawking*, é atualmente bem justificada e acredita-se que deve ser uma consequência da Teoria da Relatividade Geral e da mecânica quântica. É importante ressaltar que a radiação não se origina de dentro do horizonte de eventos, e sim no vácuo, na região externa próxima ao horizonte de eventos. De acordo com a mecânica quântica, o que chamamos de vácuo é na realidade uma estrutura extremamente complicada. Na teoria quântica o vácuo sofre flutuações, com criação e aniquilação de pares de partículas e antipartículas. Se esse processo ocorre nas vizinhanças do horizonte de eventos, existe a possibilidade de um dos componentes do par ser tragado pelo buraco negro, enquanto outro pode escapar para além do buraco negro. Para um observador externo, essa partícula parecerá que foi emitida pelo buraco negro, sendo que a partícula tragada pelo buraco ne-



gro possui energia negativa, e a que escapou, energia positiva. Dessa forma é extraída energia do buraco negro, e sendo a massa proporcional à energia, ocorre uma diminuição na sua massa, e consequentemente no seu tamanho. A probabilidade de uma das partículas escapar é maior quanto menor for o buraco negro, pois a distância necessária que deve ser percorrida para escapar da atração é menor. Dessa forma, quanto menor a massa do buraco negro, maior a temperatura e a taxa de emissão a ele associadas. Para um buraco negro com a massa do Sol, a temperatura da radiação Hawking seria da ordem de dez milionésimos de graus centígrados, enquanto em um buraco negro com a massa de uma montanha (cerca de um bilhão de toneladas) a temperatura seria da ordem de cem mil graus centígrados. Com a emissão da radiação, a massa de um buraco negro é diminuída, e sendo menor a sua massa, maior será a temperatura da radiação emitida, consequentemente mais rapidamente o buraco negro se evapora. Não sabemos com detalhes o que ocorre no final da evaporação de um buraco negro, pois os efeitos quânticos na gravitação precisam ser considerados, o que infelizmente ainda não sabemos como fazer. Mas acredita-se que no seu estágio final, com o aumento da temperatura da radiação emitida, o buraco negro será visto como uma explosão extremamente violenta.

Observar um objeto pre-

visto por uma teoria é fundamental para podermos atestar a sua validade. Mas como podemos ver um objeto que não emite nenhuma radiação? Sobre esse assunto, é interessante a afirmação de Penrose em 1969:

Pode-se argumentar que a previsão sobre os buracos negros é simplesmente de que não veremos nada — que é consistente com as observações, desde que nenhum “buraco negro” foi observado!

Mas se a afirmação de Penrose fosse correta, teríamos uma situação extremamente embaraçosa para a física. Não poderíamos verificar observacionalmente uma das consequências mais fascinantes da Teoria da Relatividade Geral. Como vimos anteriormente, certas características físicas dos buracos negros são preservadas: a sua massa, a sua carga elétrica e o seu momento angular. A massa de um corpo é considerada como a fonte geradora de um campo gravitacional ao seu redor. É justamente esse campo gravitacional gerado pela massa do buraco negro que nos permite detectar a sua presença, apesar de classicamente eles não emitirem nenhum tipo de radiação. A ação do campo gravitacional é a mesma, independente de o corpo ser uma estrela ou simplesmente poeira cósmica e gases. Estudos detalhados da dinâmica dessas poeiras e gases nas vizinhanças de corpos massivos como os buracos negros indicam que existe a possibilidade da formação de um disco de poeira e gás

ao seu redor. As partes internas desse disco, por estarem mais próximas do buraco negro, acabam sendo tragadas em sua direção. Nesse processo o gás e a poeira são aquecidos atingindo temperaturas extremamente altas, levando a uma intensa emissão de raios X. Dessa forma uma estratégia para a procura de buracos negros seria a de localizar fontes emissoras de raios X e tentar identificar a origem dessa emissão. Os sistemas mais propícios para testar essa hipótese são os chamados binários, no qual duas estrelas orbitam uma em torno da outra. Em alguns sistemas binários, uma das suas estrelas pode ser um buraco negro, e a outra pode ser a fonte de material a ser tragado pelo buraco negro, numa espécie de “canibalismo cósmico”. Nos anos 1970 um forte candidato a um sistema binário com um buraco negro como uma das componentes foi identificado. Este sistema binário é conhecido como Cygnus X-1 que é uma fonte emissora de raios X com características próximas ao esperado para um buraco negro. No entanto, apesar dos intensos esforços observacionais ainda não foi possível determinar de maneira inequívoca a existência ou não de um buraco negro nesse sistema. Além dos sistemas binários, existem outras possibilidades para se observar buracos negros. Nos anos 1960, com a entrada em operação de novos instrumentos observacionais, em especial os radiotelescópios, filhos diretos do desenvolvimento dos radares e da eletrônica após a Segunda Grande Guerra, foram descobertos objetos que emitiam muito mais radiação do que a até então observada, e tendo origem aparentemente em uma região muito pequena, com dimensões típicas de uma estrela. Devido a esse fato receberam o nome de objetos quase estelares, ou simplesmente quasares. Estudos intensos efetuados no final da década de 1960 e início dos anos 1970 forneceram um quadro mais claro do que são os quasares. Hoje é quase um consenso de que eles são núcleos de galáxias distantes que apresentam uma grande atividade, o desafio estando em explicar a origem dessas atividades. Entre os vários mecanismos propostos, está o de que existe um grande buraco negro no centro dessas galáxias, com a massa em uma faixa de 10 a 100 milhões de vezes a massa do Sol. Sob determinadas condições, os gases e as estrelas nas vizinhanças desses gigantescos buracos negros podem ser ejetados ao longo do seu eixo de rotação, formando o que os astrofísicos chamam de jatos. Estruturas semelhantes a esses jatos são observadas com frequência nos quasares e em outras galáxias com núcleos que apresentam alta atividade. Mas não apenas nos núcleos de galáxias com alta atividade podem ser encontrados os buracos negros. Alguns astrofísicos acreditam que mesmo galáxias comuns como a nossa possam conter um buraco negro em sua região central. Para explicar alguns fenômenos observados nessa região, foram propostos desde buracos negros com massas da ordem de milhões de massas solares até massas da ordem de algumas centenas de massas solares. No momento, não há resultados conclusivos, apenas evidências que indicam a possibilidade da sua existên-

cia. Em relação a outras galáxias, resultados recentes obtidos pelo telescópio espacial Hubble indicam que no centro da galáxia M87, que apresenta uma alta atividade em seu núcleo, pode existir um buraco negro com massa equivalente a cerca de 3 bilhões de massas solares. A confirmação desse resultado seria um grande alento não somente à compreensão da grande atividade desses tipos de galáxias como para a própria relatividade geral.

Outro foco de estudo está ligado à emissão das chamadas ondas gravitacionais, que é uma das consequências da relatividade geral. Essas ondas infelizmente são extremamente fracas, portanto de difícil detecção, mas a sua importância pode ser medida pelo fato de que em 1993 o prêmio Nobel de física foi atribuído aos astrofísicos R. A. Hulse e J. H. Taylor pela descoberta de um sistema binário com um pulsar, que é uma estrela de nêutrons em alta rotação. No caso do pulsar detectado por Hulse e Taylor, o período de rotação é da ordem de 0,059 segundos. O período orbital desse sistema binário é cerca de 7 horas e 45 minutos (como comparação o período de rotação da Terra é cerca de 24 horas, e o seu período orbital 365 dias). Em virtude das suas características, esse sistema binário é ideal para testar a previsão da relatividade geral que indica a emissão de ondas gravitacionais desse tipo de sistema. Como consequência da emissão dessas ondas, o sistema perde energia, com isso o raio da órbita é diminuído e conseqüentemente o período orbital diminui. Foi justamente essa variação que foi detectada em 1978 por Hulse e Taylor. Essa é no momento a única indicação da existência das ondas gravitacionais. A detecção direta é ainda um objetivo a ser alcançado, e que no momento tem levado a um intenso programa de contribuições entre pesquisadores de todo o mundo. No caso dos buracos negros, ocorre uma emissão intensa de ondas gravitacionais durante o processo da sua formação e durante a queda de matéria em sua direção. Estudos detalhados demonstram que quanto mais o corpo que colapsa para formar o buraco negro for irregular, maior a taxa de emissão de ondas gravitacionais durante o colapso. Esse processo leva à dissipação das irregularidades, fazendo com que o resultado final seja um buraco negro de Schwarzschild ou de Kerr, dependendo do seu momento angular. Detectar essas ondas gravitacionais emitidas por buracos negros seria uma das grandes provas não só da existência dos buracos negros como mais uma forte evidência da consistência da Teoria da Relatividade Geral. Dessa forma, a construção e a operacionalização dos observatórios de ondas gravitacionais são uma das esperanças de que possamos obter indícios mais precisos sobre a existência ou não de buracos negros no universo.

No caso dos buracos negros primordiais, a questão de como detectá-los é muito mais complexa. Primeiramente porque ainda não sabemos qual a sua taxa de formação e a distribuição das massas dos buracos negros primordiais. Talvez a única maneira de detectar os miniburacos negros primordiais seja pela sua evaporação. No final da sua etapa de evaporação os buracos negros de-

vem emitir uma grande quantidade de raios-*gamma*. Dessa forma, com uma análise detalhada do espectro da radiação *gamma* é possível obter estimativas sobre a distribuição desses buracos negros. Os resultados atualmente existentes indicam que, no máximo, esses buracos negros devem contribuir com cerca de um milionésimo da massa total do universo. Isso quer dizer que se construirmos um cubo com lados de um 1.500 bilhões de quilômetros teremos a chance de encontrar cerca de um miniburaco negro evaporando dentro dessa região. Comparando essa distância com o raio aproximado do Sistema Solar, que é cerca de 6 bilhões de quilômetros, temos que a chance de observar um miniburaco negro se evaporando nas vizinhanças do Sistema Solar é infelizmente muito pequena.

À primeira vista, pode parecer que a existência do buraco negro é apenas *um sonho numa noite de verão* dos físicos, pois ainda não existe nenhuma prova conclusiva da sua existência. Algumas observações associadas à existência de buracos negros podem em certa medida ser atribuídas a corpos massivos que não sejam necessariamente buracos negros. No caso dos buracos negros primordiais, a situação é até mais complicada, pois mesmo as evidências indiretas como a radiação difusa de raio-*gamma* estabelecem apenas um limite superior para a sua densidade no universo. Na realidade, esse limite resulta da nossa ignorância em determinar a origem da radiação difusa de raio-*gamma*, que pode ter outra origem além da evaporação de buracos negros primordiais. Portanto, pode surgir a questão do por que insistir no estudo de buracos negros? A ciência pode ser vista como uma grande construção com a qual pretendemos copiar o “edifício da natureza”. Os cientistas seriam os construtores, mas infelizmente sem nenhuma planta prévia de como é de fato o “edifício da natureza”. Nesse gigantesco quebra-cabeças, não sabemos qual é o papel do buraco negro, de forma que descartar previamente o seu estudo por *ainda não ter sido observado* pode resultar em um atraso considerável na nossa compreensão da natureza. Além disso, a teoria de buracos negros é matematicamente rica e fisicamente desafiadora, podendo ser uma das possíveis chaves que podem nos indicar o caminho para se obter uma teoria consistente de gravitação quântica. Talvez, excetuando o estudo da cosmologia nos instantes primordiais, os buracos negros sejam os únicos “laboratórios” para testar as previsões de uma possível teoria de gravitação quântica, que é vista como uma necessidade para se vencer o grande desafio da física teórica: a obtenção de uma teoria na qual todas as interações da natureza sejam descritas de maneira unificada. Essa busca pode ser considerada como o verdadeiro *sonho numa noite de verão* dos físicos teóricos.

Fernando Kokubun é professor e pesquisador do Instituto de Física Teórica da Universidade Estadual Paulista.

O PASSADO E O FUTURO DO UNIVERSO

SAMUEL ROCHA DE OLIVEIRA

O QUE A COSMOLOGIA MODERNA PODE DIZER SOBRE O PASSADO E O FUTURO DO UNIVERSO? PRETENDEMOS ANALISAR, CRITICAMENTE, NESTE ENSAIO, O QUE A FÍSICA TEÓRICA TROUXE DE NOVO PARA O CONHECIMENTO HUMANO A RESPEITO DO GÊNESIS E DOS ACONTECIMENTOS APOCALÍPTICOS, SE É QUE HOVE AQUELE OU HAVERÁ ESTES. SERIA POSSÍVEL, A PARTIR DAS OBSERVAÇÕES DO PRESENTE E DO PASSADO IMEDIATO, CONHECER O PASSADO E O FUTURO REMOTOS DO UNIVERSO? DE ACORDO COM O DETERMINISMO CLÁSSICO, EM PRINCÍPIO, SIM.¹ NA PRÁTICA, TALVEZ NÃO, EM VIRTUDE DO CONHECIMENTO INCOMPLETO (PRECISÃO FINITA) DOS DADOS DO PRESENTE E DO PASSADO. QUEREMOS ANALISAR AQUI SE, EM PRINCÍPIO, E ATÉ QUE PONTO NA PRÁTICA, É POSSÍVEL PREVER O FUTURO E REVER O PASSADO REMOTOS DO NOSSO COSMO.

Seria possível, a partir dos

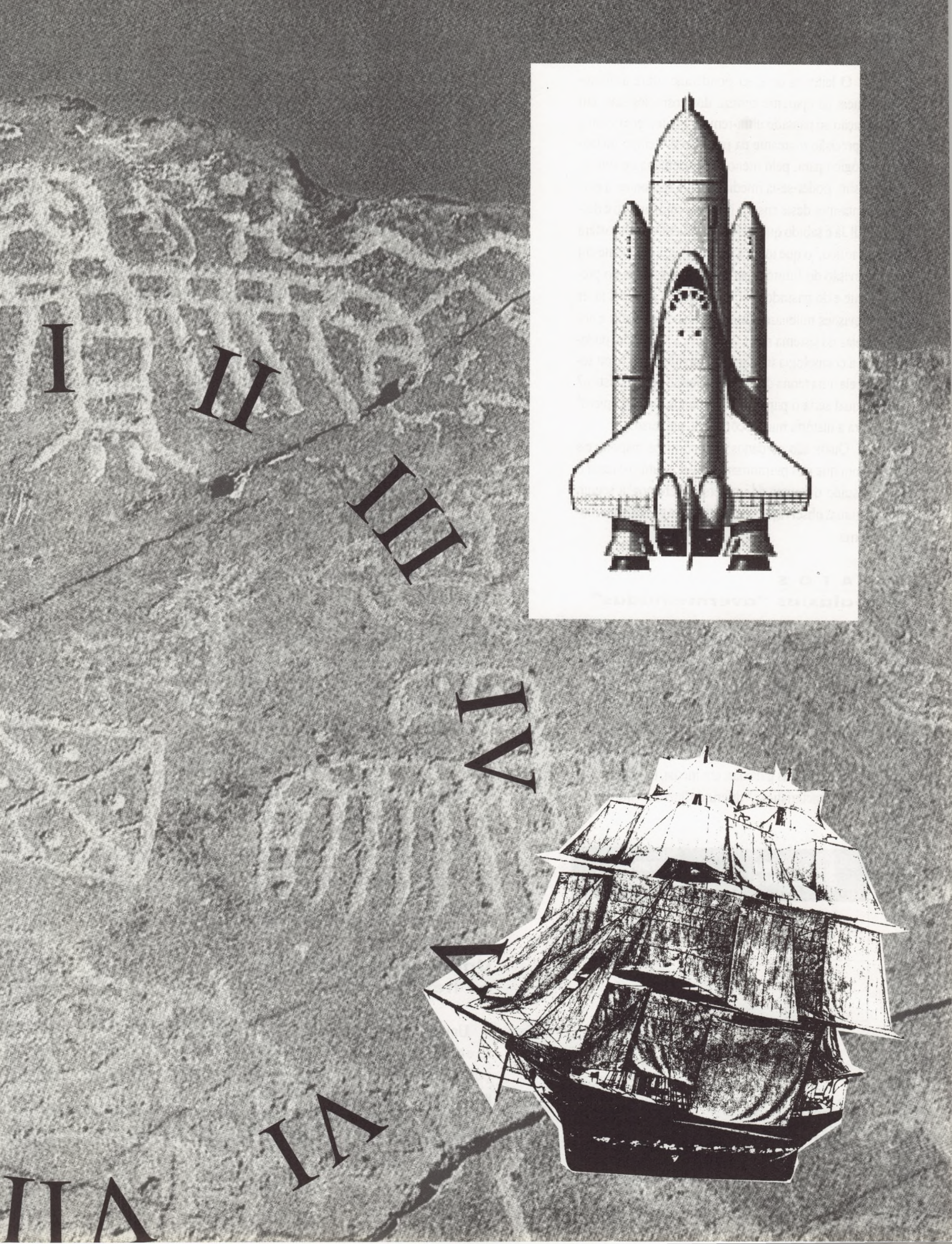
dados astronômicos dispo-

níveis, conhecer a origem

e o destino do universo?

ILUSTRAÇÃO ANA LÚCIA POMPEU





I

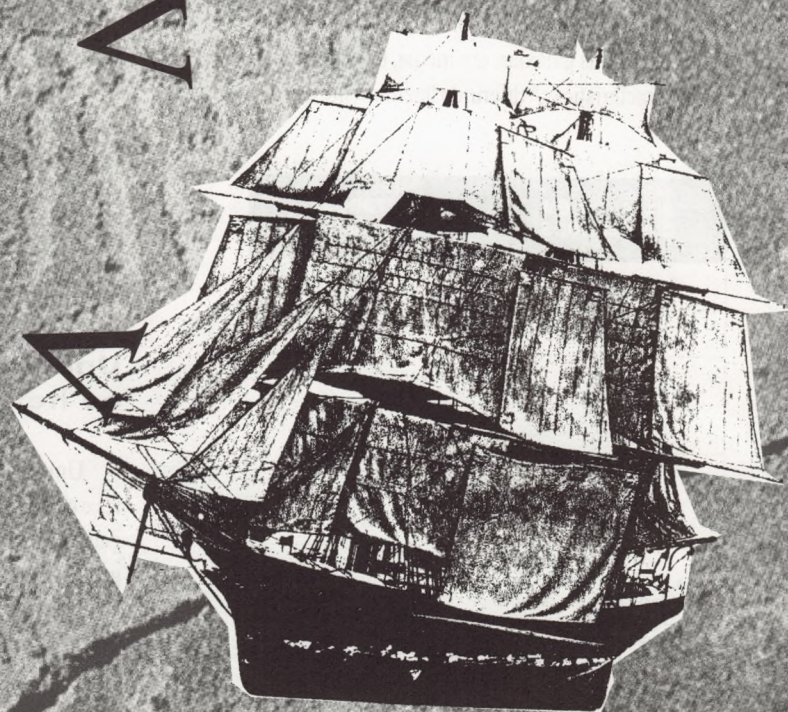
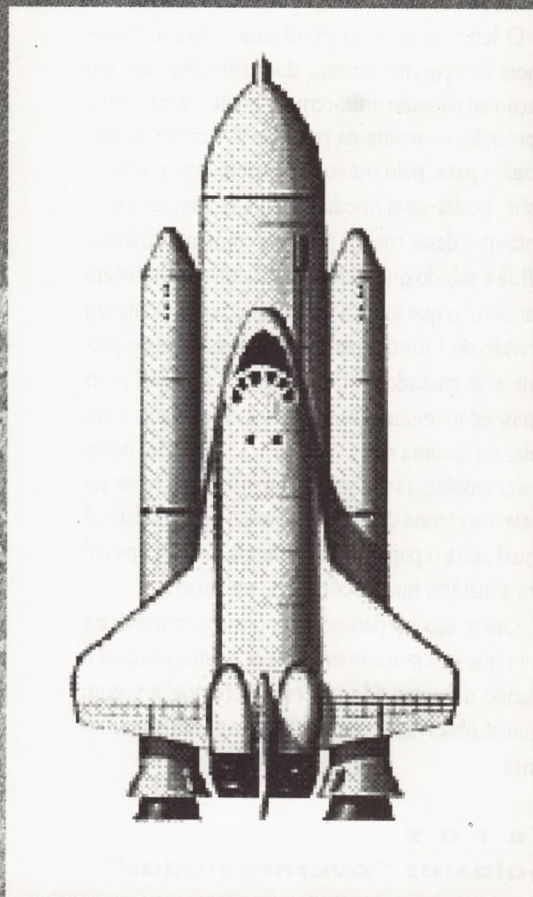
II

III

IV

IV

IIA



O leitor já deve ter ponderado sobre a discrepância da aparente certeza dos cosmologistas, em relação ao passado ultra-remoto do universo, com a imprecisão marcante da previsão do tempo meteorológico para, pelo menos, uma semana no futuro. Assim, poder-se-ia imediatamente responder à pergunta-mor deste ensaio. Mas aí a comparação é desleal! Já é sabido que o comportamento da atmosfera é caótico,² o que torna a meteorologia deficiente em previsão do futuro a partir de alguns dados do presente e do passado. Por outro lado, é possível fazer previsões milenares sobre órbitas de planetas e cometas do sistema solar. Assim, fica a questão: poderia a cosmologia ter comportamento caótico, ou seria ela uma teoria de grande precisão determinística? E qual seria o papel de fenômenos microscópicos³ para a história macroscópica do universo?

Quais são os dados astronômicos disponíveis agora que nos permitiriam prever o futuro e rever o passado distantes do universo? Veremos, a seguir, algumas observações de relevância à cosmologia moderna.

FATOS Galáxias “avermelhadas”

É comum ouvir dizer que o universo está se expandindo. Que fatos nos levam a tal afirmação? Convém lembrar que observações de interesse cosmológico são de extrema dificuldade, envolvendo muitos anos, às vezes gerações de astrônomos.

Nos anos 1930, o astrônomo americano Hubble observou que as galáxias, em média, tinham as suas cores características,⁴ diferindo ligeiramente das ga-

láxias mais próximas à nossa. A tonalidade sempre desviava no sentido violeta → vermelho, quando as cores estavam colocadas na sequência observada no arco-íris.⁵ Seus estudos também revelaram que quanto mais distante, mais avermelhadas ficavam as galáxias.

Cabe aqui ressaltar que a determinação de distâncias cosmológicas não é nada fácil. Utiliza-se uma “escada de escalas” envolvendo várias técnicas observacionais e várias hipóteses, *razoáveis*, sobre a dinâmica e termodinâmica de estrelas e galáxias. Sem querer entrar nas dificuldades técnicas envolvidas, note-se apenas que a distância da Terra ao Sol é de *apenas* 150 milhões de quilômetros, enquanto o Sol dista do centro da Via-Láctea *apenas* dois bilhões de vezes essa distância. E, finalmente, as escalas de interesse cosmológico são da ordem de milhões de vezes a distância do Sol ao centro da nossa galáxia⁶ (veja tabela 1).

Não é de se espantar, portanto, que qualquer conclusão com respeito ao nosso cosmo é altamente dependente de quão corretas estão essas distâncias!

Hubble interpretou, então, suas observações com base no chamado efeito Doppler — que faz com que galáxias se afastando da nossa apresentem o observado avermelhamento. Existem outras explicações para esse fenômeno de avermelhamento das cores,⁷ mas nem todas tão satisfatórias ou simples quanto esta. Assim, o universo estaria em expansão.

Rádio Universo FM

Foi por acaso que Penzias e Wilson, nos anos 1960, sintonizaram suas antenas com a “rádio Universo”. Na realidade, esses norte-americanos queriam evitar todo o tipo de “chiado” em suas antenas, na faixa de microondas, e não conseguiram. Havia um “chiado” de fundo, inevitável, de pequena intensidade, que incomodava esses engenheiros radioastrônomos perfeccionistas. Inicialmente não conseguiram tampouco localizar a “emissora”. Observações dos anos 1980 e 1990, por satélites e outros rádiotelescópios indicaram uma direção preferencial dessa radiação de fundo.

A interpretação é a seguinte: a emissora deve ter dimensões cosmológicas e a direção preferencial indica⁸ o movimento relativo peculiar de nossa galáxia. Se não fosse o movimento peculiar, a radiação de fundo observada teria a mesma intensidade em qualquer direção que apontássemos a antena. Assim, a emissora seria o universo como um todo.

Outras explicações para essa radiação de fundo foram propostas ao longo dos anos desde a observação inicial, mas nenhuma mostrou ser tão convincente quanto a explicação acima. E, talvez, como veremos abaixo, este seja o maior trunfo dos modelos tipo *Big Bang*.

Universo homogêneo ou heterogêneo?

Uma galáxia, em média, possui 100.000.000.000 (cem bilhões) de estrelas e estima-se que o universo observado tenha mais ou menos cem bilhões de galáxias. Será que existem regiões do cosmo com mais e outras com menos galáxias, e como estão distribuídas? A resposta mais honesta é: “depende!”

Existem algumas observações que indicam um universo homogêneo em escalas cosmológicas e outras que indicam o oposto. À primeira vista parecia

DISTÂNCIA EM QUILÔMETROS	MÉTODOS EMPREGADOS
10^{25}	?
10^{20}	57 e 7
10^{15}	4,5 e 6
10^{10}	3 e 47
10^5	17, 2, 37
10^0	1 e 2

TABELA 1: MÉTODOS PARA MEDIR DIFERENTES ESCALAS DE DISTÂNCIAS¹. RADAR, LASER, ETC.; 2. TRIANGULAÇÃO GEODÉSICA; 3. PARALAXE DIURNA; 4. DETERMINAÇÃO DE PARALAXE SOLAR E PARALAXE DE OUTROS PLANETAS VIA MECÂNICA CELESTE; 5. PARALAXE ANUAL; 6. COMPARAÇÃO DE LUMINOSIDADE ABSOLUTA NA FONTE COM A RECEBIDA AQUI; 7. LEI DE HUBBLE.

... a distância da

T

E

R

R

A

ao Sol é de apenas

que o universo não tinha nenhuma região privilegiada com maior ou com menor concentração de galáxias. Mas, recentemente, astrônomos reportaram a existência de grandes conglomerados de galáxias e de grandes vazios e uma distribuição de densidade variável a cada 128 megaparsecs. No entanto, essas observações estão ainda em processo de análise estatística mais depurada e de aprimoramento de técnicas observacionais.

Tais observações são cruciais para eliminar ou confirmar teorias. Mas, como na determinação de distâncias cosmológicas, o conhecimento que temos é ainda muito precário.

Elementos químicos

O meio intergaláctico e a maior parte das estrelas normais são compostos essencialmente por hidrogênio, hélio e lítio. A

determinação da porcentagem relativa desses elementos leves depende sensivelmente da física nuclear. Aparentemente, 70% da massa do universo é de hidrogênio sem o seu elétron, isto é, simplesmente prótons. Depois

segue o hélio e seus variantes nucleares com 27%. Lítio e todos os demais elementos disputam os restantes 3%.

Os modelos cosmológicos devem ser consistentes com essas observações mesmo que ainda não muito precisas.

Outros

Existem várias outras observações que estão vindo à tona com melhores telescópios, satélites e técnicas observacionais e de análise de dados. Mas, no momento, as observações acima são mais do que suficientes para discutirmos a nossa curiosidade com respeito ao início e ao fim do universo. Note-se que até mesmo os dados disponíveis são passíveis de múltiplas interpretações.

Pontos filosóficos

Como racionalistas, empregamos religiosamente o princí-

150 milhões de quilômetros ...

pio da casualidade natural: tudo acontece por alguma lei de causa e efeito, sem intervenção transcendental. Esse princípio pode ter origens ateístas, mas não deveria causar embaraço aos mais teófilos, que podem contra-argumentar que a formu-

lação ou o estabelecimento de leis naturais *per se* sejam atos divinos. Não vamos entrar nessa discussão aqui, apesar de haver consequências que vão além da curiosidade acadêmica, como, por exemplo, o assunto da inteligência artificial. Simplesmente utilizamos esse princípio de casualidade natural por ser parte canônica da metodologia científica.

Isso não garante a previsão completa do futuro, uma vez que pode haver leis de caráter probabilístico, e pode haver caos, de forma a inviabilizar qualquer prognóstico confiável do destino do universo.

Pode-se, ainda, questionar o estudo do universo como uma entidade única. Isto é, o cosmo observado poderia ser composto por partes completamente desconexas e independentes da nossa vizinhança e não necessariamente ter um comportamento coerente único. Assim, as observações do cosmo teriam um caráter poético, artístico e religioso, de influência imperceptível sobre o pedacinho onde vivemos. Por que não? E por que sim? Voltaremos a esse assunto no contexto de teorias de cosmologia quântica.⁹ De qualquer forma, um estudo coerente do cosmo não poderia ser descartado *a priori*. Por outro lado, na hipótese de cosmo desconexo, explicações às observações ditas cosmológicas teriam de ser formuladas. Deixamos essa possibilidade em aberto, e, no que segue, assumiremos o estudo coerente do universo como um todo.

O antropocentrismo tradicional certamente foi banido do pensamento filosófico moderno. Veio em seu lugar o princípio cosmológico de Copérnico: todas as regiões do universo são equivalentes, iguais. Isso implica que os mesmos fenômenos que ocorrem em nossa vizinhança ocorrem semelhantemente em outras regiões cósmicas. Em particular, a distribuição de galáxias vista da Via-Láctea deveria ser igual à de um astrônomo em outra galáxia distante. O céu noturno seria essencialmente o mesmo, para todos os moradores do cosmo. Um universo democrático em grande escala!¹⁰

Quando esse princípio cosmológico é aplicado à cosmologia, concluímos que o universo é *espacialmente* homogêneo!¹¹ Observações de heterogeneidade cósmica derrubariam esse princípio.

Existe um outro princípio ainda mais geral: todas as regiões *em todos os tempos* do universo são equivalentes, iguais. Isso implicaria um universo eterno homogêneo. Diz-se que esse princípio tem dificuldades em explicar a observada radiação de fundo, sendo que, atualmente, a maioria dos físicos teóricos descarta essa hipótese de trabalho, apesar de ainda haver quem a defenda como sendo fundamentalmente mais coerente com a Teoria da Relatividade Geral de Einstein.

A cosmologia moderna de maior aceitação na comunidade acadêmica usa o princípio cosmológico de Copérnico, isto é, assume que o universo seja homogêneo. Alguns modelos tipo *Big Bang* usam essa hipótese e se encaixam bem na idéia judaico-cristã de um universo criado.

Ao tentar construir um modelo teórico-matemático¹² para o universo, além das razões filosóficas utilizam-se hipóteses e princípios simplificantes por questões estéticas e técnicas. Credita-se à natureza alguma forma de beleza estética. Mesmo sendo este um critério subjetivo, ele é frequentemente utilizado como selecionador de modelos teóricos.

É comum, por exemplo, lançar mão de hipóteses de continuidade e uniformismo de fenômenos físicos fundamentais. Mesmo no dia-a-dia, tropeços e encontros inesperados com obstáculos descontínuos e quinas de móveis são desagradáveis. Da mesma forma, os físicos-matemáticos evitam alguns problemas técnicos evitando-se funções descontínuas. Apesar de restritiva, essa hipótese favorece ainda mais o caráter determinístico das teorias. Mesmo assim, fica aberta a possibilidade de explorar teorias mais catastróficas que permitam descontinuidades e variações bruscas de fenômenos físicos elementares. Pouca pesquisa tem sido feita nessa direção, basicamente por falta de apelo estético.

Fica claro, desse modo, que a resposta à nossa pergunta original vai depender de uma série de escolhas filosóficas.

Passemos então à formulação de modelos teóricos particulares para o cosmo.

Modelo teórico

Quais os ingredientes do universo? Que tipo de interação existe entre os seus componentes? E quais são importantes para estudos cosmológicos?

Não se pode negar que a gravitação é a interação fundamental de maior interesse para a cosmologia, por seu caráter *universal*. Isto é, qualquer coisa que tenha massa ou energia atrai e é atraída por qualquer outra coisa. Outras interações podem ser anuladas, mas a gravitacional não. Assim, a dinâmica do cosmo como um todo deve ser dominada pela gravitação.

A teoria gravitacional de maior beleza estética e com incrível precisão para algumas observações gravitacionais (dentro do sistema solar e para sistemas de estrelas binárias) é a Teoria da Relatividade Geral, proposta por Einstein na segunda década deste século. Existem várias outras teorias propostas,¹³ que reproduzem as mesmas observações gravitacionais e que têm outras virtudes que a teoria de Einstein não possui, mas nenhuma de consenso ainda.

No arcabouço da relatividade geral várias hipóteses são introduzidas, que por conseguinte são utilizadas em cosmologias relativísticas. Não vamos discutir essas hipóteses e nem a confiabilidade observacional e experimental da teoria de Einstein. Ressaltamos apenas que ela não é a única teoria gravitacional existente na praça, apesar de ser a mais amplamente utilizada. Obviamente a teoria da gravitação universal de Isaac Newton é um caso particular de suma importância da relatividade geral.

A matéria do universo, analisada em escalas de distâncias

cosmológicas, aparenta-se a um gás, de forma que, ao invés de tratarmos os movimentos individuais de galáxias e seus componentes, tratamos a matéria como um gás contínuo. Assim como o ar — composto por moléculas microscópicas — é tratado macroscopicamente, analisando-se apenas a sua temperatura, pressão e densidade, o fluido cosmológico — composto atualmente por pseudogaláxias — tem a pressão, temperatura e densidade como as únicas variáveis que descreveriam a matéria do universo como um todo. O fato de não se observar muitos choques entre galáxias é simulado por um fluido de pressão muito pequena. E assim se aproxima a um fluido cosmológico perfeito, essencialmente, a matéria do cosmo. Outro tipo de matéria poderia ser considerado,¹⁴ mas essa é a maneira mais simples de se tratar o conteúdo cósmico.

A construção e verificação de modelos é uma espécie de quebra-cabeças e cruzamento de várias informações. Sendo otimista, espera-se que e se um modelo se encaixa bem com algumas das observações e com predições logicamente consistentes com outras áreas do conhecimento seria um bom candidato à descrição científica da realidade do universo. Mas seria essa realidade absoluta? Seria ela única? A crença em uma verdade única e absoluta está firmemente plantada na ciência, mas tem, conscientemente ou não, origem religiosa. Assumamos também a existência de uma verdade absoluta, escondida nos vários dados observacionais, possível de ser descoberta por algum modelo teórico que descreva o universo.

O modelo padrão

O modelo cosmológico padrão é construído usando-se as hipóteses da relatividade geral, do princípio cosmológico de Copérnico, de continuidade e uniformismo e de critérios de simplicidade estética. A matéria é simulada por um fluido perfeito com a hipótese adicional de que a pressão e a densidade são diretamente proporcio-

TEMPO	COMPOSIÇÃO	DISTRIBUIÇÃO
10^{-43} segundos		Flutuação quântica?
10^{-4} segundos	Criação das partículas elementares. Separação entre matéria e antimatéria. Desacoplamento do neutrino.	
10^3 segundos	Formação do hélio	
10^5 anos		Distribuição uniforme. Flutuações na homogeneidade começam a crescer.
	Recombinação de plasma. Universo transparente	
		Formação de nebulosas.
	Formação de H	Galáxias.
10^8 anos	Aquecimento de gás	Colapso gravitacional
	Formação de elementos pesados por estrelas	Formação e evolução de estrelas
10^{10} anos	Supernovas, etc.	Atividades no interior das galáxias

TABELA 2: HISTÓRIA PASSADA DO UNIVERSO DE ACORDO COM O MODELO PADRÃO

nais entre si.

Visto dessa forma o modelo padrão tem muitas hipóteses, de forma que ele só teria algum benefício se fosse capaz de explicar uma quantidade de observações maior do que a quantidade de hipóteses.¹⁵ Fizemos isso com o propósito de mostrar que pode ser possível ter outros modelos com outras hipóteses. No entanto, os modelos tipo *Big Bang* são os mais pesquisados atualmente e, de fato, com razoável comprovação observacional.

A relatividade geral¹⁶ faz uma conexão entre o conteúdo da matéria e a geometria do espaço do universo. Existem duas possibilidades: um universo infinito ou um universo compacto. Em ambos os casos o destino do universo seria predizível. Mas como discernir entre um e outro?

No caso de universo infinito, logo após a sua criação, as distâncias físicas começariam a dilatar e assim continuariam, indefinidamente.

No caso de universo compacto haveria um período de dilatação, logo após o *Big Bang*, seguido de uma contração e findando com um grande colapso — *Big Crunch*.¹⁷

Convém ressaltar que dizer que o universo é compacto não quer dizer que existam fronteiras. Não existe região central tampouco. Pode-se fazer analogia do universo infinito com (os pontos de) uma reta infinita e do universo compacto com (os pontos de) um círculo.

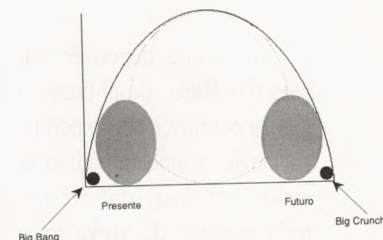
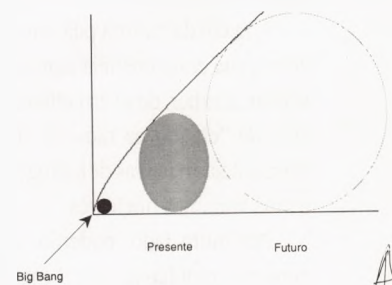
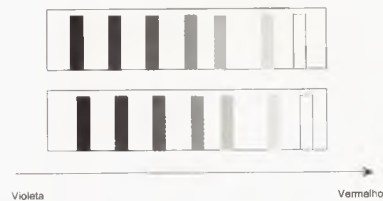
Se assumimos a interpretação de Hubble, de que o avermelhamento das galáxias é causado pelo seu afastamento, concluímos que o universo está em expansão atualmente. Isto não é suficiente para elegermos o tipo geométrico do universo, se infinito ou compacto. Para tal, precisamos de algumas outras observações, dentre elas, da densidade de matéria do universo.

Um universo com uma concentração de matéria superior a uma certa densidade crítica — estimada pelos físicos teóricos — será compacto. Caso contrário será infinito. A dificuldade está na observação. A informação luminosa da matéria no universo — estimam os astrônomos — indica um universo infinito. Já as informações dinâmicas dão margem a um universo compacto.

De acordo com o princípio da casualidade natural deve-se exigir que o universo — e o próprio tempo — seja criado a partir do nada! (Não se pode negar que essa exigência é contrária à intuição, diante da enormidade do universo que observamos agora. Sem contar na falta de palavras em nosso vocabulário para se referir à criação do tempo *per se*. Em frações infinitésimas de segundo toda a matéria seria criada. Um universo infinito teria uma quantidade infinita de matéria *ab initio*. Já um universo compacto iniciaria com um volume e uma quantidade de massa finitos.) Pode-se mostrar que a energia total de um universo compacto é nula. A idéia é que a matéria teria uma contribuição positiva contraposta à energia gravitacional, que é igual e negativa.

Pode-se pensar que a hipótese de criação a partir do nada nunca poderia ser comprovada. Isso não é verdade.

Uma das suas conseqüências é que deveria haver um mecanismo que transformasse antimatéria em matéria. Isto é, do nada poder-se-ia criar matéria e antimatéria. Mas, como o universo que observamos é dominado por matéria,¹⁸ em algum momento, a maior parte da antimatéria transformou-se em matéria. Assim, um antipróton, ainda hoje, deve poder se transformar, por exemplo, em



um elétron e liberar uma quantidade enorme de energia. Físicos experimentais estão há anos à espera de eventos semelhantes a esse, mas, sem sucesso! A natureza não se revela facilmente!¹⁹

Uma outra consequência é que deve haver mais matéria do que conseguimos estimar com os nossos telescópios, via a quantidade de luz que nos é enviada. Nesse contexto, a diferença entre o esperado teoricamente e o observado (com todas as suas dificuldades técnicas) é gritante. Tabela 2.

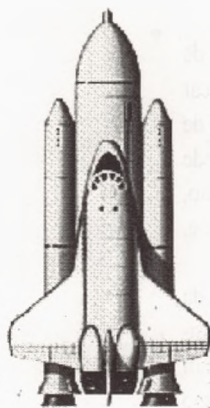
Apesar dessas dificuldades observacionais, a maioria dos físicos teóricos não desanima com o modelo padrão. Outros, todavia, começam a investigar outros modelos teóricos e técnicas experimentais.

A razão da euforia pelo modelo padrão se deve à sua concordância com algumas observações, a saber, do avermelhamento das galáxias, do “chiado” da radiação de fundo e das abundâncias relativas de hidrogênio, hélio, lítio e seus variantes nucleares.

Por outro lado, podemos mencionar alguns dos problemas que o modelo tem. Um deles é o do desconhecimento de mecanismos, teoricamente coerentes, que levem à formação de galáxias, aglomerados de galáxias em toda a sua hierarquia de acordo com as observações astronômicas. Um outro é o da aparente retidão da geometria atual do universo, isto é, por que a curvatura do universo é tão pequena? Este e alguns outros são resolvidos, parcialmente, por modelos inflacionários do universo, nos quais a expansão primordial, logo após o *Big Bang*, é exponencialmente rápida.

Conclusões

Vimos que, depois de determinadas opções filosóficas, simplificações técnicas e algumas confirmações experimentais e observacionais, o modelo padrão (ainda sofrendo sérios problemas) se atreve a prescrever a história passada do universo com um certo detalhamento.



Assim se pode reconstruir a história passada do universo. Veja resumidamente na Tabela 2.

A razão de acontecer o *Big Bang*, o ato da criação, não está explicada até o momento. Nesse contexto, o intercâmbio entre metafísica e física é ainda mais marcante do que as escolhas dos princípios filosóficos discutidos acima. Existe uma corrente de pensamento, liderada pelo físico inglês Hawking, que assume a criação do universo como um processo probabilístico similar aos processos microscópicos que ocorrem nos átomos. Isto é, haveria uma probabilidade de se criar diversos universos com variadas características. A “chance” escolheu o nosso universo. Essas e outras idéias estão sendo analisadas, teoricamente, sob o nome de cosmologia quântica, a qual está longe de ser aceita consensualmente.

Após o *Big Bang*, talvez tenha havido um período inflacionário da expansão do universo que suavizaria qualquer flutuação quântica e faria também a geometria ser pouco curva. Nesse período a densidade de matéria e energia era enorme.

À medida que o universo se expande, a densidade, a temperatura e a pressão do fluido cosmológico gradativamente diminuem. Nesse período inicial, em razão da alta temperatura, a matéria estava completamente derretida, isto é, a matéria era essencialmente composta de partículas elementares (algumas eletricamente carregadas), de radiação eletromagnética e de neutrinos. O universo era muito opaco nessa época.

A uma dada temperatura, partículas nucleares combinam-se com elétrons. É o período da recombinação do plasma cosmológico. A partir dessa era a radiação se liberta da matéria, o universo passa a ser transparente e a interação gravitacional local começa a fazer com que pequenas variações da densidade, que até a época anterior era essencialmente uniforme, se aglutinem, formando nebulosas. Essas entram em processo de formação de galáxias, que por sua vez formariam as estrelas, etc. Essa descrição qualitativa ainda carece de muitos detalhes quantitativos.

GRAVITAÇÃO

BIDIMENSIONAL

ENTENDER A GRAVITAÇÃO QUÂNTICA BIDIMENSIONAL PODE LEVAR A UMA TEORIA DE CORDAS QUE SE PROPAGAM NUM ESPAÇO-TEMPO COM QUATRO DIMENSÕES.

aprendendo com

outros universos

Já se passaram cerca de oitenta anos desde a criação da Teoria da Relatividade Geral, elaborada por Albert Einstein para descrever a gravitação. É, sem dúvida, uma das mais belas e precisas teorias da física clássica, estabelecendo uma fascinante conexão entre as propriedades da interação gravitacional e a geometria do espaço-tempo.

A história da mecânica quântica e das teorias quânticas que se seguiram também já está para completar um século. Inicia-se com os trabalhos de Max Planck, em 1900, sobre a radiação do corpo negro e prossegue com o modelo atômico de Niels Bohr, de 1913; a tese de Maurice de Broglie, de 1924, propondo a existência de ondas de matéria; a equação de Schrödinger, de 1925, construída para descrever o compor-

tamento das partículas microscópicas; e tantas outras contribuições, que culminaram no desenvolvimento das modernas

teorias quânticas de campos.

Apesar de passado tanto tempo, o fato é que, no presente, não existe uma teoria que unifique os postulados da física quântica com os princípios da relatividade geral. Em outras palavras, não dispomos ainda de uma teoria de gravitação quântica que seja aceitável. Não por falta de esforço, de habilidade ou por ingenuidade dos físicos, pois é considerável o número de cientistas brilhantes que se dedicaram ou têm se dedicado à construção de tal teoria.

O que pretendo aqui é apresentar, para o leitor não necessariamente familiarizado com as complicações técnicas do problema, um resumo de algumas idéias e estratégias adotadas pelos físicos nos últimos dez anos

que, pelo estudo de alguns modelos simplificados (os universos bidimensionais mencionados no título), buscam inspiração para a difícil tarefa de construir uma teoria quântica consistente para a gravitação.

Cosmologia e gravitação quântica

Entre aqueles que se dedicam ao ambicioso projeto de *descobrir* as leis da física que, a princípio, devem descrever consistentemente a estrutura do universo e sua evolução, vários acreditam que o sucesso desse projeto dependa do desenvolvimento de uma teoria quântica para a gravitação.

Mas do que trata tal teoria? Afinal, parecia que a esta altura já dispúnhamos de um bom modelo para descrever a interação gravitacional, do qual o leitor certamente já ouviu falar: a Teoria da Relatividade Geral. Admirada pelos físicos por sua “elegância”, a teoria da relatividade tem sido testada e aprovada, dentro dos seus supostos limites de aplicação, e o leitor poderia esperar que ela representasse a palavra final para o tema da gravitação. Mas é bem provável que não, pois mais testados ainda foram os princípios da teoria quântica,¹ que ao longo deste século tem revelado a bizarra, porém inegável, natureza quântica dos fenômenos físicos.

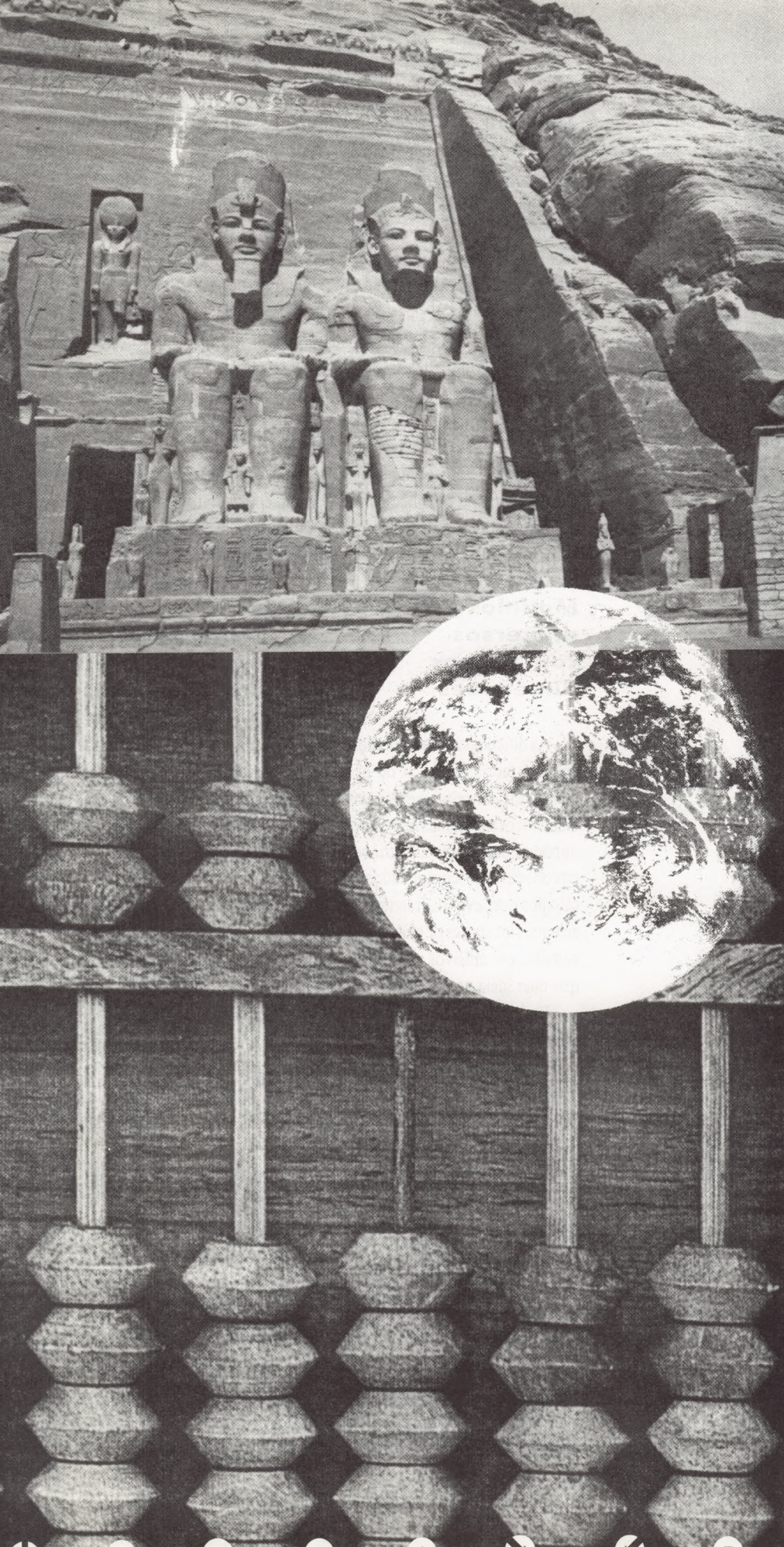
Ocorre que a relatividade não é uma teoria quântica (é um exemplo do que chamamos de *teoria clássica*). E, de fato, ainda *não existe* uma teoria completa e consistente que compatibilize os princípios da relatividade geral com os da teoria quântica. É essa teoria inexistente que estarei chamando de gravitação quântica.

Mas seria ela mesmo necessária? No interessante livro *The emperor's new mind*, de R. Penrose, o autor menciona um

AYRTON ZADRA

ILUSTRAÇÃO

ANA LÚCIA POMPEU



exemplo de como a gravitação quântica parece inevitável. No caso, o ponto de partida é o seguinte: como entendermos, a partir das leis fundamentais da física, o fato de o tempo fluir em um único sentido? De fato, parecemos estar sempre nos movendo para frente no tempo, indo de um passado determinado para um futuro incerto. Para a descrição física dessa assimetria no tempo, dispomos da chamada *segunda lei da termodinâmica*, que afirma que a entropia² de um sistema isolado sempre aumenta (ou fica constante) com o passar do tempo. Assim, se entendêssemos a *origem* da segunda lei, a partir de princípios mais fundamentais, teríamos uma explicação para a “flecha” do tempo.

A idéia consiste em considerarmos a segunda lei da termodinâmica aplicada ao universo todo: o que ocorre com a entropia do universo? Para respondermos a essa questão, precisaríamos saber como calcular a entropia do universo em diferentes momentos de sua história, em particular na sua origem e no seu possível fim. De acordo com o modelo do *Big Bang*, o universo teria sido criado a partir de uma gigantesca explosão, há cerca de 10^{10} anos. Tal explosão marcaria a própria origem do espaço e do tempo.

Considerando o espaço-tempo como um todo (conforme nos ensina a teoria da relatividade), o *Big Bang* é um exemplo

O tempo flui num único sentido
(passado → futuro)

↓
A entropia não decresce
(2ª lei da termodinâmica,
para sistemas isolados)

↓
Como evolui a entropia do universo?

↓
Estudo da entropia e da física
das singularidades
(Big Bang, buracos negros, Big Crunch)

↓
gravitação quântica

FIGURA 1: ESQUEMA DO RACIOCÍNIO QUE NOS LEVA DO PROBLEMA DA ORIGEM DA FLECHA DO TEMPO À PROCURA DA TEORIA QUÂNTICA DA GRAVITAÇÃO

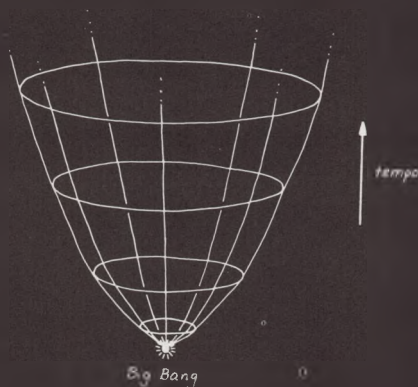


FIGURA 2: ESBOÇO DO ESPAÇO-TEMPO DE UM UNIVERSO (BIDIMENSIONAL) EM EXPANSÃO, COM SEÇÃO ESPACIAL CIRCULAR (UNIDIMENSIONAL)

de um *ponto singular*. Há outras possíveis regiões singulares no espaço-tempo, como os buracos negros, ou o chamado *Big Crunch* que marcaria o fim dos universos fechados. De qualquer modo, é necessário compreendermos a estrutura das singularidades do espaço-tempo. Mas é justamente nessas regiões que o nosso conhecimento da física chega a um dos seus limites: a gravitação clássica leva a resultados inaceitáveis, o que finalmente nos obriga a procurar uma teoria quântica para o próprio espaço-tempo: a gravitação quântica. Figura 1.

Modelos para universos com menos dimensões

As dificuldades na elaboração de uma teoria quântica de gravitação são conceituais e técnicas. Não raro os problemas técnicos se impõem: são tantas as variáveis envolvidas, tão complicados os cálculos que, eventualmente, nos achamos incapazes de chegar a resultados conclusivos e de testar qualquer idéia nova.

Embora não seja a única fonte de complicações, o número de variáveis é um dos fatores que determinam nossa habilidade para resolver uma teoria. Quando falo em “resolver” refiro-me à capacidade de fazer os cálculos e encontrar resultados que possam ser corretamente interpretados e enfim comparados com os dados experimentais. No caso da teoria da gravitação, o número de variáveis está ligado ao número de dimensões do nosso universo, que são *quatro*: três dimensões espaciais, mais o tempo. Talvez o mundo fosse menos complicado se, ao

invés de quatro, tivesse três ou duas dimensões ...

Este último comentário pode parecer fora de propósito. Para quê nos preocuparmos em imaginar como seria a física (e tudo mais) de um universo que tivesse, digamos, duas dimensões?! Afinal, já não havia sido nada trivial reconhecermos que o espaço e o tempo deveriam ser tratados em pé de igualdade, formando o tal espaço-tempo quadridimensional da relatividade. Por que então considerarmos um espaço-tempo com *menos* dimensões?

Tentemos encarar essa redução dimensional do universo em estudo como um “exercício”. Já que tal modelo de universo envolverá menos variáveis, há boas chances de que os cálculos se simplifiquem e que algumas boas idéias, sobre as leis da física que regem esse universo-modelo, possam ser conclusivamente avaliadas. Desse modo, poderíamos tirar lições a serem aproveitadas na construção das teorias em quatro dimensões. De fato, não seria a primeira vez que modelos simplificados serviriam de inspiração e de guia para novas idéias em física.³ No caso da gravitação, a esperança é que algumas das hipóteses consideradas e aprovadas, num universo bidimensional, continuem valendo em dimensões superiores.

As dimensões menores trazem também outra vantagem didática: a possibilidade de *visualização*. Considere, por exemplo, um modelo em duas dimensões: uma dimensão espacial e outra temporal. Podemos representar com um *círculo* (unidimensional) a parte espacial de um universo fechado, como mostra a figura 2. À medida que tal universo se ex-

**Talvez o mundo fosse
menos complicado se, ao
invés de quatro, tivesse
três ou duas dimensões...**

pande, a partir de sua criação num *Big Bang* original, o círculo aumenta de tamanho. Podemos então construir o espaço-tempo “colando” círculos consecutivos (cada um correspondendo a um “momento no tempo”), uns sobre os outros. O resultado será um tipo de cone encurvado (de qualquer modo, uma superfície bidimensional). As leis da física desse universo devem ditar sua evolução, dizendo-nos, entre outras coisas, se ele se expandirá para sempre ou, eventualmente, colapsará sobre si próprio.

Eis ainda outra vantagem dos universos bidimensionais: é relativamente fácil “catalogar” as possíveis geometrias que uma superfície bidimensional admite. Lembrando que a relatividade geral nos ensina a traduzir a gravitação em termos da geometria do espaço-tempo, as chances de encontrarmos uma solução para a teoria quântica da gravitação nos parecem melhores em duas dimensões.

Gravitação quântica em duas dimensões e superfícies aleatórias

Como exemplificado na figura 2, nosso problema consiste, no caso bidimensional, em construir uma teoria de gravitação para os “seres” que habitam uma superfície. Em outras palavras, queremos saber como a distribuição

desses seres (que representam a *matéria* nesse universo achatado) determina a geometria da superfície, e vice-versa. Conhecer a geometria desse universo significa saber como medir distâncias entre dois pontos quaisquer da superfície. Note que estamos transportando, para esse mundo bidimensional, a interpretação geométrica da gravitação segundo a relatividade geral.

Suponhamos que nosso universo-modelo seja uma superfície compacta, isto é, sem bordas ou fronteiras. Este é exatamente o tipo de superfície que esperaríamos num universo evoluindo a partir de um *Big Bang* até um *Big Crunch*. Do ponto de vista geométrico, isso traz mais uma simplificação: é possível contabilizar *todas* as geometrias admissíveis para esse tipo de superfície.⁴

Poderíamos inclusive considerar superfícies mais complicadas, com topologias⁵ diferentes, pois a contabilidade de geometrias continuaria bastante simples. A figura 4 mostra uma superfície com topologia de um *torus*. Tal superfície resultaria da evolução de um universo fechado que, durante um período de sua história, tenha se separado em duas regiões espaciais desconexas, que depois voltaram a se reunir. Esse tipo de fenômeno tem seu interesse em cosmologia para o estudo dos processos de mudança de topologia de universos.

Dadas as possíveis geometrias e topologias que nosso univer-

so-modelo admite, resta-nos saber qual delas representa a configuração física, isto é, qual esperamos que se realize na “natureza”? Ou melhor, como evoluirá esse universo a partir de sua origem até o colapso final?

Talvez esse tipo de questão deva ser reformulado se quisermos incorporar a teoria quântica, ou seja, se quisermos *quantizar* o modelo. De acordo com os princípios da teoria quântica, *todas* as configurações, ligando o estado inicial ao final do nosso universo, devem ser consideradas: todas as geometrias e topologias das superfícies fechadas devem ser levadas em conta, cada uma contribuindo com um certo *peso estatístico*,⁶ chamado de amplitude de probabilidade. Algumas configurações têm pesos maiores, outras menores, e nosso problema se resume então em contabilizar *todas* as geometrias, topologias e seus respectivos pesos estatísticos.

Esse peso estatístico completo das configurações certamente dependerá do tipo de matéria que habitar esse universo. Mas a lista do conjunto das geometrias e topologias possíveis só depende do fato de as superfícies serem compactas.

Note que nosso problema (o de construir uma gravitação quântica) se converteu num problema de contabilidade de *todas* as superfícies fechadas; uma teoria de *superfícies aleatórias*. Reconhecer esse fato foi importante, pois as superfícies aleatórias são objeto de

estudo de outro capítulo da física: a mecânica estatística. Assim, vários dos resultados, obtidos pela mecânica estatística, para descrever o comportamento das superfícies aleatórias, puderam ser aproveitados e reinterpretados na linguagem da teoria da gravitação. De fato, essa frutífera colaboração, entre mecânica estatística e a teoria dos campos em duas dimensões, já ocorre há muitos anos.

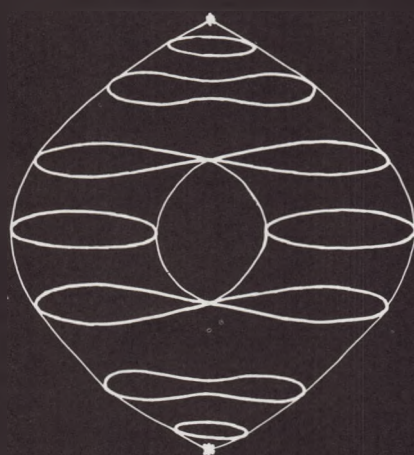
Não pretendo entrar em detalhes técnicos sobre os cálculos ou resultados da teoria das superfícies aleatórias. Menciono, sim, a importante conclusão de que, ao menos para alguns tipos de matéria se propagando em universos bidimensionais, a teoria quântica resultante dessa receita estatística nos leva a bons resultados. De fato, muitos cálculos podem ser feitos de maneira exata, certas conjecturas sobre a evolução desses universos achatados podem ser avaliadas e, no final, pode-se concluir que esse tipo de gravitação *faz sentido*!

Alguns avanços para a obtenção de bons resultados, a partir de

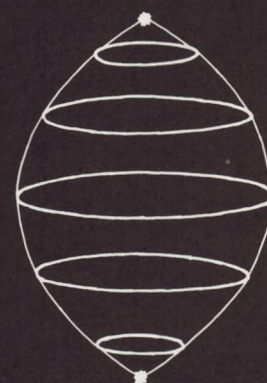
modelos de superfícies aleatórias, são bastante recentes. Eles derivam de uma nova abordagem, que substitui as superfícies "suaves" por uma versão *discretizada*, isto é, construída a partir da colagem de polígonos, como mostra a figura 5. O interessante é que a contagem das figuras discretizadas é bem mais simples. Mas, o que é mais importante do ponto de vista teórico, essas superfícies discretizadas podem ser postas em correspondência com certos modelos estatísticos de *matrizes aleatórias* (um tipo de teoria estatística envolvendo variáveis matriciais) que são *exatamente solúveis*.

Gravitação quântica bidimensional e teoria de cordas

É bem possível que o leitor já tenha ouvido falar da teoria de cordas.⁷ Esta teoria propõe que as partículas elementares, que se propagam no universo, não sejam realmente puntiformes (objetos de



tempo



tempo

FIGURA 3: EXEMPLO DE UM UNIVERSO BIDIMENSIONAL FECHADO, REPRESENTADO POR UMA SUPERFÍCIE COMPACTA

FIGURA 4: ESPAÇO-TEMPO COM A TOPOLOGIA DE UM TORUS

dimensão zero), mas tenham na verdade uma extensão (isto é, sejam unidimensionais), como se fossem pequenas cordas viajando no espaço-tempo.

Segundo esse modelo, teríamos de fato *um* só tipo de corda: os diferentes modos de vibração dessa corda (em analogia com os diferentes harmônicos de uma corda mecânica) é que se comporiam para formar todo o espectro de partículas que observamos na natureza. Apesar de razoavelmente recente, não completamente explorada, e bastante controversa, a teoria de cordas é uma forte candidata para a Teoria de Unificação das Interações, tão almejada pelos físicos.

A mecânica quântica das cordas estuda a propagação e a interação das cordas à luz dos princípios da teoria quântica. Da interação entre cordas, mais cordas podem ser criadas ou aniquiladas nos processos chamados de espalhamento. O espalhamento de cordas, assim como o de partículas, admite uma representação gráfica (os chamados gráficos de Feynman), conforme exemplificado pela figura 7. O problema de se determinar a probabilidade de ocorrer um certo espalhamento resume-se em calcular todos os gráficos possíveis, de acordo com algumas regras, chamadas regras de Feynman.

No caso da teoria de cordas, graças a uma simetria de escala (chamada de *simetria conforme*) que a teoria possui, podemos “deformar” um gráfico de espalhamento, encolhendo certas regiões e esticando outras. Gráficos obtidos por meio dessa deformação são considerados equivalentes, devido à simetria conforme, e desta forma podemos trabalhar com aquele que nos convier. Em geral, podemos sempre deformar um gráfico até que ele atinja a forma de uma superfície compacta, marcada por alguns pontos especiais, como ilustra a figura 8. Os pontos marcados na superfície representam os estados iniciais e finais das cordas interagindo.

Por fim, a contagem dos gráficos de espalhamento de cordas converte-se num problema de superfícies aleatórias. Isso implica que a teoria de cordas deve lidar, necessariamente, com um tipo de gravitação quântica, e, mais uma vez, esperam-se bons resultados do intercâmbio entre essas duas especialidades.

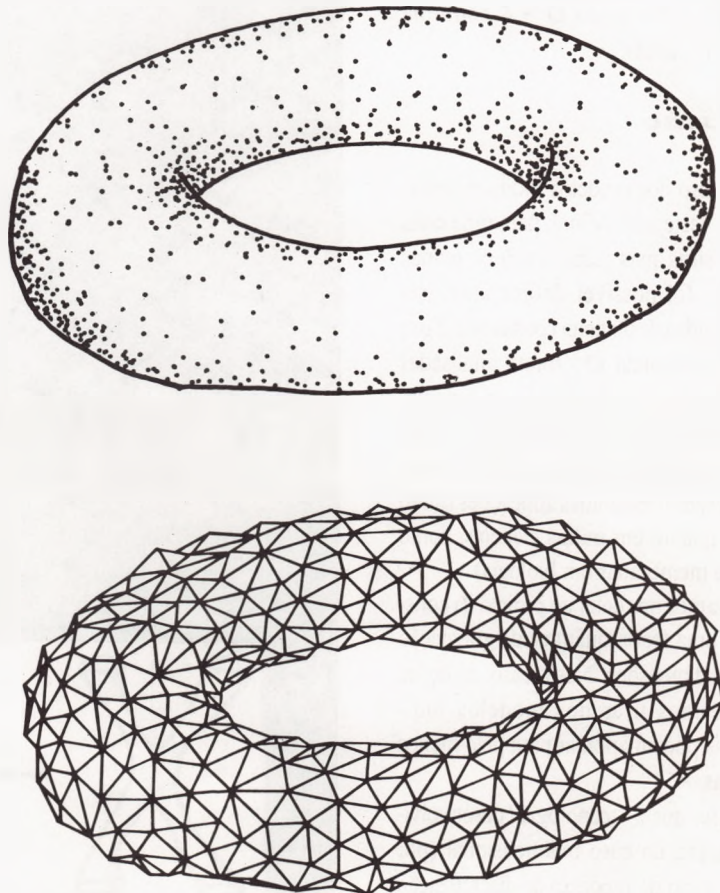


FIGURA 5: SUPERFÍCIE TOROIDAL E SUA VERSÃO DISCRETIZADA (NESTE CASO, TRIANGULARIZADA)

De fato, o sucesso na construção e na solução das teorias de superfícies aleatórias permitiu que aumentássemos o conjunto de teorias de cordas aceitáveis. Antes dos progressos com a gravitação quântica bidimensional, só se conseguia construir teorias quânticas consistentes para cordas que vivessem num universo de 26 ou 10 dimensões (que são as chamadas *dimensões críticas* das teorias de cordas e supercordas). Ou seja, a consistência interna da teoria vinculava o número de dimensões do nosso universo. Essa idéia em si, de que uma certa teoria possa nos dizer o *porquê* do universo em que vivemos ter precisamente D dimensões, não é má. Muito pelo contrário, queremos uma explicação para *tudo*, e portanto tal teoria seria bem-vinda... desde que ela nos desse a resposta esperada: $D = 4$! Voltando à gravitação quântica, esta efetivamente permitiu que fugíssemos das dimensões críticas ($D=26$ ou 10), aumentando o espectro de valores possíveis para D . Infelizmente, a dimensão $D = 4$ continua inalcançada ... ainda.

Conclusão

O sucesso dos modelos bidimensionais merece ser festejado! Afinal, para uma certa família (restrita mas respeitável) de teorias conformes, foi possível definir uma gravitação quântica de maneira consistente. Suas consequências ainda não foram analisadas completamente, mas, teoricamente, tudo parece satisfatório. Tais modelos, por si só, já teriam seu próprio interesse, além de diversas e por vezes inesperadas aplicações (tanto em física quanto em outras ciências, como estudos de membranas em biologia).

Mas vamos nos deter ao projeto da construção de uma teoria quântica de gravitação em quatro dimensões. Neste caso, as lições que pudermos tirar dos modelos bidimensionais podem apontar para pelo menos duas saídas.

Pode ser que a “tecnologia” desenvolvida na solução do caso bidimensional (por exemplo, o uso do processo de discretização da figura 5 e os respectivos modelos matriciais) possa ser elaborada e traduzida para

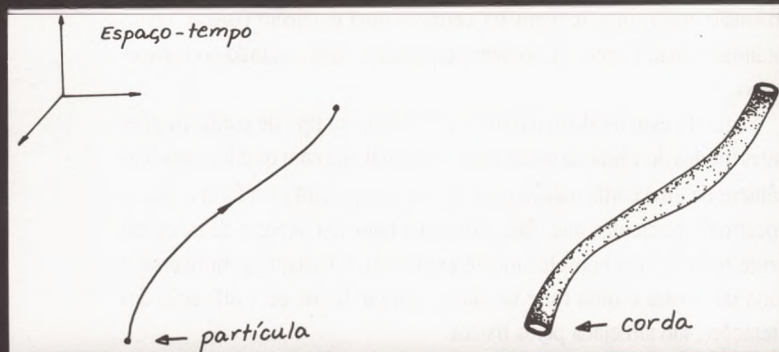


FIGURA 6: COMPARAÇÃO ENTRE A PROPAGAÇÃO DE UMA PARTÍCULA E A DE UMA CORDA FECHADA, PELO ESPAÇO-TEMPO. NOTE QUE, EM SUA VIAGEM, A PARTÍCULA ACABA DESCREVENDO UMA LINHA (CHAMADA LINHA-MUNDO), ENQUANTO A CORDA VARRE UMA SUPERFÍCIE (FOLHA-MUNDO).



FIGURA 7: DOIS EXEMPLARES DE GRÁFICOS DE FEYNMAN, PRESENTES NO CÁLCULO DO ESPALHAMENTO DE 4 CORDAS FECHADAS.

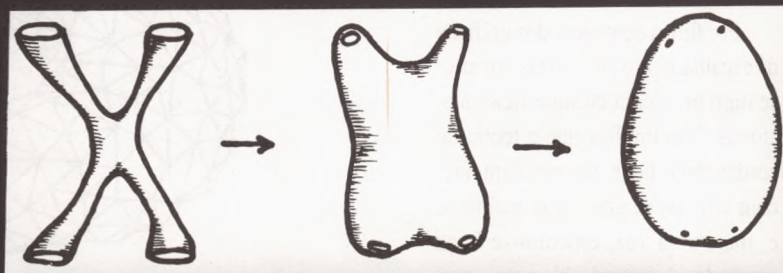


FIGURA 8: DEFORMAÇÃO DE UM GRÁFICO DE FEYNMAN, PELO USO DAS TRANSFORMAÇÕES DE SIMETRIA CONFORME (DE ESCALA), GERANDO UMA SUPERFÍCIE COMPACTA PONTUADA.

universos mais complexos. É um caminho difícil, pois ele nos obriga a reconhecer quais propriedades podem ser generalizadas nessa mudança de dimensão. De qualquer modo, há importantes exemplos na história da física que deveriam nos convencer a continuar investindo nessa direção.

O outro caminho diz respeito às teorias de cordas. Não há ainda uma teoria de cordas única e consagrada; somente modelos tentativos. Como já mencionei, o bom encaminhamento dos modelos bidimensionais de gravitação quântica tem alargado, cada vez mais, o espectro de teorias de cordas consistentes. Eventualmente, com uma melhor compreensão da própria gravitação quântica bidimensional, poderemos finalmente chegar a uma teoria de cordas que se propaguem num espaço-tempo com quatro dimensões. Se esta “boa” teoria de cordas existir, teremos dado um passo realmente grande: isso porque, entre os vários modos de vibração da corda, existe um que exibe as características típicas do *gráviton*, que é a partícula que representa o *quantum* da gravitação. Ou seja, se existir, essa teoria de cordas implicará uma unificação de todas as teorias, para as partículas elementares e suas interações, incluindo a gravitação quântica.

Qualquer que seja a saída, espera-se que a eventual descoberta da verdadeira teoria da gravitação quântica represente um importantíssimo passo para a compreensão detalhada das leis universais da natureza.

Notas

1. Hoje já dispomos de uma vasta literatura sobre os princípios e aplicações da física quântica. Mas o leitor pode aproveitar o próprio livro de R. Penrose, citado no final deste artigo, pois ele tem uma ótima introdução e revisão da física clássica e dos mistérios do mundo quântico.
2. A entropia é uma grandeza física que representa uma medida da desordem manifesta de um sistema. Quanto mais desordenado, maior a entropia do sistema.
3. Um caso famoso é o do modelo estatístico de Ising. O modelo em si é bastante simples: um conjunto de *spins*, distribuídos em uma rede de pontos, que interagem com seus vizinhos próximos e eventualmente com um campo magnético externo. Mas a solução desse modelo simples deu origem a várias idéias fundamentais da teoria quântica de campos (idéias associadas ao grupo de renormalização, transições de fase, expoentes críticos, expansão do produto de operadores e outros conceitos importantes).
4. De fato, basta conhecer apenas uma geometria: todas as demais poderão então ser geradas, a partir desta primeira, fazendo-se mudanças de coordenadas e mudanças de escala.
5. Em (muito) poucas palavras, a topologia de uma superfície compacta mede o número de “alças” dessa superfície: é o que distingue uma esfera (que não tem nenhuma alça) de um pneu (ou *torus*, que tem uma alça).
6. A interpretação correta exige mais cuidado, porque nas teorias quânticas esse “peso estatístico” pode ser um número complexo.
7. Estarei aqui me restringindo às chamadas cordas fechadas.

Leituras sugeridas

The emperor's new mind — Concerning computers, minds, and the laws of physics, de Roger Penrose, Oxford University Press, Oxford, 1989. É um livro muito interessante, acessível aos não-especialistas. Trata de vários assuntos, mas dedica os capítulos 5 a 8 a uma estimulante discussão das leis da física, em particular da gravitação.

Para aqueles mais familiarizados com a linguagem, a matemática e a física envolvidas, cito duas referências: a primeira é sobre a teoria de cordas: *Superstring theory*, de Michael B. Green, John H. Schwarz e Edward Witten, Cambridge University Press, Cambridge, 1987; e a outra é uma revisão dos resultados recentes sobre gravidade e supergravidade quântica em duas dimensões: “2D-Gravity in non-critical strings: discrete and continuum approaches”, de E. Abdalla, M. C. B. Abdalla, D. Dalmazi e A. Zadra, *Lecture Notes in Physics* m20, Springer-Verlag, Ed., 1994.

A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS E A FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS NO UNIVERSO

O desenvolvimento das pesquisas em cosmologia pode vir a trazer, nos próximos anos, surpresas em relação à intrigante questão da formação de estruturas.

CARLOS ALEXANDRE WUENSCHÉ

ILUSTRAÇÃO ANA LÚCIA POMPEU

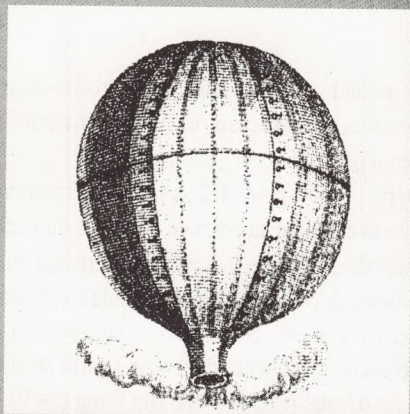
A cosmologia é a ciência que estuda o universo como um todo, buscando o entendimento da sua estrutura e da sua evolução. Seu objetivo é explicar o universo em termos de uma teoria simples e esteticamente atraente. Entretanto, de todas as ciências, a cosmologia é a mais exigente em termos de extrapolação de resultados e de conceitos, já que as escalas de tempo e de distância envolvidas nos problemas cosmológicos são da mesma ordem de grandeza da idade e do tamanho do universo que queremos observar.

Até cerca de 1950, a cosmologia era uma ciência eminentemente teórica, com pouco suporte observacional e praticamente nenhuma atividade experimental que pudesse apoiar os modelos de universo então vigentes. Esses modelos possuíam as mais diversas características e praticamente todos evoluíram a partir das soluções das equações que Albert Einstein propôs para descrever o movimento de corpos em referenciais acelerados: a chamada Teoria da Relatividade Geral, ou TRG. Recentemente, alguns fatos experimentais em conexão com a TRG criaram um paradigma de modelo cosmológico, conhecido como o modelo cosmológico padrão (doravante MCP). Embora criticado por alguns cientistas, o MCP é o que melhor descreve o universo que observamos e se baseia nos seguintes pontos:

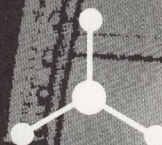
UMA VISÃO ATUAL

H

Li



He



- ❶ Não há região ou observador no espaço que ocupe uma posição preferencial em relação a outra qualquer. Essa afirmativa é conhecida como o princípio cosmológico.
- ❷ O universo é homogêneo e isotrópico em escalas suficientemente largas
- ❸ A existência da radiação cósmica de fundo em microondas (doravante RCF, descoberta por A. Penzias e R. Wilson, em 1965), a abundância de determinados elementos químicos leves (hidrogênio, deutério, hélio e lítio, cuja primeira estimativa foi feita por R. A. Alpher e R. Hermann, em fins dos anos 1940) e a observação da velocidade relativa de afastamento de galáxias distantes (descoberta por E. Hubble, em 1929), que são fatos observacionais, servem como pedra de base do MCP.

O item ❶ foi enunciado por Nicolau Copérnico em fins do século XV e vem sendo utilizado na imensa maioria dos modelos cosmológicos desde então. Como praticamente todos os processos observados na evolução das estrelas e galáxias podem ser descritos em termos da física conhecida, acredita-se que as leis que descrevem os fenômenos físicos da nossa galáxia são as mesmas em qualquer parte do universo. Essa crença vem de podermos observar e descrever fenômenos que ocorrem em galáxias distantes com exatamente o mesmo formalismo matemático usado para descrever fenômenos locais. O item ❷ vem sendo estudado em detalhes nos últimos anos e verificado com base em resultados de diversos levantamentos de distâncias de galáxias (os *redshift surveys*, feitos em instituições como o Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics — CfA, por exemplo). A homogeneidade e a isotropia do universo começam a ser verificadas a partir de distâncias da ordem de 100 megaparsecs ($3,08 \times 10^{26}$ cm, que equivalem a 3 bilhões de trilhões de quilômetros). Até distâncias dessa ordem ainda são observados diversos tipos de estrutura, tais como vazios, paredes e estruturas filamentosas. Desse ponto até o ponto onde se formou a RCF (~ 3.000 megaparsecs, equivalentes a 100 bilhões de trilhões de quilômetros) existe uma lacuna de informações, mas cálculos teóricos sugerem que esse foi o intervalo de tempo necessário para que perturbações gravitacionais evoluíssem nas primeiras galáxias do universo. Esquematicamente, a *figura 1* mostra a evolução do universo entre a época da formação da RCF e o instante atual. Consideramos o instante atual como o centro da circunferência e a parte externa como a época de formação da RCF. Essa região é conhecida como a Última Superfície de Espalhamento (USE). O item ❸ apresenta as evidências observacionais que sustentam o MCP, sendo que a abundância dos elementos químicos nos traz informações sobre o processo da nucleossíntese primordial, a RCF reflete o estado de equilíbrio termodinâmico no universo na USE, e a velocidade de recessão das galáxias distantes pode esclarecer pontos obscuros sobre diversos parâmetros cosmológicos, tais como a constante de Hubble e o parâmetro de desaceleração. Dos três observáveis, o que nos interessa mais de perto é a RCF, pois as flutuações de temperatura na RCF estão diretamente ligadas às

flutuações de densidade primordial que, acredita-se, criaram as instabilidades gravitacionais necessárias para a transformação das nuvens de hidrogênio primordial em galáxias.

O cenário previsto pelo MCP, baseado nos pontos acima, sugere que o universo explodiu há cerca de 10 a 20 bilhões de anos, a partir de um estado de densidade, temperatura e pressão infinitas. Essa explosão é conhecida como Big Bang (Grande Explosão), e, a partir do instante zero, o universo começou a expandir-se e a resfriar-se. Todos as referências a intervalos de tempo a partir de agora serão feitas supondo que o instante inicial foi o Big Bang ($t = 0$).

Até cerca de 0,01 segundo, a temperatura era muito alta e havia formação e aniquilação incessante de pares de partículas elementares. Após a temperatura cair para valores abaixo de um bilhão de K, a produção e aniquilação de pares e as reações nucleares cessaram, deixando como resultado elétrons, prótons e nêutrons (nossos conhecidos, que formam a matéria comum que constitui a Terra e as moléculas orgânicas a partir das quais nosso organismo é formado). Também restaram neutrinos (partículas de massa praticamente nula e carga elétrica igual a zero, dificílima de ser detectada) e fótons.

A combinação de prótons e nêutrons deu origem aos primeiros elementos químicos formados no universo: hidrogênio (H), deutério (D), hélio (He) e lítio (Li). Com o universo em expansão e conseqüente resfriamento, a temperatura atingiu o valor de 3.000 K, trezentos mil anos após a explosão. Nesse momento, prótons e elétrons — que se encontravam livres até então — começaram a combinar-se para formar átomos de hidrogênio, e o plasma de matéria e radiação deixou de existir. Com a combinação o processo de interação entre fótons e elétrons, conhecido como espalhamento Thomson, tornou-se insignificante e o universo, transparente à radiação (Fig. 2). A trajetória de um fóton, antes limitada devido às colisões sucessivas com os elétrons livres, passou a ser da mesma ordem de grandeza do universo. Devido ao processo de expansão, a temperatura dos fótons da RCF vem decrescendo proporcionalmente à taxa de expansão, mas mantendo exatamente as mesmas características. Hoje, observa-se essa radiação, que permeia todo o universo, a uma temperatura de 2,726 K.

Como a variação de temperatura é inversamente proporcional à taxa de expansão, podemos estimar o aumento relativo do tamanho do universo nesse período. Se a temperatura na época do desacoplamento era cerca de 3.000 K, e a temperatura atual é da ordem de 3 K (a temperatura equivalente de um objeto imerso em hélio líquido), o fator de decréscimo foi 1.000 ($3.000/3$) — conseqüentemente, o universo hoje é mil vezes maior que na época da recombinação. Por outro lado, a partir dessa época a matéria estava livre para condensar-se em estruturas que evoluíram nas galáxias que hoje observamos, já que a pressão exercida pela interação dos fótons não mais está presente para impedir que átomos se combinem, aumentando a atração gravitacional e o conseqüente colapso de nuvens de gás em galáxias ou grandes aglomerados, dependendo do modelo escolhido para descrever a formação.

O Panorama Atual

Existem diversas questões em aberto na cosmologia deste final de milênio, e todas elas apontam para o desconhecimento dos detalhes sobre os processos físicos que ocorreram nos primeiros instantes do nascimento do universo. A questão da formação de estruturas (galáxias, aglomerados e superaglomerados) está diretamente ligada ao nosso entendimento dos processos que ocorreram nos primeiros instantes do universo primordial. Em outras palavras, ele está sujeito ao nosso conhecimento das condições iniciais do universo — temos um problema de condições de contorno iniciais desconhecidas. Devido ao estado de equilíbrio termodinâmico em que se encontravam matéria e radiação nesse período e à uniformidade da RCF (verificada por medições feitas com diversos experimentos), sabemos que a matéria, até separar-se do campo de radiação, deveria estar uniformemente distribuída, do mesmo modo que a radiação. Como essa distribuição uniforme de matéria evoluiu para formar estruturas cuja densidade é milhares ou mesmo milhões de vezes maior que a densidade média do universo? Um metro cúbico de matéria tem cerca de 10^{30} (1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000) partículas, enquanto que, se distribuirmos uniformemente toda a matéria existente no universo, cada metro cúbico do espaço deve conter cerca de “uma” partícula! Cientistas referem-se a essa diferença na distribuição de matéria dizendo então que a densidade média de partículas na Terra é “30 ordens de magnitude” maior que a densidade média do universo. Se há regiões com densidade tão diferente, partindo das mesmas condições iniciais uniformes, surge a questão: qual foi o processo físico que causou essa aglutinação? A principal fonte de informações sobre os instantes em que a matéria se separou do campo de radiação é a RCF, mencionada na seção anterior. As flutuações na distribuição de matéria evoluíram para formar as galáxias e os aglomerados hoje vistos no céu, e a “impressão digital”, por assim

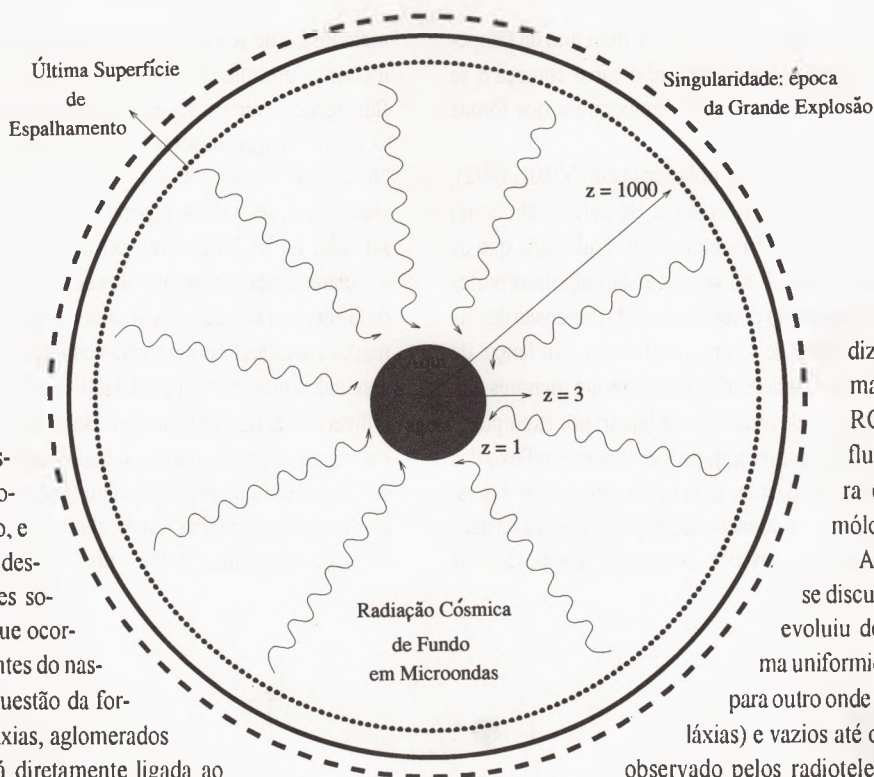


FIGURA 1. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA EVOLUÇÃO DO UNIVERSO. NO CENTRO DOS CÍRCULOS (QUE REPRESENTAM ESFERAS QUADRIDIMENSIONAIS, ONDE AS TRÊS DIMENSÕES DESCREVEM A EVOLUÇÃO ESPACIAL E UMA DIMENSÃO DESCREVE A EVOLUÇÃO NO TEMPO) ESTÁ UM OBSERVADOR QUE OLHA PARA O CÉU NOS DIAS ATUAIS. OS CÍRCULOS MAIS EXTERNOS REPRESENTAM ESTÁGIOS MAIS DISTANTES NO ESPAÇO E MAIS PARA TRÁS NO TEMPO. O ÚLTIMO CÍRCULO REPRESENTA O ESTÁGIO INICIAL DO UNIVERSO, CONHECIDO COMO BIG BANG.

dizer, das flutuações de matéria foi impressa na RCF, dando origem às flutuações de temperatura estudadas pelos cosmólogos atualmente.

Até abril de 1992, vinha-se discutindo como o universo evoluiu de um estado de extrema uniformidade e homogeneidade para outro onde existem “caroços” (galáxias) e vazios até os confins do universo observado pelos radiotelescópios e telescópios ópticos criados pelo homem. A partir daquele abril, com a detecção de flutuações na RCF da ordem de treze partes por milhão, o quadro mudou radicalmente — aparecera, enfim, uma justificativa (vide artigo de Thyrso Villela nesta edição)! Sabia-se que a única distorção na RCF era uma variação dipolar, observada ao se medir a temperatura do céu em dois pontos diametralmente opostos. Desde meados da década de 1970 o fato de que a temperatura da RCF é 0,1% mais quente que o valor médio na direção do aglomerado de galáxias conhecido como Virgo é conhecido da comunidade astronômica. Essa distorção (chamada pelos cientistas de “momento de dipolo da RCF”) foi medida de forma mais precisa no início da década de 1980 por grupos da Universidade de Princeton e da Universidade da Califórnia em Berkeley. O COBE (sigla para COsmic Background Explorer, satélite lançado pela NASA em 1989, exclusivamente para estudar a RCF) determinou o melhor valor da temperatura do dipolo até o momento: 3,34 mK (milésimos de Kelvin). A explicação para a distorção de dipolo é simples e não está relacionada a nenhuma causa cosmológica; ela se deve à atração gravitacional causada pelo aglomerado de Virgo, para onde nossa galáxia está sendo arrastada. Esse movimento por entre os fótons da RCF faz com que observemos os fótons entre nós e Virgo a uma temperatura ligeiramente maior que os que estão atrás de nós. Esse efeito é conhecido como “efeito Doppler”, sendo facilmente observado quando vemos um carro com

sirene passando pela nossa janela. A intensidade do som aumenta (com relação à mesma quando parada) à medida que o car-

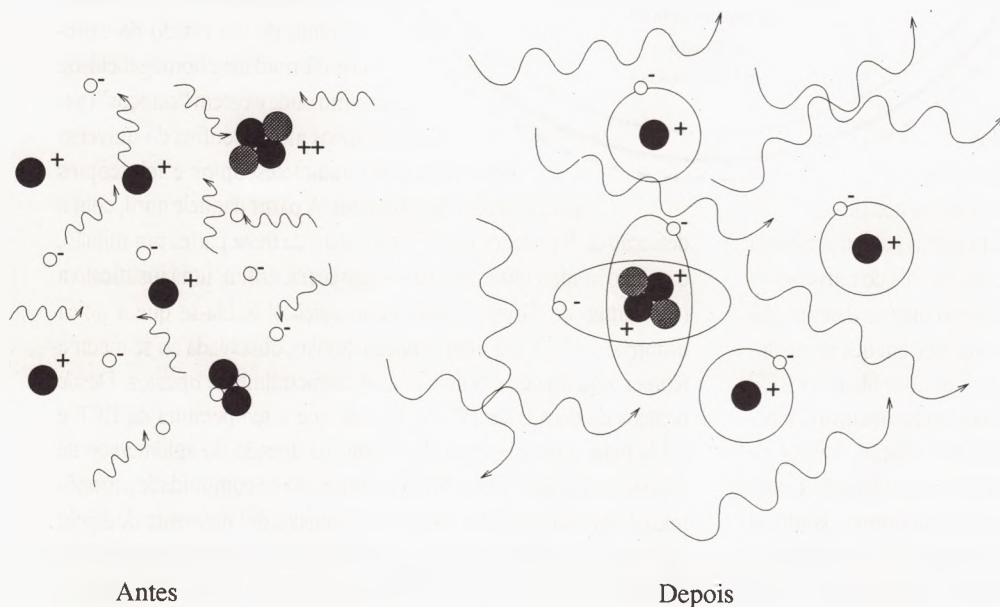
ro se aproxima de nós (correspondendo ao valor mais alto da temperatura) e diminui a partir do instante em que o carro começa a se afastar (correspondendo ao decréscimo de temperatura dos fótons que se encontram “atrás” de nós).

Descontado esse efeito, resultados publicados pelo COBE (1992), por grupos da Universidade de Califórnia em Berkeley e em Santa Barbara e pela Universidade de Princeton (1993) afirmam que as variações de temperatura na RCF não ultrapassam algumas partes em 100.000. Uma analogia útil no entendimento da dimensão dessas flutuações é pensar em dobras de 1 mm de altura em um lençol de 100 m x 100 m de dimensão. Essas variações são muito menores que as imperfeições na superfície de uma bola de bilhar, por exemplo.

Essas variações de temperatura são, provavelmente, reflexo das flutuações de densidade, consideradas as sementes geradoras das estruturas que hoje observamos. A idéia básica é que variações na densidade local de matéria, causadas por diferenças nos potenciais

merados), é de se esperar que essas flutuações tenham sido mais ou menos as mesmas. E. Harrison e Y. Zel'dovich propuseram que as flutuações deveriam ser as mesmas para *todas* as escalas angulares. O espectro que descreve as flutuações nesse caso é chamado “invariante em escala” ou “espectro de Harrison — Zel'dovich”. Nesse caso, seria de se esperar que as variações de temperatura observadas na RCF deveriam ser as mesmas em todas as separações angulares desde alguns minutos de arco até 90°. Conseqüentemente, os limites (ou detecções) em uma escala angular deveriam ser confirmados em todas as outras. Isso vem acontecendo, de certo modo, nos resultados publicados pelo COBE, pela Universidade de Princeton, Universidade da Califórnia em Berkeley e em Santa Barbara. Todos esses grupos publicaram resultados onde foram medidas variações de temperatura da ordem de algumas partes em 100.000. Pesquisas continuam sendo feitas em escalas angulares menores que 1 minuto de arco, objetivando testar a previsão de Harrison e Zel'dovich da

forma mais ampla possível. De qualquer modo, a distribuição praticamente uniforme da RCF indica que a matéria, acoplada à RCF devido ao estado de equilíbrio termodinâmico no universo primordial, também estava distribuída uniformemente. Essa é a suposição básica de uma corrente que defende flutuações adiabáticas como causadoras das distorções que geraram as estruturas. As flutuações adiabáticas são flutuações na densidade de radiação e matéria, onde perturbações em uma implica perturbações na outra. É possível mostrar que o número de partículas se conserva nesse tipo de flutuação, daí o nome adiabática. Já flutuações



gravitacionais locais, foram crescendo devido à atração gravitacional entre as partículas daquela região e, finalmente, formaram as galáxias e aglomerados hoje observados. Flutuações vêm sendo estudadas em diversas escalas angulares, mas os resultados anunciados até o momento somente indicam a detecção de flutuações em média e larga escalas angulares, enquanto que os resultados apresentados de medidas em pequenas escalas somente sugerem a existência de limites para as flutuações, ao invés de detecções efetivas. O que chamamos de escala angular é a projeção, na esfera celeste, da abertura da antena usada por um certo experimento. Assim, um experimento que usa uma antena em forma de corneta, cujo ângulo de abertura é de um grau, vai ser sensível a flutuações na escala angular de um grau.

Como estruturas são observadas em diferentes escalas angulares, ou de distância, caso pensemos no arco de circunferência definido pelo ângulo em questão (galáxias, aglomerados e superaglo-

isotérmicas — preferidas pela outra corrente — sugerem que possa ter havido aglutinação de matéria enquanto a radiação permanecia uniforme. Elas correspondem a variações na equação de estado local (relação entre a pressão, temperatura e composição química locais). Entretanto, é difícil explicar como variações na densidade de matéria poderiam ter ocorrido sem haver perturbado o campo de radiação, devido ao forte acoplamento entre ambos.

Supondo que o universo tenha sido criado com pequenas “dobras” no campo uniforme de radiação, como essas dobras evoluíram, tornando-se objetos da escala das galáxias e aglomerados hoje observados? Essa é uma questão interessante e crucial para o entendimento da física do universo primordial.

Existem dois períodos distintos de evolução, dois regimes qualitativamente diferentes: um período inicial, lento, de crescimento linear das instabilidades, e outro, rápido, de crescimento não-linear.

No período lento, a atração gravitacional mantém uma nuvem de gás (a “candidata” à galáxia) fracamente ligada, e a taxa de expansão das partículas dessa nuvem é menor que a taxa de expansão do universo ao seu redor. A atração gravitacional da matéria ao redor da “candidata”, tentando despedaçá-la, contribui para que o estado de ligação seja bastante delicado. Sua densidade é incrementada em passos muito pequenos, pois a densidade na ilha de matéria é apenas ligeiramente superior à densidade média local.

Esse delicado estado de equilíbrio é mantido durante bilhões de anos até que a densidade em volta da “ilha” atinge cerca da metade da densidade nela. Nesse ponto a atração gravitacional interna da própria nuvem faz com que ela comece a se contrair; é o início do processo rápido. A atração gravitacional da vizinhança já foi enfraquecida pela expansão universal durante esse período, fazendo com que a distância média entre as partículas da “ilha” não tenha aumentado tanto quanto entre as partículas da “ilha” e das vizinhanças, ou somente entre as partículas da vizinhança. A partir daí o processo é iterativo, já que mais matéria faz com que a atração gravitacional aumente, o que, por sua vez, atrai mais matéria, proporcionando um aumento rápido de massa. Essa “ilha”, ou protogaláxia, evoluirá para formar uma galáxia normal.

A teoria de formação de estruturas cósmicas, sejam elas superaglomerados ou pequenas estrelas, pode se resumir aos detalhes de uma longa batalha entre a força gravitacional e outras forças que tentam, sem sucesso, contrabalançá-la. No caso da formação de estrelas, a gravidade é balanceada pela pressão exercida pelos fótons de dentro para fora da protoestrela. As protogaláxias são palco do combate entre a gravidade e as velocidades locais e de expansão do universo. O resultado final, no entanto, é sempre a vitória da gravidade, já que estrelas e galáxias existem!

Essa passa a ser, então, a grande interrogação no cenário que descreve a formação de estruturas primordiais: dada a uniformidade da RCF, o intervalo de tempo decorrido desde a Grande Explosão e os valores extremamente pequenos medidos das flutuações na RCF, como é que o processo de aglutinação foi bem-sucedido? Partindo dessas condições, formar estruturas é um processo ainda bastante improvável. Vejamos, a seguir, o que os cosmólogos propõem atualmente para resolver o problema.

Discussão

Várias soluções são atualmente aceitas como possíveis, seguindo todas ao longo de duas linhas principais. Uma das alternativas é a existência de algum tipo de matéria, não-detectada de nenhuma forma pelos meios atualmente disponíveis, que viabilize uma interação gravitacional muito mais forte do que a estimada hoje, de modo que os colapsos possam acontecer no intervalo de tempo entre o final do desacoplamento e os dias de hoje. A outra é a existência de algum

processo, muito anterior à criação da RCF, que tenha criado condições para que as flutuações tenham começado a crescer logo após a transição do período dominado pela radiação para o período dominado pela matéria.

Essa matéria não-detectada é conhecida entre os cientistas como “matéria escura” (do inglês *dark matter*), e é assim chamada por não emitir nenhum tipo de radiação detectável diretamente e praticamente não interagem entre si ou com outras partículas. A matéria escura poderia desacoplar-se da “sopa” de matéria comum ou bariônica (composta basicamente de prótons e nêutrons, já que elétrons são 1.840 vezes mais leves que os dois anteriores, e praticamente não contribuem para o colapso gravitacional) e começar a aglutinar-se muito antes do período necessário para o desacoplamento entre matéria comum e radiação (cerca de 300.000 anos). Seus constituintes poderiam ser as sementes procuradas, atingindo a densidade de matéria necessária na época do desacoplamento, e não apresentariam o inconveniente grave de criar “dobras” grandes na distribuição de matéria. A matéria bariônica agregar-se-ia às sementes, posteriormente, como limalha de ferro atraída por um ímã distante quando o campo magnético é forte o suficiente.

Entretanto, isso implica a existência de uma quantidade de matéria dez a cem vezes superior à que se observa atualmente com teles-

FIGURA 2. O ESTÁGIO ANTES DESCREVE O COMPORTAMENTO DOS FÓTONS ANTES DA RECOMBINAÇÃO, QUANDO ELÉTRONS E PRÓTONS SE JUNTAM PARA FORMAR HIDROGÊNIO NEUTRO. NESSE CASO, FÓTONS POSSUEM UM COMPRIMENTO DE ONDA MAIS CURTO, UMA FREQUÊNCIA MAIOR E, CONSEQUENTEMENTE, POSSUEM MAIS ENERGIA. DURANTE ESSE PERÍODO EXISTE UMA INTERAÇÃO INTENSA ENTRE FÓTONS E ELÉTRONS, COM AMBOS TROCANDO ENERGIA POR ESPALHAMENTO THOMSON. NO ESTÁGIO DEPOIS, APÓS A RECOMBINAÇÃO, OS FÓTONS NÃO INTERAGEM COM O ÁTOMO DE HIDROGÊNIO E, COMO A QUANTIDADE DE ELÉTRONS DA RCF SE PROPAGAM LIVREMENTE E O COMPRIMENTO DE ONDA MAIOR (MENOR FREQUÊNCIA E ENERGIA) ESTÁ REPRESENTADO PELAS FLECHAS ONDULADAS COM UM INTERVALO MAIOR ENTRE AS CRISTAS.

cópios ópticos, por duas razões: a quantidade de matéria bariônica existente no universo está limitada pela nucleossíntese primordial, e mesmo que houvesse matéria bariônica suficiente, ela não poderia ser responsável, por só começar a se aglutinar após o desacoplamento. Existem diversos candidatos à matéria escura e a grande maioria deles são partículas previstas no modelo padrão de física de partículas. Esses candidatos estão agrupados sob o pseudônimo de WIMPs (do inglês *Weak Interactive Massive Particles*, que significa partículas massivas que interagem fracamente), englobando desde os neutrinos com massa da ordem de um centésimo de milésimo da massa do elétron até monopólos magnéticos — equivalentes magnéticos da carga elétrica — passando por partículas estranhas, resultantes de variantes do modelo padrão da física de partículas, como os áxions. A característica básica dessas partículas é a diminuta capacidade de interação. Com exceção dos neutrinos, todas as outras partículas possuem velocidades muito menores que a velocidade da luz, e usamos essa particularidade para classificar a matéria escura em “quente” (basicamente os neutrinos, que se movem com velocidades muito próximas à da luz) e “fria” (partículas muito lentas, se comparadas com a velocidade dos neutrinos).

O tipo de matéria escura pode determinar a maneira como as estruturas se formam, algo como um organograma da formação. A

matéria escura quente, por exemplo, após atrair a matéria bariônica que constitui a nuvem de gás candidata à protogaláxia, inicia o estágio de colapso não-linear, formando uma nuvem em duas dimensões, semelhante a uma panqueca. As galáxias, que são formadas por partículas que constituem a panqueca, aparecem ao final de um estágio conhecido como estágio de colisão dissipativa, onde a energia cinética é dissipada em colisões entre as partículas, e a atração gravitacional segura as partículas, mais lentas, próximas umas das outras. Como essa hierarquia começa com a nuvem grande fragmentando-se em estruturas menores, ou, em outras palavras, com superaglomerados fragmentando-se em aglomerados e estes em galáxias, ela é chamada de *top-down* (cuja tradução livre quer dizer “de cima para baixo”). Uma representação esquemática do processo *top-down* pode ser vista na figura 3. Já a matéria escura fria, constituída de partículas com velocidades baixas, se comparadas com a velocidade da luz, só admite variações de densidade em pequenas escalas na nuvem, já que partículas não possuem velocidade suficiente para atravessá-la numa escala de tempo adequada. Com isso, as pequenas flutuações evoluem em objetos subgalácticos e entram em equilíbrio após um período de relaxação. A distribuição de velocidades é tal que a densidade se torna proporcional ao quadrado do raio dessa nuvem, isto é, quanto mais distante do centro, menos partículas serão encontradas. Ocorre então a formação de halos galácticos e, como WIMPs e bárions colapsam em tempos diferentes, a galáxia formada a partir de matéria escura fria possui um halo constituído basicamente de um ou mais tipos de WIMPs (já que eles interagem muito menos e não colapsam para formar o núcleo que se tornará a galáxia), e um disco, constituído de bárions. As estruturas maiores formam-se por efeitos de maré e fusão de pequenas estruturas, ou seja, interação de galáxias para formar aglomerados. Nesse caso, a hierarquia vem de baixo para cima, sendo chamada de *bottom-up* (Fig. 4).

Um outro tipo de semente passível de causar o colapso gravitacional são os chamados defeitos topológicos, criados durante o resfriamento do universo. Diversas etapas, conhecidas como transições de fase — onde o universo “muda de estado”, com simetrias entre as forças fundamentais sendo quebradas em cada uma dessas etapas —, criam defeitos na estrutura do espaço-tempo que é o universo. Esses defeitos são análogos aos observados durante o processo de congelamento da água, por exemplo. Cristais de gelo possuem um determinado plano de simetria, crescendo preferencialmente numa certa direção. Por vezes, um plano de crescimento intercepta o outro, criando uma linha no lugar onde essa interrupção acontece. Essa linha é um defeito topológico, sendo análogo aos que aparecem nas transições de fase do universo. Os defeitos podem ser zero-dimensionais (puntuais), unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. Os defeitos puntuais constituem os chamados monopólos magnéticos e, teoricamente, praticamente inexistem no universo atual. A detecção de um monopólo magnético foi anunciada pelo físico B. Cabrera, da Universidade de Stanford, em 1982, mas, mesmo melhorando em várias ordens de magnitude a sensibili-

dade dos detectores utilizados, nenhum outro foi observado pelo mesmo grupo. Vários outros experimentos foram feitos em seguida, buscando verificar esse resultado — que seria de crucial importância para uma idéia que estava sendo lançada na época: o universo inflacionário —, mas os esforços foram em vão, de modo que não se acredita naquela detecção. Defeitos uni e bidimensionais são chamados, respectivamente, de cordas cósmicas e de paredes. Cordas cósmicas são filamentos extremamente massivos, infinitos, e não interagem com a matéria ou a radiação, exceto pela força da gravidade. Elas seriam a analogia cósmica das linhas formadas durante o congelamento da água, observadas numa forma de gelo, por exemplo. A densidade de massa de uma corda cósmica é algo extraordinário, e uma polegada de corda deve pesar cerca de 1.000.000.000.000.000 (um milhão de bilhão) de toneladas, tornando-se uma candidata atraiante e efetiva para ser semente no processo de formação de estruturas, devido à enorme quantidade de matéria que poderia atrair. As paredes são “folhas”, análogas aos filamentos, só que em duas dimensões. Os defeitos tridimensionais, também chamados de texturas, são uma espécie de caroço, também criado durante uma transição de fase. Todos esses defeitos possuem a característica comum de serem extremamente massivos e servirem, alternativamente, às flutuações de densidade aleatórias, como sementes no processo de formação de estruturas.

Os experimentos elaborados na década de 1980 e início dos anos 1990 vinham abaixando sistematicamente os limites impostos às flutuações de temperatura na RCF, e ameaçando o “reinado” das teorias de formação de galáxias que foram propostas até a metade da década de 1980. Sua queda dar-se-ia caso, num nível de sensibilidade de uma parte em 1.000.000, não se observasse sinal de flutuações de temperatura. Isso praticamente assinaria o atestado de óbito de belas teorias que previam a associação de flutuações de temperatura a flutuações de densidade, estas responsáveis pelo colapso gravitacional. Caso variações na temperatura da RCF não fossem observadas numa escala de, aproximadamente, uma parte em 100.000, isso significaria uma total reformulação dos conceitos vigentes, ou mesmo que seria necessário procurar um novo processo físico (ou uma nova física?) que pudesse explicar a existência de galáxias e aglomerados formados no intervalo de tempo disponível, isto é, os 10 ou 20 bilhões de anos que correspondem à idade do nosso universo.

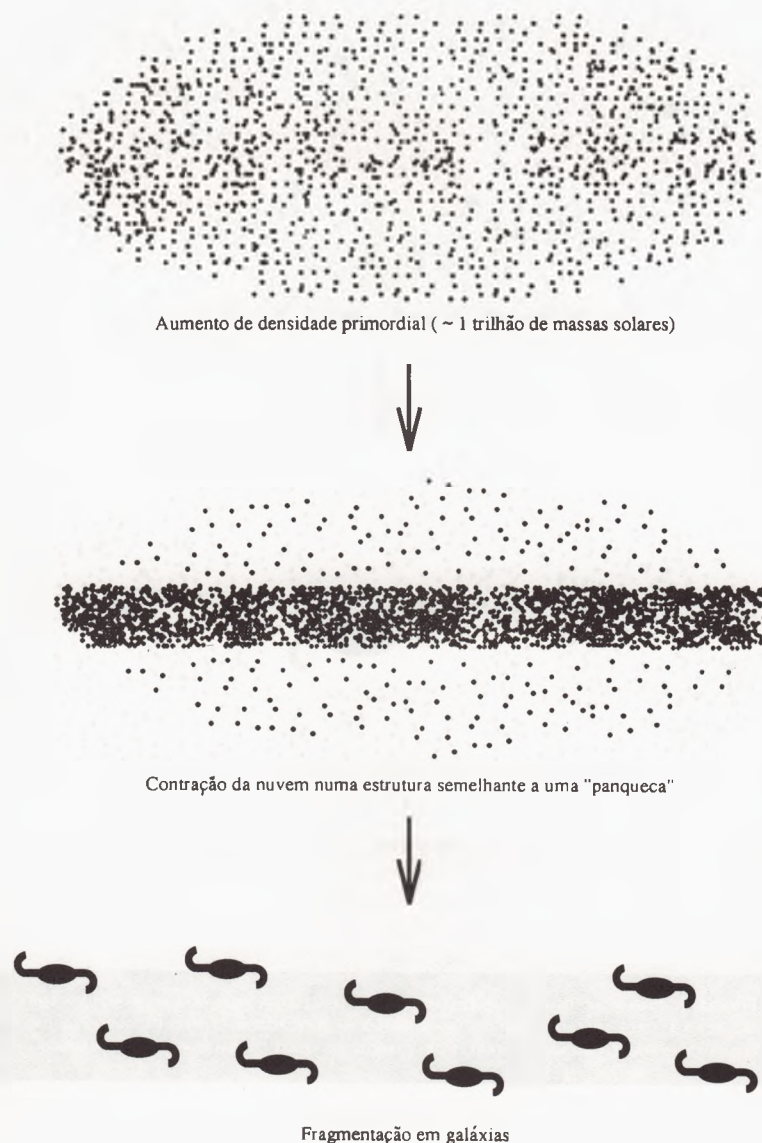
Felizmente, para físicos, astrônomos e cosmólogos, em abril de 1992 a equipe que gerencia o satélite COBE anunciou que haviam sido medidas flutuações de temperatura da ordem de 13 partes em 1.000.000 na RCF! Em 1993, diversos outros experimentos realizados a bordo de balões estratosféricos no Pólo Sul, e utilizando radiotelescópios, detectaram variação ou estimaram limites da mesma ordem de grandeza, em escalas angulares da ordem de um grau (vide, novamente, o artigo “Medindo a temperatura do universo”, de Thyrso Villela, nesta edição). Esses grupos vêm trabalhando em conjunto desde meados da década de 1980 e, recentemente, o grupo da

Universidade da Califórnia, nos *campi* de Berkeley e de Santa Barbara (UCB e UCSB, res-

spectivamente), realizaram a quarta versão de um experimento que vem sendo lançado desde 1988 — o MAX (Millimetre Anisotropy EXperiment ou experimento de anisotropia em ondas milimétricas). O MAX publicou resultados de detecção de flutuações de temperatura na RCF em 1993 e 1994, usando um sistema de espelhos especiais para observar na faixa de microondas. Esse conjunto foi montado sobre uma gôndola — na verdade, uma espécie de gaiola sem paredes — totalmente controlada por controle remoto e estabilizada, de modo que o detector podia ser apontado para onde se desejasse. Essa mesma gôndola foi utilizada pelo grupo da UCSB, com um sistema de espelhos ligeiramente diferente e um outro tipo de detector, para realizar missões mais longas de observação no Pólo Sul. Durante três verões antárticos (1988-1989, 1990-1991 e 1993-1994) pesquisadores passaram cerca de três meses na Antártida “pilotando” o ACME (Advanced Cosmic Microwave Explorer — explorador cósmico avançado em microondas). Os objetivos científicos foram os mesmos do MAX: observar flutuações de temperatura na RCF, mas realizados numa faixa de frequência diferente deste. Flutuações na RCF da ordem de algumas partes em 100.000 são os resultados das medidas do MAX, e limites superiores, os resultados do ACME. Ambos são compatíveis com um universo onde galáxias nasceram do colapso gravitacional decorrente de flutuações aleatórias e invariantes em escala, conforme mencionado na seção anterior.

Vários outros experimentos estão sendo realizados por grupos em diversas universidades nos EUA e por um grupo italiano, na Universidade de Roma, e muitos dentre estes mantêm uma colaboração ativa. O estágio atual do co-

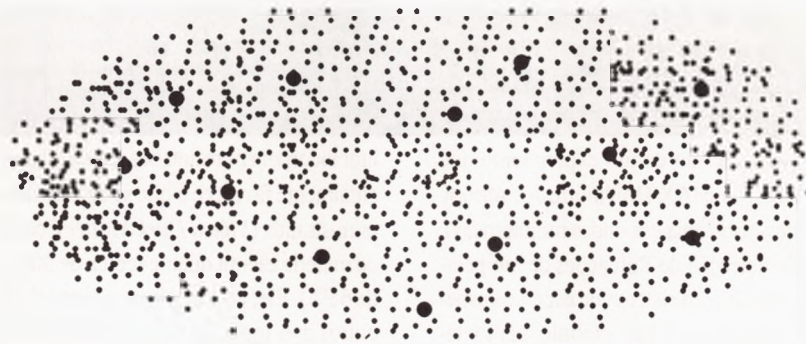
FIGURA 3. FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS TIPO “TOP-DOWN” COM MATÉRIA ESCURA QUENTE. UMA NUVEM DE GÁS PRIMORDIAL COM CERCA DE UM TRILHÃO DE VEZES A MASSA DO SOL COLAPSA EM UMA ESTRUTURA FINA SEMELHANTE A UMA “PANQUECA”. ELA FRAGMENTAR-SE-Á EM AGLOMERADOS QUE, EVENTUALMENTE, CONDENSAR-SE-ÃO EM GALÁXIAS INDIVIDUAIS.



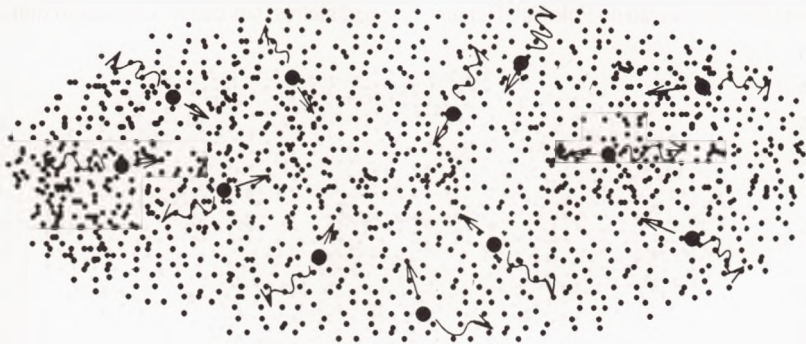
lhor incorpora os resultados recentemente obtidos. O modelo em voga atualmente favorece o que se convencionou chamar de matéria escura misturada (*Mixed Dark Matter*), constituído de uma combinação de matéria escura quente (cerca de 30%) e matéria escura fria (cerca de 65%). Ele, em princípio, é capaz de resolver os problemas que os outros dois modelos que o compõem não conseguiram, mas ainda é cedo para afirmar que ele será a resposta do problema de formação de estruturas. A forma de testar essas teorias é, usando os resultados obtidos pelos experimentalistas como condições iniciais, verificar o comportamento da versão computacional das teorias: os modelos. E o que esses modelos fazem? Basicamente, eles usam uma série de parâmetros, tais como composição química inicial do universo, am-

plitude das flutuações da RCF na época do desacoplamento, densidade de matéria e energia do universo como valores iniciais para resolver as equações de transporte radiativo que descrevem o comportamento da matéria e da radiação em função do tempo. Esse processo é chamado de simulação porque o computador simula a evolução temporal do universo, dando como resultado um mapa com pontos que representam a distribuição de matéria numa certa região do espaço. A análise desses mapas, baseada, entre outras coisas, no fator de aglutinação entre os pontos (que representariam as estruturas formadas no intervalo de tempo para o qual o modelo foi ajustado), é que faz a distinção entre os modelos.

Podemos resumir o estado do conhecimento atual sobre os mecanismos de formação de galáxias da seguinte forma: para haver formação de galáxias são necessárias matéria e se-



Concentração homogênea de bárions e matéria escura (~ 100 bilhões de massas solares)



Bárions irradiam e "caem" na direção do centro da nuvem



Disco brilhante de estrelas forma-se no meio da nuvem

FIGURA 4. FORMAÇÃO DE GALÁXIAS ESPIRAIS COM MATÉRIA ESCURA FRIA. MATÉRIA BARIÔNICA EMITE RADIAÇÃO E PERDE ENERGIA, "CAINDO" MAIS RÁPIDO NA DIREÇÃO DO CENTRO DA NUVEM DE GÁS, ENQUANTO A MATÉRIA ESCURA PERMANECE GRAVITANDO AO REDOR DA GALÁXIA RECÉM-FORMADA.

mentes. A matéria necessária existe na forma de matéria escura, fria, quente ou, mais provavelmente, uma mistura de todas. As sementes podem ser flutuações aleatórias na densidade inicial de matéria ou defeitos topológicos no espaço em si. A tendência atual, embora não aceita por unanimidade, aponta para o modelo de matéria escura misturada, onde o colapso gravitacional é causado por flutuações aleatórias de densidade com amplitudes de algumas partes em 100.000. Por outro lado, defeitos topológicos não estão totalmente descartados, muito pelo contrário. Entretanto, existem, hoje em dia, poucos testes estatísticos capazes de distinguir entre os efeitos de cordas cósmicas ou paredes, por exemplo, e flutuações aleatórias. A solução, acreditamos, virá junto com a nova geração de experimentos para medir a RCF, já que medições em escalas angulares da ordem de um grau em um pedaço razoável do céu (um corte de $20^\circ \times 20^\circ$, por exemplo) podem criar detalhes novos nos quadros atuais. Isso permitirá que os físicos teóricos reavaliem seus modelos e possam selecionar o mais adequado. De qualquer modo, a versão final, após as detecções de flutuações anunciadas nos últimos dois anos, não deve estar longe. O problema de adequar as medidas da RCF e as medidas de velocidades peculiares de aglomerados de galáxias a um determinado modelo de formação de estruturas possivelmente será resolvido combinando-se as novas medidas de flutuações na RCF com os levantamentos de estruturas em larga escala que vêm sendo feitos por diversos centros de pesquisa no mundo. Somos bastante otimistas e estamos convencidos de que um quadro satisfatório emergirá nos próximos anos.

Conclusão

A questão da formação de estruturas é um dos mais intrigantes e excitantes problemas da cosmologia atual e, certamente, esconde ainda muitas surpresas que devem vir à tona nos próximos anos. Qualquer que seja o modelo adotado atualmente, ele não responde a todas as nossas perguntas. Ainda existe um grande mistério — um paradoxo, poderíamos afirmar — na convivência entre a uniformidade observada na RCF e a existência de um universo “encarado” como este em que vivemos. O universo é suficientemente complexo para permitir a formação de estruturas em estado de sofisticado e delicado equilíbrio, tais como o nosso Sistema Solar, a partir de uma “sopa” de matéria e radiação muito mais uniforme do que jamais poderíamos supor ao olhar para o céu.

Os candidatos à semente e matéria escura são diversos e exóticos. Entretanto, como vimos neste artigo, muitas coisas mudaram nos últimos quinze anos, e a lealdade de muitos físicos a seus modelos vem sendo constante e, muitas vezes, duramente abalada por um resultado experimental totalmente inesperado. Muitas surpresas aconteceram nesse curto espaço de tempo, e seria, para os cientistas envolvidos na solução desse paradoxo, no mínimo ingênuo descartar

qualquer das hipóteses existentes hoje antes de realizar uma investigação muito cuidadosa. Hipóteses improváveis hoje podem voltar à tona amanhã, caso o modelo de matéria escura misturada não seja perfeito o suficiente para explicar os magníficos objetos existentes no céu, e dos quais ainda não se conhece a origem. Ainda existem muitos segredos a serem descobertos sobre a formação de estruturas no universo — quer sejam eles ligados a uma nova física ou simplesmente uma nova maneira de pensarmos e entendermos os processos físicos que se nos apresentam. A cosmologia encontra-se num tal estado de evolução e de descobertas nos dias de hoje que, com certeza, novas, bizarras e interessantes teorias estão esperando atrás das portas do edifício da ciência. Cabe a nós, cientistas, decidir quais perguntas devem ser formuladas para que essas portas se abram e aceitar as respostas que a natureza nos apresentará.

Carlos Alexandre Wuensche é pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais — INPE.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Philip Lubin, Peter Meinhold, Todd Gaier, Josh Gundersen, Mike Seiffert, Mark Lim, Tim Koch, John Staren e Jatila van der Veen pelas intermináveis discussões, regadas a café e *cookies*, no laboratório do grupo de Cosmologia Experimental da Universidade da Califórnia, Santa Barbara, que amadureceram as idéias que resultaram neste artigo. A Thyrso Villela, meus agradecimentos pelas críticas e sugestões durante a preparação do manuscrito.

Leituras sugeridas

As referências aqui citadas devem ser consideradas apenas como sugestão para leitura complementar e foram escolhidas com base pura e simplesmente no meu gosto, estando ordenadas por ordem crescente de dificuldade.

Riordan, Michael e Schramm, David. *Shadows of creation: dark matter and the structure of the universe*. W. H. Freeman and Co., Nova York, 1991. Texto de divulgação científica, escrito com o objetivo de passar ao leitor os conceitos básicos do processo de formação de estruturas e da existência de matéria escura no universo.

Weinberg, Steven. *Os três primeiros minutos*. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980. Escrito por um físico de partículas que se aventurou no terreno da cosmologia, esse texto apresenta, numa linguagem clara e simples, um resumo do universo primordial. Um dos primeiros textos de divulgação escritos sobre cosmologia (1977), possui um apêndice matemático para aqueles que desejarem se aventurar...

Silk, Joseph. *O Big Bang*. 2ª ed., Editora Universidade de Brasília, 1989. Escrito por um dos físicos de maior destaque na área, esse livro apresenta o modelo do Big Bang de forma simples, e introduz alguns conceitos matemáticos (também concentrados em um apêndice) um pouco mais complexos que os apresentados no livro de Weinberg.

Kolb, Edward e Turner, Michael. *The early universe*, cap. 9. Séries: *Frontiers in Physics*, Addison-Wesley, 1990. Considerado atualmente uma das “bíblias” da cosmologia, é destinado a alunos do último ano do curso de física, ou a estudantes de pós-graduação na área.



$$F_g = G \frac{M_1 M_2}{l^2},$$

$$f = m_{\text{part}} a,$$

$$G \frac{M_{\text{part}} M}{l^2} = M_{\text{part}} a, \Rightarrow a = G \frac{M}{l^2},$$

Cosmologia e Geometria

As geometrias não-euclidianas surgem dos trabalhos de matemáticos, e estão presentes naturalmente na descrição moderna de gravitação.

Gravitação

A COSMOLOGIA MODERNA É, SEM DÚVIDA, UMA DAS MAIORES AVENTURAS INTELECTUAIS DO HOMEM. ELA PODE SER APRESENTADA COMO A CIÊNCIA QUE ESTUDA O UNIVERSO COMO UM TODO, E PODE SER SUBDIVIDIDA EM TRÊS PARTES DISTINTAS. PRIMEIRO, A COSMOGRAFIA, QUE SE PREOCUPA BASICAMENTE COM A CATALOGAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS ASTROS E DE SEUS MOVIMENTOS. A COSMOLOGIA TEÓRICA TEM COMO PREOCUPAÇÃO EXPLICAR OS DADOS OFERECIDOS PELA COSMOGRAFIA A PARTIR DE MODELOS FÍSICOS, OBTIDOS ADMITINDO-SE COMO VÁLIDAS PARA TODO O UNIVERSO AS LEIS DA FÍSICA USADAS COM ÊXITO EM NOSSAS ESCALAS DE ESPAÇO E DE TEMPO COTIDIANAS. A TERCEIRA PARTE, A COSMOGONIA, PREOCUPA-SE EM DESCREVER E EXPLICAR A ORIGEM DO UNIVERSO E A SUA MAIS REMOTA HISTÓRIA. AQUI A EXTRAPOLAÇÃO É MAIS IMPRESSIONANTE AINDA, AS LEIS DA FÍSICA SÃO USADAS PARA OS MAIS DISTANTES E ANTIGOS EVENTOS DO UNIVERSO.

QUAIS SÃO AS LEIS DA FÍSICA RELEVANTES PARA UM ESTUDO COSMOLÓGICO? VEREMOS QUE, ESSENCIALMENTE, SÃO AS LEIS QUE REGEM AS INTERAÇÕES GRAVITACIONAIS. PODE PARECER, À PRIMEIRA VISTA, PARADOXAL QUE A MENOS INTENSA INTERAÇÃO FÍSICA CONHECIDA, A GRAVITACIONAL, SEJA A RELEVANTE PARA A DESCRIÇÃO DOS FENÔMENOS COSMOLÓGICOS. ISTO PODE SER MELHOR COMPREENDIDO SE ATENTARMOS PARA ALGUNS FATOS. A MAIS INTENSA DAS INTERAÇÕES FÍSICAS CONHECIDAS, A INTERAÇÃO FORTE, RESPONSÁVEL PELO CONFINAMENTO DOS NÚCLEONS DENTRO DO NÚCLEO DE UM ÁTOMO, É DE CURTÍSSIMO ALCANCE, DESAPARECENDO QUASE QUE COMPLETAMENTE FORA DAS DISTÂNCIAS TÍPICAS DO NÚCLEO ATÔMICO. AS DUAS INTERAÇÕES DE LONGO ALCANCE CONHECIDAS SÃO AS GRAVITACIONAIS E AS ELETROMAGNÉTICAS. NOS DOIS CASOS, A INTERAÇÃO ENTRE DUAS PARTÍCULAS PUNTIFORMES É PROPORCIONAL AO QUADRADO DA DISTÂNCIA QUE AS SEPARA, MAS HÁ UMA SUTIL E FUNDAMENTAL DIFERENÇA: A FORÇA GRAVITACIONAL É SEMPRE ATRATIVA, ENQUANTO QUE A ELÉTRICA DEPENDE DAS CARGAS DAS PARTÍCULAS. SE CONSIDERARMOS UM CORPO MACROSCÓPICO, COMO SENDO CONSTITUÍDO POR UM GRANDE NÚMERO DE PARTÍCULAS MENORES, SABEMOS QUE, CERTAMENTE, A SUA MASSA SERÁ MAIOR DO QUE A MASSA DE CADA PARTÍCULA. JÁ COM RESPEITO À CARGA DO CORPO MACROSCÓPICO, ESTA PODERÁ SER INCLUSIVE NULA, SE TIVERMOS UM IGUAL NÚMERO DE PARTÍCULAS COM CARGAS POSITIVAS E NEGATIVAS. NÃO É ESTRANHO, PORTANTO, QUE NA DESCRIÇÃO DE CORPOS MACROSCÓPICOS COM CARGA TOTAL NULA AS FORÇAS DE ORIGEM ELETROMAGNÉTICA SEJAM SUPLANTADAS EM INTENSIDADE PELAS GRAVITACIONAIS. PODE-SE QUESTIONAR TAMBÉM A RELEVÂNCIA DOS CONCEITOS DA FÍSICA QUÂNTICA NUMA DESCRIÇÃO COSMOLÓGICA. PODEMOS ADIANTAR QUE NA DESCRIÇÃO DE FENÔMENOS DE GRANDES MASSAS E DISTÂNCIAS AS CORREÇÕES DE ORIGEM QUÂNTICA SÃO DESPREZÍVEIS; CONTUDO, ELAS SÃO ESSENCIAIS NA COSMOGONIA, NA DESCRIÇÃO DOS PRIMEIROS INSTANTES DO UNIVERSO, MAS NÃO TRATAREMOS DESSE ASSUNTO AQUI.

Tendo em vista que a física relevante para os estudos cosmológicos é essencialmente a gravitacional, concentrar-nos-emos na exposição das teorias modernas da gravitação. Nosso ponto de partida será a gravitação de Newton. Em sua teoria, Newton propôs que a interação gravitacional seria mediada por uma força, a força gravitacional, que no caso de duas partículas puntiformes seria sempre atrativa, proporcional às massas das partículas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa, ou seja:

$$F_{Gr} = G \frac{M_1 M_2}{l^2},$$

onde G seria uma constante universal, a ser determinada experimentalmente. Conhecendo-se a força que age numa partícula, poderíamos, baseados na segunda lei de Newton, prever a trajetória dessa partícula. Lembremos que a trajetória é descrita matematicamente por uma função que associa a cada instante de tempo a posição da partícula no espaço. Dada uma trajetória, podemos obter outra função que nos fornece a velocidade instantânea da partícula em cada ponto da trajetória, também em função do tempo. Conhecidas as velocidades instantâneas, obtém-se por um processo análogo a aceleração instantânea da partícula. O processo inverso também é possível, ou seja, a partir das acelerações instantâneas podemos obter as velocidades e por fim a trajetória, se bem que neste caso precisamos conhecer também a velocidade e a posição iniciais da partícula. Em resumo, se conhecermos a posição e a velocidade iniciais de uma partícula e suas acelerações instantâneas, conheceremos também a sua trajetória. A aceleração instantânea nos é de grande in-

teresse porque ela é proporcional à força que age na partícula de acordo com a segunda lei de Newton,

$$F = M_{part} a,$$

onde a constante de proporcionalidade M_{part} é a massa da partícula.

Um dos pontos fascinantes da teoria newtoniana é que, de certa forma, ela contém a essência da gravitação moderna, a gravitação de Einstein. Consideremos o seguinte caso, onde várias partículas orbitam ao redor de um grande corpo de massa M , modelo semelhante ao do sistema solar. A trajetória de cada partícula pode ser prevista, conhecendo-se suas posições e velocidades iniciais e as acelerações instantâneas, que por sua vez são obtidas igualando-se as duas fórmulas anteriores,

$$G \frac{M_{part} M}{l^2} = M_{part} a, \Rightarrow a = G \frac{M}{l^2},$$

ou seja, a aceleração não depende da massa da partícula em questão! Como consequência, a trajetória da partícula também será independente de sua massa. Isso nada mais é do que uma verificação da famosa conclusão de Galileu, a de que corpos de massas diferentes caem com a mesma aceleração na superfície da terra. Aqui cabe dizer que essa independência das massas das trajetórias de partículas sujeitas à interação gravitacional é verificada com grande precisão experimental. Por trás dessa independência está a igualdade entre a massa gravitacional, aquela presente na lei da gravitação de Newton, e a massa inercial, a presente na segunda lei de Newton. Essa igualdade é um dos resultados conhecidos com maior precisão na física.

A essência da teoria de gravitação de



FIGURA 1

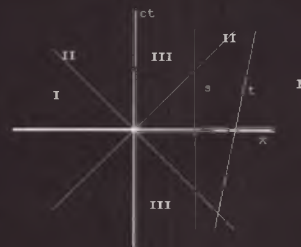


FIGURA 2

Einstein é o fato já citado de que as trajetórias de partículas sujeitas à interação gravitacional independem de suas massas. Isso quer dizer que se dois corpos completamente distintos forem lançados ao redor do sol com mesmas posições e velocidades iniciais, eles seguirão exatamente a mesma trajetória. Isso é surpreendente, não se verifica essa situação com nenhuma outra interação física conhecida. Uma situação semelhante ocorre com as chamadas forças fictícias, ou inerciais, também presentes nos trabalhos de Newton. Todos nós já experimentamos a sensação de sermos jogados à frente ou para trás quando o automóvel freia ou acelera. Dentro de um ônibus freando, todos os passageiros, independentemente de suas massas, experimentam a mesma aceleração. Também num carrossel de parque de diversões, todas as crianças experimentam a mesma aceleração centrífuga. Nessas situações está claro que a trajetória e as forças envolvidas são decorrentes dos movimentos acelerados do ônibus, que está freando, e do cavallinho do carrossel, que executa um movimento circular. Como se não bastassem essas semelhanças, há outro argumento para nos convencer que as forças fictícias e as gravitacionais têm algo em comum. Todos provavelmente também já tiveram a sensação de ausência de peso nas montanhas-russas de parques de diversões. Podemos, por exemplo, construir um trem que se mova sobre um círculo vertical, de tal maneira que a aceleração centrífuga que os passageiros estejam sujeitos no ponto mais alto do círculo tenha exatamente a mesma intensidade que a aceleração da gravidade. Isso anularia o efeito da gravidade naquele ponto. Astronautas em órbita da Terra também experimentam uma situação semelhante. Assim também funcionam os simuladores de gravidade zero empregados no trei-

namento de astronautas na Terra. Um avião à jato sobe a uma grande altitude e mergulha em queda livre. Dentro dele, seus ocupantes são jogados para trás, anulando-se assim por algum tempo a ação da gravidade.

Foram essas idéias que levaram Einstein a formular a sua teoria da gravitação. Já que todos os corpos “reagem” da mesma maneira à gravidade, isto é, todos os corpos, mesmo que completamente distintos, seguem as mesmas trajetórias quando sujeitos a uma mesma configuração de campo gravitacional, a gravitação pode ser vista como algo inerente ao espaço, e não aos corpos, como na teoria newtoniana. Para que isto fique claro, necessitamos de uma pequena introdução aos resultados da teoria da relatividade especial, também de Einstein, e a ela dedicaremos a próxima seção.

Espaço-tempo

O ano de 1905 foi um ano incomum para a física. Nele, o então jovem e desconhecido físico. Albert Einstein publicou três trabalhos revolucionários, os três sobre temas diferentes. Em um deles, são estabelecidas as bases do que seria mais tarde conhecida como a te-

oria da relatividade especial, e que pode ser considerado o maior golpe que a teoria newtoniana da mecânica experimentou.

O que nos interessa agora é entender como a teoria da relatividade especial revolucionou a visão do espaço e do tempo. Na visão newtoniana, o tempo tem um caráter absoluto, o tempo “flui” da mesma maneira para todos os corpos no universo, independente de suas posições ou seus movimentos. Duas partículas são completamente caracterizadas na visão newtoniana pelas suas coordenadas espaciais, três para cada partícula (x, y, z), e por um único valor do tempo (t), para os dois, já que o tempo flui de maneira idêntica para as duas partículas. A teoria da relatividade rompe com esse esquema na medida que ela introduz uma “velocidade máxima” na natureza, a velocidade da luz. Segundo Einstein, nada na natureza, nenhum corpo ou nenhum sinal de qualquer tipo, pode se mover com uma velocidade maior do que a da luz, que iremos denotar por c . Isso requer modificações nos conceitos de instantaneidade; dois pontos distantes podem, na melhor das hipóteses, ser conectados por sinais que viajam à velocidade da luz, o que implicará um certo atraso na troca de sinais pelos pontos. Quando um dos pontos recebesse o sinal do outro, este sinal corresponderia a um instante passado, devido ao atraso do sinal que viaja à velocidade da luz. Além disso, a teoria de Einstein baseia-se no fato de que a velocidade da luz tem sempre a mesma magnitude, independentemente da velocidade relativa entre o observador e a fonte da luz. Essa hipótese tem profundas conseqüências, dentre elas, o fato de que o tempo flui de maneiras diferentes para observadores em movimento com velocidades diferentes, e que os padrões de comprimento também serão diferentes para obser-

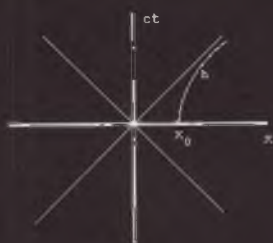


FIGURA 3

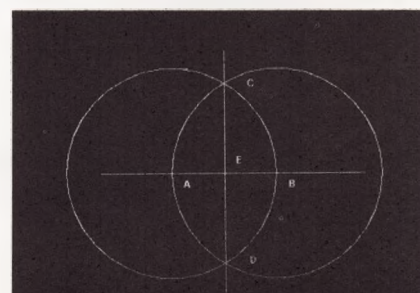


FIGURA 4

vadores diferentes. Isso pode ser facilmente entendido com a ajuda do experimento imaginário da figura 1. Um trem em movimento leva em seu interior um aparato que consiste em uma lanterna montada no chão, um espelho no teto e uma célula fotoelétrica também montada no chão. Há dois observadores munidos de relógios próprios, um dentro do trem, e outro fora, parado na estação. O experimento consiste em acionar a lanterna e medir o tempo necessário para que a luz vá do chão ao teto e do teto ao chão novamente. O observador dentro do trem vê uma trajetória vertical, e mede o tempo necessário para a luz percorrê-la como sendo $\Delta t_1 = 2l/c$. O observador de fora do trem vê outra trajetória, como mostra a figura 1, mas para ele a luz viaja com a mesma velocidade c . O tempo que o observador de fora mede será dado por $\Delta t_2 = 2l'/c$. O observador que está fora do trem medirá um intervalo de tempo maior do que o observador que está dentro! Lembrando que a velocidade é a razão entre o espaço percorrido e o intervalo de tempo, ambos os observadores somente poderão concordar quanto à velocidade da luz se seus padrões de comprimento também se alterarem.

Todos esses dados levaram o matemático H. Minkowski a propor uma revisão no esquema newtoniano do tempo e espaço, que consistia basicamente em agregar o tempo como uma coordenada, em pé de igualdade com as coordenadas espaciais usuais, e os movimentos de todos os corpos seriam agora descritos por essas quatro coordenadas, e o espaço formado por elas receberia o nome de espaço-tempo. Os eventos desse espaço-tempo seriam caracterizados por quatro coordenadas (x, y, z, ct) , as três espaciais usuais mais o tempo multiplicado por c . A figura 2 mostra o aspecto de um espaço-tempo onde se considera apenas uma das direções espaciais, no caso, x . As retas s e t correspondem respectivamente a uma partícula parada num dado ponto e a uma outra em movimento com velocidade constante. Note que a linha a 45 graus corresponde ao limite de velocidade desse espaço-tempo, ou seja, corresponde ao movimento de uma partícula à velocidade da luz. Temos três regiões distintas nesse espaço-tempo, a primeira, I, corresponde a pontos que não podem se conectar com a origem por troca de sinais, já que isto implicaria sinais com velocidades superiores à da luz. A região II corresponde à linha cheia, denota o limite da região onde o contato é possível. Em toda a região III esse contato também é possível. Mesmo com padrões de tempo e espaço diferentes para observadores diferentes, há certas quantidades invariantes, quantidades que terão sempre o mesmo valor independentemente do observador e de seu estado de movimento. Uma delas é a função intervalo, que é definida para dois pontos e dada por

$$(\Delta S)^2 = (\Delta x)^2 - (c\Delta t)^2,$$

onde Δx e Δt são respectivamente a diferença entre as coordenadas x e t dos pontos em questão. As regiões I, II e III podem ser

caracterizadas pelos seus $(\Delta S)^2$ em relação à origem, que respectivamente são $(\Delta S)^2 > 0$, $(\Delta S)^2 = 0$ e $(\Delta S)^2 < 0$.

Uma partícula que não está sujeita a força alguma seguirá uma trajetória que corresponderá a uma linha reta no espaço-tempo. Nesse caso, obviamente, basta conhecermos as posições e velocidades iniciais para prevermos a trajetória, que será independente da partícula. Podemos perguntar o que as linhas retas têm de especial nesse caso. Sabemos que no espaço usual as linhas retas são as linhas de menor comprimento entre dois pontos, linhas estas chamadas na geometria de geodésicas. O análogo do comprimento no espaço-tempo é a função intervalo, mas a presença do sinal “-” em sua expressão altera o caráter das geodésicas, que podem passar a ser as linhas de máximo intervalo. De qualquer forma, as linhas retas seguirão sendo as geodésicas do espaço-tempo.

Consideremos agora o movimento de uma partícula acelerada, representada na figura 3 pela curva h . A curva h corresponde à trajetória de uma partícula sujeita a um campo gravitacional constante, como o campo da superfície da Terra por exemplo, inicialmente parada no ponto x_0 . Esta será a trajetória de qualquer partícula com as mesmas condições iniciais nesse campo gravitacional. Segundo Einstein, o campo gravitacional corresponde de fato a alterações no espaço-tempo, alterações tais que as geodésicas deixariam de ser as linhas retas e passariam a ser como por exemplo as da figura 3. O que Einstein propôs foi que a presença de matéria alteraria a geometria do espaço-tempo de maneira tal que a trajetória de uma partícula sujeita a um campo gravitacional corresponderia às geodésicas do espaço-tempo, da mesma forma que a trajetória de uma partícula livre corresponde às geodésicas do espaço-tempo da figura 2. Geodésicas que não são linhas retas são os primeiros indícios de que na presença de um campo gravitacional o espaço-tempo deve ter uma geometria não-euclidiana. Isso será esclarecido na próxima seção.

Antes de passarmos às discussões sobre geometria, encerraremos esta seção com a popular história dos dois indivíduos, um newtoniano e o outro einsteiniano, que observam do alto de um arranha-céu corpos que se movem em ziguezague nas ruas. O newtoniano concluiria que há forças atuando sobre os corpos, enquanto que o einsteiniano diria que o terreno é acidentado.

Geometria do espaço-tempo

Há mais de 2.000 anos, Euclides (330 - 275 a.C.), de Alexandria, escreveu um tratado em treze livros chamado *Elementos*. Nove desses livros são dedicados à geometria plana e espacial, e os quatro restantes, à teoria dos números. Sobre o autor desses livros se sabe muito pouco, inclusive sendo ele frequentemente confundido com seu predecessor Euclides de Megara. Seus livros contêm os trabalhos que estabeleceram as bases da geometria, e muitos permanecem válidos até hoje, mas é natural que depois de mais de vinte séculos eles sejam passíveis de modificações. Nesta

seção iremos apresentar algumas dessas modificações, e para isso vamos introduzir as bases dos trabalhos de Euclides. Antes de iniciarmos as discussões sobre modificações dos trabalhos de Euclides, convém lembrar que a geometria euclidiana ainda é usada cotidianamente. Mesmo tarefas extremamente sofisticadas baseiam-se nos trabalhos de Euclides. Como exemplo, citemos as viagens espaciais das décadas de 1960 e 1970. Certa vez, quando perguntado da base da terra sobre sua trajetória, o comandante de uma das missões disse que Isaac Newton os conduzia pelo espaço. Seguramente Euclides de Alexandria também os conduzia.

Euclides baseou seus trabalhos em cinco postulados, formulados em termos de idéias que seriam familiares a todos. São eles:

- I. Uma linha reta pode ser traçada entre quaisquer dois pontos.*
- II. Um segmento de reta pode ser estendido continuamente numa linha reta.*
- III. Um círculo pode ser traçado com qualquer raio e tendo como centro qualquer ponto.*
- IV. Todos os ângulos retos são iguais entre si.*

Esses quatro postulados iniciais são relativamente óbvios. O mesmo não pode ser dito do quinto, que como veremos é o postulado sujeito a modificações. Sobre o quarto postulado, é importante dizer que os postulados I, II e III nos permitem construir de maneira única ângulos retos em qualquer ponto. A figura 4 mostra-nos como consegui-los. Inicialmente, traça-se uma reta s e escolhe-se dois pontos distintos A e B desta. Traçam-se agora dois círculos com centros em A e B de tal forma que eles se interceptem em dois pontos, D e C na figura 4. Traçando-se a reta t pelos pontos D e C, esta interceptará s no ponto E. As retas s e t formaram quatro ângulos retos em E. Note que nessa construção foi usado apenas o fato de que uma reta pode ser traçada entre quaisquer dois pontos e que círculos de qualquer raio podem ser traçados com qualquer centro. O procedimento da figura 4 é de fato uma consequência do famoso teorema *pons asinorum* de Euclides, que estabelece um



fundamental resultado sobre os triângulos isósceles.

Com esses quatro postulados iniciais, pode-se introduzir dois conceitos fundamentais. O primeiro é a distância entre dois pontos. Munidos de um segmento de reta p , que será usado como padrão de comprimento, podemos, baseados nos dois primeiros postulados, introduzir de maneira simples o conceito de distância entre dois pontos A e B. Com o postulado I, traçamos uma reta unindo A e B. O postulado II garante que a reta AB pode ser subposta por um certo número de segmentos padrão p justapostos contiguamente. Esse número de segmentos será o comprimento da reta AB, e portanto a distância entre os pontos A e B. A partir do conceito de distância entre dois pontos podemos introduzir também a noção de comprimento de uma linha, não necessariamente reta. Consiste em aproximar a linha por uma poligonal e somar o comprimento de cada segmento dela. À medida que aumentamos o número de segmentos da poligonal, a soma convergirá ao valor do comprimento da linha real. É importante notar que esse simples procedimento, descrito em duas frases, não estava disponível para Euclides. Seus detalhes só foram completamente entendidos na época de Newton! Também admitiremos que existam procedimentos que nos permitam determinar ângulos entre dois segmentos de reta.

Podemos agora retornar ao quinto postulado. Existem várias formulações equivalentes desse postulado, conhecido como p “postulado das paralelas”. Com o propósito de introduzi-lo, consideremos o esquema da figura 5. Uma linha reta u intercepta outras duas s e t formando-se os ângulos α_1 e β_1 num dos lados e α_2 e β_2 no outro. Por construção, sa-

bemos que $\alpha_1 + \alpha_2$ e $\beta_1 + \beta_2$ são ambos iguais a 180 graus. O postulado das paralelas garante que

V. *Se a soma dos ângulos de um certo lado ($\alpha_1 + \beta_1$ ou $\alpha_2 + \beta_2$) for diferente de 180 graus, as retas s e t se estendidas arbitrariamente se encontrarão num certo ponto, no lado correspondente ao de menor soma de ângulos.*

Se a soma for exatamente 180, as retas s e t não se encontrarão em ponto algum, e estas serão então paralelas. Por construção, a paralela é única. Note que para afirmarmos que as retas não se encontram em ponto algum, temos de prolongá-las *ad infinitum*.

Durante séculos, tentou-se provar que o postulado das paralelas decorria dos quatro primeiros postulados. Gregos, árabes e vários matemáticos do século XVII dedicaram-se exaustivamente a esses intentos, e não obtiveram êxito. A razão disso é que de fato o quinto postulado é independente dos quatro primeiros, como foi mostrado no século XVIII. Para mostrar tal independência, consideraremos um modelo onde se verificam os quatro primeiros postulados, mas não o quinto. O modelo é mostrado na figura 6. Consiste em um “mundo” plano, onde os padrões de comprimento diminuem de tamanho quando nos afastamos do centro. Para um habitante desse mundo, tal diminuição dos padrões de comprimento são imperceptíveis, ele não

tem acesso a referências externas ao seu mundo plano. Note que apesar desse mundo estar contido num círculo de raio finito quando olhado do nosso, seus habitantes diriam que a distância entre o centro e qualquer ponto da borda do círculo seria infinita, já que os padrões de comprimento se encolheriam de tal maneira ao se aproximarem da borda que seria necessário um número infinito deles para sobrepor uma reta que unisse o centro a qualquer ponto da borda.

Um habitante desse mundo plano não hesitaria ao construir uma reta entre dois pontos. Sabemos que uma reta é a linha de menor comprimento entre dois pontos, mas o fato de o padrão de comprimento diminuir ao se afastar do centro terá consequências curiosas. Por exemplo, a menor distância entre os pontos A e B da figura 7 corresponde à linha cheia, e não à linha tracejada. Vemos que as geodésicas desse mundo plano não são retas quando vistas do nosso mundo! Isso pode ser entendido se atentarmos ao fato que a linha tracejada está, em média, mais distante do centro do que a linha cheia, e portanto seria necessário um maior número de padrões de comprimento para superpô-la. De fato, nosso modelo de mundo plano foi concebido de maneira que as geodésicas sejam arcos de círculo, com exceção dos pontos pertencentes aos diâmetros, para os quais as geodésicas continuam sendo retas quando vistas de fora.

Não é difícil mostrarmos que nosso modelo satisfaz os quatro postulados iniciais. Como vimos, podemos traçar uma geodésica entre quaisquer dois pontos pertencentes ao mundo plano, mesmo que essas geodésicas não tenham o aspecto de linhas retas se vistas de fora. Também um segmento de geodésica pode ser continuamente estendido, e assim

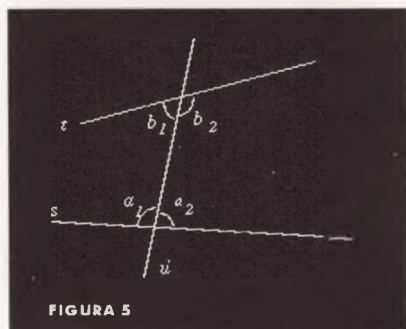


FIGURA 5



FIGURA 6

verificamos os dois primeiros postulados. Quanto ao terceiro postulado, também é simples verificar que podemos traçar círculos com quaisquer raio e centro. Como os círculos são linhas onde todos os seus pontos estão a uma mesma distância (raio) do centro, não esperaríamos círculos com aspectos usuais, a não ser que o seu centro coincida com o ponto O. Com esses círculos é possível definirmos ângulos retos em qualquer ponto de nosso modelo, e temos finalmente o quarto postulado também verificado.

O curioso é mostrar como o quinto postulado não é mais verificado. Consideremos a figura 8. A pergunta que fazemos é a seguinte. Qual seria a paralela à reta s ? Bem, o quinto postulado diz-nos como construir uma paralela. Seguindo-o, chegaríamos à reta t . Mas tomemos por exemplo a reta u . Ela também não intercepta a reta s . Mas pelo quinto postulado ela deveria interceptar, como podemos verificar atentando aos ângulos α_1 , α_2 , β_1 e β_2 , presentes no postulado V. É evidente que o nosso modelo não verifica o postulado das paralelas, mesmo verificando os quatro primeiros, o que nos mostra que o quinto postulado não é consequência dos quatro primeiros. Esse é o primeiro exemplo de uma geometria não-euclidiana. Para os habitantes desse mundo, a geometria euclidiana não se aplicaria para as tarefas mais simples. Como exemplo, somaremos os ângulos internos de um triângulo construído por geodésicas, o triângulo ABC da figura 9, por exemplo. O ângulo ABC é um ângulo reto, já os ângulos BAC e BCA são zero! Isso nos dá uma soma de 90 graus para os ângulos internos desse triângulo.

Em nosso exemplo, vimos que o quinto postulado é violado porque existem outras

paralelas, isto é, mesmo a soma dos ângulos α_1 e β_1 sendo diferente de 180 graus, as retas não se encontram. Há um outro exemplo, onde o quinto postulado é violado porque não há nenhuma paralela, mesmo que a soma seja 180. É o caso da superfície da esfera. Na superfície da esfera, as geodésicas sempre são segmentos de meridianos. Partindo de um meridiano então, pelo postulado V, construiríamos uma paralela que seria outro meridiano. Mas dois meridianos certamente se encontram em pontos diametralmente opostos, e portanto não podem ser paralelos. Nesse caso, pode-se construir um triângulo cuja soma dos ângulos internos seja de 270 graus. Basta pegarmos o equador e dois meridianos perpendiculares. Tanto a superfície da esfera como o nosso mundo bidimensional anterior são exemplos de espaços curvos, espaços onde a geometria não é a euclidiana. Os espaços onde a geometria é a euclidiana por sua vez são chamados de chatos.

Nossa finalidade é mostrar que na presença de matéria, o espaço-tempo se comporta como um espaço curvo devido ao campo gravitacional. Para isso, devemos ser capazes de identificar um espaço curvo. Uma maneira de fazê-lo é a seguinte (veja fig. 10). Construa um triângulo a partir de três geodésicas. Em um dos lados do triângulo, trace um segmento de reta que o intercepta num dado ângulo. Transporte esse segmento sobre o lado de maneira que o ângulo permaneça constante. Ao chegar a um vértice, reinicie o processo pelo novo lado, conservando agora o novo ângulo. Isso deve ser feito até que o segmento volte ao ponto de origem. Se o segmento voltar com o mesmo ângulo que ele partiu, para qualquer triângulo e para qualquer ângulo inicial, o espaço será chato, caso contrá-

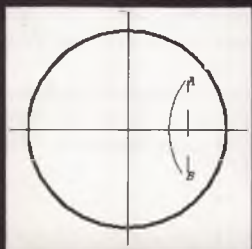


FIGURA 7

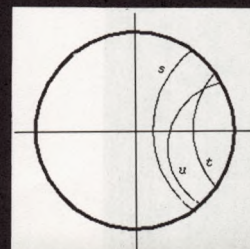


FIGURA 8

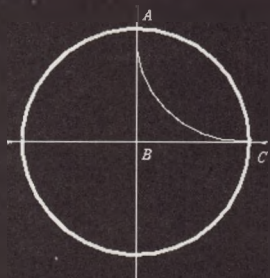


FIGURA 9

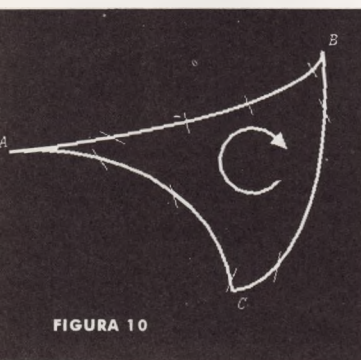


FIGURA 10

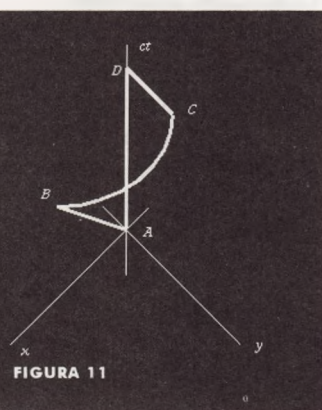


FIGURA 11

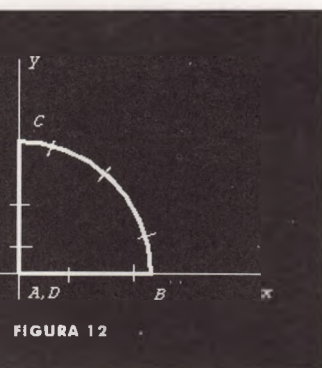


FIGURA 12

rio, será curvo. Podemos verificar isso para o nosso mundo bidimensional e para a superfície da esfera. Exemplos de espaços chatos são o plano usual e a superfície do cilindro. Esse procedimento permanece válido se, no lugar do triângulo, escolhêssemos qualquer outro polígono geodésico, isto é, um polígono cujos lados são geodésicas.

Vamos mostrar que o espaço-tempo na presença de um corpo de grande massa, de acordo com a teoria de Einstein, apresenta uma geometria não-euclidiana. Para isso, mostraremos que existe um polígono geodésico para o qual o transporte descrito no parágrafo anterior acusará uma "curvatura". Considere um espaço-tempo com um corpo material de dimensões desprezíveis situado na origem espacial ($x = 0, y = 0, z = 0$). A idéia é que uma partícula se movendo sob a ação do campo gravitacional desse corpo seguirá geodésicas no espaço-tempo. Consideremos então os seguintes movimentos (veja fig. 11). A partícula inicialmente se encontra na origem A, e é lançada na direção x até atingir uma distância máxima R (ponto B na fig. 11). A segunda trajetória corresponderá à partícula orbitando o corpo, trecho BC na figura 11. Depois, consideremos a partícula caindo sobre o corpo, trecho CD. Nosso polígono geodésico já possui três lados, correspondentes à partícula subindo, orbitando e caindo. Poderemos fechá-lo considerando a trajetória AD, correspondente à partícula em repouso na origem espacial. É simples agora verificarmos que esse espaço-tempo, caracterizado pelas geodésicas da figura 11, necessariamente é curvo, ou seja, sua geometria não é euclidiana. A figura 12 mostra o polígono da figura 11 visto a partir do eixo t , onde se pode ver melhor que ao transportarmos um segmento de reta como descrito acima concluiremos que tal espaço-tempo é curvo.

Chegamos assim ao nosso objetivo, mostramos que o espaço-tempo na presença de um corpo material tem uma geometria não-euclidiana, tendo como hipótese que uma partícula se movendo sob ação de um campo gravitacional segue as geodésicas do espaço-tempo.

Alberto Saa é professor e pesquisador do Instituto de Física da USP.

Leituras sugeridas

A bibliografia sobre gravitação e geometria não-euclidiana é riquíssima. Aqui apresentaremos algumas poucas obras, que se destacam pela simplicidade e facilidade em encontrá-las.

Um tratado elementar e lúcido sobre a teoria da gravitação de Einstein e de suas implicações cosmológicas pode ser encontrado em: M. V. Berry, *Principles of cosmology and gravitation*, IOP Publishing, Londres, 1989.

Uma descrição profunda e clássica das idéias apresentadas aqui está disponível, para leitores com conhecimentos de análise superior, na obra: A. Weyl, *Space time matter*, Dover, Nova York, 1952.

Para os aspectos da geometria, uma leitura extremamente agradável e de requisitos mínimos será: H. S. M. Coxeter, *Introduction to geometry*, John Wiley, Nova York, 1969.

Aspectos históricos do desenvolvimento da geometria não-euclidiana e da teoria da gravitação são discutidos respectivamente em: R. Bonola, *Non-euclidean geometry*, Dover, Nova York, 1955; e H. Reichenbach, *From Copernicus to Einstein*, Dover, Nova York, 1980.

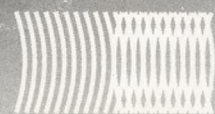
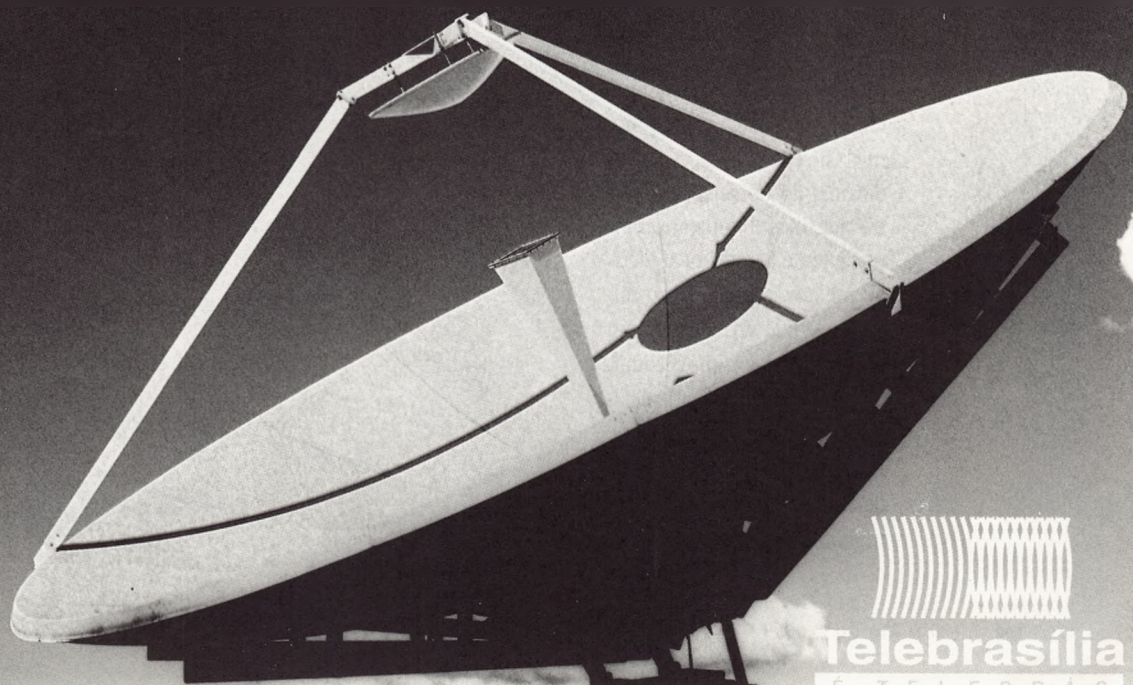
TELEBRASÍLIA

UM ÓTIMO EXEMPLO DO QUANTO A HUMANIDADE É CAPAZ DE EVOLUIR

DESDE A INVENÇÃO DO TELEFONE, AS
TELECOMUNICAÇÕES NÃO PARARAM DE SE
DESENVOLVER. A TELEBRASÍLIA, COM O
APOIO E A DETERMINAÇÃO DA TELEBRÁS,
SOUBE ACOMPANHAR ESSA EVOLUÇÃO.

HOJE, A CAPACIDADE DA TELEBRASÍLIA EM
ENCONTRAR SOLUÇÕES MODERNAS E DE
ALTA TECNOLOGIA É UM EXEMPLO DO QUE
A HUMANIDADE É CAPAZ DE FAZER.

E UM ORGULHO PARA TODOS NÓS.



Telebrasília
é telecomunicações

COSMOLOGIA

Conhecer o funcionamento do universo é papel fundamental da ciência, e a cosmologia vem contribuir de forma intrigante para que novas descobertas sejam feitas.

MÁRIO NOVELLO

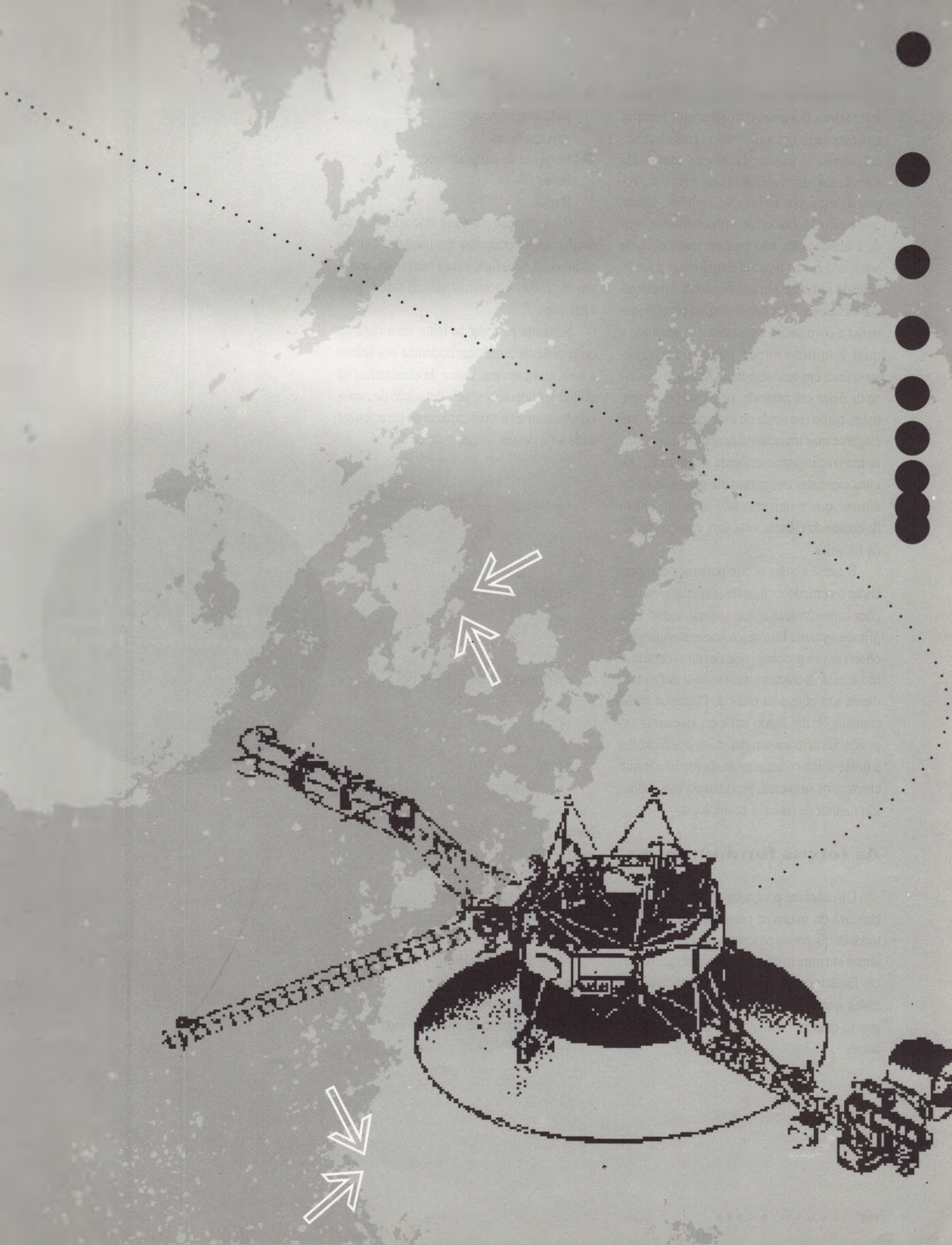
ILUSTRAÇÃO ANA LÚCIA POMPEU

Ao final dos anos 1930, uma espetacular observação astronômica provocou uma mudança notável na história do pensamento.

Foi quando, em um dos momentos mais fantásticos da experiência humana, os astrônomos detectaram evidências de que o universo como um todo parecia sofrer um movimento único, coerente, solidário, um processo global de expansão. Um fenômeno anunciado fantasticamente como tal foi posteriormente comprovado, sendo consolidado por outra observação cósmica realizada na década de 1960.

Se, por um lado, essas experiências produziram uma enorme mudança na astronomia, isto é, em nossa visão tradicional do universo, por outro lado, elas eliminaram completamente a tradicional idéia, ou melhor, o preconceito milenar, de que vivemos em um universo estático, imóvel, imutável, desprovido de uma dinâmica intrínseca. Mais ainda, elas possibilitaram a formação desta nova, maravilhosa e intrigante ciência: a cosmologia.





Para entendermos o alcance completo da frase acima, devemos primeiramente lembrar que essa estrutura *universo* era então tratada, até mesmo no interior da ciência, como nada mais do que um sinônimo de *uma grande porção de espaço e tempo*. Supunha-se, assim, que a ciência, por estar umbilicalmente ligada à observação, não poderia tratar daquele *mito*, isto é, não poderia transformar a totalidade do universo em um objeto de investigação científica. Esse quase-dogma parecia sustentar a corriqueira argumentação segundo a qual o mundo nunca poderia ser *experienciado* em sua totalidade. Assim, o universo da física era pensado, pelos próprios cientistas, como resultado de uma idealização, um elegante mas inacessível produto de uma certa teorização inconsequente do mundo. Alguns cientistas chegavam até mesmo a ousar afirmar que o universo não seria um objeto de estudo da ciência, mas sim, e por tradição, da filosofia.

É nesse contexto que podemos compreender o verdadeiro alcance daquelas observações astronômicas acima mencionadas. Pela primeira vez na história, o homem conseguia observar um processo que deveria ser atribuído a essa totalidade, tornando-a definitivamente um objeto da ciência. Podemos então concluir, de um modo enfático, que essas experiências arrancaram das mãos dos filósofos a posse sobre o discurso dessa totalidade que chamamos universo, produzindo esta extensão natural da física: a cosmologia.

As forças fundamentais

Um notável progresso em nosso conhecimento da natureza permitiu-nos sintetizar todos os diferentes processos de interação existentes em uma mistura de somente quatro forças fundamentais. Estas podem ser caracterizadas quer por suas intensidades de acoplamento quer por seu alcance de ação. Assim, temos:

❶ Interações de longo alcance:

- eletromagnéticas,
- gravitacionais.

❷ Interações de curto alcance:

- fortes,
- fracas.

Com relação às suas intensidades de acoplamento, podemos enumerá-las em seqüência, da mais forte para a mais fraca, como segue: forte, eletromagnética, fraca, gravitacional.

Somente para dar ao leitor uma idéia da origem dessa seqüência podemos nos referir a uma numerologia, capaz de caracterizar as diferentes interações, pela definição de quantidades adimensionais capazes de caracterizar cada uma dessas forças, a saber:

$$\bullet \text{ gravitação: } \frac{G_N}{hc} M_p^2 \sim 10^{-38}$$

$$\bullet \text{ fraca: } \frac{g_w M_e^2 c}{h^3} \sim 10^{-12}$$

$$\bullet \text{ eletromagnética: } \frac{e^2}{hc} \sim 10^{-2}$$

$$\bullet \text{ forte: } \frac{g_s^2}{hc} \sim 10$$

onde:

- G_N — constante de Newton
- M_p — massa do próton
- h — constante de Planck
- g_w — constante de Fermi
- M_e — massa do elétron
- e — carga do elétron
- c — velocidade da luz
- g_s — constante de interação forte

... vivemos uma fase de expansão global.

Segue então que as forças nucleares (fortes e fracas) de alcance pequeno (da ordem de 10^{-12} cm) não devem desempenhar um papel importante em escalas cosmológicas (cf. adiante, entretanto); como, em média, o universo é constituído de estruturas (como átomos) que são neutras e, como não parece existirem campos eletromagnéticos intensos extragaláticos, resulta que a força gravitacional — precisamente a mais fraca — por ser sempre atrativa¹ é aquela que domina o cenário cosmológico: aquela que determina a estrutura em larga escala do universo.

Gravitação

Segue da observação acima que, se pretendemos gerar um modelo do universo devemos preliminarmente voltar nossa atenção para conhecer as propriedades da força gravitacional. Isto é: uma teoria da gravitação fundamenta uma cosmologia. No século XX, a Teoria da Relatividade Geral (TRG) do físico alemão Albert Einstein veio substituir mais de trezentos anos de dominação da tradicional teoria do inglês Isaac Newton. Na TRG a gravitação está intimamente ligada à estrutura do espaço-tempo (ET). A influência da matéria-energia é sentida por meio da variação da curvatura do espaço-tempo. Isto é, quanto mais intenso um campo gravitacional maior a alteração no ET, em suas propriedades métricas.

A teoria: Refundamentação da cosmologia

A cosmologia, neste século, passou por três momentos notáveis que podemos esquematicamente caracterizar por três etapas que, por razões de simplicidade, iremos denominar:

- fase matemática,
- fase astrofísica,
- fase física.

A primeira fase caracterizou-se pela constituição, formação e fundamentação dos chamados *modelos cosmológicos*. Tratava-se então de gerar estruturas métricas, geometri-

as especiais dentro do quadro permitido pelo matemático alemão Riemann, produzindo soluções especiais das equações de Einstein da gravitação e que obedeciam a certos critérios gerais de simetria e simplicidade, consubstanciando hipóteses apriorísticas sobre o mundo.

Foi durante essa fase que apareceram praticamente todos os grandes modelos do universo que ainda hoje dominam o cenário da cosmologia, a saber: os modelos cosmológicos de Einstein, de Friedmann, de de Sitter, de Kasner e de Gödel.

A segunda fase procurou enfatizar os processos físicos de relevância cósmica (isto é, não-localizados) para produzir uma unidade na imensa quantidade de objetos observados no universo (tais como galáxias, estrelas, radiação, etc.). O ponto culminante dessa análise ocorreu com a aceitação, pela comunidade científica, da interpretação da radiação observada (em 1964) equivalente à de um corpo negro (isto é, fótons ou grãos de luz em equilíbrio termodinâmico) como se fora um processo global dependente de um movimento solidário da totalidade do universo em expansão. A consequência notável desse período foi a criação do *mundo astrofísico*, consubstanciado no modelo que viria a ser chamado, por um astrônomo brincalhão, de *Big Bang* — e que se tornou extremamente popular.²

A terceira fase, cujo impulso notável ocorreu ao longo dos anos 1980, viu surgir a possibilidade de uma estreita ligação entre o microcosmo (e as teorias que tratam dos constituintes fundamentais da matéria) e o macrocosmo. Essa interação se tornou possível na prática graças à existência de uma fase anterior do universo, em que este se encontrava extremamente condensado, possibilitando assim as condições para que outras forças de curto alcance pudessem competir significativamente com a gravitação na sua descrição global do mundo.

Nosso limitado propósito neste pequeno artigo não nos permite entrar em detalhes quanto ao desenvolvimento ulterior dessas fases. Limitaremos-nos a alguns comentários mais específicos envolvendo a moderna visão da cosmologia.

Evolução do universo

Em 1917, o cientista russo A. Friedmann propôs uma solução das equações de Einstein que regem a dinâmica do espaço-tempo particularmente intrigante: ela sugeria pensar o universo não como uma estrutura fechada, estática, mas como um processo, possuindo uma dependência temporal, contrariamente às idéias então aceitas. Foi necessário esperar mais de cinquenta anos para que essa proposta fosse, em um primeiro momento, aceita, e em estágio ulterior alçada à categoria de modelo padrão da cosmologia ao longo dos anos 1970.

Se por um lado esse modelo questionava a idéia de que o universo é a totalidade maior a que a física poderia ter acesso, ele contribuía para instituir uma consequência, gerando uma noção espantosa: a de que este nosso universo poderia ter tido um *começo*.

A hipótese do átomo primordial

No modelo de Friedmann o volume tridimensional do universo varia com o tempo. A observação do desvio espectral da luz recebida de galáxias distantes (interpretada como um processo global, um movimento coletivo de toda a matéria existente) leva efetivamente à conclusão de que o volume foi menor no passado: isto é, vivemos uma fase de expansão global. Na solução de Friedmann o volume mínimo atingido pelo universo é o limite extremo: *zero* — onde toda a matéria/energia existente estaria concentrada. Por alguma razão que a física desconheceria (e que o modelo padrão abdica de conhecer), dessa *singularidade* inicial teria explodido o mundo. Uma tal hipótese tem a segurança indesejável de não poder jamais ser contestada por nenhuma observação, visto que o ponto zero está fora e, para sempre, de qualquer acesso. Ao longo dos últimos anos fomos bombardeados pela mídia nacional e internacional a respeito da “comprovação pelos cientistas” desse cenário explosivo, o *Big Bang*. O leitor interessado nesse tema poderá consultar, entre outros, meu curso de Cosmologia da V Escola de Cosmologia e Gravitação, editado pela

World Scientific, Singapura, 1987.

A redução da cosmologia a esse modelo decorreu, em parte, de sua extrema simplicidade formal associada à observação do processo de expansão do universo. Entretanto, ao final dos anos 1980 vimos nascer modelos alternativos capazes de a um só tempo conciliar a ausência de singularidade inicial com a observação de um universo em expansão. Esse *universo eterno* apresenta uma série de respostas deixadas em aberto pelo modelo explosivo anterior.

Nos primórdios da expansão

Ao final dos anos 1980 a cosmologia começou a considerar, de um modo sistemático, alternativas àquela descrição explosiva capazes de gerar um estudo sistemático dos modos possíveis de criação do universo, isto é, sem entrar em contradição com as leis físicas. Para isso ela tem se valido de duas grandes aliadas:

- física das partículas elementares,
- física quântica da gravitação.

Com efeito, a existência de uma fase do universo na qual este estava extremamente condensado recoloca em questão o papel das diferentes forças de curto alcance na sua história global. A cosmologia recebeu nos últimos anos um formidável reforço teórico ao serem utilizadas, no exame de questões globais do espaço e do tempo, novas teorias das forças de curto alcance. Abriu-se assim um novo campo de estudos, no qual a cosmologia passou a ser encarada como um *laboratório teórico* para exame dos diferentes modelos competitivos das interações. Em verdade, foi-se além disso: ao procurarmos extrapolar o território de aplicação da física ao universo estamos testando de um modo direto a coerência interna dessa ciência.

Assim, podemos entender de onde vem a atração que possui a cosmologia: esta não somente possui uma razão de ser intrínseca, como também constitui



um sistema balizador da física.

Estamos acostumados, ao aprendermos como tratar fenômenos de propagação (como, por exemplo, ondas eletromagnéticas), a considerar condições assintóticas como uma parte fenomenológica à qual a teoria não tem acesso *a priori*. Consideramos, na física pré-relativista, essa inacessibilidade como *natural*. A Teoria da Relatividade Geral veio questionar de modo absoluto e imperativo essa normalidade, retirando do território proibido aquelas condições envolvendo propriedades do espaço-tempo a que não tínhamos acesso. Dito de outro modo, qualquer teoria da física que pretenda se envolver com processos dinâmicos que ocorrem no espaço-tempo (e dificilmente sobriam alguma coisa dessa ciência se ela não o fizesse) deve necessariamente providenciar um modelo cosmológico. Algum particular modelo sempre foi admitido implicitamente em todo o pensamento da física, mesmo na sua fase pré-relativista. Coube à cosmologia neste século explicitar essa necessidade até que os físicos de todas as áreas de estudo se convencessem dessa sua característica. Ao retirar a cosmologia da mão dos metafísicos, à semelhança do que a física havia feito com boa parte de seu território, os cientistas deste século terminaram uma longa batalha de conquista do pensamento humano.³

O mito do Big Bang

De um modo simples podemos sintetizar que o projeto da cosmologia consiste na descrição completa da totalidade que chamamos universo, tendo como base a física. Isto significa assumir, implicitamente, que o método científico utilizado nessa ciência é suficientemente poderoso para gerar uma visão completa e coerente de tudo-o-que-existe: o espaço, o tempo, a matéria e a energia em todas as suas manifestações.

Afinal, para que serve a cosmologia?⁴

Essa questão-título me parecia estar completamente respondida já há muito tempo na elaboração de qualquer programa científico. Entretanto, fui levado, para meu espanto, a me deparar com ela, recentemente, ao procurar dialogar com um agente financeiro de um banco federal ao qual eu me dirigira para negociar apoio à realização da VII Escola Brasileira de Cosmologia e Gravitação.

Pensei, em um primeiro momento de nossa conversa, que se tratava de uma genuína ignorância de meu interlocutor e, como tal, passível de um esclarecimento direto e fácil. Entretanto, com a evolução da nossa conversa, fui ficando mais e mais apreensivo, ao perceber que aquela questão era retórica: ele possuía já uma sua resposta. Essa foi precisamente a causa de minha apreensão: segundo ele, a ciência só pode ser financiada pelo Estado se tiver um claro, preciso e determinado objetivo tecnológico de aplicação

imediatista.⁵ Fiquei pensando em que nível deveria colocar a discussão que se seguiria.

Se me detenho aqui nessa questão é menos pelo fato em si, mas por ter mais tarde, ao longo do mesmo dia, descoberto que uma questão semelhante havia sido formulada em uma universidade. Pensei então que seria conveniente fazer alguns comentários a respeito e estimular o aprofundamento ulterior dessa análise.

Não irei aqui comentar sobre a relação ciência—tecnologia. Uma tal discussão passa por um exame da função social da ciência e me afastaria de meu limitado propósito aqui. Mas eu gostaria, sim, de comentar as razões que impulsionam um grupo de cientistas ao exame de questões cosmológicas.⁶ Em primeiro lugar aparece o desejo ingênuo, espontâneo, comum a todos os homens, de conhecer alguma coisa sobre essa totalidade maior que chamamos universo. Um pouco mais além nessa reflexão queremos saber da existência efetiva dessa totalidade como estrutura solidária. Isto é, saber se o que chamamos universo não passaria de simplificação linguística para o que denotaríamos como um processo compreensível em termos de *simples* adição de partes. Para o cientista, o conhecimento local não esgota sua capacidade de formular questões que envolvam algo mais do que suas teorias, ao produzirem uma fenomenologia particular, permitem alcançar. A física produz modelos de fenômenos que possuem inter-relação espaço-temporal e que permitem uma descrição unificada do mundo. Sua coerência interna deixa de ser requisito formal a ser perseguido ulteriormente e passa a ser uma realidade se ela permite descrever uma totalidade que comporta tudo-que-existe. Essa idéia de unidade não pode se limitar a uma pequena (ou grande) região do espaço-tempo, mas sim a *tudo* o espaço-tempo. E é uma das funções do cientista criar essa totalidade de modo crítico.

Isto é o que aprendemos da análise de Kant do desenvolvimento das ciências. Segundo outro filósofo alemão, Heidegger, Kant nos teria ensinado também que, anteriormente à formação de uma cosmologia científica, a ordenação do universo é feita de um modo espontâneo sem a necessidade de uma dependência formal com a física. O homem não parece saber resistir a essa necessidade interna de produzir uma unidade total, um universo. Ao longo da história humana essa função era exercida ora pela filosofia ora pela religião, gerando uma visão simplista do mundo e que estaria na base de todo o discurso, até mesmo o científico.

Compreendemos então porque os cientistas devem prover essa visão da totalidade universo e, conseqüentemente, para que serve a ciência da cosmologia: para que possamos substituir, no pensamento humano, aquela descrição espontânea simplificada e provisória sobre o que é o universo, que o homem produziu ao longo de sua história.

Com efeito, mesmo a física newtoniana não conseguiu retirar daquelas atividades extracientíficas o papel de formular um modelo de totalidade capaz de nos satisfazer. O gigantesco passo para frente dado pela física einsteniana produziu, neste século, condi-

ções para que a ciência possa, hoje, elaborar a idéia de universo dentro do seu quadro específico.

Esse avanço de nosso conhecimento no século XX permite esperar que, ao lançar as bases de uma completa fundamentação da cosmologia, tenhamos condições para trazer, para nosso conhecimento, a noção de universo que ainda nos falta, que ainda não completamos.

Essa é a tarefa maravilhosa que desafia os cosmólogos e que se encontra, tal como um grande oceano da verdade, à nossa frente.

Mário Novello é professor e pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas — CBPF/RJ.

Notas

1. Não se conhece nenhum dado observacional de matéria repulsiva.
2. A razão dessa popularidade se deveu menos a uma inequívoca demonstração científica do que a uma impressionante divulgação pela mídia de suas fantásticas conseqüências. O leitor interessado em uma história crítica desse período pode consultar o livro *Cosmos et contexte*, M. Novello, Masson, Paris, 1988.
3. Entretanto, contrariamente à arrogância demonstrada nas demais áreas, e possivelmente graças à sua especificidade, os cosmólogos continuaram dispostos a negociar com os antigos “senhores” uma comum *Weltanschauung*. Essa tarefa, quase autocontraditória (e que tem sido a maior causa das desconfianças generalizadas dos demais cientistas) passa por um total reexame da questão-maior do mecanismo de criação do universo. Essa é a tarefa que, na fronteira do pensamento científico, nos desafia.
4. Uma versão preliminar desse assunto foi apresentada em meu relatório à FAPESP correspondente à VII Escola de Cosmologia e Gravitação, Rio de Janeiro, 1993.
5. Nos últimos anos, e por vários motivos, o papel fundamental da ciência, isto é, procurar conhecer o funcionamento do universo, parece ter sido relegado a um plano inferior. Isto está sendo feito em nome de uma certa visão utilitarista da ciência e em aparente contraponto à tecnologia. Essa visão pequena e totalmente irreal pretende confundir o original projeto técnico-científico de valorizar acima de tudo o homem. Em uma sociedade capitalista, convivendo com a propaganda cotidiana do fim de uma era socialista (que nunca aconteceu), essa confusão tem um objetivo bem claro: a formação de uma geração de jovens incapazes de produzir pensamentos abstratos gerenciados por um duplo processo: de conformidade ao real (como conhecimento da natureza e não de fantasias) e de progresso do bem-estar humano, em seu sentido mais amplo.
6. Elas são basicamente as mesmas para os diferentes projetos científicos envolvidos no exame dos fundamentos de um dado setor da ciência.

Humanidades é uma revista que busca gerar novas

idéias e suscitar reflexões, destinada à um público

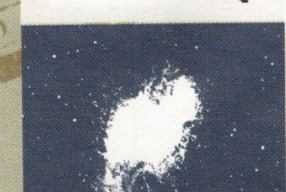
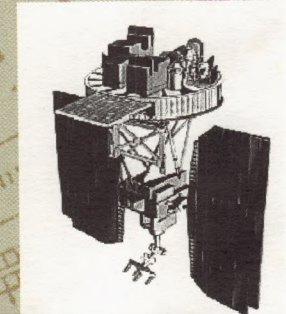
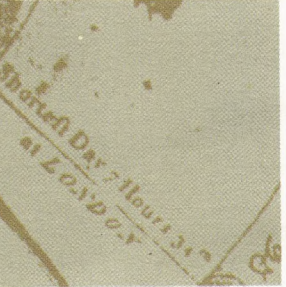
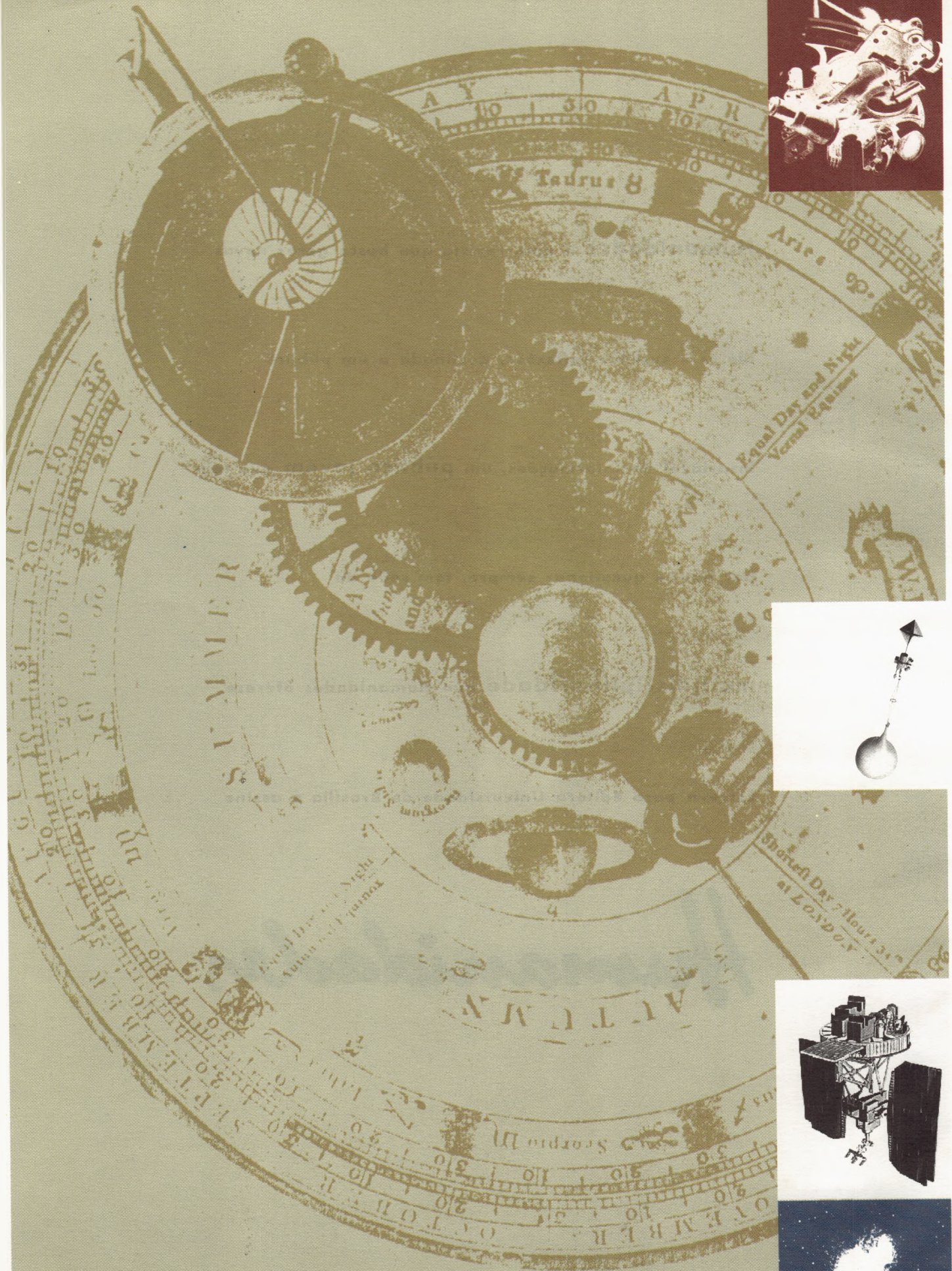
insaciável de informações, um público jovem que tem

por hábito questionar sempre, tem sede da

multidisciplinaridade que Humanidades oferece.

Escreva para Editora Universidade de Brasília e assine

Humanidades



A curiosidade humana, associada à pesquisa incessante de cosmólogos, levou à determinação da temperatura do universo — um conceito inimaginável até há pouco tempo.

Durante muito tempo a cosmologia foi tida como pouco séria. Os motivos eram muitos e variavam desde o preconceito a respeito do conhecimento obtido com a observação de fenômenos fora do alcance do homem, como os que ocorrem nas profundezas do universo, até, e fundamentalmente, a falta de respaldo experimental e observacional das teorias que tentavam explicar a origem e o destino do mundo material. A cosmologia às vezes era confundida com credices como a astrologia e outras relacionadas à eterna ambição humana de prever o futuro, o que colaborava para a ampliação desse preconceito. Essa visão perdurou até recentemente, por incrível que isso possa parecer. Somente a partir da terceira década deste século, aproximadamente, é que as coisas realmente começaram a mudar. Nessa época, o ame-

ricano Edwin Hubble, um advogado convertido à astronomia, descobriu a expansão do universo ou, em outras palavras, que as galáxias se afastavam umas das outras a velocidades enormes, o que era uma indicação clara de que o universo é dinâmico.

Mesmo assim, a mudança de atitude da humanidade, incluindo, naturalmente, os próprios cientistas, em relação à seriedade da cosmologia ainda era muito lenta e gradual. A crença reinante era de que os dados cosmológicos tinham uma incerteza tão grande, e obviamente uma enorme probabilidade de estarem errados, que era mais cômodo simplesmente ignorá-los do que confrontá-los com os modelos, como exige o método científico. A década de 1960 representou um salto fenomenal em relação à nossa visão do universo, e as décadas subseqüentes coroaram em definitivo a inauguração de uma nova era para a humanidade: o uso dos últimos recursos tecnológicos na procura das mais angustiantes e mais velhas questões intelectuais que desafiam o ser humano, que são a procura de sua identidade, a compreensão da natureza que o cerca, o porquê de sua existência e a origem e o destino de seu universo.

THYRSO VILLELA NETO

ILUSTRAÇÃO ANA LÚCIA POMPEU

TEMPERATURA DO UNIVERSO

A tecnologia, freqüentemente associada a aplicações que tentam resolver os problemas imediatos do ser humano e, portanto, aparentemente longe de satisfazer as curiosidades menos imediatas do seu pensamento, passa agora a contribuir de forma fundamental no esforço constante da humanidade em busca de respostas para suas dúvidas filosóficas. Computadores, criogenia e veículos espaciais passaram a fazer parte do vocabulário do cosmólogo, que agora é visto definitivamente como um cientista, na verdadeira acepção da palavra. A temperatura do universo, conceito até recentemente totalmente inimaginável e mesmo repugnante dentro da comunidade científica, é conhecida hoje com uma precisão melhor que um por cento. Pequenos desvios do valor esperado dessa temperatura em várias regiões do céu, que fornecem pistas sobre os processos físicos que proporcionaram o surgimento de estruturas como galáxias, estrelas, planetas e até mesmo o próprio ser humano, são conhecidas hoje com precisão da ordem de milionésimos de Kelvin (ou graus Celsius). Satélites, foguetes e balões vasculham os céus à procura das respostas que possam satisfazer a curiosidade humana. Finalmente, o homem empreendeu um esforço sem precedentes e sem barreiras religiosas na busca da satisfação de seus anseios intelectuais mais genuínos. A precisão dos dados cosmológicos melhorou vertiginosamente, a ponto de superar, em alguns casos, a de medidas de laboratórios!

O esforço intelectual produziu dúvidas a respeito do provável começo e desenvolvimento do universo. Foi realmente uma explosão que originou tudo? Como se formaram as estruturas que observamos hoje no céu, como estrelas, galáxias, aglomerados de galáxias, etc.? A teoria mais aceita atualmente é a que prega uma origem violenta para o universo: a Teoria da Grande Explosão, ou *Big Bang*, como foi popularizada, e que, junto com algumas outras hipóteses, forma o chamado modelo padrão que explica o início e o desenvolvimento do universo (vide artigo de C. A. Wuensche nesta edição). Contrapondo-se à Teoria do Universo Estacionário, essa teoria foi elaborada no final da década de 1940 por Ralph Alpher, Robert Herman e George Gamow. A Radiação Cósmica de Fundo (RCF) em microondas, que define a temperatura do universo, foi prevista no contexto dessa teoria. Ela seria nada mais do que o resquício de uma era em que altas temperaturas e densidades dominavam o universo, há aproximadamente quinze bilhões de anos. Essa fase do universo foi tão fantástica que toda a matéria existente hoje estava concentrada num volume da ordem de uma bolinha de pingue-pongue. A densidade dessa bolinha seria obviamente muito grande e a temperatura extremamente alta. Nesse cenário, a RCF era o éter que preenchia o universo na época da explosão e que continua a permeá-lo até os dias de hoje. A procura por tal radiação foi incessante. Por se espalhar pela região do espectro eletromagnético conhecida como microondas, ela é extremamente difícil de ser observada no solo, devido à influência da atmosfera terrestre, o que atrasou em muito a sua detecção. Aliado

a esse problema está o fato de ser um sinal extremamente débil, o que complica ainda mais as tentativas de observá-la.

A Radiação Cósmica de Fundo em microondas está compreendida entre comprimentos de onda cujas dimensões variam de quinhentos micrômetros (um micrômetro equivale à milionésima parte do metro) a cinquenta centímetros. Ela, para ser considerada de origem cosmológica, deve obedecer a uma lei da física conhecida como lei de Planck, ou de corpo negro, formulada no início do século pelo físico alemão Max Planck, que prevê uma forma exata de distribuição da intensidade da radiação em função do comprimento de onda, ou seja, para cada comprimento de onda, ou freqüência, está associada uma certa intensidade da radiação. Um único parâmetro, a temperatura, define essa distribuição. Corpo negro é um objeto teórico que se comporta como absorvedor e emissor ideal de energia; ele não reflete qualquer onda, apenas irradia energias características de sua temperatura. Essa lei reflete a existência de equilíbrio em um sistema. Assim, supondo-se que o universo primordial se apresentava em equilíbrio, espera-se que a RCF obedeça à lei de corpo negro apresentando a mesma temperatura em todas as regiões do céu, ou, em outras palavras, a mesma intensidade em todas as direções se for observada num mesmo comprimento de onda, ou freqüência. Medindo-se, por outro lado, a intensidade da radiação proveniente do céu em vários comprimentos de onda podemos montar o seu espectro, isto é, uma curva que mostra as intensidades da radiação em cada comprimento de onda, e, conseqüentemente, conhecer sua temperatura. É isso que foi feito pelos cosmólogos para definir a temperatura do universo. Pequenas variações dessa temperatura, da ordem de milionésimos de grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$), são esperadas para explicar o surgimento das estruturas que existem hoje no universo, de acordo com as leis físicas que conhecemos.

Essa radiação é o sinal na forma de onda eletromagnética que provém das regiões mais distantes do universo. Ele é oriundo de distâncias muito maiores que as dos quasares e das galáxias e, devido a isso, revela o passado mais remoto do Cosmo: permite que se tenham informações das condições físicas que reinavam no universo trezentos mil anos depois da explosão inicial. Somente a detecção de neutrinos ou grávitons, por exemplo, revelaria um passado mais remoto do universo. Se o Modelo Padrão estiver correto, a RCF provém de uma distância de aproximadamente quinze bilhões de anos-luz. Um ano-luz equivale à distância percorrida em um ano pela luz, que viaja a uma velocidade aproximada de trezentos mil quilômetros por segundo, ou um bilhão e oitenta milhões de quilômetros por hora. Isso equivale a aproximadamente 9,5 trilhões de quilômetros. Caso alguém fosse de Brasília a São Paulo viajando à velocidade da luz gastaria apenas três milésimos de segundo para cumprir a distância aproximada de mil quilômetros que separa essas duas cidades.

Com a expansão provocada pela explosão, a temperatura do universo foi diminuindo. Ela variou de dez trilhões de graus Celsius,

quando o universo tinha a idade de um décimo de milionésimo de segundo, passando por um bilhão de graus entre dois e dezessete minutos, quando houve a formação dos elementos químicos, 27 graus Celsius aos quarenta dias, quando se iniciou o processo de formação de galáxias, 240 graus abaixo de zero grau Celsius no primeiro bilhão de anos, até chegar hoje, quinze bilhões de anos depois da grande explosão, a 270 graus Celsius abaixo de zero, aproximadamente. Dessa forma, a radiação cósmica de fundo em microondas é o fóssil mais importante que se tem disponível para estudos cosmológicos. Ela quase foi descoberta, de forma indireta, em 1941, por Adams e Dunham, que descobriram várias linhas fracas de absorção presentes no espaço interestelar e que foram identificadas como sendo devidas à emissão das moléculas CH, CH⁺ e CN. No caso de CN, além do estado fundamental, foi identificada uma transição do primeiro estado rotacionalmente excitado. McKellar, usando esses dados sobre as populações desses dois estados, concluiu que a temperatura de excitação deveria ser de 2,3 Kelvin (K), sem atentar, porém, para a existência de um campo de radiação universal. Essa transição rotacional ocorre no comprimento de onda de 2,64 milímetros, que se situa próximo do máximo de intensidade da RCF. Somente em 1964 é que a RCF foi finalmente identificada, e mesmo assim de forma accidental, por Arno Penzias e Robert Wilson.

A história da descoberta da RCF é, no mínimo, curiosa. Em 1963, esses dois cientistas americanos, que trabalhavam nos Laboratórios Bell, começaram a preparar uma antena, que já não estava mais sendo usada para receber os dados do satélite Echo 1, para ser usada em observações radioastronômicas. A idéia era fazer medidas de intensidades de fontes cósmicas de forma a poder usá-las como padrão de referência em outros observatórios, além de um estudo sobre a radiação produzida pela própria Terra, que proporcionaria um melhor entendimento do ruído de fundo para observações astronômicas. Essa antena, na realidade, não era muito interessante para observações astronômicas, já que sua área útil era de apenas 25 m² e já havia radiotelescópios muito maiores em uso. Penzias e Wilson, que estavam apenas começando suas carreiras científicas, fizeram observações no comprimento de onda de 7,35 centímetros. Depois de subtrair todas as fontes conhecidas de sinais de rádio, sobrou um sinal extremamente fraco. Como não conseguiam entender esse ruído persistente, tentaram todas as alternativas possíveis para removê-lo, incluindo a expulsão de um casal de pombos que fizera seu ninho na antena e a limpeza de um certo “material dielétrico branco” depositado na mesma pelo distinto casal. Tudo em vão. O sinal era constante independentemente da região do céu observada e não sofria variações sazonais. Durante mais de um ano Penzias e Wilson tentaram de todas as formas eliminar o ruído e não conseguiram. Várias hipóteses foram cogitadas, incluindo uma possível influência da explosão de uma bomba nuclear em grande altitude em 1962. Essa explosão fez com que os cinturões de Van Allen ficassem repletos de partículas ionizadas. Uma vez que estes se encontram a uma grande distância da superfície terrestre, qualquer radiação que eles produzissem devido a esse efeito não poderia ser detectada facilmente. Mas, mesmo assim,

depois de um ano, qualquer radiação proveniente dessa região já teria sido consideravelmente reduzida.

No entanto, Penzias, conversando com Bernard Burke, do MIT, sobre outros assuntos, mencionou a ele o ruído inexplicável que, junto com Wilson, havia medido. Burke então relatou o trabalho que um grupo de cientistas da Universidade de Princeton estava fazendo, mais especificamente o trabalho teórico de Peebles, sobre a temperatura do universo, e o de Dicke, Roll e Wilkinson, que estavam justamente construindo um receptor para detectar a radiação, proveniente do início do universo, que define tal temperatura. Penzias telefonou a Dicke, em Princeton, e acertaram uma visita aos Laboratórios Bell. Dicke e seus colegas, nessa visita a Penzias e Wilson, convenceram-se de que as medidas eram na realidade o que eles estavam procurando: o valor da temperatura do universo! Concordaram então em publicar dois artigos independentes lado a lado no *Astrophysical Journal*, onde Dicke, Peebles, Roll e Wilkinson falavam da teoria, e Penzias e Wilson, de suas medidas, que chamaram de excesso de temperatura, e fizeram questão de excluir qualquer interpretação cosmológica para a origem do mesmo. Eles quiseram frisar que suas medidas foram feitas independentemente da teoria proposta pelo grupo de Princeton e o artigo deveria deixar isso bem claro. Porém, estavam satisfeitos pelo fato de que finalmente alguém havia dado uma explicação para suas medidas. Essa descoberta, considerada uma das mais importantes da cosmologia moderna, lhes valeu, em 1978, o prêmio Nobel de física e aumentou consideravelmente a credibilidade da teoria do *Big Bang*.

Como a medida de Penzias e Wilson, que representava apenas um ponto na curva de corpo negro, era insuficiente para provar que o que mediram era realmente a radiação que a cosmologia esperava, vários outros experimentos foram sendo realizados na tentativa de se “montar” tal curva. Um pouco depois da descoberta, o grupo de Princeton completou seu experimento e mediu um outro ponto da curva, que se mostrava de acordo com o previsto pela teoria. A tarefa para os cosmólogos, então, era medir o maior número possível de pontos. É interessante notar que, em 1966, trabalhos independentes de Field, Shklovsky e Thaddeus, seguindo uma sugestão de Woolf, apontaram para a existência de equilíbrio entre o CN e a radiação de fundo, já que não existia outro responsável pela excitação dessa molécula. Assim, percebeu-se que havia



FIGURA 1 PENZIAS E WILSON, GANHADORES DO PRÊMIO NOBEL DE FÍSICA DE 1978

realmente um ruído de fundo permeando o universo que era diferente de zero. A temperatura do universo hoje, medida com uma precisão incrível pelo satélite COBE, é de 2,726 K, ou seja, apenas 2,726 °C acima do zero absoluto ou aproximadamente -270 °C! O espectro da RCF medido pelo satélite COBE concorda com o espectro previsto pela lei de Planck com um desvio de 0,25%, ou seja, vinte e cinco partes em dez mil. Em cosmologia, nenhum outro parâmetro é conhecido com a precisão das

medidas da RCF. Logo, elas naturalmente ocupam um lugar de destaque nesse cenário científico. Qualquer teoria cosmológica tem que, necessariamente, levar em conta os dados relativos à temperatura do universo.

Na verdade, a concepção de que o universo é permeado por um ruído de fundo é bastante antiga, e os primeiros registros dessa idéia datam da época dos egípcios, que acreditavam que o azul do céu era consequência da reflexão da luz pela matéria distante do universo. Assim, surgiu a noção de que havia uma espécie de oceano primordial que banharia todo o Cosmo, que nada mais é do que hoje conhecemos como o ruído de fundo em microondas ou RCF. Os gregos, há 2.500 anos, começaram a fazer as primeiras observações cosmológicas. A visão aristotélica do universo passou pela Idade Média e perdurou até a Renascença. Para Aristóteles, o Criador colocou todos os corpos do universo em um estado perfeito e eterno de movimento. Não havia o vazio entre os corpos celestes; tudo era preenchido pela presença divina. A matéria era composta de quatro elementos: terra, água, ar e fogo. O éter preenchia o vazio e era o quinto componente do Cosmo. A procura desse éter se estendeu até recentemente, sendo que uma das tentativas mais famosas se deve a Michelson e Morley. Os tempos modernos rejeitaram a noção do éter, mas a RCF, de uma certa forma, comporta-se como tal, já que se trata de um campo de radiação eletromagnética que está presente em todo o universo.



FIGURA 2 SATELITE COBE

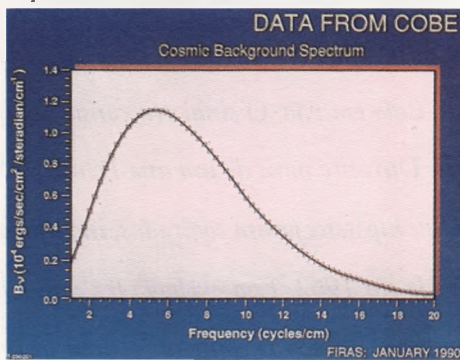


FIGURA 3 ESPECTRO DA RADIAÇÃO CÔSMICA DE FUNDO MEDIDO PELO COBE

O desenvolvimento tecnológico (e também teórico) tem proporcionado a aproximação de dois campos aparentemente bem distintos entre si: a física de partículas, que trata do mundo microscópico, com experimentos sendo feitos nos grandes aceleradores de partículas, e a cosmologia, que trata das maiores dimensões já vislumbradas pelo homem, realizando observações de regiões extremamente distantes e onde, geralmente, reinavam condições de energia que ainda não podem ser reproduzidas nos laboratórios terrestres. A energia das partícu-

las na época do *Big Bang*, por exemplo, era de mais de um bilhão de vezes maior do que a energia que pode ser obtida hoje no maior acelerador de partículas do mundo. Esse desenvolvimento pode ser atribuído ao grande empenho dos cientistas em construir máquinas cada vez mais sensíveis e poderosas para estudar tanto o mundo subatômico aqui na Terra quanto os constituintes mais longínquos do universo.

As observações da temperatura do universo

As medidas da temperatura do universo e de suas variações no céu empregam, basicamente, duas técnicas diferentes: a medida absoluta e a diferencial. Na primeira, compara-se a medida de uma fonte conhecida, no caso um recipiente contendo hélio líquido, cuja temperatura é de 4,2 K ($\sim -269^\circ\text{C}$), com a medida feita do céu. O valor obtido com a subtração dos sinais é a temperatura da região do céu que foi observada, já que a temperatura do hélio é conhecida. Assim, determina-se de forma absoluta a temperatura da região observada. Esse tipo de técnica é freqüentemente empregado nas observações do espectro da RCF. Nas medidas de isotropia da RCF, ou seja, da verificação de sua distribuição espacial, normalmente se utiliza um instrumento conhecido como radiômetro de Dicke, que compara duas regiões do céu separadas por um certo ângulo e registra a diferença entre as intensidades dos sinais, sem contudo comparar as medidas a uma referência interna conhecida. Dessa forma, sabe-se apenas a diferença entre as temperaturas e não a temperatura absoluta da região. Ambas as técnicas são largamente empregadas hoje em dia.

O sinal que caracteriza a RCF é extremamente fraco. A potência que recebemos aqui na Terra é da ordem de 10^{-18} watts, que, se comparada à de uma emissão típica recebida de uma estação de rádio transmitindo a cem quilômetros de distância, equivalente a 10^{-7} watts, é cem bilhões de vezes menor. Esse fato se traduz numa dificuldade técnica enorme para os experimentos que buscam estudar as propriedades da RCF, como seu espectro e sua distribuição angular. É possível, por esse número, ver claramente que qualquer sinal pode mascarar o sinal da RCF. Emissões de radares, de estações de rádio, de satélites, da própria atmosfera terrestre e de fontes cósmicas (Sol, Lua, estrelas, etc.) podem facilmente confundir e atrapalhar as medidas. Logo, é necessário um cuidado extremo para preparar e operar esses instrumentos. Para evitar esses problemas, os experimentos são realizados, em geral, no espaço, a bordo de balões, aviões, foguetes e satélites. Quando realizados a bordo de balões, aviões e foguetes, evita-se o Sol, voando à noite, e a Lua, voando em época de Lua nova ou observando o céu de forma a evitá-la totalmente. A emissão proveniente da nossa galáxia, a Via-Láctea, ainda é um problema em aberto para a astrofísica, apesar de estarmos quase no final do século XX. Como estamos situados dentro da Via-Láctea, a nossa

situação em termos observacionais é bastante prejudicada. Existem vários componentes da Via-Láctea que contribuem para atrapalhar as medidas: elétrons que se movem no espaço entre as estrelas; grãos microscópicos de poeira existentes no meio interestelar; grãos de poeira no Sistema Solar; e as próprias estrelas que compõem nossa galáxia. Até hoje não conhecemos em detalhes a emissão rádio oriunda da Via-Láctea e isso prejudica muito os estudos sobre a RCF, devido à grande área do céu onde é produzido esse sinal. Atualmente, há um grande esforço observacional no sentido de entender o espectro e a distribuição da emissão galáctica e, dessa forma, poder descontar sua influência nas medidas da RCF. Assim, para distinguir esses sinais do sinal da RCF se deve escolher cuidadosamente a freqüência de observação, procurando "janelas" no espectro eletromagnético nas quais o brilho dos objetos próximos seja mínimo.

Na verdade, quando se observa a RCF, o sinal que chega ao receptor é o somatório de vários sinais, onde o menor deles é o devido à RCF, que é quase como um ruído se comparado à intensidade dos demais. Chegam simultaneamente os sinais de fontes artificiais, que são bastante fortes, como as mencionadas acima, e os de fontes naturais, como, por exemplo, os devidos à emissão da própria Terra, que se comporta como um corpo negro a aproximadamente 300 K (27°C), da Lua (300 K), do Sol (6.000 K) e de várias outras. No entanto, dependendo do tamanho das fontes, esse problema pode ser solucionado. Fontes cósmicas que não sejam bem-definidas podem ter suas contribuições desprezadas quando as observações englobam grandes áreas do céu: a razão entre sua área e a área observada é pequena, de modo que a contribuição da fonte é "diluída" na observação. As observações realizadas com experimentos baseados no solo têm como grande preocupação a atmosfera terrestre e a Via-Láctea, sendo que a primeira é o fator predominante. A emissão atmosférica aumenta dez mil vezes quando passamos de uma altitude de 35 km, típica de vôos de balões, para o nível do mar. Ela é devida principalmente à emissão em microondas das moléculas de oxigênio e água presentes no ar. Logo, o sinal atmosférico passa a ser preocupante como um possível agente contaminador dos dados, já que boa parte de sua emissão se dá justamente na região do espectro eletromagnético em que se situa a RCF. Tenta-se efetuar as observações em altitudes elevadas, como montanhas, para minimizar o problema. Vários avanços teóricos foram conseguidos através dos dados obtidos com esses experimentos. Inicialmente, eles procuravam medir o espectro da radiação de fundo, depois sua polarização e, mais tarde, sua distribuição angular. O número maior de dados sobre o espectro dessa radiação foi obtido por intermédio de um esforço empreendido por grupos dos EUA e da Itália. Os experimentos eram realizados no topo da White Mountain (Montanha Branca) nos EUA. Já as medidas de polarização foram poucas e feitas pelos americanos na década de 1970. Somente após as medidas realizadas a bordo de balões é que foram efetuados experimentos no solo para

estudar a distribuição angular da radiação de fundo em microondas. Essas medidas foram realizadas no continente antártico, sendo que algumas delas no Pólo Sul geográfico, a três mil metros de altitude.

O advento da era espacial proporcionou um grande progresso para a astrofísica: tornou possível a observação de fenômenos físicos que ocorrem no universo e que não podem ser observados na superfície terrestre por causa da ação bloqueadora da atmosfera, que impede a chegada às suas camadas mais baixas de grande parte da radiação eletromagnética vinda do espaço. Por outro lado, é essa mesma ação que permite a existência de vida no nosso planeta. Os primeiros experimentos espaciais que estudaram a temperatura do universo foram realizados a bordo de balões estratosféricos e do avião U-2, que foi bastante utilizado durante a guerra fria como espião pelos americanos. Esse avião que fotografou, no início da década de 1960, os mísseis soviéticos instalados em Cuba, fato que quase deflagrou uma nova guerra mundial, foi o responsável por levar a vinte quilômetros de altitude, em 1974, um experimento científico que detectou de forma definitiva o efeito dipolo na RCF. Esse efeito mostrava que havia uma pequena diferença de temperatura entre duas regiões do céu diametralmente opostas, daí o nome dipolo. Um experimento a bordo de balão tem alguns pontos a seu favor: é relativamente barato, se comparado a foguetes e satélites, e pode ser preparado mais rapidamente. Porém, não consegue a mesma altitude de um foguete ou satélite nem o mesmo tempo de observação que este último proporciona. Em geral, os experimentos antes de serem embarcados em satélites voam a bordo de balões para serem testados e aperfeiçoados.

Um experimento realizado a bordo de balão sempre carrega consigo um lado aventureiro. Isso é facilmente explicado pela forma com que esse tipo de experimento é conduzido. Emprega, geralmente,

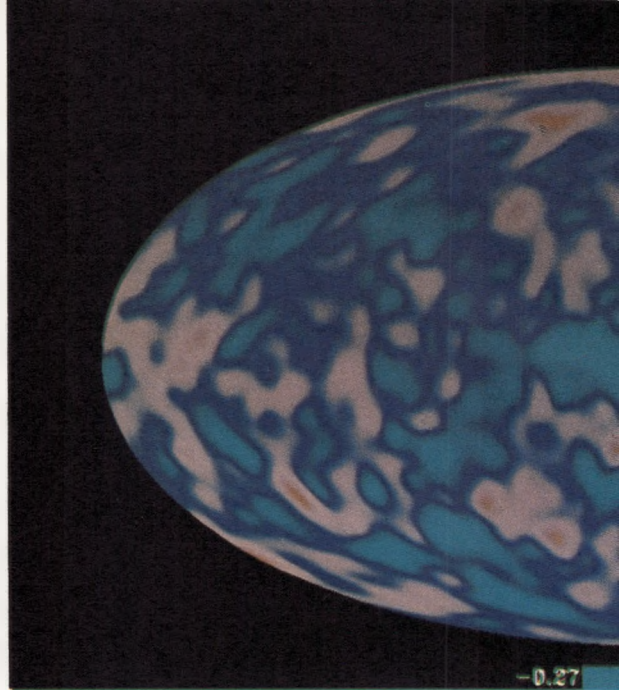
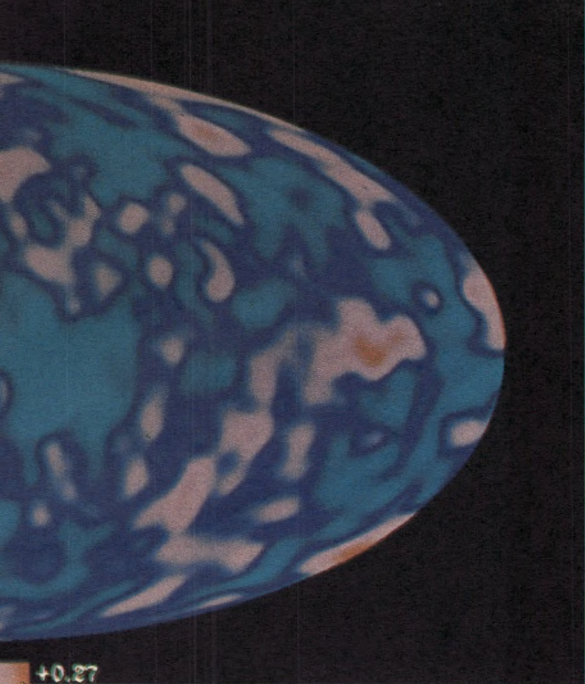


FIGURA 4 FLUTUAÇÕES NA TEMPERATURA DA RCF MEDIDAS PELO COBE

modernos equipamentos e mistura essa modernidade com um sonho antigo da humanidade, que é o de flutuar pelo ar sem a ajuda de motores, onde o imprevisível sempre está presente. O episódio a seguir ilustra bem esse espírito aventureiro. No dia 19 de novembro de 1982, em Cachoeira Paulista, SP, nas dependências do Centro de Lançamento de Balões do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais — INPE, decolava rumo a mais uma aventura em busca de dados para auxiliar a cosmologia um balão, levando consigo um experimento extremamente sensível. Sua sensibilidade era tal que ele era capaz de distinguir regiões do céu cujas temperaturas diferissem de milésimos de graus Celsius. Participavam desse experimento Philip Lubin, George Smoot, Gerald Epstein e eu. Tratava-se de uma colaboração científica entre a Universidade da Califórnia, em Berkeley, e o INPE. Esse instrumento incorporava significativos avanços tecnológicos na área de microondas. Operava na frequência de noventa gigahertz (um hertz é a frequência de uma oscilação periódica que se completa uma vez a cada segundo; um gigahertz equivale a um milhão de hertz) e era praticamente um protótipo do experimento DMR que voaria no satélite COBE sete anos mais tarde. Havia feito já dois vôos no Hemisfério



Norte e iria agora coletar dados no Hemisfério Sul, para ter a maior visão possível do céu.

O lançamento ocorreu de forma perfeita, assim como todo o voo. Os dados enviados às estações de telemetria chegavam com uma clareza incrível. O problema ocorreu exatamente quando foi decidido o término da missão, que havia sido um sucesso científico total. Era manhã do dia 20 de novembro, exatamente às 10h56m26s, quando o dispositivo que separaria o balão do experimento foi acionado. Depois de separado do balão, o experimento deveria voltar ao solo com o auxílio de um pára-quedas. O balão que leva esses experimentos à estratosfera, geralmente a altitudes que variam de trinta a quarenta quilômetros, é feito de plástico extremamente fino (da ordem de centésimos de milímetro de espessura) e é usado apenas uma vez, dada a deformação do material plástico. O balão é cheio de hidrogênio ou hélio que, por serem mais leves que o ar, fazem com que ele suba. Ao atingir a altitude de observação, seu diâmetro é da ordem de cem metros, o que equivale ao comprimento de um campo de futebol! Pois bem, acionado o mecanismo de separação nada aconteceu. O balão continuava preso ao experimento. O dispositivo de separação havia falhado. Foram feitas inúmeras ten-

tativas que fracassaram. O experimento continuava a mandar sinais de rádio, mas suas baterias, sabíamos, em breve não forneceriam mais energia e, conseqüentemente, perderíamos a localização da gôndola. Nada poderia ser pior: um experimento de cosmologia vagando sem rumo pelos céus do sudeste brasileiro...

Já era fim da tarde quando notamos os primeiros sinais de queda das tensões das baterias. Nossa esperança era que, com a chegada da noite, o balão perdesse altitude e caísse, já que a temperatura mais baixa faria com que o balão diminuísse de volume. Porém, nada garantia que ele efetivamente fosse cair; poderia simplesmente diminuir de altitude e continuar vagando pelos ares. Um avião da equipe de resgate não conseguiu visualizá-lo. À noite, perdemos o sinal de telemetria e a última informação confiável que dispúnhamos era de que o balão estava diminuindo sensivelmente de altitude. Nada mais poderia ser feito a não ser procurar por um sinal que é emitido automaticamente pelo sistema de localização 24 horas depois de lançado o balão. Esse sistema leva uma bateria independente que tem carga suficiente para fazer funcioná-lo por 48 horas. Na manhã do dia 21 de novembro um helicóptero e um avião partiram em busca da gôndola perdida. A procura foi inútil. A tragédia maior configurava-se. Tudo havia desaparecido! O desespero era total. Pelo menos a telemetria havia funcionado a contento e os dados haviam sido gravados em terra. O grande problema era, além da perda do equipamento, poder resgatar a fita que estava a bordo com os dados mais detalhados sobre toda a missão. A busca continuou por mais 72 horas e nada. Foram colocados avisos em aeroportos próximos da área da suposta queda, onde era oferecida uma recompensa de dois mil dólares a quem desse informações sobre o paradeiro da gôndola. Mais uma vez nada. Ainda tentamos várias excursões pela área nos meses seguintes que se mostraram igualmente infrutíferas.

O tempo passou e mais de dois anos depois do terrível acontecimento recebemos, nos Estados Unidos, um telefonema dos colegas do INPE informando que a gôndola havia sido localizada. Foi um misto de alegria e apreensão. Alegria porque, finalmente, haveríamos de saber onde nossa experiência havia aterrissado e como teria resistido a mais de dois anos no meio do mato. Os americanos insistiam que era uma selva! Apreensão porque havíamos



FIGURA 5 EXPERIMENTO DE BALÃO PARA MEDIR A TEMPERATURA DO UNIVERSO

trabalhado duro na análise dos dados de telemetria e estávamos ansiosos para verificar o conteúdo das fitas de bordo, que continham muito mais detalhes. A essa altura já havíamos publicado os resultados e qualquer informação que por-

ventura houvesse nos escapado seria terrível, particularmente as informações relativas à calibração do instrumento, que eram muito mais ricas nas fitas de bordo e de fundamental importância para a correta interpretação dos dados. Em fevereiro de 1985 chegamos ao Brasil, eu e Phil Lubin. Partimos imediatamente para o local onde o experimento havia sido encontrado. Alguns colegas do INPE se juntaram a nós na aventura.

A história de como a gôndola foi encontrada é bastante curiosa. O experimento desceu numa região próxima à cidade de Sorocaba, no interior do estado de São Paulo. Essa região se encontra em uma das áreas mais povoadas e bem-aquinhoadas do país em termos de acesso à informação e condições de infraestrutura, o que aumentava em muito o mistério de ninguém haver dado qualquer notícia do balão durante todo esse tempo. No entanto, o que aconteceu foi totalmente incompatível com essa realidade. A experiência desceu numa área do município de Tapiraí, SP. Era uma área de preservação ambiental, uma mata bem fechada. Já que o sistema de separação balão — gôndola havia falhado, o balão desceu junto com o experimento, de forma que a queda foi suave e ajudada pelas árvores da região. A experiência nem chegou a tocar no solo, tendo ficado pendurada em algumas árvores, o que garantiu sua total integridade. Ficamos sabendo dessa história depois, obviamente, de muito tempo. A pessoa que encontrou a gôndola, na realidade, fez tal achado alguns meses depois que a perdemos. Segundo ela, foi por volta de meados de 1983. Essa pessoa, conhecida como João Mineiro, era um palmitreiro, vivia da extração clandestina do palmito que está presente naturalmente naquela área. Disse ele que não avisou a ninguém com medo de que alguma represália o atingisse. O motivo

era óbvio: sua atividade de subsistência dava-se em uma área de proteção ambiental, de forma que ele não poderia estar colhendo palmito lá. Já que era proibida a entrada de pessoas na área, como ele explicaria tal achado? Realmente era um problema sério!

João Mineiro contou que a primeira vez que vislumbrou o equipamento pendurado nas árvores se apavorou. Pensou que se tratasse de um objeto voador não identificado: um disco voador. Ficou atônito. Um objeto metálico, de forma estranha, junto com um enorme plástico reluzente dependurado nas árvores, convenhamos, assustaria muita gente esclarecida. Que dizer de um matuto! Infelizmente, ele não podia dividir essa angústia com ninguém, porque corria o risco de ser preso por um crime inafiançável. Carregou consigo essa aflição por mais de um ano quando, no final de 1984, embriagado devido às festas natalinas, disse, no único bar local, que havia visto algo estranho na mata. Disse que não sabia do que se tratava, mas que jamais havia visto coisa igual. Foi o suficiente para que a pequena cidade entrasse em pânico. Organizou-se uma expedição para diligências que contava com todo o efetivo policial do município (dois soldados e um cabo) e várias personagens de destaque local, incluindo Orestes, o dono do bar, como líder. Chegaram ao local e encontraram o experimento. Chamaram o jornal de Sorocaba que registrou o evento. Decidiram tomar as providências cabíveis e avisaram a Força Aérea que imediatamente avisou o INPE. Assim ficamos sabendo que a nossa gôndola, que procurava medir diferenças na temperatura do universo no Hemisfério Sul, havia sido encontrada. Recebendo a informação de que o experimento havia sido perdido há mais de dois anos, os expedicionários decidiram que não havia mais interesse em recuperar o instrumento e decidiram desmantelá-lo e dividir os pedaços para servirem de lembranças. Foi outro desastre. A experiência que havia resistido heroicamente por mais de dois anos no mato não resistiu aos afoitos caçadores e sucumbiu em pedaços.

Quando chegamos à cidade, vimos, desolados, partes espalhadas por todo o canto. O bar ostentava orgulhoso o mecanismo que movia o calibrador, os protetores da antena serviam de abajur na casa do cabo, o sensor de pressão era brinquedo do cachorro do soldado e daí por diante. Perguntamos sobre o resto da gôndola e fomos informados que João Mineiro o tinha em seu poder. Fomos ao seu encontro na mata. Ele havia escondido tudo, porque ouvira dizer que havia uma recompensa para quem a encontrasse. Dissemos que a recompensa realmente fora anunciada mas tinha um prazo de validade, que já havia expirado. Nenhuma explicação servia. Ele queria o dinheiro e, mais do que isso, aparecer na maior rede de televisão do país para falar de seu achado. A essa altura, o medo de ser preso havia desaparecido totalmente. Como poderiam prender uma celebridade? Foi difícil convencê-lo a mudar de idéia. Finalmente, dando-lhe algum dinheiro e prometendo conferir-lhe os devidos créditos pelo achado, conseguimos o que restava de volta. A preciosa fita com os dados havia, por sorte, sido

guardada por outros membros da expedição e os dados estavam todos lá. Agora, era chegada a hora de comparar as informações da telemetria com as gravadas na fita e verificar nossos resultados.

Apesar de tudo, esse experimento foi um sucesso. Conseguimos uma das maiores varreduras da esfera celeste, só superada pelo satélite Relikt 1, na época. Os dados mostravam claramente que havia uma diferença de temperatura entre regiões do céu separadas por 180 graus. Essas diferenças de temperatura eram da ordem de três milésimos de grau Celsius, indicando que nos movíamos em relação ao universo como um todo. O objetivo do experimento era estudar a distribuição angular da RCF, ou sua isotropia. O que medimos mostrava uma anisotropia, ou seja, uma região do céu era um pouco mais quente que a temperatura do universo e a outra um pouco mais fria, indicando, respectivamente, um aumento e uma diminuição na intensidade do sinal medido pelo instrumento. A anisotropia medida é o resultado do movimento do Sistema Solar em relação à RCF e equivale a uma velocidade de 600 quilômetros por segundo, ou 2 milhões, 160 mil quilômetros por hora. Esse movimento é percebido por causa do efeito Doppler, que prevê uma alteração na frequência medida por um observador que se move em relação à fonte geradora dessa frequência. Como a lei de Planck prevê que a uma dada frequência equivale uma certa intensidade de radiação, havendo um movimento do observador em relação à fonte seu receptor medirá a intensidade devida a uma outra frequência.

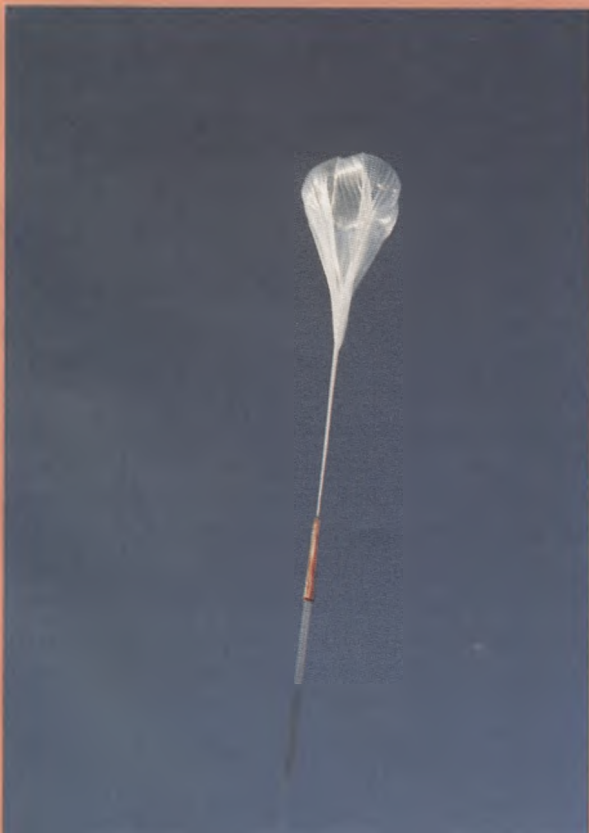
Sabendo a velocidade que o Sol se move ao redor do centro da nossa galáxia, que é em torno de 300 quilômetros por segundo, e que a Terra gira ao redor do Sol a aproximadamente 30 quilômetros por segundo, ou 108 mil quilômetros por hora (mais de cem vezes maior do que a velocidade de cruzeiro de um avião comercial!), podemos subtrair os valores desses movimentos do que foi medido para conhecer a velocidade com que a nossa galáxia desloca-se pelo universo. Assim, deduzimos que ela viaja a 500 quilômetros por segundo em relação à RCF, ou à matéria mais distante, e que esse movimento se dá em direção à constelação de Leão. Essa direção está em torno de 40 graus fora da direção da galáxia M87. Isso representa um problema, já que se esperava que o Sol estivesse indo em direção a essa galáxia, centro do aglomerado de Virgem, que é a principal concentração de galáxias do superaglomerado de galáxias do qual fazemos parte. O satélite COBE confirmou essa medida, assim como as anteriores realizadas por outros grupos. Até o momento, não existe nenhuma explicação plausível para o fato.

Foi a extinta União Soviética quem primeiro lançou um satélite totalmente dedicado à cosmologia: o Relikt 1, em 1983. Somente em 1989, com um atraso provocado pela explosão do ônibus espacial Challenger, em 1986, os Estados Unidos da América lançaram seu primeiro satélite cosmológico, o COsmic Background Explorer (COBE). Inicialmente, o COBE havia sido projetado para ser lançado pelo ônibus espacial. Com o desastre, teve de ser redesenhado para ser acomodado num foguete, o que obrigou que seu tamanho e massa fossem reduzidos à metade. O COBE foi reduzido a 5,00 m de comprimento e seu diâmetro a 2,20 m (8,20 m com os painéis solares, que geram a energia elétrica, abertos). Seu peso era de 2.280 kg. Mas, às 14:34 h (tempo universal) do dia 18 de novembro de 1989, na Califórnia, EUA, ele era lançado por um foguete Delta 5920A (de número 189) e viria a coroar as últimas décadas de pesquisa astronômica feita com veículos espaciais e inaugurar uma nova era

para a cosmologia. O COBE continua em órbita, mas foi desativado de sua função de coletar dados científicos no início deste ano, depois de uma missão extremamente bem-sucedida.

Curiosamente, esse tipo de foguete que lançou o COBE esteve envolvido, embora de forma indireta, em outro grande momento da cosmologia. O primeiro foguete dessa série, em 12 de agosto de 1959, lançou o satélite de comunicações Echo 1, que inaugurou a era das comunicações via satélite. De forma a captar os sinais enviados por esse satélite, os Laboratórios Bell, em Nova Jersey, EUA, construíram, em 1960, uma antena de micro-ondas com seis metros de diâmetro. Essa mesma antena, em 1964, propiciou a Penzias e Wilson a descoberta acidental da Radiação Cósmica de Fundo. Um outro fato histórico digno de registro para a cosmologia foi a presença de Ralph Alpher e Robert Herman, colegas de George Gamow, que, há quase cinquenta anos, previram a existência da RCF em uma palestra aberta à imprensa na véspera do lançamento do COBE. Eles estavam extremamente felizes e satisfeitos por terem tido a oportunidade de testemunhar em vida a transformação em realidade de uma previsão teórica da qual participaram. Agora poderiam, finalmente, ter a possibilidade de ver comprovadas definitivamente suas previsões com um satélite, uma das melhores ferramentas tecnológicas do homem. Na história da cosmologia não existe testemunho tão eloquente. Einstein, que num primeiro instante não acreditou no que suas equações diziam e introduziu um parâmetro que ficou conhecido como constante cosmológica, só teve

FIGURA 6 EXPERIMENTO DA FIGURA 5 DURANTE O VÔO



a oportunidade de consertar seu erro de interpretação quando, em 1929, tomou conhecimento da descoberta de Hubble. Tratava-se no entanto de um fato previsto nas equações, mas não interpretado corretamente por Einstein. Assim, nenhuma previsão teórica anterior realizada em cosmologia teve uma confirmação tão contundente quanto a da radiação de fundo. Ela teve implicações filosóficas importantes: ajudou a derrocar (pelo menos por enquanto...) a teoria do universo estacionário, que prega que o universo é como é porque será como sempre foi.

O satélite COBE levava a bordo três experimentos distintos: o FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrophotometer), que operava na faixa de um centímetro a vinte micrômetros e tinha como objetivo medir de forma precisa o espectro da RCF; o DIRBE (Diffuse InfraRed Background Experiment), cujo objetivo era mapear a RCF no infravermelho distante, fazendo medidas de intensidade absoluta da radiação infravermelha difusa em dez bandas fotométricas entre 1 e 300 micrômetros e medidas polarimétricas de 1 a 3,5 micrômetros; e o DMR (Differential Microwave Radiometer), cuja missão era estudar a distribuição angular da RCF em escalas angulares maiores que sete graus nas frequências de 31,5, 53 e 90 gigahertz com seis radiômetros, dois para cada frequência. Essas frequências foram criteriosamente escolhidas de forma a aproveitar as “janelas” atmosféricas e de emissão galáctica. Os canais de 31,5 gigahertz operavam em polarização circular, e os canais de 53 e 90 gigahertz, em polarização linear. Cada radiômetro tinha duas antenas, separadas de sessenta graus. O de 31,5 gigahertz operava a uma temperatura de trezentos Kelvins (27 graus Celsius), enquanto os outros dois foram resfriados passivamente a uma temperatura de 140 Kelvins (133 graus Celsius negativos), através de um elaborado sistema de isolantes e radiadores que fazia com que o instrumento irradiasse para o espaço o calor produzido pelo seu funcionamento. Um reservatório de 650 litros de hélio líquido resfriou o DIRBE e o FIRAS a 1,5 Kelvin (271,5 graus Celsius negativos) por dez meses.

O COBE está numa órbita polar a 900 quilômetros de altitude, inclinada em 99 graus em relação ao eixo da Terra e precessionando-a de 360 graus em um ano, escolhida de forma a

ser alta o suficiente para se livrar da interferência da atmosfera e baixa o bastante para evitar o bombardeio intenso de prótons e elétrons nas zonas de radiação de alta altitude. Nessa órbita é possível observar todo o céu em seis

meses. O projeto em si foi bastante particular no sentido de que o COBE foi o primeiro satélite a exigir uma rotação em torno de um eixo que não se mantém fixo numa direção, mudando continuamente de forma a manter a espaçonave apontando sempre para cima em relação à Terra e 94° fora do Sol. O período orbital é de 103 minutos e o satélite completa uma volta em torno de seu eixo a cada 75 segundos. O satélite Relikt 1, da ex-URSS, foi o nono da série Prognoz. Foi projetado exclusivamente para observar a distribuição angular da RCF com uma resolução angular de seis graus. Opera em apenas uma frequência (37 gigahertz). Tem a seu favor algumas características importantes relacionadas à órbita em que foi colocado: é altamente excêntrica, levando-o a uma distância, no apogeu, duas vezes maior que a da Terra à Lua, o que faz com que o experimento fique praticamente imune aos efeitos do campo magnético terrestre. O perigeu, de mil quilômetros, é um pouco mais alto que a órbita do COBE. O período orbital é de 27 dias e ele gira em torno de seu eixo uma vez a cada dois minutos.

Comparando o DMR/CODE diretamente com o Relikt, é possível ver algumas diferenças entre ambos: o DMR operava em três frequências diferentes com dois canais independentes para cada uma, o que ajudava a reduzir os erros sistemáticos. Duas das frequências eram mais altas que a do Relikt, ou seja, menos susceptíveis à contaminação de origem galáctica. Levava a bordo um calibrador com precisão da ordem de um por cento, e suas antenas foram projetadas de forma a evitar a interferência de objetos situados fora da linha de visada. Por outro lado, sua órbita era baixa em relação ao Relikt 1. O satélite COBE foi o primeiro satélite cosmológico construído pelos americanos e o segundo a ser posto em órbita com essa finalidade. Sendo o segundo satélite cosmológico e tendo entrado em operação seis anos depois do Relikt, o COBE mostrou resultados simplesmente espetaculares, se comparado ao seu antecessor. Enquanto o Relikt 1 só levava um experimento a bordo, o COBE levava três experimentos distintos. Dos três, dois conseguiram resultados fantásticos, que, se definitivamente confirmados, revolucionarão a cosmologia. Na realidade, essa revolução se daria no sentido de fornecer suporte observacional para o avanço da física de um modo geral e não apenas da cosmologia.

O primeiro grande resultado do COBE foi obra do experimento FIRAS. Com uma observação de apenas oito minutos do Pólo Norte celeste, o FIRAS determinou de forma inequívoca o espectro da RCF, pondo fim a uma controvérsia de mais de 25 anos a respeito da natureza *planckiana* do espectro da RCF, e produzindo a esperada confirmação do prêmio Nobel de física concedido a Arno Penzias e Robert Wilson, em 1978, pela descoberta da RCF em 1964: a grande crítica à concessão do Nobel aos americanos era a falta de confirmação da natureza térmica do espectro da RCF e a sua conseqüente importância cosmológica. A forma do espectro da RCF foi alvo de muita investigação nas décadas de 1970 e 1980. Em 1979, Woody e Richards mediram uma distorção

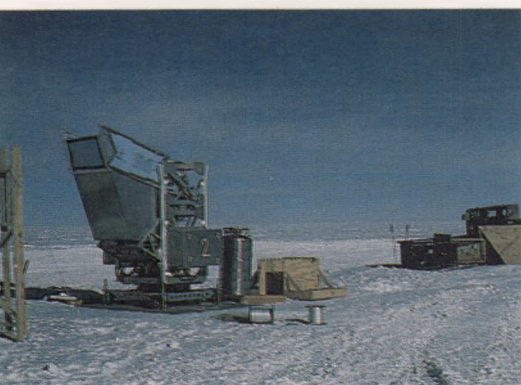


FIGURA 7 EXPERIMENTO NO PÓLO SUL PARA MEDIR A TEMPERATURA DO UNIVERSO

LASERCOR

Alô



O scanner cilíndrico Hell trabalha durante as 24 horas do dia.



O scanner Chromagraph S2000 opera conectado ao Macintosh.



A Imagesetters Herkules: versatilidade e rapidez.

A NOVA ERA DA PRÉ-IMPRESSÃO

A Lasercor não pára de investir em tecnologia de ponta. Graças a isso, a Qualidade Lasercor em fotolito está cada vez melhor.

Os clientes da Lasercor já estão acostumados com os sucessivos aperfeiçoamentos e avanços tecnológicos introduzidos pela empresa. Nem por isso deixam de se surpreender.

Agora mesmo a Lasercor tem mais uma boa notícia para seus clientes: o tempo de produção de pré-impressão caiu das anteriores doze horas para apenas três! Os preços também.

É resultado do recente investimento de US\$ 600 mil em equipamentos de altíssima resolução. Ao moderno scanner cilíndrico Hell para seleção de cores que vinha sendo utilizado foram acrescentados um scanner S-2000 (Linotype Hell) e uma imagesetters Herkules, igualmente Hell. Tudo isso acoplado a uma bateria de computadores Macintosh e PCs.

Tem mais. A Lasercor trabalha agora com Diamond Screening, a revolucionária textura que substitui a retícula tradicional, com notável ganho de qualidade.

Qualidade, preços vantajosos, muita agilidade. Razões do prestígio da Lasercor.

LASERCOR
TECNOLOGIA EM FOTOLITO

SIG - Quadra 3 - Bloco "C" nº 09 - 1º e 2º andar
Fone: (061) 344-1007 - Fax: 344-1228 - Brasília-DF

próxima ao pico da curva (a intensidade medida não era exatamente a prevista pela lei de Planck) que gerou muita discussão sobre os possíveis mecanismos físicos responsáveis por essa injeção de energia. Vários trabalhos foram publicados na década passada, por exemplo, tentando explicar esses dados. Apesar da retratação dos autores alguns anos mais tarde, quando admitiram a existência de um erro sistemático no experimento, a controvérsia persistiu com a divulgação dos resultados de um experimento conjunto realizado com foguetes entre a Universidade de Nagóia, Japão, e da Califórnia, Berkeley, que mostrava uma distorção do espectro que, embora menor do que a anterior, teimava em continuar. O COBE, por meio do FIRAS, sepultou de vez as dúvidas, determinando finalmente o valor da temperatura do universo.

Porém, o resultado mais importante conseguido pelo COBE, que se deu com o experimento DMR, foi a detecção de flutuações de temperatura, de origem intrínseca, na RCF. Longamente esperadas pelos teóricos, tais flutuações vieram corroborar o Modelo Padrão. As medidas do COBE encerram uma etapa da história da astronomia que representa uma das tarefas mais difíceis já empreendidas até hoje pela humanidade para conseguir dados astronômicos: as medidas da (an)isotropia da RCF, que foram objeto de experimentos no solo e a bordo de aviões e balões estratosféricos. Como ilustração desse fato, pode ser citado o esforço que está sendo realizado hoje em dia para medir flutuações em escalas angulares menores do que as medidas pelo COBE, onde os detectores estão operando nas proximidades do limite quântico. Os próprios resultados do COBE, também, foram obtidos já quase no limite de sensibilidade do DMR e exigiram uma enorme manipulação dos dados e o emprego maciço de computadores. Cada observação do DMR/COBE produz um pixel (abreviatura do inglês picture element) que equivale em graus a 27 vezes a área ocupada pela Lua no céu. Para produzir um mapa preciso da esfera celeste, cada um dos 6.144 pixels em que foi dividida a esfera celeste é observado milhares de vezes. No primeiro ano de operação, o DMR colecionou 420 milhões de medidas! Os dados do DMR/COBE mostraram a detecção de vários sinais: emissão galáctica, anisotropia em dipolo da RCF e uma estrutura estatisticamente significativa. Foram selecionados dados tomados vinte graus acima e abaixo do Plano Galáctico, onde a emissão galáctica é maior, dos quais foram removidos a média e a anisotropia de dipolo, que já era bastante conhecida. Assim, a estrutura restante pôde ser associada às flutuações de temperatura devidas ao processo de formação de estruturas no universo. As variações de temperatura encontradas no céu são da ordem de trinta milionésimos de Kelvin (ou de graus Celsius). Esse foi o resultado que tanto entusiasmo causou na comunidade astrofísica quando foi anunciado em 23 de abril de 1992.

Essas variações de temperatura encerram regiões que variam de dez a noventa graus, sendo dessa forma tão grandes que nenhum processo causal da cosmologia não-inflacionária padrão poderia explicá-las. Os dados dão um suporte extraordinário aos modelos de universo baseados na inflação. O que o COBE encontrou não são estruturas no sentido



FIGURA 8 GÔNDOLA ACHADA EM TAPIRAÍ, SP, DEPOIS DE DOIS ANOS

exato da palavra: são regiões cujas temperaturas na era do desacoplamento entre radiação e matéria diferiam milionésimos de Kelvin da média. Elas fornecem apoio para todas as teorias de formação de galáxias que se baseiam na gravidade como o agente responsável pelo processo. Essas variações de temperatura são da ordem de algumas partes por milhão atualmente. São observadas hoje estruturas em escalas de dezenas de megaparsecs (um megaparsec equivale a 3.260.000 anos-luz) no universo próximo, e as regiões observadas pelo COBE são muito maiores do que essas dimensões. As variações observadas representam regiões cujas dimensões parecem indicar as maiores e mais velhas estruturas já observadas no universo. A menor delas ocupa hoje uma região maior que a “Grande Muralha”! As maiores estruturas observadas pelo COBE têm aproximadamente dez bilhões de anos-luz, enquanto que a “Grande Muralha”, uma concentração de galáxias que era a maior estrutura conhecida no universo até então, tem duzentos milhões de anos-luz, ou seja, é cinco vezes menor. Para uma discussão mais detalhada das implicações dessa medida, vide o artigo de C. A. Wuensche nesta edição.

Já o satélite Relikt 1, que tem o mérito de ter sido o primeiro a ser dedicado ao estudo da cosmologia, não apresentou, inicialmente, resultados que se diferenciavam dos que já haviam sido obtidos anteriormente pelos experimentos embarcados em aviões e ba-

lões estratosféricos. Os dados, até recentemente, mostravam apenas o já bem-conhecido dipolo da distribuição angular da RCF que, por ser de origem extrínseca à radiação, não apresentava mais novidade para a cosmologia. Entretanto, uma nova análise dos dados obtidos durante o período de julho de 1983 a fevereiro de 1984, e divulgada quase que concomitantemente com os resultados do COBE, mostrou um sinal proveniente de uma região muito vasta do céu. Esse resultado é bastante curioso e a explicação ainda está longe de ser definitiva. A equipe científica do Relikt 1 também reivindica a detecção de flutuações intrínsecas de temperatura na RCF. Os dados do experimento, depois de terem sido novamente analisados, mostram a existência de um sinal anômalo vindo de uma região que ocupa aproximadamente 30% da área do céu com uma intensidade de setenta milionésimos de Kelvin. No processo de análise e redução de dados do Relikt, foram subtraídas as contribuições devidas à Terra, ao Sol e à Lua. Naturalmente, o sinal devido ao dipolo e a média do sinal fora do Plano Galáctico também foram subtraídos. O sinal observado pelo Relikt 1, devido ao seu caráter peculiar de parecer ser proveniente de uma região enorme, poderia ser interpretado como sendo devido a uma diminuição local na intensidade do ruído de fundo de origem galáctica. No entanto, essa e outras explicações são extremamente difíceis de serem

aceitas já que entram em choque com dados disponíveis em outras regiões do espectro eletromagnético, como no óptico e em rádio. Portanto, o problema ainda está em aberto já que o sinal também não pode ser explicado por efeitos devidos ao experimento.

Os resultados apresentados pelos dois satélites, entretanto, estão ainda sujeitos a dúvidas e a várias outras interpretações. Pode ter havido, por exemplo, erro experimental. Apesar de o DMR/COBE ter sido calibrado por meio de três técnicas totalmente independentes entre si (fontes de estado sólido geradoras de ruído, observações da Lua — ambas realizadas a bordo — e calibração do instrumento ainda no solo dentro de uma câmara de vácuo criogênica) e terem sido tomados cuidados extremos durante a execução do projeto, sempre existe a possibilidade de que algum erro sistemático possa ter passado despercebido. Não há muita informação a respeito do processo de calibração do Relikt 1. Outra hipótese seria de algum erro na análise dos dados. Devido ao procedimento de análise dos mesmos ser bastante complicado, em virtude da baixa relação sinal—ruído, há a possibilidade de que os métodos empregados possam ter gerado artefatos que influenciaram os resultados. A contaminação do sinal por outros ainda não muito bem-conhecidos é uma outra fonte de preocupação, como



FIGURA 9 DESTRUIÇÃO DO EXPERIMENTO PELA EXPEDIÇÃO DE TAPIRÁ



FIGURA 10 JOÃO MINEIRO

os sinais de origem galáctica e extragaláctica. Nas frequências escolhidas para as observações, o sinal da RCF é cerca de mil vezes mais forte do que o proveniente da emissão em microondas da Via-Láctea. Mesmo assim, essa afirmação não pode ser encarada como algo definitivo porque o nosso conhecimento a respeito da emissão galáctica é bastante precário: as medidas hoje existentes são antigas e sujeitas a muitos erros, principalmente de calibração. Basicamente, é feita uma extrapolação dos dados em frequências mais baixas para se obter um valor a ser extraído do sinal recebido. Quando da publicação dos resultados, os membros da equipe científica do COBE foram bastante sinceros ao admitir que a hipótese mais econômica seria atribuir o sinal observado como sendo de origem cosmológica, já que tanto o sinal de origem galáctica quanto o de origem extragaláctica não são suficientemente conhecidos. Entre os fatores que podem estar influenciando as medidas podem estar radiofontes extragalácticas ainda desconhecidas. Uma grande influência nos dados seria aquela devida à contaminação do sinal pelo campo magnético terrestre. Inicialmente, os dados do DMR/COBE apresentavam contaminação em virtude dele. Essa contaminação, de acordo com o responsável pelo instrumento, George Smoot, foi devidamente subtraída. Entretanto, em consequência da baixa órbita do satélite, ela ainda se constitui em um perigo potencial. Em relação ao Relikt 1, esse perigo praticamente inexistente devido à alta excentricidade da órbita que o leva a distâncias enormes da Terra.

As medidas do COBE podem não ter nenhuma relação com a estrutura do universo de milhões de anos atrás. A estrutura observada pode ser apenas uma consequência da teoria da relatividade: as variações poderiam ter sido distorções causadas por ondas gravitacionais. A teoria faz a previsão de que uma massa que se move com velocidade variável na métrica do espaço-tempo produz flutuações que se propagam com a velocidade da luz, as chamadas ondas gravitacionais. A provável fonte de tais ondas teria sido a inflação do universo. Uma fração de segundo após o *Big Bang*, de acordo com a teoria inflacionária, o universo expandiu por um fator 1030. Esta rápida inflação poderia gerar ondas gravitacionais numa variedade de tamanhos que poderiam explicar as variações de temperatura observadas pelo COBE. Uma outra implicação proveniente desse cenário é que, em particular, algumas ondas gravitacionais poderiam ter comprimentos de onda comparáveis ao tamanho do universo, o que faria com que regiões enormes do espaço se comprimissem ou expandissem de forma que algumas partes emitiriam mais radiação que outras e, dessa forma, a diferença apareceria no ruído de fundo em microondas. Esse efeito obscureceria a evidência de flutuações que pudessem explicar a origem das galáxias. Há argumentos, no entanto, de que tal fenômeno só seria capaz de “apagar” ou explicar 10% das flutuações. As alternativas para resolver o problema são basicamente três: construir detectores de ondas gravitacionais, realizar experimentos em física de partículas e fazer medidas de alta sensibilidade da

RCF. Assim, o modelo inflacionário que foi bastante beneficiado com os resultados do COBE pode também explicar esses mesmos resultados e pôr por água abaixo a interpretação dos resultados como sendo decorrente do processo de formação de estruturas.

Conclusão

O modelo inflacionário não é compatível com um universo puramente bariônico. Assim, além de necessitar de matéria escura (que foi postulada pela primeira vez na década de 1920 por Fritz Zwicky), ele exige que tal matéria não seja totalmente bariônica. Exige também que a matéria esteja distribuída em escalas maiores do que vinte megaparsecs. Com a aceitação quase que tácita do Modelo Padrão, resta agora a busca pela matéria escura que teima em não ser detectada. O resultado do DMR/COBE colocou fortes vínculos nessa procura, ou, pelo menos, na escolha dos possíveis candidatos à matéria escura. Modelos que utilizam uma composição de matéria escura fria com neutrinos massivos ou com uma constante cosmológica diferente de zero podem explicar os resultados do COBE. O quadro atual chega a ser intrigante de certa forma: alguns modelos cosmológicos que utilizam matéria escura fria conseguem explicar a existência de estruturas em larga escala, outros as estruturas mais simples, mas nenhum consegue explicar de uma só vez a existência de todas as estruturas observadas.

O modelo inflacionário também faz a previsão de que o universo contém cem vezes mais matéria escura do que a matéria que brilha nas estrelas. Prevê ainda especificamente que a densidade de matéria é no mínimo igual ao valor crítico que divide modelos com expansão eterna daqueles com contração. Um universo que contivesse dez vezes mais matéria escura expandiria para sempre. Cem vezes mais haveria contração. Assim, uma medida da densidade do universo determinaria se o modelo inflacionário é correto ou não. Uma vez que matéria escura é invisível (por definição!), a probabilidade de se fazer uma medida direta e precisa da densidade total de matéria é bastante baixa ainda devido ao atual estágio tecnológico. A resposta seria uma análise cuidadosa dos resultados do COBE. A melhor maneira de determinar quanto de matéria escura o universo contém consiste em encontrar maneiras de testar os vários modelos de formação de galáxias. Atualmente, o único meio de testar o modelo inflacionário, ou qualquer outro modelo que tente descrever o universo primordial, reside em confirmar ou não os resultados do DMR/COBE e medir anisotropias na RCF em escalas angulares menores do que a que ele mediu. Há no momento experimentos sendo realizados à procura de anisotropias na RCF em escalas média e pequena, cujos resultados estarão sendo divulgados a qualquer momento.

Uma outra grande novidade é a reanálise dos dados de um experimento do MIT, realizado a bordo de balões, que mostra uma concordância com os dados do COBE. É o primeiro experimento que parece confirmar os resultados do COBE e tem a seu favor o fato de ter sido totalmente independente deste, ter utilizado uma técnica diferente de análise de dados e de ter subtraído o sinal de origem galáctica também de forma independente. Existe um plano para lançar um sucessor do Relikt 1: o Relikt 2. Este satélite será colocado numa órbita de um milhão de quilômetros, operará em três comprimentos de onda com uma sensibilidade muito melhor que a do Relikt 1. As observações estão planejadas para o período entre 1995 e 1997.

Se as flutuações observadas pelo COBE forem confirmadas, haverá a quase certeza de que existe matéria escura no universo; caso contrário, seria lógico pensar que a força gravitacional não seja a que proporciona a formação de estruturas. Talvez, por exemplo, exista uma nova força! Qualquer uma das alternativas, no entanto, seria muito interessante. Assim, vemos que as medidas da temperatura do universo podem revelar muitas coisas para a cosmologia. A temperatura exprime um conceito conhecido pela humanidade há muito tempo de uma forma empírica, mas em cosmologia presta-se para revelar uma das formas mais elaboradas do pensamento humano.

Modelo de liberdade, busca de

Nas atuais discussões sobre a integração latino-americana costuma-se esquecer que existe uma forte paradigma político, admiração tradição sobre o tema antes mesmo das lutas pela independência. A partir da primeira metade do século XVIII já são encontrados escritos de *criollos*¹ com manifestas preocupações em vincularem-se panco-americanos. Quatro mo- comercialmente a outras regiões. Na Guatemala, por exemplo, um arbitrista queixa-se da falta de or- nentos em que a América his- ganização no comércio regional. Diz que, caso se despache um barco para o porto do Callad, carregado pânica avaliou e avalia o domí- de produtos locais como breu, anil, pau-brasil e alcatrão, os peruanos deveriam mandá-lo de volta com nio que os Estados Unidos exer- vinho, aguardente e azeite para o consumo interno. O que esse comerciante reclama é, simplesmente, ceram sobre ela.

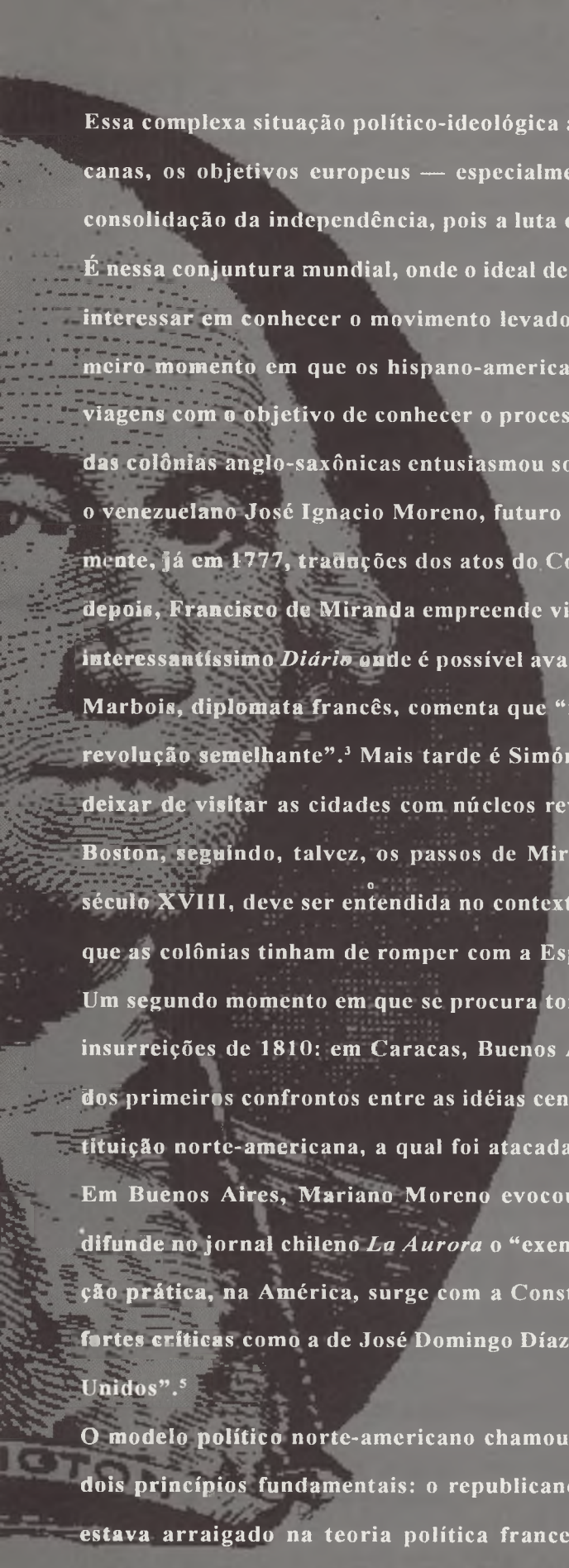
acabar com a intermediação da Espanha e se beneficiar das diversidades de cada colônia. Outros são mais explícitos e propõem ao vice-rei que “deixe o comércio livre” para que a concorrência regule os preços.²

Essa liberdade que os americanos pleiteavam para seus produtos regionais germinou em uma época de convulsão tanto na América quanto na Europa. Na segunda metade do século XVIII eclodiram as primeiras insurreições sociais do continente americano: a rebelião popular de Quito (1765), a de Tupac-Amaru (1780-1783) — o primeiro movimento nacionalista —, o levante dos Comuneros del Socorro (1781), a Inconfidência Mineira (1789), os grandes movimentos negros em Santo Domingos e Haiti (1791 Toussaint L'Ouverture), e o dos negros de Coro (1795), na Venezuela.

Por outro lado, se toda a América tentava livrar-se do jugo colonial, a Espanha começava a sofrer o ocaso: o ciclo de primeiros-ministros entreguistas, a imposição da França em romper o pacto de família, a infeliz expulsão dos jesuítas (1767) dos territórios peninsulares e americanos e, por último, iniciando o que seria uma série de perdas territoriais, o ministro espanhol Godoy concede aos Estados Unidos a livre navegação no rio Mississippi (1789).

Em sentido oposto, além dos Pireneus, estava ocorrendo uma das mudanças políticas mais importantes da história moderna — a Revolução Francesa —, cujos princípios cruzaram o Atlântico com uma velocidade surpreendente. Sabe-se, por exemplo, que o colombiano Antonio Narino traduziu e distribuiu, clandestinamente, a *Declaração dos direitos do homem* já em 1789, e que a imprensa européia liberal tinha leitores assíduos na América espanhola. Uma das publicações mais conhecidas na Europa, e que circulou amplamente na América, foi *El espíritu de los mejores diarios* (1787-1791) cujo objetivo era tornar conhecidos tanto o pensamento das mais famosas publicações européias quanto as idéias de pensadores liberais como Alexander Pope, Francis Bacon, João Baptista Rousseau, John Locke, todos proibidos pelo Santo Ofício.

AS ADVERTÊNCIAS DOS PENSADORES LATINO-AMERI



Essa complexa situação político-ideológica aqui delineada, os interesses comerciais das regiões americanas, os objetivos europeus — especialmente os dos ingleses — desembocariam, com o tempo, na consolidação da independência, pois a luta comercial e ideológica, em si, havia começado muito antes. É nessa conjuntura mundial, onde o ideal de liberdade flamejava no alto, que o *criollo* americano vai se interessar em conhecer o movimento levado a cabo pelas treze colônias anglo-saxônicas. Esse é o primeiro momento em que os hispano-americanos dirigem seu olhar para o norte e empreendem longas viagens com o objetivo de conhecer o processo revolucionário que acaba de terminar. A independência das colônias anglo-saxônicas entusiasmou sobremaneira a burguesia hispano-americana. Sabemos que o venezuelano José Ignacio Moreno, futuro reitor da Universidade de Caracas, guardava clandestinamente, já em 1777, traduções dos atos do Congresso dos Estados Unidos de 1774 a 1775. Pouco tempo depois, Francisco de Miranda empreende viagem à América do Norte (1783-1784), da qual deixou um interessantíssimo *Diário* onde é possível avaliar as idéias que essa revolução lhe infundira. Com Barbé-Marbois, diplomata francês, comenta que “nossos reinos da América não demorarão muito a ter uma revolução semelhante”.³ Mais tarde é Simón Bolívar quem desembarca em Charleston, em 1807, sem deixar de visitar as cidades com núcleos revolucionários consolidados, como Filadélfia, Nova York e Boston, seguindo, talvez, os passos de Miranda.⁴ A busca do exemplo norte-americano, no final do século XVIII, deve ser entendida no contexto libertário que irradiou sua emancipação e na esperança que as colônias tinham de romper com a Espanha.

Um segundo momento em que se procura tomar a América do Norte como modelo ocorre logo após as insurreições de 1810: em Caracas, Buenos Aires, Santa Fé de Bogotá, Dolores e Santiago. É a época dos primeiros confrontos entre as idéias centralistas e federalistas, estas últimas encarnadas na Constituição norte-americana, a qual foi atacada e defendida em diferentes rincões da América hispânica. Em Buenos Aires, Mariano Moreno evocou inflamado as palavras de Jefferson. Camilo Henríquez difunde no jornal chileno *La Aurora* o “exemplo memorável” da carta americana. E a primeira aplicação prática, na América, surge com a Constituição venezuelana de 1811, que não escapou de receber fortes críticas como a de José Domingo Díaz que afirmou que era uma “pueril imitação da dos Estados Unidos”.⁵

O modelo político norte-americano chamou a atenção de certos grupos hispano-americanos por seus dois princípios fundamentais: o republicano e o federalista. É verdade que o conceito de República estava arraigado na teoria política francesa, porém este se viu desvirtuado aos olhos dos novos

governantes devido às andanças expansionistas de Napoleão Bonaparte. As idéias federalistas criaram, desde os primórdios da vida independente, tanto apaixonados defensores quanto ferozes detratores; sem dúvida foi o princípio federalista que motivou as grandes polêmicas entre os forjadores das constituições americanas.

Uma das censuras mais contundentes ao sistema federal norte-americano — não em seu aspecto jurídico e político, mas na inoperância que apresenta para governar territórios tão vastos e povos tão diferentes como os da América espanhola e os da saxônica — é feita por Simón Bolívar no Congresso de Angostura em 1819. Ele lança um furioso chamado aos legisladores para que deixem de lado as teorias e pensem no povo que governam.

Essa mesma linha de pensamento, porém de maneira muito mais dura e contundente, é expressa pelo mexicano frei Servando

... “Que ninguém seja possuidor de um direito que prejudique o do outro.”

Teresa de Mier, que mostra a gênese diversa dos povos em um discurso (1823) no Congresso Constituinte. A América do Norte já estava conformada de ter estados separados ou independentes uns dos outros e, para fazer frente à opressão da Inglaterra, decidiram federar-se; “federarmo-nos estando unidos” — disse — “é dividirmo-nos e atrair o mal que eles procuram remediar com essa federação”. Digna de louvor é a reflexão de frei Servando, a que continua mais incisiva ao examinar o poder sob o qual haviam vivido uns e outros. Os anglo-saxônicos somente com a supressão da palavra rei em suas leis passavam a ser uma República, enquanto nós, afirma, “curvados há trezentos anos sob o jugo de um monarca absoluto, apenas acertamos dar um passo sem tropeço no desconhecido aprendizado da liberdade”.

Entretanto, é válido perguntar que interesses estavam por trás ou que grupo social defendia o federalismo ou o centralismo. Pode-se dizer, grosso modo, que as burguesias urbanas queriam uma democracia onde o poder político se mantivesse centralizado; contudo, grupos sociais locais, representando as pequenas cidades que queriam romper o monopólio político das grandes urbes, opuseram-se tenazmente. Foi este último grupo — as burguesias regionais — que apoiou o princípio federal.

Anos depois, quando já haviam surgido desavenças entre as diversas regiões, e as divisões estavam quase consolidadas, Bolívar continua manifestando-se contrário a um sistema de governo federal. Assim o expressa a seu amigo, o general Daniel Florencio

O’Leary, numa carta de 1829 onde analisa diferentes possibilidades de governo; do federal, assevera que é uma “anarquia regularizada”, e afirma, categoricamente, “melhor seria para a América adotar o Alcorão do que o governo dos Estados Unidos”. Bolívar foi um homem prático que construiu seu pensamento passo a passo com a realidade que via surgir; assim, é possível compreender sua ênfase no “visto” mais do que no “lido”, quando sustenta que os exemplos históricos nos dizem muito mais do que as bibliotecas.

Através de mais de dez mil documentos é possível equacionar a coerência do Libertador, pois ele não recua um passo sequer em seu ideário político, ao contrário, ratifica sua mesma posição unitária uma semana antes de morrer. Em sua última proclama, de 10 de dezembro de 1830, que representa o legado bolivariano para seus compatriotas da Colômbia, a Grande — venezuelanos, colombianos, equatorianos e panamenhos —, reafirma, pela última vez, seu pensamento unitarista: “se minha morte contribui para que acabem os partidos e se consolide a União, eu descerei tranqüilo ao sepulcro”.

Depois que as diversas nações já estavam relativamente fortalecidas geográfica e politicamente, o desenvolvimento dos Estados Unidos deixa bastante intranqüilo certo grupo político. É interessante perceber, nesse momento de crescimento ideológico das elites latino-americanas, como um grupo de pensadores vincula a idéia de progresso ao conceito de civilização que a Europa do século XVIII havia cunhado para distinguir o Velho do Novo Continente. Refiro-me à civilização no sentido de estado do homem e de uma sociedade; a esse lento processo de educação, a esse gradual desenvolvimento.

Um dos expoentes máximos do conceito de civilização em relação estreita com o progresso é o argentino Domingo Faustino Sarmiento. Antes de apaixonar-se pelos Estados Unidos, ele foi um fanático pela velha Europa, que utilizava para afrontar as cidades do interior da Argentina com a europeia Buenos Aires em sua polêmica obra *Civilização e barbárie* (1845). Mas, com o tempo, decepçiona-se com a Europa — “demasiado quieta”, disse — e propõe como modelo de República os Estados Unidos, desdenhando tanto as antigas monarquias europeias quanto o “despotismo brutal” da Argentina daquela época.

Em sua passagem por várias cidades da Europa, Estados Unidos e algumas da África (1846-1848), Sarmiento vai se convencendo de que a prosperidade tecnológica, a riqueza, o transporte ferroviário, a educação e a liberdade individual permitem a uma nação crescer, progredir e, finalmente, poder chamar-se civilizada. Características que o Velho Mundo já havia perdido, restando-lhe apenas a lembrança de uma glória passada. Sua bússola, então, será a partir de agora a América do Norte, que servirá de modelo não só aos hispano-americanos, mas também será o “belo ideal de grandeza das nações modernas”.

Essa emulação com os americanos não foi apenas um arrebatamento da juventude de Sarmiento. Em sua obra mais amadurecida, após uma intensa vida de homem público, ela é corroborada. Em *Conflito e harmonia das raças na América* (1883), o ideólogo argentino afirma claramente que:

(...) a América do Sul fica atrás e perderá sua providencial missão de sucursal da civilização moderna. Não detenhamos os Estados Unidos em sua marcha. Alcancemo-los. Sejam os Estados Unidos como o mar é o oceano. Sejam os Estados Unidos.¹¹ É chocante essa confissão e, especialmente, a vocação “para saga” que Sarmiento atribui, de forma tão natural, aos países do Cone Sul, ao empregar a palavra “sucursal”.

Ao mesmo tempo em que o progresso na América anglo-saxônica ergue-se como modelo, na latina vai brotando um crescente temor em face do poderio daquele que alguns já chamam de o “colosso do norte”. Surgem, aproximadamente desde 1862, em várias cidades americanas e por motivos similares, embora em conjunturas diversas, diferentes associações cujo vínculo era a defesa da independência geográfica e também a independência cultural dos países do Novo Mundo.¹²

É interessante notar, neste momento em que se propõe os Estados Unidos como modelo de avanço, como os cidadãos organizam-se à margem dos governos. Principalmente se recordarmos as infrutíferas convocações para os quatro congressos hispano-americanos, feitas por diferentes governos — Congresso do Panamá em 1826, convocado por Bolívar; Congresso de 1847-1848, convocado pelo Peru; Congresso de 1856-1857, convocado pela Venezuela; e o Congresso de Lima, em 1864 —, que terminaram sem resultados, pois as medidas nunca se confirmaram. É, pois, a sociedade organizada, integrada por um grupo ativíssimo de ideólogos liberais, que vai alertar sobre o poderio crescente da América do Norte, e que vai chamar à unidade os países do continente. Não devemos esquecer que naquela época eram fatos consumados a intromissão dos Estados Unidos e da França em nossos territórios — os norte-americanos já tinham se assenhoreado da Flórida (1825), do Texas (1845), do Novo México e da Alta Califórnia (1849), e Napoleão III já havia invadido o México (1861-1867).

Como exemplo desses ideólogos destaco Francisco Bilbao, integrante da associação “União Americana”. Suas obras, com títulos sugestivos — *A América em perigo* (1863) e *O evangelho americano* (1864) —, repudiam com veemência a missão que os anglo-

americanos outorgaram a si próprios, pois achando-se tão grandes, diz o credo bilbaíno, caíram na tentação dos titãs, julgando serem os árbitros da terra. Mas esse chileno não foi uma voz ilhada ao revelar as implicações do poderio norte-americano. Nessa mesma linha de pensamento destacam-se seus conterrâneos José Victorino Lastarria, Vicuña Mackenna e o cubano José Martí, entre outros.

Martí é um dos maiores humanistas do século passado. Brigou em todas as frentes. Com a poesia, com as idéias, com o exemplo, com as armas e, por último, com sua vida na luta pela independência de Cuba. Na sua vasta obra, repleta de noções mestras, não é fácil escolher aquela que melhor sintetiza seu pensamento. Há, porém, uma pequena frase, quase perdida no trecho da descrição de um desfile em Nova York, que, quando lida e relida, comove por sua simplicidade e grandeza — “que ninguém seja possuidor de um direito que prejudique o do outro”.¹³ Grande verdade essa, que nos serve de introdução às observações martianas sobre o poderio da América do Norte.

Detemo-nos, de maneira sucinta, no trabalho jornalístico, continental,¹⁴ que José Martí empreende desde os Estados Unidos a partir de 1880. Sua presença na imprensa hispano-americana, durante quinze anos, foi substancial para o despertar da opinião pública. Esses “bramidos” — como Sarmiento definiu seus artigos jornalísticos — demonstram o completo conhecimento que tinha da sociedade norte-americana.

Em suas obras, a temática sobre os Estados Unidos é abundante. Martí ocupou-se dos poetas, dos filósofos, dos oradores, dos governantes, das figuras lendárias — “Buffalo Bill” —, dos partidos políticos, da religião, dos anarquistas de Chicago, da importância do voto e dos diversos costumes daquele país. Preocupou-se com afinco na preparação e no significado que teria, para a “nossa América”, a Conferência Internacional Americana, em Washington (1889-1890). Este foi o primeiro evento panamericano que teve enormes conseqüências para nossos países. A pena martiana não se cansa de prevenir os governos para que fizessem um minucioso exame e uma vigilância extrema a respeito

dos propósitos dos Estados Unidos, pois aquele país — disse Martí, em carta a *La Nación* de Buenos Aires — está repleto de “produtos invendíveis” e está determinado a “ampliar seus domínios na América”. É tal o perigo, tanto econômico quanto geopolítico, que Martí defende a necessidade de se declarar nossa “segunda independência”.¹⁵ Como

comentário, e parafraseando o ilustre cubano, podemos comprovar quão lamentável é que as nações latino-americanas se vejam levadas a conquistar, quase a cada século, uma nova independência, pois o atual termina, como é bem sabido, ameaçado pelo estrangulamento da dívida externa: a terceira independência a ser alcançada.

Como se vê, José Martí escreve das “entranhas” da sociedade norte-americana, e sabe perfeitamente que o objetivo primeiro, inevitável e sem concessões em tudo o que os Estados Unidos fazem, é cuidar de seus próprios interesses. As advertências de Martí encaminham-se nesse sentido.

Demonstrei, pois, os quatro momentos em que os hispano-americanos do século passado voltam sua atenção em direção aos Estados Unidos. O primeiro como modelo de liberdade; o segundo em busca de um paradigma político; num terceiro momento a idéia de progresso conduz a uma admiração pela sociedade norte-americana. É nessa conjuntura que pensadores latino-americanos começam a avaliar o domínio que os Estados Unidos podem chegar a exercer sobre a América hispânica. Como consequência dessa superioridade territorial e econômica, um grupo de ideólogos adverte sobre os perigos que representam os países hispano-americanos, configurando, assim, o quarto momento do olhar em direção ao norte.

Para terminar estas anotações sobre a presença dos Estados Unidos na mentalidade latino-americana, podemos assegurar que o rio Bravo não conseguiu separar as duas Américas, nem geográfica nem ideologicamente. O vínculo mútuo foi e continua sendo uma constante inquietação de nossos pensadores. Alguns temeram-lhe, como Simón Bolívar, que previu antecipadamente que os Estados Unidos “parecem destinados pela Providência a flagelar a América de miséria em nome da liberdade”.¹⁶ Outros renderam-se, como Sarmiento, que opinou que a “luz se irradiará até nós quando o sul refletir o norte”.¹⁷ É só olhar nossa realidade de hoje e perceber quanta verdade encerram as pa-

lavras de Bolívar e de Martí. A situação na Venezuela e no Peru servem de exemplos, demonstram as intrincadas consequências da presença norte-americana em nossas nações.

Sara Almarza é PhD pela Universidade de Nova York na área de literatura. É professora do Departamento de Teoria Literária e Literatura da Universidade de Brasília.

Notas

1. Na América espanhola, os *criollos* são os descendentes de espanhóis nascidos na América.
2. Sara Almarza, *Pensamiento crítico hispanoamericano. Arbitristas del siglo dieciocho*, Madrid, Pliegos, 1990, pp. 94 e segs.
3. Apud Caracciolo Parra Pérez, *Miranda et la Révolution Française*, Paris, Librairie Pierre Roger, 1925, p. XVII.
4. Mas o desejo libertário foi expresso por Bolívar muito antes de sua viagem à América do Norte, em seu famoso juramento de Roma (1805).
5. José Luis Romero, *Situaciones ideológicas en latinoamérica*, México, UNAM, 1981, p. 103.
6. Discurso “Las profecias”, *Antología del pensamiento político americano*, México, UNAM, 1945, p. 127.
7. Simón Bolívar, *Doctrina del libertador*, editado por Manuel Pérez Vila, Caracas, Biblioteca Ayacucho, 1979, p. 302.
8. *Ibid.*, p. 327.
9. *Viajes*, editado por F. Friedmann de Golberg, México, Kapeluz, 1978, p. 234.
10. *Ibid.*, p. 301.
11. Apud Roberto Fernández Retamar, *Calibán y otros ensayos*, La Habana, Arte y Literatura, 1979, p. 242.
12. Dentre essas sociedades podemos citar o Clube Liberdade e Progresso, de Buenos Aires; a sociedade Defensores da Independência Americana, de Lima; a Sociedade da União Americana, de San Luis Potosí e a Junta Patriótica da Cidade do México. Vide Ricaurte Soler, *Idea y cuestión nacional latinoamericanas*, México, Siglo XXI, pp. 189-190.
13. *Obras completas*, La Habana, Nacional de Cuba, 1963, t. 10, p. 78.
14. Seus trabalhos jornalísticos apareceram no *La Nación* de Buenos Aires, no *El Partido Liberal* e *Revista Universal* do México, no *La Opinión Nacional* e *Revista Venezolana* de Caracas, no *La República* de Honduras e no *La Opinión Pública* de Montevidéu.
15. Carta de Nova York de 2 de novembro de 1889. Op. cit., t. 6, p. 46.
16. Op. cit., p. 295.
17. Op. cit., p. 233.

A SEMANA DE ARTE MODERNA E A IMPRENSA

Assim como a literatura e as artes viveram seu momento de reflexão e de reforma durante a Semana de 22, também a imprensa brasileira deveria passar pela experiência de se reformar.

RUBEM DE AZEVEDO LIMA

Não se pode estar sempre criando uma nova universidade, a partir do nada, para que pelo menos os seus primeiros estudantes saibam que ela não foi feita apenas fantasia dos que a idealizaram. Mas seria interessante que a experiência desse construir constante pudesse institucionalizar-se, de algum modo, para que o contato com a realidade cotidiana que ele possibilita fosse obrigatório em todas as escolas de ensino superior no Brasil.

Aliás, creio que se deve ao fato de ter usufruído do privilégio dessa experiência, na UnB, que me leva a discorrer sobre o presente tema.

As aulas da primeira turma do curso de Letras da UnB, e as circunstâncias peculiares sob as quais a universidade funcionava em 1962, proporcionaram aos es-

tudantes, especialmente aos que se interessavam pela literatura brasileira, pleno conhecimento das potencialidades da Semana de 22, embora passados quarenta anos desse acontecimento.

É de se assinalar que o tema principal do primeiro semestre do curso, no caso da literatura brasileira, eram, basicamente, os textos produzidos em função da Semana ou gerados pela revolução artística e literária de 1922.

Na UnB, recém-instalada no *campus*, então um imenso canteiro de obras, a construção dos blocos para salas de aula, reitoria e auditório fazia-se de acordo com o traço de Oscar Niemeyer, inspirado pelo espírito da arquitetura funcional de Warchawski, concebida após a Semana de 22.

Os professores de Letras, quase todos, cultuavam as criações da

Semana. Cito seus nomes: Heron de Alencar, Nelson Rossi, Hércio Martins, Berek Gerzsenhut, Santiago Naud, Ciro dos Anjos, Pompeu de Souza, Agostinho da Silva e Eudoro de Souza.

Nessa época, a UnB também não estava alheia à ânsia de desenvolvimento do país e aos debates que se travavam sobre a questão das reformas de base, julgadas essenciais à consecução daquele objetivo.

Juntavam-se no *campus* da universidade, à efervescência política vinda de fora dos seus limites, a que existia internamente, fruto da agitação do trabalho dos operários que a construíam e dos entrechoques ideológicos, mas também da politização causada pela releitura dos textos literários da Semana de 22.

Em meio ao caos de trabalho

e estudo, reinante no *campus*, revivia-se o ideário programático da Semana de Arte Moderna: a valorização do Brasil, dos brasileiros e de tudo que refletisse a realidade do país.

Sem essa experiência na UnB dos primeiros tempos, da qual participei como aluno temporário e já jornalista, provavelmente não teria muito a dizer sobre o tema das relações entre a Semana e a imprensa. Graças ao convívio que então se estabeleceu entre estudantes, professores e operários, foi possível criar um curso de alfabetização para os trabalhadores, utilizando textos de autores da Semana de 22 ou inspirados na linguagem autenticamente brasileira que eles preconizavam.

Mas a experiência durou pouco. Logo a universidade seria ocupada militarmente, após o golpe

SEMANA DE ARTE MODERNA

A IMPRENSA E A SEMANA DE ARTE MODERNA

de 1964. Pouco antes disso, porém, tive a satisfação, como dirigente do primeiro órgão de representação estudantil na UnB, a FEUB, de comunicar ao XXV Congresso da UNE, realizado em Petrópolis, no estado do Rio de Janeiro, os resultados do que fazíamos em Brasília, juntamente com os trabalhadores. Apesar de não ter ainda tradição cultural e de sua pequena expressão no jogo da política estudantil, a comunicação da UnB sensibilizou as delegações das universidades tradicionais. Estas, no entanto, igualmente atingidas pelo movimento de 64, não puderam repetir a experiência brasiliense, baseada — repito — em textos com a marca da Semana de 22.

Apesar das dificuldades para sua execução, a iniciativa atraiu centenas de trabalhadores. O que

se pretendia era ajudar a construir uma sociedade menos injusta, a partir de seus alicerces, como, naturalmente, são feitas todas as construções.

Ao analisar a Semana de Arte Moderna, em artigo publicado no suplemento “Idéias”, do *Jornal do Brasil* (4/7/1992), o acadêmico Sérgio Paulo Rouanet assinalou que aquele acontecimento comporta muitas leituras, mas nenhuma delas será válida se não distinguir entre o espírito e a letra da semana. Esta última — salientou Rouanet — envelheceu, como obra de arte, mas seu espírito está vivo. É ele que instiga ainda hoje a busca da modernização social e política, a luta por uma cultura livre e por um país justo.

Em 1962, no quadragésimo aniversário da Semana, a iniciativa dos estudantes da UnB, sob

esse aspecto, era portanto francamente moderna, embora modesta. E dentre as homenagens que se prestaram à data, a dos estudantes de Brasília, por seus objetivos, foi talvez a que melhor se ajustou ao espírito do movimento de 22, que, para o poeta Oswald de Andrade, seria servir, algum dia, biscoito de massa fina ao povo.

Como constata hoje a análise de Rouanet, também em 1962 a letra da Semana de Arte Moderna já estava superada e a literatura brasileira seguia novos caminhos.

Quanto à imprensa, por influência tardia da Semana de Arte Moderna, mal começara a modernizar sua linguagem, desportuguesando-se. Ainda assim, foi no final dos anos 1960, graças à ousadia de um jornal alternativo, *O Pasquim*, que a linguagem do jornalismo no Brasil se aproximou

do padrão de falar brasileiro para os brasileiros, com que haviam sonhado os modernistas de 22 e que a FEUB utilizava na alfabetização de operários.

Ao longo de cerca de setenta anos, a imprensa e a Semana de Arte Moderna tiveram momentos de atração e repulsão. Os homens de letras de 1922 eram quase todos jornalistas, mas, nem por isso, no primeiro momento, a imprensa lhes deu tratamento menos hostil do que o do público presente aos três dias de exposições e conferências no Teatro Municipal de São Paulo, em fevereiro de 1922.

Quando, porém, as criações da Semana já não constituíam novidade e, conforme reconhece hoje Rouanet, muitas delas estavam superadas, abriu-se a imprensa generosamente aos modernistas, inclusive àqueles a quem o

acadêmico, em seu artigo no suplemento “Idéias”, talvez considere praticantes do modernismo vulgar.

É bem verdade que vários modernistas ocupavam postos importantes em jornais e revistas, no começo dos anos 1940. Em 1942, ano em que Mário de Andrade fez o balanço dos frutos da Semana, o poeta modernista Cassiano Ricardo dirigia o suplemento literário “A Manhã”, cujas páginas eram ocupadas quase exclusivamente pelos poetas do modernismo.

Em 1952, a imprensa de maior expressão, em termos de circulação e número de leitores, divulgou numerosas entrevistas com os remanescentes da Semana.

Apesar de tudo, afora a renovação da linguagem — liberdade da palavra que os modernistas preconizavam — e a supressão dos rebuscamentos do português europeu, a mesma imprensa que consagrava o modernismo em boa parte já superado, não colhera, para si, outros benefícios da Semana de 22, em termos de modernização.

Somente em 1949, através de mudanças também importadas, como as da Semana — que se inspiraram nos modernos franceses e italianos —, a imprensa começou a modernizar-se. Graças a Pompeu de Souza, mais tarde professor da UnB — que estivera nos Estados Unidos, durante a II Grande Guerra —, o *Diário Carioca*, do Rio, incorporou a técnica do *lead*, suprimindo o preciosismo gongórico do “nariz de cera”, que eram as divagações pretensamente filosóficas, sociais, culturais ou políticas, mas de má qualidade, com que os jornalistas abriam, desnecessariamente, suas reportagens, antes de entrarem no relato dos fatos, ou seja, na notícia.

Qual a situação da imprensa, passados mais de 180 anos de existência no Brasil?

Não cabe fazer a retrospectiva desse longo período, apreciado em detalhes, no capítulo que Américo Jacobina Lacombe escreveu sobre jornalismo, para o sexto volume de *A literatura no Brasil* (direção de Afrânio Coutinho, 2ª ed., Rio de Janeiro, Sul Americana S.A., 1971, pp. 57 a 104).

Algumas passagens dessa trajetória merecem, porém, ser lembradas, por serem paradigmáticas e ajudarem a responder à indagação relativa ao panorama atual da imprensa brasileira e a conferir a extensão de sua modernidade.

Falando sobre o período que se seguiu à Independência, o historiador Armitage, em sua *História do Brasil*, mostra que “muitos jornais brasileiros de oposição eram tão exagerados no tom quanto insensatos nas conclusões”.

Na *Sentinela da Liberdade no Quartel-general de Pirajá* — uma das muitas “sentinelas” criadas pelo jornalismo radical de então — Cipriano Barata, referindo-se ao ministério de regência, coloca na manchete de seu jornal uma conclamação das mais ofensivas: “Fora,

pés de chumbo! Fora, marotos!”

Em chamada de primeira página, um dos últimos números da revista *Veja*, a mais moderna e de maior circulação no país, aplicou ao chefe índio caiapó, Paulinho Paiakan, a denominação, de duplo sentido, “Selvagem”. Para Alexandre Cockburn, do semanário norte-americano *The Nation* (edição de 28 de setembro de 1992), o título da reportagem da revista brasileira demonstra preconceito racista contra Paiakan e revela uma espécie de “violent glee at the discomfiture to First World environmentalists” (violento regozijo pelo transtorno causado aos ambientalistas do Primeiro Mundo), “cuja imagem estereotipada de pureza selvagem entrará em colapso em muitos lugares do mundo, quando a notícia do crime de Paiakan se espalhar”.

Por sua vez, o correspondente de jornais brasileiros em Paris, jornalista Sebastião Nery, chama os militantes de um partido político (o PT), pejorativamente, de “petelhos”. Outro correspondente, este sediado em Nova York, o jornalista Paulo Francis (*O Globo*, 6/9/1992) afirma: “... Não sei de líder político que não leve dinheiro de empreiteiros e outros grupos que precisem do governo, até que seja para que não os chateie”.

Mas o próprio Nery, numa correspondência de página inteira, relata a discussão realizada em Paris, entre jornalistas e políticos, para examinar a “Degradação do debate público, a ética, a deontologia do jornalismo” (*Jornal de Brasília*, 14/4/1992). “Sempre fomos juizes” — diz Nery. “Agora somos réus. Éramos todos fiscais. Começaram a fiscalizar-nos. De repente a sociedade descobriu que estávamos ficando fortes, importantes, arrogantes, metidos a bestas demais”. E adiante:

Vamos reconhecer que estamos abusando e ultrapassando todos os limites. A tecnologia nos fez cada dia mais poderosos. Ficamos com o rei na barriga. Viramos ditadores absolutos do comportamento social. Se a sociedade não se defende, está frita. A massa de mentiras, falsidades, enganações, desinformações que jogamos diariamente nas mãos, nos olhos, dentro de casa, da opinião pública chegou a índices alarmantes.

Nery cita vários depoimentos prestados durante o encontro de Paris, como o de Dominique Gerbaud, secretária da Associação de Imprensa Presidencial, que acusa:

Também temos (os jornalistas) nossa parte de responsabilidade na perda de crédito da política. O poder do jornalista não é acompanhado de uma moral claramente definida. Precisamos fazer uma reflexão ética, sem a qual a queda da credibilidade da imprensa, já visível na opinião pública, não pode senão continuar.

Os depoimentos transcritos, resumidamente por Nery, são impressionantes, como no caso do “jornalismo espetáculo”, o que se



E. DI CAVALCANTI. CARICATURA DE MÁRIO DE ANDRADE, 1928 [HISTÓRIA DA CARICATURA NO BRASIL DE H. LIMA]

prática sobretudo na tevê. É de André Laignel, secretário do governo francês, que aponta, nesse particular, a co-responsabilidade dos jornalistas e políticos: “Há jornalistas políticos” — diz Laignel, segundo o relato de Nery — “que consideram a política um espetáculo, assim como há homens públicos que privilegiam a aparência, o que provoca a falta de espaços para que as idéias possam se exprimir”.

Nery fala ainda do caderno especial de *Le Monde*, sobre a imprensa (“Mídia, mentiras e democracia”), a seu ver “um rosário de queixas contra a grande manipulação que perde de vista a finalidade da profissão”. Para o caderno de *Le Monde*, “a denúncia dos truques e a revelação das manipulações parecem ter-se tornado um segundo tempo obrigatório da informação”.

Os jornalistas e os políticos franceses propõem a criação de um comitê de ética, integrado por jornalistas, sociólogos, políticos e representantes do público, além da instituição de um *ombudsman* em cada jornal, para cuidar das reclamações do público, e a elaboração, pelos jornalistas, de “um código de ética, em que se prevejam sanções contra os abusos do jornalismo”.

Noutra apreciação desse mesmo problema, Nery sustenta (*Jornal de Brasília*, 14/6/1992) que:

a imprensa, no Brasil, é muito mais do que o quarto poder das democracias. Aqui, ela vem sendo vários poderes e alguns jornais e revistas se consideram não o quarto, mas os quatro poderes: denunciam como imprensa, força a lei como Legislativo, julga como Judiciário, e impõe o poder como Executivo. O primeiro grande problema nacional é a imprensa brasileira.

Não falta razão a Nery, em muitos pontos. Durante a Constituinte, de 1987 a 1988, a imprensa assumiu a postura pretensiosa de juízo irrecorrível do que ali era feito, como se fosse, ela própria, infalível e estivesse acima do bem e do mal. Na primeira fase dos trabalhos da Constituinte — quando, através da comissão que elaborava o esboço da futura Constituição e ali se impunham avanços econômicos, sociais e políticos surpreendentes — a imprensa moveu cerrada campanha de descrédito dos constituintes. Deu-se então grande relevo aos episódios pitorescos de que os constituintes eram protagonistas, abrindo-se espaços para o comentário do ridículo e da miudeza, em detrimento do debate de questões essenciais para o país.

Provavelmente para conter esse bombardeio, a Constituinte aprovou, nessa fase, quando era mais atacada, a inclusão, no projeto de Constituição, de dispositivo concedendo aos jornais e revistas brasileiras imunidade tributária total. Repetiu-se o favor obtido pelas empresas jornalísticas, durante a ditadura militar, por meio da Carta de 1967. O então senador Itamar Franco tentou, inutilmente, na Constituinte, através de emenda supressiva, eliminar esse privilégio. Promulgada a Constituição, o deputado Roberto Cardoso Alves, quei-

xando-se de perseguições de algumas empresas jornalísticas, voltou a propor, através de emenda constitucional, a supressão da imunidade tributária à imprensa. À exceção de *O Estado de S. Paulo* — que fez o registro da apresentação dessa emenda, para atacá-la —, nenhum outro veículo da mídia impressa ou eletrônica do Brasil noticiou a iniciativa.

Mais recentemente, no entanto, a Associação Brasileira de Jornalistas (ABJ), que defende a eliminação da exigência do diploma para exercício do jornalismo, publicou os resultados de pesquisa sobre o nível cultural dos jovens jornalistas diplomados, mostrando que a maioria deles ignora os assuntos mais mezinhas. A ABJ e seus associados, em geral, parecem acreditar que a desqualificação do ensino e da cultura, ocorrida no país, notadamente durante o regime militar, afetou apenas os cursos de Comunicação Social. E pior: nutrem a irracional esperança de que as pessoas sem nenhum curso superior sejam as únicas capazes de formar novos quadros de boa comunicação social no Brasil.

Esse é um aspecto do confronto político e econômico entre os empresários do jornalismo e os jornalistas, e que abordo apenas para mostrar ângulos ocultos de fatores que contribuem, no país, para o aumento do descrédito da imprensa.

Tais questões foram denunciadas formalmente, pelos comitês de imprensa do Senado e da Câmara, que, ao final da Constituinte, protestaram contra a auto-suficiência antidemocrática do empresariado de comunicação, graças à qual a imprensa preservou seus interesses e esqueceu ou combateu os da sociedade.

As generalizações sistemáticas contra os homens públicos são outro vezo autoritário da imprensa, muitas vezes utilizadas a pretexto de demonstrar firmeza na crítica e nos julgamentos, ou para sensibilizarem leitores desavisados e espectadores da mídia eletrônica. Mas, frequentemente, as generalizações, além de inaceitáveis nos códigos de comunicação, encobrem interesses políticos ou econômicos. Graças a essa prática, muitos intelectuais, artistas, profissionais liberais e trabalhadores foram levados, no Brasil, à repugnância pela ação política, reagindo como seus iguais, na Alemanha de 1933. Nesse ano, os que podiam salvar a Alemanha aceitaram a falácia generalizadora dos que apregoavam a falência das instituições democráticas e a falta de estofo moral de todos os homens públicos, especialmente os do Legislativo ou dos partidos políticos. Frustradas pelos descaminhos da política, sobre os quais a imprensa tanto insistia, essas pessoas não quiseram lutar. E não lutaram. Todas acabaram perdendo a liberdade de pensar, de falar e de escrever contra a nova política e os novos políticos, e logo sobre qualquer assunto.

A partir de renovação gráfica, ocorrida na mídia impressa, no final de 1940, os jornais e as revistas passaram a preocupar-se com a



GUEVARA. CARICATURA DO POETA MANUEL BANDEIRA, 1928. [REVISTA PARA TODOS].

beleza de sua imagem, procurando torná-la cada vez mais atraente. Isso implicou a criação de amplos espaços em branco nas páginas para equilibrar, de modo agradável, a massa de textos com o material fotográfico ou caricaturas e charges.

Em consequência, reduziu-se, drasticamente, o espaço destinado à informação e às análises e interpretações. Essa tendência se agravou ainda mais porque a mídia impressa quis concorrer esteticamente com a mídia eletrônica, e adotou, como praxe, a limitação do número de linhas dos textos, alternando-os, a partir dos avanços tecnológicos da impressão em cores, com grandes fotos coloridas.

Os manuais de regras dos grandes jornais e revistas adotaram limites rígidos para cada matéria jornalística, sob o argumento de que os leitores não têm interesse por textos longos. A justificativa, aliás, não é nova. O jornalista e homem público Bernardo Pereira de Vasconcelos, na primeira metade do século XIX, proprietário do jornal *Sete de Abril*, recomendava a seus redatores: “Artigos curtos, rapazes, artigos curtos. São os que o povo lê”.

A nova tendência, inspirada em boa parte pelo jornal americano *U.S. Today*, teve como consequência o aumento da quantidade de pequenas notícias, em detrimento das reportagens investigativas de maior fôlego ou das interpretações e análises dos fatos cotidianos, que ajudam o leitor a entender os acontecimentos e a situar-se diante da realidade. O bombardeio de pequenas notícias — vestidas numa espécie de camisa-de-força parnasiana —, na opinião dos teóricos da comunicação, só confunde seus destinatários.

De qualquer forma, a tendência generalizada a pulverizar a informação foi superada por um acontecimento superveniente no Brasil: a denúncia de envolvimento do governo em escândalos de tráfico de influência. As grandes revistas semanais — que sempre reservam espaço maior para o aprofundamento do noticiário em torno do fato marcante da semana — dominaram a cobertura sobre essa questão, objeto de investigações parlamentares, e os jornais diários precisaram readaptar-se à nova realidade — um retorno ao estilo de cobertura ampla —, abandonando, provisoriamente, seus manuais de recomendações técnicas e limitadoras.

Mas o problema persiste e tem outras implicações. A informação é poder, pois ajuda a decidir, e implica, portanto, dominação. A falta de informação, em contrapartida, significa submissão e fraqueza.

Por isso, tanto nos regimes autoritários — aliás especialmente nestes — quanto nas democracias liberais modernas, não é incomum, na comunicação de massa, o recurso à antiética da mentira e da omissão voluntária ou involuntária, como instrumento de defesa de suas conveniências políticas, econômicas e sociais.

Tenho dito e repito: mesmo chefes de governos considerados democráticos mentem ou omitem a verdade, para se protegerem ou às elites que os apóiam.

O presidente Nixon mentiu no caso Watergate. Reagan omitiu a verdade no episódio Irã — contras. Bush praticou as duas coisas, ao invadir o Panamá e ao propor, como vantajosa para os países atrasados, a integração econômica do Alasca à Patagônia. No Brasil, o pre-

sidente da República declarou-se inocente das acusações que lhe foram feitas na CPI sobre seu governo, mas reconheceu haver pedido empréstimo externo, para custeio de sua campanha eleitoral. Tais recursos — pelo que se viu depois — foram usados em contrabando de ouro.

A opinião pública, diante de tais práticas, tem cada vez menos condições para julgar se um governante lhe mente ou simplesmente escamoteia a verdade por motivos políticos. Para enfrentar esse problema, intelectuais norte-americanos (Noam Chomsky, Ellen Ray, Doug Henwood, e outros) criaram um veículo específico para a crítica das mentiras da mídia, a *Lies of our times*.

Há quarenta anos, analfabetas eram as pessoas a partir de certa idade, que estivessem no nível zero da capacidade de ler qualquer texto e de assinar o próprio nome. Em meados dos anos 1950, a Unesco fixou novo conceito de analfabetismo, ao considerar analfabeto funcional alguém incapaz de entender a bula de um medicamento ou de preencher corretamente um questionário sobre si mesmo.

Nos países desenvolvidos, o analfabetismo absoluto praticamente desapareceu, mas, mesmo neles, os analfabetos funcionais cresceram em número e hoje são quase 20% da população adulta. Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, o analfabetismo convencional persiste em larga escala. Entre nós, essa categoria está entre 55% a 60% dos adultos, enquanto os analfabetos funcionais são estimados em pelo menos 80% da população.

A reversão desse quadro não é fácil, pois depende da educação e do ajustamento dos alfabetizados à complexidade cada vez maior do mundo moderno, ditada pelo progresso da tecnologia. Em tese, a imprensa tem, nesse processo, condições para ajudar a diminuir o crescimento do analfabetismo funcional. Esse fenômeno, como é natural, tende a incorporar, com o tempo, as pessoas que hoje lêem ou escrevem, mas, por desinformação continuada ou por sujeição à manipulação da verdade, perdem progressivamente a capacidade de avaliar a realidade ou de julgar os personagens que a constroem. Noutras palavras: em tais condições, os analfabetos funcionais tornam-se obstáculo ao aprofundamento do processo democrático.

A situação atual da imprensa não autoriza otimismo, nesse particular. De um lado, a mídia eletrônica é objeto de concessões do Estado, pouco ou mal controladas pela sociedade e se submete, por isso, às limitações do poder concedente ou aos interesses das grandes transnacionais promotoras do consumismo.

Na televisão, o maior tempo disponível é destinado ao entretenimento, pouco sobrando para a informação e menos ainda para a análise e interpretação dos fatos. Portanto, meio por excelência de comunicação aos analfabetos, a televisão — como é feita no Brasil — ajuda a aumentar nosso analfabetismo funcional.

Por sinal, no artigo em que fala da situação da imprensa na França, Sebastião Nery menciona uma das conclusões do debate sobre comunicação lá realizado: “Obrigada a seguir a tevê, a imprensa escrita abandona seu papel intelectual, sua função de reflexão”.

PASQUIM

PARA
MAIORES
DE 16
ANOS

ANO XI - Nº 564 - RIO, DE 18 A 24/4/1980 - C\$ 40,00

- UM PAÍS A DESCOBERTO.

DESCOBERTA DO BRASIL

22 DE ABRIL

NÃO VAI
DAR CERTO,
CABRAL!



MAIS UM FIURO DO PASQUIM:

HENFIL ENTREVISTA JULIÃO

CHICO CARUSO: POSTER DA CHEGADA DA FLÁVIA SCHILLING

Colha da Noite

Paulo—Quinta-feira, 9 de Abril de 1931

JUSTO REVIDE DOS ESTUDANTES DE DIREITO AOS INSULTOS DE UM ANTHROPOPHAGO

ALDO DE ANDRADE, QUE CLASSIFICOU A FACULDADE DE DIREITO SENDO UM "CANCRO" QUE MINA O NOSSO ESTADO, FUI AGREDIDO E QUAN LINGUADO EM PLUMA PARA DA SU

Com a publicação de uma carta de Alda de Andrade, dirigida ao "Estado", em 27 de março, em que o autor classificava a Faculdade de Direito de um "cancro" que minava o Estado, e a faculdade respondeu com uma carta de revide, assinada por um grupo de estudantes, em 28 de março, em que se dizia: "A faculdade de Direito não é um cancro, é um órgão vital do Estado, e não pode ser removida sem que o Estado não sobreviva".



Reuniao dos estudantes da Faculdade de Direito, em 27 de março, em que se discutiu a carta de Alda de Andrade.

COCO DE PAGU



1.º Prêmio de 100.000 réis
2.º Prêmio de 50.000 réis
3.º Prêmio de 25.000 réis
4.º Prêmio de 10.000 réis
5.º Prêmio de 5.000 réis
6.º Prêmio de 2.500 réis
7.º Prêmio de 1.000 réis
8.º Prêmio de 500 réis
9.º Prêmio de 250 réis
10.º Prêmio de 100 réis



O AUMENTO DO SUBSIDIO

15
JANEIRO
1927

Carreta

NUMERO
ANNO XX

ENOS AIRES IRA 7FRN

O que se passa nas graças de Lima? Quem é o João Saldanha que descobrimos? O que escreveu Padre Rodolfo, antes de ser assassinado? Quais realmente os poemas de Raulino...

Verdade & Liberdade

PATRICIA GALVAO

S. PAULO (BRASIL) 1931



Viandant

Diário

SUPPLEMENTO

MAC

BO DE JANTIM

GALVÃO, MILITANTE



Viandant
A Viandant é uma revista mensal, fundada em 1931, com o objetivo de divulgar a cultura e a arte. A revista é editada por Patricia Galvão e tem como principais colaboradores os artistas e escritores da época.



VERSUS

Um jornal de aventuras, ideias, reportagens e cultura

AUGUSTO DE CAMPOS



cega fanika e kabeiluda

1.º Prêmio de 100.000 réis
2.º Prêmio de 50.000 réis
3.º Prêmio de 25.000 réis
4.º Prêmio de 10.000 réis
5.º Prêmio de 5.000 réis
6.º Prêmio de 2.500 réis
7.º Prêmio de 1.000 réis
8.º Prêmio de 500 réis
9.º Prêmio de 250 réis
10.º Prêmio de 100 réis

1.º Prêmio de 100.000 réis
2.º Prêmio de 50.000 réis
3.º Prêmio de 25.000 réis
4.º Prêmio de 10.000 réis
5.º Prêmio de 5.000 réis
6.º Prêmio de 2.500 réis
7.º Prêmio de 1.000 réis
8.º Prêmio de 500 réis
9.º Prêmio de 250 réis
10.º Prêmio de 100 réis

1.º Prêmio de 100.000 réis
2.º Prêmio de 50.000 réis
3.º Prêmio de 25.000 réis
4.º Prêmio de 10.000 réis
5.º Prêmio de 5.000 réis
6.º Prêmio de 2.500 réis
7.º Prêmio de 1.000 réis
8.º Prêmio de 500 réis
9.º Prêmio de 250 réis
10.º Prêmio de 100 réis

A televisão se diz espelho da realidade e sem nenhuma influência sobre ela. Mas o relator do Orçamento de Comunicações, no Senado francês, Jean Cluzel (*Recherches Parlamentaires*, setembro de 1990), mostra que ela é um espelho sim, mas côncavo, pois aumenta, quase sempre, a imagem do real, através de edição, a fim de dramatizá-la e atrair a atenção do espectador pela emoção. Por dispor da força da imagem, acoplada às palavras, a televisão parece merecer maior credibilidade que a mídia impressa, tornando, por isso mesmo, bem mais perigosas as deformações que realiza.

Veículo principal do Estado espetáculo, a televisão — ao que mostra o jornalista Tetê Catalão (*Jornal de Brasília*, 8/4/1990) — “invade o mais sagrado reduto da pessoa: sua autonomia crítica para analisar e decidir sem pressão da máquina ou sob a censura dos zumbis do sistema”. “E o objetivo dessa invasão” — esclarece Tetê — “acaba sendo a eliminação de opositores e a instauração de valores messiânicos”.

Não é por outro motivo, aliás, que as emissoras de televisão se opõem, vigorosamente, à cessão de tempo e espaço — que usam a seu bel-prazer — para a propaganda eleitoral ou de partidos políticos. Bem ou malfeitos, os programas desses invasores possibilitam um mínimo de contestação ao poder incontestável e sem controle da mídia eletrônica.

Na tentativa de se tornar mais leve, para fazer frente à leveza e à mobilidade da televisão, a mídia impressa — conforme procurei mostrar — reduziu a dimensão de suas matérias informativas, multiplicando-as porém em termos

numéricos. Isso importou o sacrifício da explicação dos fatos mais importantes do dia-a-dia para bom entendimento do leitor comum. Conseqüentemente, abriu-se mão de meios que poderiam contribuir para neutralizar o aumento do analfabetismo funcional, entre seus leitores.

A inexistência, no Brasil, de conselhos de redação independentes, na mídia impressa, e de conselhos societários, na mídia eletrônica, para inibir abusos do império das comunicações, agrava as distorções do jornalismo brasileiro, algumas das quais foram mencionadas ao longo desta exposição.

Na concorrência tecnicamente desigual entre a mídia impressa e a mídia eletrônica — em muitos casos o controle de ambas pertence a um só grupo, o que permite abusos ainda maiores — há um ponto comum entre as duas: a utilização disfarçada ou explícita daquilo que o professor Emil Dovifat (*Periodismo*, México, 1959, tomo I, p. 129) chama de autoritarismo na linguagem da comunicação. Introduz-se, no corpo da informação, uma valorização política, “que se serve, ao mesmo tempo, de termos difamatórios ou ambíguos, para alterar, com habilidade, a reação emotiva do leitor ou do espectador”. Segundo Dovifat, não se respeita, com isso, o direito que tem o destinatário das mensagens de emitir, racionalmente, sua resposta, ante as informações que lhe são transmitidas.

No entender de José Luiz Martinez Albertos, vice-diretor da Faculdade de Ciências de Informação, na Universidade Autônoma de Barcelona (*Los estilos y generos en la prensa escrita*, Barcelona, A.T.E., 1974, p. 53), “a

importância política dessa falta de respeito está no fato de que tais respostas são as que originam as atitudes coletivas situadas na base dos processos de opinião pública”.

Mostra Martinez, nas páginas seguintes dessa obra, o emprego, na linguagem política, de expressões também autoritárias, como os adjetivos de persuasão, os tropismos (transposição de termos de um terreno para outro), as anfibologias, a traslação lingüística, isto é, a assimilação de determinados termos pelos problemas a que eles se referem, o que conduz à resignação de quem os escuta ou lê e esconde o fatalismo que escapa ao controle do ser humano.

Enfim, embora houvesse outros aspectos a abordar na questão da imprensa, limitei-me a oferecer alguns deles à reflexão de todos. Em conclusão, entendo que a imprensa, dada a natureza dos problemas que enfrenta, em várias partes do mundo, mas principalmente no Brasil, precisa, ela própria, passar pelo crivo de discussões modernizadoras, como aconteceu com a literatura e as artes brasileiras, em geral, na Semana de 22.

A parte viva desse acontecimento, o que o acadêmico Rouanet chama de espírito da Semana de Arte Moderna, deveria, pois, inspirar a reforma na imprensa, no fundo, na forma e na gerência da própria comunicação.

Toda a sociedade — cujo destino está em jogo, nos acertos ou desacertos da imprensa — precisa participar desse debate e não apenas os empresários, o governo e os homens de comunicação.

A verdade é que, apesar dos brilhantes feitos jornalísticos que operou ou opera — e está operan-

do, hoje, um dos mais extraordinários de sua história —, a imprensa brasileira, no conjunto de suas qualidades e defeitos, ainda não é a de que o Brasil precisa para resolver o problema das injustiças sociais que o afligem.

A modernização desejável da imprensa deve alcançar, em especial, a mídia eletrônica, fonte mais importante de informação, formação e deformação da maioria dos brasileiros. Será preciso fazer — de que modo, não sei — com que os brasileiros aprendam a debater e deixem de ser meros consumidores de imagens e sons, ou observadores passivos dos debates alheios. Quando estiverem aptos a julgar corretamente os debates, terão também condições de derubar, entre nós, aquilo que Jean François Revel acha que existe em todo o mundo contemporâneo: o império da mentira, na era da superinformação.

Se chegarmos a isso, por um grande debate, como o da Semana de 22, poderemos reler, aplicando-os à mentira e à mistificação, os belos versos iniciais do modernista Felipe de Oliveira, no “Epitáfio que não foi gravado”:

Todos sentiram quando a morte entrou

Com um frêmito apressado de retardatária.

A que tinha de morrer fechou os olhos, para sempre.

Que sejam, pois, a mentira e a mistificação essa morta. Ninguém vai chorar por ela.

Rubem de Azevedo é formado em direito (Rio) e em letras (UnB). Autor de *Como se faz um presidente da República no Brasil e Ética jornalística*.

Filóteo - Não são os sentidos que percebem o **INFINITO**; não é pelos sentidos que chegamos à esta conclusão, porque o infinito não pode ser objetos dos sentidos. Por isso aquele que procura esclarecer tudo isto através dos sentidos se parece com aquele que procura enxergar com os olhos a substância e a essência: é aquele que as negasse, por não serem sensíveis ou visíveis, negaria a própria substância e o próprio ser. Mas deve haver cautela em recorrer ao testemunho dos sentidos, os quais admitimos só no campo das coisas sensíveis, mesmo aceitando-os com certa suspeita, se não emitirem um julgamento de acordo com a razão. É conveniente para o intelecto julgar e dar razão das coisas ausentes e divididas por espaço de tempo e de lugar. Nisto temos suficiente testemunho no campo dos sentidos pelo fato de não poderem nos contradizer e, ainda mais, por tornarem evidente e confessarem sua incapacidade e insuficiência na aparência da finitude causadas pelos limites de seu **HORIZONTE**, tornando evidente como são inconstantes. Ora se conhecemos por experiência que eles nos enganam com respeito a superfície do globo no qual nos encontramos, muito mais devemos suspeitar deles quando querem referir-se ao côncavo céu estrelado.

Elpino - Para que então servem os sentidos?

Filóteo - Servem somente para excitar a razão, para tomar conhecimento, indicar e dar **TESTEMUNHO PARCIAL**, não para testemunhar sobre tudo, nem para julgar, nem para condenar. Porque nunca, mesmo perfeito, são isentos de alguma perturbação. Por isso **VERDADE**, em pequena parte, brota desse fraco princípio que são os sentidos, mas não reside neles.

Giordano Bruno

Elpino - Eu gostaria de entender melhor tudo isso. Então, façam-me o favor de se explicarem mais a respeito daquilo que afirmam existir todo, e totalmente em tudo, e todo, em todo o infinito e totalmente infinito.

Filóteo - Eu considero o universo **"TODO INFINITO"** porque não possui limite, nem termo, nem superfície; digo não ser o universo "totalmente infinito" porque cada parte que dele possamos pegar é finita, e cada um dos inúmeros mundos que contém é finito. Digo que Deus é "todo infinito" porque exclui de si qualquer termo, e cada um dos seus atributos é **UNO** e infinito; e digo que Deus é "totalmente infinito", porque está inteiramente em todo o mundo, em cada uma de suas partes, infinita e totalmente: ao contrário da infinitude do universo que reside totalmente no todo e não nas partes (se nos é permitido chamá-las "partes", referindo-nos ao infinito que nele podemos compreender).

Não se deve procurar se fora do céu existe lugar, vácuo ou tempo: porque único é o lugar geral, único o espaço imenso, que podemos livremente chamar de **VÁCUO**, onde existem inumeráveis e infinitos globos, como existe este, onde vivemos e vegetamos. Esse espaço nós chamamos infinito, porque não existe razão, conveniência, possibilidade, sentido ou natureza que deva limitá-lo. Nele estão contidos infinitos mundos semelhantes a este.

Giordano Bruno (1548-1600)

O Brasil em 1º lugar.

A Petrobrás foi criada há 41 anos com a missão de garantir ao Brasil o abastecimento de derivados de petróleo, ao menor custo possível.

Nestes 41 anos, aconteceram graves distúrbios internacionais, guerras, drásticas interrupções de fornecimento de petróleo, violentas flutuações de preços. Por causa disso, muitos países, mesmo os desenvolvidos, foram obrigados a amargar rigorosos racionamentos de combustíveis e outros derivados.

No Brasil não ocorreu nada parecido.

A Petrobrás contornou importantes impactos político-econômicos nacionais, bem como impactos internos, como greves – e sempre superou tudo.

Os estoques estratégicos garantem o Brasil contra imprevistos, independente de fornecedores e injunções externos.

Tanto que a Petrobrás, conseguiu manter nosso abastecimento regular constante, tranqüilo, sem falhar um único dia em 41 anos.

Melhor. Os preços dos derivados Petrobrás são sempre menores que a média dos preços dos produtos congêneres oferecidos no mercado mundial.

Na missão da Petrobrás, a economia brasileira e os cidadãos brasileiros estão em 1º lugar.

E ela está cumprindo plenamente sua missão.



RENDE O MAIOR PERCENTUAL QUE VOCÊ JÁ VIU.

CADERNETA
DE POUPANÇA
OURO
A poupança do Brasil.

Rende mais
segurança,
rende grandes
investimentos
na agricultura,
rende uma
enormidade
para você e
para o seu País.



BANCO DO BRASIL

Bom para você.
Bom para o Brasil.