A estrutura do universo, a mecânica quântica e a cosmologia moderna

AS ORIGENS NAS PREOCUPAÇÕES DO HOMEM

A preocupação humana com o problema de nossas origens provavelmente remonta ao início das preocupações conscientes do homem, haja vista a enorme quantidade de lendas acerca do fato em sociedades mais primitivas, e sua presença em conteúdos mitológicos de várias religiões politeístas, que culminam nas gêneses das religiões monoteístas. Como podemos apreciar, por exemplo, nas pinturas da Capela Sistina, o problema da criação passa pela arte de conteúdo religioso. Também observamos a satisfação do pensamento na característica hierárquica da criação, como após a separação entre a luz e as trevas, onde temos a criação do Sol, e finalmente a criação humana.

ELCIO ABDALLA
é professor do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

O ser humano, tornado consciente, passando a viver o mito do herói e a planejar a compreensão da natureza, almeja poder descrever a criação do mundo, suas leis e conseqüências. A arte retrata muito bem essas passagens.

Pode-se dizer que a mitologia tenha sido o início da ciência, como vemos nos pitagóricos que foram o elo entre o orfismo e uma protociência. O orfismo, por sua vez, foi um movimento de reforma dos mitos dionisíacos. Pitágoras fez uma ligação entre o místico e o racional, dicotomia que sempre permeou a história do pensamento humano, não tendo mais uma união harmônica no Ocidente após os gregos. Na Grécia Antiga, os mitos anteriores acerca de deuses e ritos menos civilizados foram transformados nos

deuses olímpicos por Homero, já que um povo guerreiro de grandes heróis necessitava de deuses condizentes com aquela descrição.

Interessa-nos aqui a questão da criação. Em muitas civilizações a criação do universo tem caráter similar, com uma criação do universo que inclui a criação do próprio tempo. A criação, entre os gregos, apresenta um aspecto geral bastante parecido com a criação judaica, em algumas de suas vertentes. Para os gregos, Caos juntou-se com a Noite (Nyx) com quem teve um filho, Érebo (Escuridão). Este casou-se com a própria mãe, gerando a Éter (Luz) e Hemera (Dia) que, por sua vez, com a ajuda do filho Eros, geraram o Mar (Pontus) e a Terra (Gaia). Gaia gerou o Céu (Urano). Gaia e Urano geraram os doze Titãs, entre os quais Crono e Rhea, pais de Zeus. Crono trouxe o tempo, e comia seus filhos, uma personificação do que cria para destruir. Rhea salva Zeus, que quando crescido rebela-se, salvando os irmãos do interior paterno, e gerando assim a homens e deuses.

Esta brevíssima história, que, em suas versões originais, foi rica de detalhes até mesmo sobre o interior humano, mostra a preocupação do homem com a criação do mundo e seu destino. Os deuses olímpicos preocuparam-se com os homens e suas lutas como se fossem questões deles mesmos. Foram deuses humanizados, tanto no melhor quanto no pior sentido, tal como na história bíblica de Jó. Os deuses olímpicos nos trouxeram a preocupação com as ciências, com as artes e com a medicina. Palas Atena foi a mais sábia das deusas, e Febo Apolo foi o pai de Asclépio, o fundador da medicina. Seus filhos Macáone e Podalírio foram médicos.

A cosmologia foi uma importante peça na estrutura do pensamento humano, já que dá um caráter divino às atribuições humanas, fazendo dos céus um hábitat dos deuses paralelo à Terra. Toda civilização tem alguma resposta para a pergunta sobre a estrutura do universo e, começando da civilização helênica, o homem foi-se aproximando de uma resposta a partir da observação dos céus, uma resposta que andava na direção do racional.

A ciência grega era no entanto uma protociência. Conhecia-se muito mas, apesar disso, os conceitos estavam, dentro do aspecto da ciência moderna, equivocados. Foram no entanto essenciais para a posterior evolução do pensamento humano. Em particular, o conhecimento dos céus, primeiramente através da antiga crença astrológica, posteriormente através da observação direta dos céus, foi bastante grande, tendo evoluído para o universo ptolomaico.

Assim, já mais de 1.000 anos antes da era cristã havia observações precisas do movimento do Sol, através da variação do tamanho da sombra de uma vara vertical, durante o dia e de um dia para outro. Combinando-se com relógios d'água, havia uma marcação do tempo.

Os movimentos das estrelas são mais regulares, porém sua observação é mais difícil, pois é necessário que se reconheçam estrelas facilmente distinguíveis de noite para noite. São todavia excelentes para marcações de tempo mais longo. A maioria das constelações reconhecidas pelos antigos foi colocada em correspondência a figuras mitológicas, de onde temos uma pré-protociência, a astrologia, que mistura observações precisas com elementos mitológicos.

Para que as observações feitas aqui na Terra que hoje sabemos estar em movimento fizessem sentido caracterizou-se o movimento dos céus através de duas grandes esferas, que em uma interpretação moderna referem-se aos movimentos da Terra. Desse modo, uma esfera contendo as estrelas move-se para oeste com uma rotação a cada 23 horas e 56 minutos. As estrelas nascem e morrem exatamente a leste e a oeste em relação a essa esfera, respectivamente. Há um grande círculo, a eclítica, com uma inclinação de $23^1/_2°$, e o Sol se move uma vez a cada $365^1/_4$ dias pela eclítica. Algumas estrelas tinham movimentos bastante distintos, pois em certa época do ano andavam em sentido contrário, em movimento retrógrado. Foram chamadas de *planetas*, palavra que significava movimento errante.

A descrição dos céus foi ficando mais sofisticada. Os planetas passaram a se mover em círculos em torno de outros círculos em torno da Terra, os epiciclos e os deferentes. Esse sistema deu origem ao que podemos chamar de sistema ptolomaico de descrição dos céus. Recebido pelos árabes, os guardiães da ciência e da filosofia durante a Idade Média, o sistema foi aperfeiçoado a ponto de ter uma precisão de até 8 minutos de arco!

NOSSA POSIÇÃO DIANTE DO UNIVERSO

Os pensadores da Antigüidade observavam com muita frequência o seu esplendoroso céu. Desde muito cedo souberam da forma esférica da Terra. Medindo o ângulo gerado pelos raios solares ao meio-dia por uma vara vertical e comparando-o com uma localidade onde o sol no mesmo instante estava a pino, Eratóstenes, o bibliotecário de Alexandria, foi capaz de calcular, aproximadamente, o raio da Terra por volta do terceiro século antes de Cristo. Para isso ele precisou apenas mandar medir a distância entre Alexandria e uma outra localidade, distância esta que se constatou ser de 5.000 estádios, e comparou, no mesmo dia, o sol a pino em Alexandria com o ângulo de $73pt1/5^o$ na outra cidade. Isso levou a uma circunferência da Terra de 250.000 estádios, que segundo estimativas estaria correto dentro de um limite de 5% (não se tem certeza do valor exato do estádio).

Como observadores perspicazes que eram, os antigos elaboraram mapas para a localização dos astros celestes. Na teoria de Ptolomeu, a Terra era o centro do universo. Ptolomeu viveu em Alexandria, durante o segundo século depois de Cristo. Sua teoria era bem aceita pela Igreja, já que propunha que o homem era um ser privilegiado pela Divindade, no centro do universo. Além disso, pode-se imaginar que a teoria alimentava o orgulho dos poderosos, que não eram apenas os donos do poder do lugar em que habitavam, mas do centro do universo. Essa situação psicológica ainda persiste hoje, quando muitos acreditam que haja vida em outros planetas, enquanto outros insistem que isso seja impossível, novamente um teimoso antagonismo de posições.

Felizmente, a ciência não se desenvolve baseada apenas em opiniões, mas em fatos. No século XV, o padre polonês Nicolau Copérnico foi incumbido de uma reforma do calendário pondo-se, portanto, a fazer observações astronômicas, já que as antigas tabelas ptolomaicas haviam acumulado muitos erros até aquela época. Em particular, festas como a Páscoa estavam sendo comemoradas em dias que não eram os prescritos anteriormente. Copérnico descobriu que as complicadas tabelas de Ptolomeu ficavam muito mais simples se, ao invés de a Terra ser considerada como centro do universo, o Sol o fosse. Copérnico não teve problemas com o clero, pois isso foi considerado apenas como uma hipótese de trabalho, e não como uma realidade. Quando outros filósofos, como Giordano Bruno, tomaram as idéias de Copérnico como verdades científicas, houve um intensa reação – Giordano Bruno foi considerado herege e queimado vivo. Todavia, com o tempo, os fatos impuseram-se. De acordo com a teoria de Ptolomeu, segundo a qual os planetas se movem em epiciclos (círculos menores cujos centros estavam por sua vez em círculos maiores em torno da Terra), Vênus nunca poderia ter fases como a Lua. Mas essas fases foram observadas com o advento do telescópio! Mais que isso, as observações mais modernas foram dando corpo a uma nova teoria, muito precisa, e com poder de previsão. O astrônomo dinamarquês Tycho Brahe recebeu do rei permissão para usar a Ilha de Hven como observatório. Ali ele fez um enorme número de observações. Por sua vez, o alemão Johanes Kepler colocou essas observações sob a forma de três leis, conhecidas como Leis de Kepler, que diziam que os planetas se moviam em elipses, o Sol estava num dos focos, a área varrida por unida-

de de tempo era constante e o cubo do raio da órbita é proporcional ao quadrado do período de revolução. Essas leis, o inglês Isaac Newton mostrou serem conseqüência de outra mais simples ainda: em primeiro lugar há um conceito de força agindo sobre a aceleração dos corpos proporcionalmente, com a constante de proporcionalidade igual à massa do corpo. Além disso, há uma força gravitacional entre os corpos proporcional ao produto das massas e ao inverso do quadrado da distância. Assim nascera a lei da gravitação universal de Newton. O universo tem agora uma outra aparência, completamente diferente: não há um centro, nem a Terra, nem o Sol, mas uma infinidade de astros sujeitos à ação de uma lei fundamental, universal, regendo seus movimentos e suas trajetórias.

Após Newton, vários desenvolvimentos seguiram-se dentro da física. Dois grandes campos afirmaram-se: por um lado, a física do pequeno, com a hipótese atômica ganhando força e finalmente se impondo; e de outro lado, a união de dois tipos de força conhecidas milenarmente: o magnetismo (do antiqüíssimo ímã) e a eletricidade (do pré-histórico relâmpago). Foi com grande surpresa que se verificou no século XIX que as leis que regem o eletromagnetismo pareciam diferentes das leis que regem a mecânica dos corpos – aquela descoberta séculos antes por Isaac Newton. Para acomodar esses dois tipos de leis foi proposto que os fenômenos eletromagnéticos (e a luz é um desses fenômenos) só ocorreriam em um tipo de geléia universal chamada éter, que preenche todo o espaço. Todavia foram vãs as tentativas de se medir o éter.

Foi em 1905 que Albert Einstein, que trabalhava no departamento de patentes em Berna, na Suíça, propôs que todas as leis devem ter a mesma forma. Não importava de onde observássemos um fenômeno, seja de um trem em movimento, seja parado vendo-o acontecer, tanto o fenômeno eletromagnético como o mecânico devem se comportar da mesma maneira. Assim, ele modificou as Leis de Newton – na verdade a modificação era muito pequena, e com os aparelhos da época não podia ser observada em fenômenos mecânicos, pois era da ordem (tamanho) do quadrado da relação entre a velocidade do objeto e a velocidade da luz! Lembremos que a velocidade da luz é de 300.000 quilômetros por segundo! Dessa maneira, a modificação em fenômenos do dia-a-dia (movimento de uma pessoa, por exemplo) não poderia ser notada. No entanto, quando aplicada ao macrocosmo a teoria da relatividade traz várias conseqüências. Desse modo, a teoria da gravitação de Newton também foi mudada para ser relativística, ou seja, obedecer à teoria da relatividade.

Einstein acreditava que o universo fosse estático. Tentou resolver suas equações para a relatividade geral (assim foi chamada a nova teoria da gravitação) para obter um universo estacionário e encontrou dificuldades, sendo possível encontrar tal solução apenas no caso de modificar as equações com um termo chamado cosmológico. Outras soluções existiam, que todavia não eram estáticas, e que sugeriam um universo em expansão.

Em 1926 o astrônomo Edwin Hubble verificou que as estrelas distantes estavam se afastando de nós, e que a velocidade de afastamento era proporcional à distância que estivéssemos da estrela. Ora, se tomarmos um elástico, pintarmos nele pontos eqüidistantes e começarmos a esticá-lo, vamos verificar que também a velocidade relativa de um ponto a outro é proporcional à distância – isso significa que as observações de Hubble implicam um universo em expansão, de acordo com as equações originais da teoria da relatividade geral! E mais, se o universo está em expansão, houve um dia em que tudo estava comprimido numa região do espaço, e de repente – Bum! – uma grande explosão deu origem a tudo!

Dessa maneira nos aproximamos da origem do nosso universo. No entanto, como descrevê-la em mais detalhe? Por que se formaram as estrelas, os planetas, as moléculas, os átomos, ou o que quer que exista de menor? E por que as galáxias, aglomerados de galáxias ou o que quer que exista de maior?

A resposta a essas questões merece um estudo muito detalhado. E devemos retroceder um pouco, para olhar para outras descobertas, agora no mundo do muito pequeno.

O NASCIMENTO DA CIÊNCIA MODERNA

Em um estudo sobre o universo como um todo, partimos agora da revolução científica de Galileu e Descartes. Com o método científico em mãos, levando em conta as observações detalhadas anteriores ao século XVII, foi possível a Isaac Newton realizar a grande revolução científica dentro da ciência. O trabalho de Newton tornou-se a base sólida da física clássica. Há duas partes essenciais na equação de Newton. Em primeiro lugar, fala-se do resultado da força: esta é proporcional à aceleração do corpo a ela submetida. Sendo a aceleração um objeto geométrico obtido da posição geométrica do objeto como função do parâmetro absoluto chamado tempo, o resultado da força é imediatamente conhecido, uma vez que se saiba a constante de proporcionalidade, chamada de *massa*. De fato, podemos chamá-la *massa inercial*. A força deverá ser o produto da massa pela aceleração. Por sua vez, para definirmos a física do problema, devemos dizer quem é a força. No caso da gravitação, Newton postulou que ela fosse proporcional às massas (aqui *massas gravitacionais*) dos objetos que se atraem e inversamente proporcional à distância que os separa.

Finalmente, as forças devem obedecer ao *princípio de ação e reação*. Com as Leis de Newton, puderam-se confirmar as Leis de Kepler de modo dedutivo. Esse foi o grande sucesso de Newton. O universo newtoniano, todavia, era pobre, por várias razões. Em primeiro lugar, a lei de Newton da gravitação era postulada não havendo qualquer razão fundamental para a mesma. No entanto, para a época, este não era realmente um problema. Havia dificuldades decorrentes do fato de tal universo ser infinito. Poderia haver colapsos de proporções gigantescas no universo! Além disso, havia o paradoxo de Olbers conforme vemos na Figura 1.

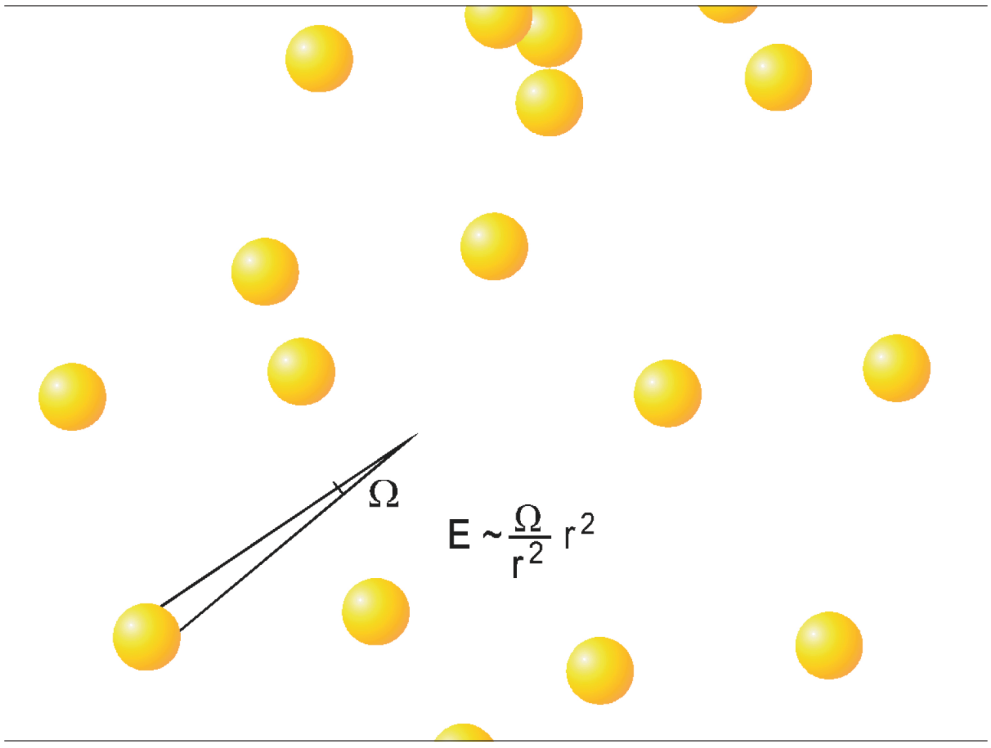
Suponhamos que o universo seja formado por estrelas ou aglomerados uniformemente distribuídos. Nesse caso, se olharmos para uma dada direção no céus, sempre veremos algum ponto luminoso vindo de uma estrela (ou aglomerado). O fluxo de energia dali proveniente é inversamente proporcional ao quadrado da distância, portanto, a energia que é obtida multiplicando-se pela área de transmissão é proporcional apenas ao ângulo sólido usado na observação. A constante de proporcionalidade só depende do fluxo de energia transmitida pela estrela ou aglomerado, que supomos constante pelo universo. Portanto, se olhássemos para qualquer parte do céu, durante o dia ou à noite, veríamos a mesma claridade que observamos para o Sol! Este é o paradoxo de Olbers. Finalmente, com o tempo absoluto tal como definido pela física clássica, não há um início, e não se podem compreender problemas relacionados com a formação cósmica.

NOVOS VENTOS NA CIÊNCIA

O próximo desenvolvimento científico de relevância é o eletromagnetismo (1). As equações de Maxwell descrevendo o eletromagnetismo são de natureza diferente das equações de Newton. Elas descrevem a fonte da força que se juntaria à força gravitacional para dar origem ao sistema de forças que alavancam o movimento horário através das equações de movimento. Todavia ocorre que a simetria fundamental das equações de Maxwell é tal que não há um tempo absoluto parametrizando as três dimensões espaciais euclidianas, mas, sim, um conjunto de quatro parâmetros que envolvem de modo quase democrático as três dimensões espaciais e o tempo. Desse modo, as equações de Newton não seriam

1 De fato, a formulação do paradoxo de Olbers só se faz após o desenvolvimento do eletromagnetismo.

Figura 1



O paradoxo de Olbers. Qualquer que seja a direção em que olharmos o universo, através de um ângulo sólido W, encontraremos uma fonte luminosa, que emitirá energia de fluxo proporcional a $\frac{1}{r^2}$ com área total Wr^2; portanto o produto será constante, qualquer que seja a distância necessária para encontrarmos a fonte luminosa. Isso acarreta o fato de esperarmos, em um universo infinito e homogêneo, uma luminosidade constante no céu, como se todas as estrelas estivessem arbitrariamente próximas.

as mesmas para observadores diferentes, o que lhes retiraria o caráter universal e faria com que a física fosse diferente para diferentes observadores. Esta foi uma questão fundamental ao final do século XIX, que culminou, no início do século XX, mais exatamente em 1905, com o advento da teoria da relatividade especial.

A reinterpretação da mecânica clássica em termos da teoria da relatividade especial requereu novos conceitos e interpretações, mas a parte formal da teoria pode ser revista em pouco tempo. Desse modo, a cinemática relativística passa a ser simples.

Por outro lado, um grande passo seria a reinterpretação de outro pilar da física clássica, a teoria da gravitação de Newton. Como a força newtoniana tinha uma expressão que não fora deduzida de preceitos gerais, mas postulada de modo a poder explicar uma série de leis, seria natural obter-se a força gravitacional de equações de campo similares às equações de Maxwell. Tais equações foram propostas por Einstein como conseqüência do princípio de equivalência e através de uma for-

mulação geométrica da gravitação. O princípio de equivalência, conseqüência da igualdade das massas inercial e gravitacional, leva-nos a uma geometrização da física gravitacional. O uso da geometria riemanniana completa o cenário.

ÁTOMOS, PRÓTONS, ELÉTRONS E OUTROS – QUAL É O FUNDAMENTAL?

Demócrito, famoso filósofo grego, dizia que toda matéria era formada por uma unidade fundamental, indivisível, a qual ele chamou átomo (do grego: *sem partes*, isto é, *indivisível*). Todavia, a hipótese atômica não podia ser provada – ou desmentida – e ficou por vários séculos no domínio da filosofia. Na Idade Moderna, com o desenvolvimento da química, a hipótese atômica foi finalmente demonstrada pela experiência: reações químicas eram descritas por relações entre números inteiros, mostrando a existência de uma unidade fundamental. Posteriormente Mendelev classificou os átomos em uma tabela, a tabela periódica, de acordo com seus *pesos atômicos*, descobrindo uma série de regularidades. Baseado na idéia atômica, Boltzmann construiu uma teoria para os gases – a teoria cinética dos gases.

No final do século XIX foi descoberto ainda o elétron e sua carga, por Thomson e seus colaboradores. E, para dar a idéia final do que é o átomo, Lord Rutherford bombardeou finíssimas lâminas de ouro com pequenas partículas descobertas na época – as partículas α, provenientes de material chamado radiativo. Foi com grande surpresa que Rutherford constatou que o átomo era formado por um núcleo muito pequeno, enquanto os elétrons deveriam estar girando a uma grande distância, como no movimento planetário. Mas isso constituía um enorme problema, pois esse tipo de movimento de cargas não era compatível com a teoria eletromagnética de James C. Maxwell. Essa teoria, muito bem confirmada na prática, previa que, se o elétron girasse em torno do núcleo, ele começaria a emitir radiação – pois, segundo a teoria, cargas aceleradas irradiam. Assim, ele perderia sua energia e cairia no núcleo, de modo que a matéria seria instável. Foi o físico dinamarquês Niels Bohr quem resolveu o problema, dizendo que as leis do eletromagnetismo, tais como eram apresentadas, não valiam para partículas muito pequenas. Bohr construiu teoricamente o átomo, introduzindo uma constante fundamental, chamada h, postulada anos antes por Max Planck para resolver o problema da radiação do corpo negro. A constante h é chamada constante de Planck. Postulou-se que, para objetos muito pequenos, certas quantidades físicas escolhidas em conformidade com o problema em questão, como o momento angular, ou a energia, são descritas por certas funções de números inteiros multiplicadas por $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, e portanto não podiam tomar qualquer valor, como se pensava anteriormente. Assim nascia a teoria quântica. Muitos outros fenômenos (que aqui não serão descritos), que não eram compreendidos na teoria clássica, o foram na teoria quântica.

Para que a teoria quântica pudesse se tornar uma teoria física, sendo propriamente chamada de mecânica quântica, dever-se-ia mostrar as equações que regem o movimento das partículas na teoria quântica. Nesse sentido, Erwin Schrödinger e Werner Heisenberg escreveram, independentemente, equações que regem o movimento das partículas, e como essas equações devem ser interpretadas, já que toda a idéia de trajetória, tão comum na física clássica (como o caminho de um carro na estrada), não vale mais na mecânica quântica. O princípio da incerteza na mecânica quântica diz que, se tentarmos localizar uma partícula, para sabermos onde ela está, haverá uma incerteza muito grande em sua velocidade, isto é, a velocidade escapa ao nosso controle.

Uma vez construída a mecânica quântica, havia dois gigantescos passos a serem dados. O primeiro, construir uma mecânica quântica relativística, incorporando a pri-

meira teoria de Einstein (de 1905). Depois, tentar incorporar a relatividade geral, isto é, a gravitação. Esses processos envolvem problemas enormes que não foram ainda completamente resolvidos, sendo que para o segundo problema, qual seja, uma teoria quântica da gravitação, ainda não há uma teoria completamente desenvolvida, mas várias tentativas em estudo, como a teoria de cordas, atualmente.

Paul A. M. Dirac propôs, em 1928, uma equação – hoje chamada equação de Dirac – que descreve objetos na teoria quântica relativística. Mais uma vez a teoria trouxe novas e fantásticas descobertas. Na teoria da relatividade, uma certa quantidade de matéria-massa tem um equivalente em energia, dada pela equação $E=mc^2$. Assim, energia e massa são equivalentes. Dentro da teoria quântica, essa relação adquire novas dimensões, pelo seguinte: a equação de Dirac, além de descrever o elétron, que tem carga negativa, descreve também uma outra partícula de carga oposta e mesma massa, a qual chamou-se de pósitron. Quando o elétron e o pósitron se encontram eles se aniquilam, e as suas massas transformam-se em energia pura na forma de radiação eletromagnética! Além disso, a reação oposta é perfeitamente possível, e quando há quantidade suficiente de energia, e condições apropriadas, como no choque de partículas de altíssima energia, pode-se formar um par elétron-pósitron (ou e^-e^+). De fato, poucos anos mais tarde o pósitron foi encontrado.

No princípio, chegou-se a pensar que o pósitron pudesse ser nosso conhecido, o próton, idéia que se configurou errada. O pósitron era uma nova partícula, um exemplo de antimatéria: ele é o antielétron.

A introdução da teoria da relatividade na mecânica quântica tornou-se então uma nova área, agora conhecida como teoria de campos. Esta teoria trata da descrição das partículas elementares – como o elétron, o pósitron, o próton e outras que seriam descobertas no contexto da mecânica quântica relativística. Mas outras descobertas excitantes estariam ainda por aparecer na década de 30.

O decaimento β para substâncias radiativas era conhecido. Verificava-se que o nêutron decaía em um próton e um elétron, mas havia algo de errado, pois a quantidade de movimento e a energia aparentemente não se conservavam. Além disso, todas as partículas tinham spin 1/2 (2), de maneira que o momento angular também não podia ser conservado. Em 1930, Wolfgang Pauli postulou a existência de uma nova partícula, o neutrino. Em 1934, Enrico Fermi formulou a teoria das interações fracas, responsável pelo decaimento β, usando esta nova partícula – o neutrino – explicando as experiências até então. Posteriormente, em 1955, o neutrino foi de fato detectado numa reação β inversa.

Outro problema que se fazia presente era como o núcleo atômico podia ser estável se ele é formado por partículas com carga positiva (prótons) e partículas sem carga (nêutrons). Deveria, portanto, haver uma outra força agregando tais partículas, já que um cálculo rápido mostra que a atração gravitacional não pode juntá-los, pois ela é fraca demais. A nova força foi chamada forte – pois deveria sobrepujar a força de repulsão eletromagnética para conferir estabilidade ao núcleo atômico.

Assim como os fótons são os mediadores da interação eletromagnética, pensou-se que deveria haver um mediador da interação forte, que foi chamado de píon. Os píons foram de fato descobertos. No entanto, descobriu-se bem mais tarde que prótons e nêutrons não são partículas fundamentais, mas compostas de outras mais simples, os quarks. E ainda os mediadores não são os píons (apesar de estes existirem), mas outras partículas chamadas glúons. Como se pode bem perceber, a imagem do universo das partículas elementares vai ficando cada vez mais complexa!

TEORIA MODERNA DAS PARTÍCULAS ELEMENTARES

A meta das teorias físicas, de uma maneira geral, é unificar. Isso significa dar pou-

2 O spin mede a rotação intrínseca de uma partícula, e só tem sentido de fato em uma teoria quântica, podendo assumir apenas valores inteiros ou semi-inteiros. Os primeiros são chamados bósons, e os outros são férmions. As propriedades de bósons e férmions são muito diferentes.

cas e simples explicações para uma gama variada de fenômenos. Este era o grande sonho de Einstein: unificar as interações conhecidas, eletromagnetismo e gravitação (posteriomente as interações fraca e forte), em um esquema amplo, assim como eletricidade e magnetismo haviam sido unificados no eletromagnetismo. Era um sonho alto. Muitas foram as tentativas.

Usando a idéia de quebra de simetria, os professores Abdus Salam e Steven Weinberg propuseram uma teoria que unificava as interações eletromagnética e fraca, na década de 60. Foi o primeiro avanço real no sentido da unificação das interações. A idéia era introduzir quatro partículas, chamadas campos de calibre, que são análogas a fótons de luz, principalmente quando a temperatura for muito alta. No entanto, quando a temperatura decresce o suficiente, três dessas partículas ficam pesadas, e uma, o fóton que conhecemos, continua sem massa. O processo guarda analogia com o congelamento da matéria. Isso porque, quando a matéria é congelada, a simetria é menor. Expliquemos melhor. Considere um chapéu mexicano de abas muito altas, e bolinhas movendo-se em seu interior. Quando a temperatura é muito alta, isto é, quando as bolinhas movem-se muito rápido, elas vão a qualquer ponto do chapéu, não se importando com o cume no centro. No entanto, quando elas estão vagarosas, só podem dar a volta no cume, perdendo uma direção de movimento. Essa perda de uma direção de movimento é a quebra de simetria e leva ao ganho de massa dos três *irmãos* do fóton de luz. É também o que acontece quando congelamos um material cristalino: antes, todas as direções do cristal eram equivalentes; depois, devido à formação da estrutura cristalina, onde os átomos se justapõem em direções definidas, algumas direções ficam diferentes de outras, e a simetria diminui.

A quebra de simetria tornou-se uma pedra angular na construção das teorias unificadas. Notemos ainda que um outro conceito, a temperatura, entrou agora em questão, e será muito importante na descrição do universo primordial, já que, no início, a temperatura era muito alta. Vemos, então, que já há um ponto de contato entre o infinitamente pequeno – as partículas elementares – e o infinitamente grande – o macrocosmo.

Mas voltemos à teoria de Weinberg-Salam. Medimos uma simetria através de um conceito matemático chamado grupo. A teoria prediz a existência das correntes neutras que foram posteriormente constatadas em experimentos. Também prediz a existência dos companheiros massivos do fóton, chamados W^+, W^- e Z^0, que foram descobertas no CERN, em Genebra, em 1983 pelo grupo do prof. Carlo Rubbia. Os professores Steven Weinberg e Abdus Salam receberam juntamente com o prof. Sheldon Glashow o prêmio Nobel de Física pelos seus trabalhos em teorias unificadas. Posteriormente, pelo trabalho experimental, o prof. Rubbia dividiu o prêmio Nobel de Física de 1984 com o engenheiro Van der Meer, que inventou o processo do esfriamento estocástico, que permite a acumulação de antiprótons necessários para a experiência que visa à identificação dos bósons mediadores W^+, W^- e Z^0. Além da teoria da interação eletrofraca, acima descrita, procurou-se compreender o papel da interação forte, que é descrita por 8 companheiros do fóton – os glúons – e por companheiros análogos do elétron, os quarks, que formam o próton e o nêutron. Várias formulações têm sido propostas para a grande unificação, não havendo resposta definitiva. Mas o que é certo é que, havendo uma teoria unificada com maior simetria e temperaturas mais altas ainda, existem outros companheiros do fóton, e estes outros companheiros – os campos de calibre X –, devido à grande simetria, vão tornar possível o decaimento do próton. Isso implica que, em temperaturas altíssimas, o próton evapora, transformando-se em pósitrons e outras partículas. E o que acontece com a teoria da gravitação, até agora completamente fora desse esquema, e que teria sido o objeto da idéia de Einstein de uma unificação das interações? O fato é que a gravitação, sob o ponto de vista da mecânica quântica, é a mais complicada

das teorias. Tecnicamente falando, a teoria da gravitação é não renormalizável, fazendo com que haja um número infinitamente grande de ambigüidades na definição da teoria. A idéia mais atraente hoje é que existe um outro tipo de simetria, chamada de supersimetria, que liga bósons e férmions, embebida em uma teoria com objetos extensos, a *Teoria das Cordas*.

SUPERSIMETRIA – BÓSONS E FÉRMIONS

Há duas grandes classes de partículas, cujo comportamento é muito diferente: os bósons são partículas de spin inteiro. O spin é uma quantidade que aparece em mecânica quântica análoga ao movimento de rotação dos corpos; seu valor é fixo para cada tipo de partícula, contrastando, nesse ponto, com a rotação clássica; os férmions possuem spin semi-inteiro (1/2, 3/2, 5/2, etc.). Esse número muito simples implica diferenças fundamentais dentro da teoria quântica. Um exemplo dessas diferenças é dado pelo gás helio a temperaturas muito baixas. O He^3 (hélio-3) é um férmion, e apresenta o fenômeno da superfluidez. Ele é um fluido perfeito. O He^4 (hélio-4) difere do anterior basicamente pelo spin: é um bóson.

Até há 30 anos não se conhecia nenhum tipo de relação de simetria entre bósons e férmions. Pensava-se que fossem partículas de características distintas, criadas sem qualquer conexão entre si. Todavia, a idéia de unificação dentro da física tem sido muito frutífera, e acreditamos que uma visão fundamental dos fenômenos da natureza deve tratar de uma maneira única todos os fenômenos, e as partículas elementares deverão ter sido criadas por um mecanismo comum. No entanto várias dificuldades são encontradas para tornar realizável tal programa.

Do ponto de vista técnico, as teorias supersimétricas possuem propriedades muito interessantes, havendo possibilidade de solução de vários problemas, como a obtenção de resultados finitos na teoria quântica da gravitação, ou ainda a explicação da existência de partículas cujas massas diferem em várias ordens de magnitude.

TEORIAS DE CORDAS E OUTRAS DIMENSÕES

A idéia de supersimetria tem como conseqüência natural a introdução de novas dimensões no espaço. Para concretizar completamente as idéias apresentadas, precisamos de uma máxima supersimetria – chamada supersimetria estendida –, precisamos definir a teoria em 10 ou 11 dimensões de espaço-tempo, e depois tornar as 6 ou 7 dimensões extras muito pequenas.

Uma maneira alternativa para o procedimento acima é a idéia de cordas – as partículas elementares seriam pequenas estruturas alongadas movimentando-se no espaço-tempo. Para as cordas supersimétricas só existe uma dimensão onde as quantidades físicas são consistentes: 10 dimensões sendo 9 de espaço e 1 de tempo.

A CIÊNCIA DOS DIAS DE HOJE

As equações de Einstein podem ser resolvidas para certas situações físicas particulares da gravitação. Para um centro atrator com simetria esférica, acha-se o potencial de Newton, como no caso de planetas ou estrelas com densidade relativamente baixa. Para grandes concentrações de matéria, acha-se a solução de Schwarzschild para o buraco negro, que virá a ser de grande importância.

No caso da descrição cosmológica deve-se levar em conta a equação de campo da matéria e sua distribuição. Nesse caso, foi postulado o princípio cosmológico que nos diz que o universo é, em escala muito grande (escalas cosmológicas), homogêneo e isotrópico, ou seja, não há posições privilegiadas no cosmo. Como consequência, acham-se as soluções de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker.

Desse modo, pode-se supor que o universo seja formado por um fluido cósmico universal, homogêneo, dependente apenas do tempo. O tensor de energia-momento, compatível com essa mesma isotropia e homogeneidade, teria uma componente representando a densidade de energia $\rho(t)$, e outras representando a pressão $p(t)$. Postuladas as equações de Einstein, o mundo é descrito por uma métrica, ou seja, por uma régua universal cujo tamanho se modifica de um lugar para outro. Podemos obter a métrica de um modelo cosmológico encontrando, para a solução das equações de Einstein, a solução de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, que caracteriza um universo dinâmico, primeiramente em expansão, e depois em contração ou expansão até o infinito. Einstein havia julgado essas soluções como errôneas, propondo modificações para sua teoria. Tomemos um certo fôlego para a interpretação dos resultados. A métrica $g_{\mu\nu}$ representa a geometria intrínseca do espaço-tempo. Ela é a medida de distância, e num espaço plano em três dimensões ela representa nada menos que o teorema de Pitágoras para se achar a diagonal de um paralelepípedo de arestas dx, dy e dz, ou seja, $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$. Incluindo-se o tempo num espaço sem gravitação, temos a geometria de Minkowski da relatividade especial, ou seja (adiante faremos a velocidade da luz c=1, que representa uma escolha especial de unidades): $ds^2 = -c^2dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$.

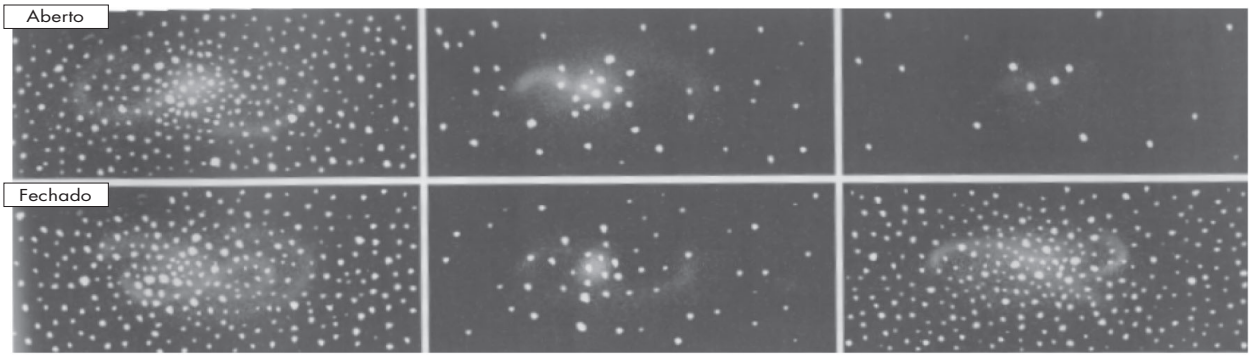
No caso Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker temos um parâmetro dependente do tempo, $R(t)$ que, se aumentando ou diminuindo, aumenta ou diminui o valor das distâncias. Além disso temos uma constante k que torna os valores 0±1.

O valor de k determina o tipo de universo obtido. Quando $k = 1$ o universo é dito fechado. Nesse caso, $R(t)$ aumenta até um valor máximo voltando posteriormente a diminuir. Nesse caso o universo se inicia a alta temperatura e densidade, expande-se até um máximo, depois volta a se encolher até seu desaparecimento numa implosão final. Para $k = -1$ a expansão é eterna. O que diferencia um caso de outro é a densidade de matéria média no universo. Há um valor crítico para a mesma, $\rho = \rho_{crit}$, acima do qual o universo é fechado, ou seja, a atração gravitacional é mais forte que a expansão; enquanto para a densidade média menor que a densidade crítica a expansão é eterna. O caso $\rho = \rho_{crit}$ corresponde a $k = 0$ e o universo é dito *chato* (flat). As figuras 2 e 3 ilustram esses fatos.

Se tivermos a equação de estado da matéria, ou seja, se caracterizarmos bem as propriedades físicas da matéria, poderemos obter soluções explícitas. Essa equação é de fato bastante geral, descrevendo matéria ora inerte, como hoje, ora radiação pura, como há 14 bilhões de anos.

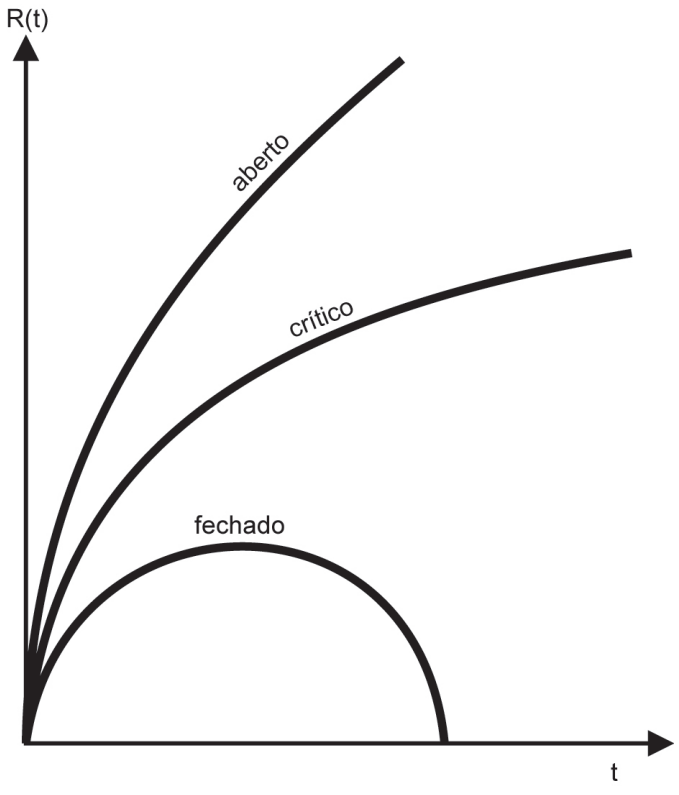
O resultado das equações de Einstein mostra que a *régua universal* depende do tempo, aumentando sempre segundo cer-

Figura 2



Evolução dos universos aberto e fechado (do **Cambridge Atlas of Astronomy**).

Figura 3



Evolução segundo o valor de *k*
(do **Cambridge Atlas of Astronomy**).

tos modelos cosmológicos. A *régua* depende também da constante de Hubble, hoje, que fixa a escala de tempo e a idade do universo. A *régua* é exatamente a função $R(t)$ apresentada acima.

O diagrama mostrando a evolução de $R(t)$, que nos diz o tamanho da régua para os três casos possíveis de evolução, é dado pela Figura 3.

Os dados observacionais originais, obtidos pelo astrônomo Edwin Hubble, mostram o universo em expansão e estão na Figura 4. Através dos dados obtidos das linhas espectrais de corpos celestes, pode-se observar a sua velocidade, através do chamado efeito Doppler. Hubble fez um diagrama das velocidades assim calculadas como função da distância de tais corpos celestes em relação a nós, obtendo uma relação aproximadamente linear. A constante de Hubble corresponde à constante de proporcionalidade entre a velocidade e a distância. O valor correspondente a H obtido por Hubble foi $H = 500km/sMpc$.

Supondo-se que o universo tenha tido um início e que tenha se expandido desde então, o tempo passado até hoje, que corresponde à idade do universo, equivale a $T \approx H^{-1} \approx 2$ bilhões de anos.

Esta idade é ainda menor que a própria idade da Terra, 5 bilhões de anos. O valor correto de *Ho* pode ser obtido do diagrama (Figura 5) que indica valores da ordem de $H \approx 75$ km/sMpc, de modo que a idade do universo é cerca de 14 bilhões de anos, como conseqüência desses dados.

Há várias questões atuais nesse contexto. Em primeiro lugar, as escalas de distância. Tais escalas são grandes demais para que possam ser observadas diretamente. Isto é apenas um pequeno detalhe do grande problema observacional em astronomia, mas que tem óbvias conseqüências em relações como a de Hubble, indicando a dificuldade em se obter informação sobre um parâmetro tão importante quanto H, que determina a idade do universo. Além disso, há a questão sobre se o universo está se acelerando ou desacelerando, se é fechado ou aberto.

As observações indicam que a densidade do universo é muito próxima da densidade crítica, ou seja $\Omega = \frac{\rho}{\rho crit} \approx 1$, que é a relação entre a densidade da matéria observada no universo e um valor crítico, teoricamente previsto. Esse valor próximo do valor crítico constitui um grande problema de interpretação, como veremos adiante, já que esse valor é instável. Além disso, uma aceleração, ou desaceleração, pode ser um indício de uma constante cosmológica ou energia escura, o que pode mudar sobremaneira nossa visão de mundo.

Mecânica quântica

Toda a descrição feita até o momento supõe uma natureza clássica relativística, ou seja, não há modificações de princípios

na mecânica clássica, além dos ajustes usuais advindos da teoria da relatividade especial e geral.

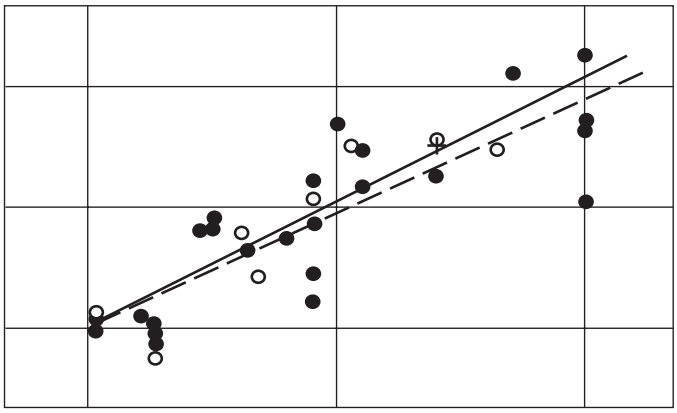
A necessidade de quantização advém de vários pontos na descrição do universo. O principal deles é o fato de que uma teoria do tipo big-bang, na qual o universo emerge de um plasma cosmológico de temperatura altíssima, requer a descrição de um fluido cuja energia média por partícula constituinte (ou seja, a temperatura) é muito alta. Assim, a interação se dá no âmago da matéria e requer uma descrição eminentemente quântica.

A mecânica quântica é uma teoria linear, com uma interpretação não-linear, em que, para todos os efeitos práticos, supõe-se que haja um limite clássico macroscópico que constitui o instrumento de medida do fenômeno quântico. Desse modo, a descrição mais simples do fenômeno quântico se dá através de uma medida clássica, que é o que chamamos acima de interpretação não-linear.

No entanto, tal interpretação passa a ser problemática no caso do universo. Afinal, para um observador interno do universo, pode-se perguntar o que é a sua função de onda, já que não há limite clássico, ou seja, não há uma medida clássica externa ao objeto quântico em questão, no caso, o cosmo universal. Poderíamos perguntar: existe o universo quando fechamos os olhos? Mas se fecharmos os olhos e o universo não existir, então, há olhos? Tais perguntas são inerentes à interpretação da mecânica quântica com relação à medida clássica. O fato é que o problema da medida é resolvido, de modo prático, colocando-se o observador num mundo clássico, o mais longe possível do fenômeno quântico a ser estudado. Em outras palavras, o observador é externo ao mundo quântico em estudo, o que faz sentido quando estudamos fenômenos da escala do microscópico.

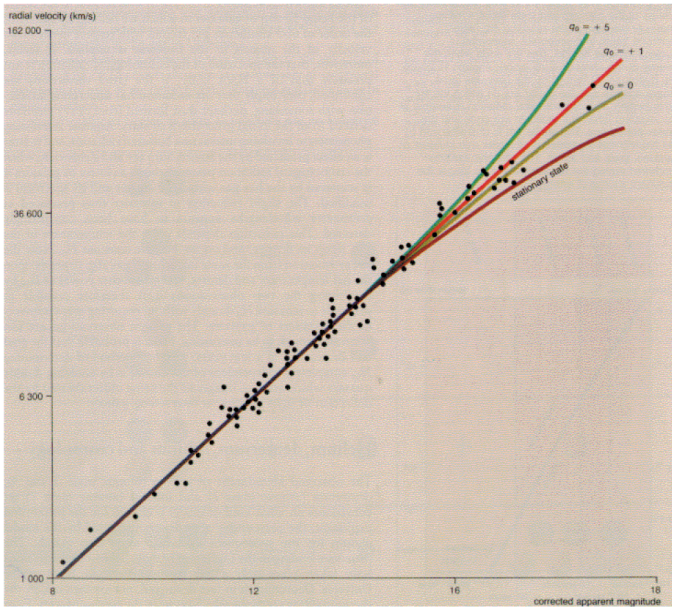
Por outro lado, nós, como observadores, fazemos parte do universo e a dicotomia entre observador e observado desaparece completamente ao estudarmos o universo como um todo, fazendo com que o

Figura 4



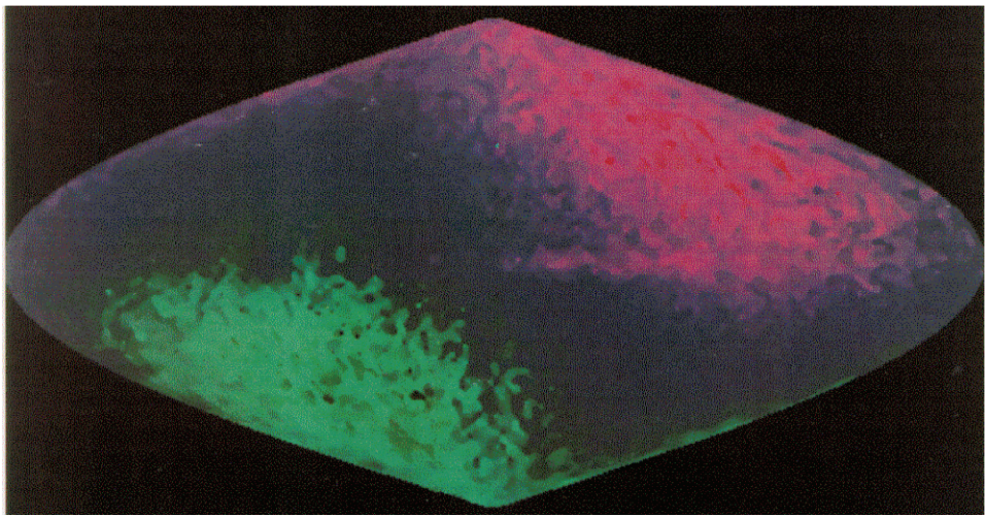
Dados originais de Hubble, em que temos a velocidade em km/s graficada contra a distância em parsecs.

Figura 5



Novos dados sobre a lei de Hubble, em que se grafica a velocidade contra a distância (Cambridge Atlas of Astronomy).

Figura 6



Dados obtidos da radiação cósmica de fundo.

observador faça parte do fenômeno, ou seja, o experimentador é parte intrínseca da experiência. Assim, não mais se define a parte clássica do aparelho de medida.

Tal contexto faz de uma teoria quântica da gravitação algo muito difícil para ser estudado. No entanto, estes não são os únicos problemas a serem apresentados. A evolução relativística da mecânica quântica, ou seja, a teoria quântica relativística apresenta novas e grandes dificuldades. A primeira descrição quântica relativística correta de uma partícula foi feita por Dirac. Ele modificou a equação de Schrödinger de modo que ela pudesse descrever o spin do elétron e satisfazer a relação relativística entre energia e momentum. A primeira conseqüência importante da equação de Dirac foi o fato de haver estados de energia negativa, havendo um número infinito deles, que não podiam ser compreendidos pela teoria padrão. Dirac reinterpretou os estados de energia negativa em termos de uma *antimatéria*, de tal modo que um estado de elétron e um estado de pósitron – o antielétron (ou, equivalentemente, um estado disponível de energia negativa), na presença um do outro, desapareceriam deixando para trás energia pura. Do mesmo modo, energia pura em quantidade suficiente pode gerar matéria na forma de pares elétron-pósitron, no processo acima visto no sentido inverso. Como na teoria quântica, uma variação de energia infinitesimal é uma quantidade com indefinição devido à relação de incerteza $\Delta E \sim \hbar/\Delta t$ para pequenos intervalos de tempo, é possível haver energia suficiente para formar pares, como na reação $e^+ + e^- \leftrightarrow 2\gamma$, que nos mostra que os fótons, aqui denotados por γ, podem se converter em um par elétron (e^-) e pósitron (e^+). Isso faz com que a teoria quântica relativística seja uma teoria de muitos corpos. Daí o advento da teoria de campo quantizado, ou teoria quântica de campos.

Universo quântico em expansão: o modelo padrão

Conforme mencionamos, seguindo a evolução cósmica para trás no tempo, chegaremos a um ponto inicial de temperaturas altíssimas em que a teoria quântica relativística será essencial para a descrição do mundo. Vários elementos serão necessários para uma descrição teórica

competente de tal evolução, assim como para que se confirmem observacionalmente os fatos.

Em primeiro lugar, foi observado um resquício importante da explosão inicial que perdura até os dias presentes, e continuará nos céus para sempre. O fato é que uma grande explosão e sua conseqüente evolução produzem uma grande quantidade de radiação. No início, tal radiação esteve em equilíbrio com a matéria, já que pares de partículas e antipartículas estariam se aniquilando produzindo fótons – radiação eletromagnética –, ao mesmo tempo em que fótons altamente energéticos teriam voltado a interagir na reação inversa, produzindo pares, como na reação já vista anteriormente. Quando a energia diminui aquém da energia mínima necessária para que os fótons possam interagir com a matéria, os fótons – ou seja, a radiação eletromagnética – desacoplam-se – ou seja, separam-se do restante –, praticamente não interagindo mais com a matéria, e passam a existir isoladamente. Radiação em um dado espaço vazio é um problema conhecido como corpo negro, e foi o objeto estudado por Planck na descoberta inicial que levou à mecânica quântica. Para uma dada temperatura, a distribuição de energia em termos da freqüência ν obedece à chamada distribuição de Planck, que é caracterizada por uma temperatura T.

Em um estudo com antenas, Penzias e Wilson, em 1965, observaram a existência de uma radiação de fundo em todo o céu, que obedece à distribuição de Planck, com um parâmetro de temperatura T tendo um valor de aproximadamente $3K$. Essa descoberta foi fundamental para que se pudesse confirmar experimentalmente (observacionalmente) a teoria do big-bang. A radiação aqui descrita é chamada de radiação cósmica de fundo. Hoje, mapas da radiação cósmica de fundo são feitos com extremo detalhe, e se supõe que as pequenas diferenças nas várias regiões sejam responsáveis pelas futuras estruturas do universo, já que a radiação de fundo é um resquício deixado desde 14 bilhões de anos atrás, ou seja, desde antes da formação de qualquer estrutura no horizonte conhecido. É muito digno de nota que, se retirarmos o efeito do nosso movimento na radiação de fundo consignado pelo efeito Doppler, que tecnicamente é um efeito de dipolo, as diferenças de temperatura entre os vários pontos do universo são menores que uma fração de aproximadamente 10^{-5} em relação à temperatura média. O fato de essa diferença ser tão diminuta aponta para mais uma forte razão para o que será a teoria inflacionária.

Deveremos, subseqüentemente, descrever a evolução cósmica. No entanto, é certo que tal evolução terá diferentes fases. Hoje há muita matéria que não faz qualquer pressão. Assim, há uma densidade de energia inerte e pressão zero: estamos no chamado domínio da matéria, e a física é descrita pelas quatro interações fundamentais, as interações forte, eletromagnética, fraca e gravitacional. As partículas elementares que compõem o universo, apesar de parecerem estar presentes em grande número, são de fato compostas de poucos elementos primordiais – quarks, léptons e seus respectivos antiquarks e antiléptons, além dos carregadores de força –, os fótons e sua *generalizações não abelianas*. Além disso, há mais algumas partículas teoricamente previstas para dar consistência à teoria.

Uma pergunta aparentemente sem conexão com a evolução do universo será a chave da compreensão cósmica: por que as diferentes interações têm força diferente, e por que de fato há um certo número de interações? Ou ainda: haverá uma teoria unificada das interações? Como tal teoria estaria relacionada com as diversas interações elementares?

A resposta está na dependência das interações com a energia efetiva e com a temperatura, e no processo chamado de quebra espontânea de simetria.

A quebra de simetria é um processo simples, como acontece quando uma interação elementar é descrita por um potencial com simetria por rotação, tal como no exemplo da Figura 7.

Se escolhermos um desses pontos como origem, na direção radial haverá uma inércia para se deslocar a partícula, mas na

Figura 7

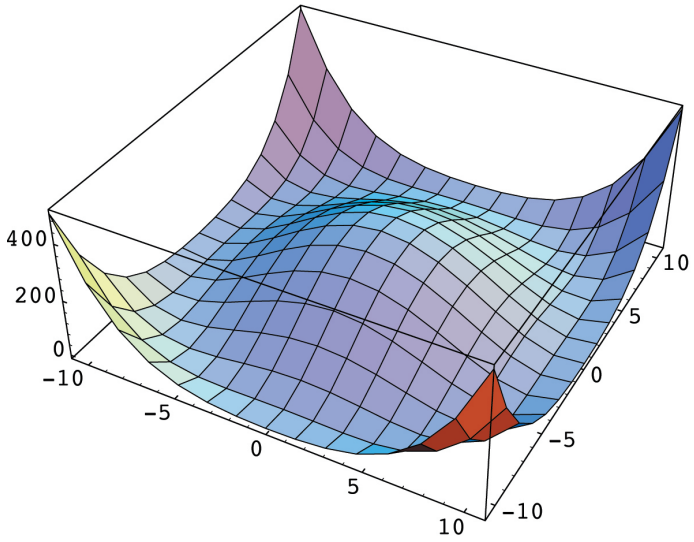


Diagrama com potencial tipo chapéu mexicano, em que a quebra de simetria se dá para uma simetria de rotação contínua, criando a possibilidade de geração de massa através do fenômeno de Higgs.

direção do mínimo não haverá, portanto há uma partícula de massa zero. O ponto é que o fóton devora o bóson sem massa e engorda! Este é o chamado fenômeno de Higgs, e, em conseqüência dele, os fótons de interação fraca ganham massa e sua interação fica fraca, ao contrário do eletromagnetismo e da interação forte. No entanto, quando as partículas estão num plasma de alta temperatura, os detalhes do potencial não são mais tão importantes, e o fenômeno de Higgs não se pode processar! Assim, quanto mais alta a temperatura mais simétricas serão as interações – elas tendem a se igualar.

Este fenômeno pode ser revisto e reestudado em termos da teoria de campos das três interações elementares – fraca, eletromagnética e forte, tais como descritas pelo respectivo grupo de simetria, $SU(3)$ X $SU(2)$ X $U(1)$. As respectivas forças de interação vão se tornando iguais com o aumento da energia. As interações fraca e eletromagnética tornam-se uma só a uma energia de aproximadamente 100*Gev* (3). Após isso, elas se juntam à interação forte, numa única interação elementar unificada a uma energia aproximadamente correspondente a 10^{15} Gev, portanto já macroscopicamente relevante, algo gigantesco para uma partícula elementar. Os aceleradores existentes só chegam hoje a algumas centenas de Gev, devendo chegar ao milhar de Gev (1*Tev*) na próxima geração de aceleradores. A possibilidade de uma experiência direta nessa energia só seria possível com técnicas inteiramente novas, indisponíveis nos dias de hoje.

A EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

No início do universo, com altas temperaturas, fora possível o fenômeno da restauração de simetria, de modo que outras fases do universo passam a existir, cada vez com maior simetria quanto mais alta for a temperatura.

Dessa maneira, é possível fazer um paralelo entre a história cósmica e a descrição das interações elementares como função de energia de interação. Os detalhes da história do universo, também chamada de história térmica do universo, já que a temperatura do universo é uma função monotonicamente decrescente do tempo, foi e tem sido objeto de estudos em cosmologia, assim como em teorias de campos. Os detalhes de tal história, desde a quebra da simetria eletrofraca, são bem conhecidos e confirmados em física de aceleradores. Antes disso, até energias correspondentes à teoria unificada das três interações, excluída a gravitação, tem-se um conhecimento razoável da evolução do universo, baseado em hipóteses teóricas bem fundamentadas. Mais além, a questão é bem mais profunda, envolvendo o universo inflacionário e posteriormente uma teoria quântica da gravitação unificada com as outras interações. São problemas profundos, enraizados na própria origem de todo o universo, cuja solução poderia explicar não apenas nosso uni-

3 1 Gev = 10^9 eV = 1.6 X 10^{-3} erg.

verso mas também prever dimensões extraordinárias, partículas supersimétricas, novas propriedades físicas e até mesmo novos universos. Uma versão simplificada da história térmica é dada pela seqüência abaixo.

- 10^{-44} seg ..... gravitação quântica ..... 10^{19} Gev
- 10^{-34} seg ..... origem da matéria ..... 10^{15} Gev
- 10^{-12} seg ..... transição eletrofraca ..... 10^{2} Gev
- 10^{-6} seg ..... transição quark hádron ..... 1 Gev
- 10^{-6} seg ..... matéria nuclear ..... 1 Gev
- 1 seg ..... nucleossíntese ..... 1 Mev
- 10^{12} seg ..... matéria atômica ..... 10 ev
- 10^{13} seg ..... desacoplamento matéria energia ..... 1 ev
- 10^{16} seg ..... formação galática ..... 10^{-2} ev
- 10^{17} seg ..... formação do sistema solar ..... 10^{-3} ev

Um ano corresponde a $3.15 \times 10^{7} seg$, e 1 ev corresponde a uma temperatura de $5 \times 10^{3} K$, praticamente o mesmo em graus Celsius.

Pode-se observar ainda que, nos primeiros instantes, a evolução temporal, medida através de nosso presente parâmetro tempo, tem uma evolução cada vez mais rápida, quanto mais nos aproximamos do instante inicial.

Os primeiros segundos são incógnitos, correspondendo à época de gravitação quântica, em que presumivelmente haveria supercordas como elementos físicos relevantes, e a dimensão do espaço-tempo deveria ser 10 (9 de espaço e 1 tempo) para que fossem descritas corretamente as supercordas, ou eventualmente 11 no caso de uma *teoria mãe* ou *teoria mestra*, já recentemente formulada. A matéria passou a existir aos 10^{-34} segundos, quando a teoria unificada se dividiu em interação forte e interação eletrofraca. Antes disso os bárions podiam decair, o que seria equivalente a dizer que os prótons, ou a matéria normal, não são estáveis. Sinais experimentais de tal decaimento estão sendo procurados mas ainda não há confirmação.

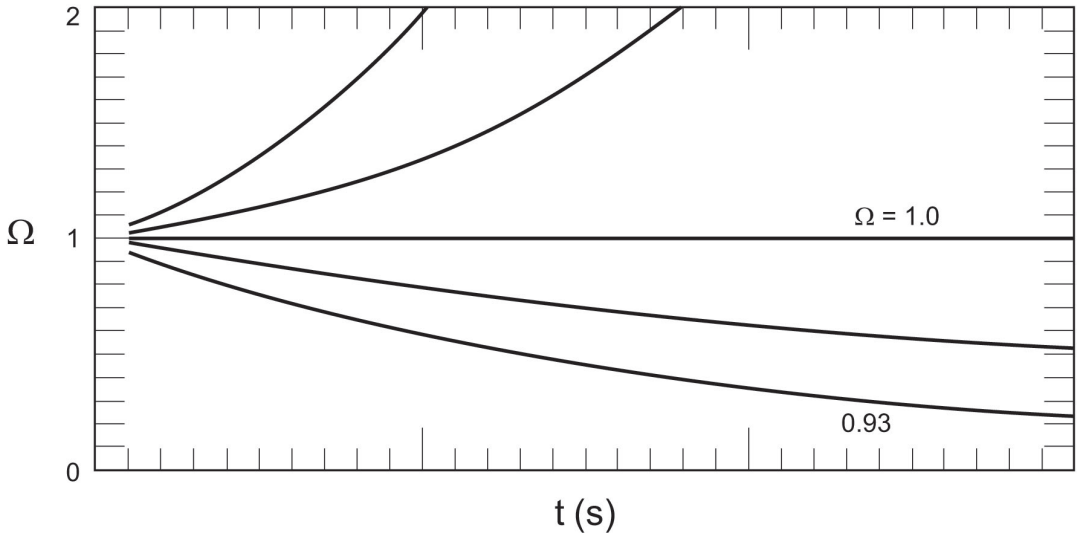
A matéria atômica, tal como a conhecemos hoje, só se formou segundos após o início (cerca de 30 mil anos após o big-bang), mas a matéria desacoplou-se da energia radiante apenas 300 mil anos após o big-bang. Foi só então que a luz passou a poder viajar longas distâncias sem se espalhar pela matéria, e o universo ficou transparente. De fato, antes disso o universo era opaco. Desse modo, só podemos observar o universo posteriormente ao tempo em que os fótons passaram a se mover livremente. Antes disso, eles eram *capturados* antes de chegarem aos nossos olhos, de modo que não podemos enxergar nada antes do tempo $t_l \approx 10^{13}$ s$\approx$ 300.000 anos, o tempo de *liberação* dos fótons.

Do ponto de vista observacional, a melhor confirmação do modelo, após a radiação cósmica de fundo, é a abundância de hélio observada no universo. Tal abundância é prevista como conseqüência de sucessivas reações de captura de nêutrons, começando por $n + p \rightarrow d + \gamma$, ou seja, um nêutron n choca-se com um próton p dando origem ao deutério d e radiação eletromagnética, ou fóton, γ, dando início a reações mais complicadas.

Como resultado, obtém-se a previsão de que a quantidade de hélio como fração da matéria bariônica no universo deve ser de aproximadamente 25%, o que é plenamente confirmado pelos dados observacionais.

Alguns problemas ainda permanecem, todavia, sem solução. O primeiro é o problema da extrema isotropia observada no universo. Conforme mencionado, retirando-se o efeito do movimento da Terra em relação à radiação cósmica de fundo, a isotropia no valor da temperatura observada é tal que a diferença relativa nas tempe-

Figura 8



Comparação entre o valor de Ω hoje e aquele do início do universo; qualquer diferença extremamente pequena naquela época se configura hoje como gigantesca. Assim, para que se tenha Ω próximo de 1 hoje, esta constante deve ser escolhida infinitesimalmente próxima de 1 no início.

raturas é da ordem de 10^{-5}. Isso é visto na Figura 6. Naquele mapa, as duas grandes manchas na temperatura correspondem ao termo de dipolo gerado pelo movimento da Terra em relação à radiação de fundo.

O segundo problema refere-se ao fato de o valor da densidade de matéria no universo ser tão próximo do da densidade crítica. Em geral, definimos $\Omega = \frac{\rho}{\rho crit}$. O valor $\Omega = 1$ é muito instável. Se olharmos para o diagrama (Figura 8) veremos que o valor de Ω, perto de 1 hoje, deve corresponder, no início dos tempos, a um valor enormemente mais próximo de 1. Seria como manter uma esfera equilibrada sobre um dedo por muito tempo sem tocá-la. Tal fato dificilmente ocorreria por mero acaso.

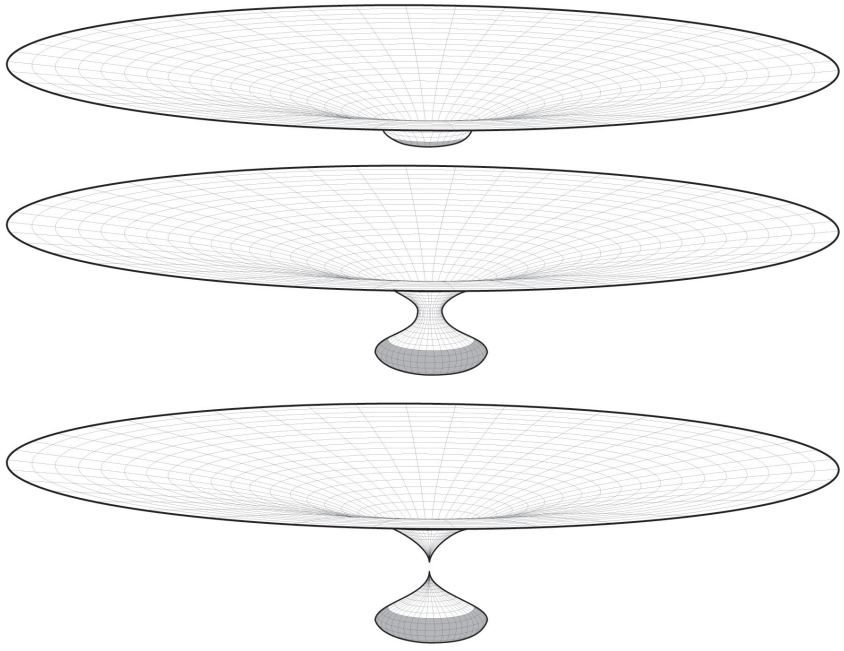
Um terceiro problema é o fato de não haver monopolos magnéticos no universo. A teoria os prevê, mas eles nunca foram encontrados.

Estes e alguns outros problemas são resolvidos pelo processo chamado de inflação. Segundo tal processo, teria havido no princípio uma expansão exponencial do fator de escala do universo. De modo geral, esse crescimento exponencial deveu-se ao fato de o universo estar em um falso vácuo – um máximo relativo de energia.

Com o crescimento alucinante do universo ficamos em um espaço relativamente homogêneo que estava em conexão causal no início dos tempos. A densidade de matéria deve se manter igual à densidade crítica, e outros monopolos estariam fora do horizonte conhecido. São resolvidos, portanto, os maiores problemas do modelo padrão. Abrem-se ao mesmo tempo outras possibilidades, como por exemplo a criação de novos universos (ver Figura 9).

O último degrau nessa seqüência será a compreensão de uma teoria quântica da gravitação que lance luz na estrutura última do espaço-tempo.

Figura 9



A criação de novos universos.

RUMO AO FUTURO

Teoria quântica da gravitação

Há tão grandes dificuldades em se formular uma teoria quântica da gravitação, que não poucas vezes chegou-se a sugerir que a gravitação talvez jamais devesse ser quantizada, permanecendo um capítulo clássico à margem do desenvolvimento da teoria geral de campos e partículas.

De fato, apenas pensar em uma gravitação quântica já nos demanda uma reestruturação da geometria. Ademais, uma teoria de campos gravitacionais quantizados não é consistente devido a quantidades infinitas que não podem ser absorvidas em constantes experimentais. O chamado problema da renormalização de uma teoria de campos, que *cura* os infinitos que aparecem devido ao caráter operacional dos campos quantizados, não pode ser resolvido em teorias de campos que contenham a gravitação. Diz-se que a gravitação é uma teoria *não renormalizável*.

Dessa maneira, a antiga meta já antevista por Einstein, de se obter uma teoria unificada dos campos, que foi obtida para as outras interações no decorrer das últimas décadas do século XX, encontra uma alta barreira exatamente na teoria da gravitação, que podemos chamar a *menina dos olhos* da física fundamental.

Várias tentativas foram iniciadas. Em particular, foi tentada a introdução da nova simetria relacionando bósons e férmions, a supersimetria.

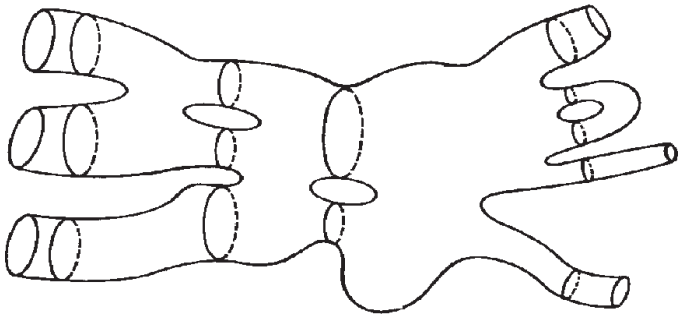
Entrementes, havia uma teoria iniciada no final dos anos 60 que pretendia chegar à compreensão da teoria das interações fortes, como uma alternativa às teorias de campo: era a chamada teoria dual, que tinha poucos elementos dinâmicos e basica-

mente tratava de simetrias. Mostrou-se posteriormente que a teoria dual podia ser descrita por um objeto filamentar percorrendo livremente o espaço-tempo, sendo o único vínculo o fato de fazê-lo descrevendo uma superfície de área mínima – equivalente a um princípio de mínima ação.

Certas manobras de consistência teórica levam a vínculos que só podem ser descritos de modo simples em um espaço de 26 dimensões (25 de espaço e 1 de tempo). Uma corda supersimétrica foi obtida, dessa vez em 10 dimensões (9 de espaço e 1 de tempo).

Apesar de o problema tornar-se difícil demais para seu uso em teorias de força nucleares, para as quais, no início dos anos 70, foi demonstrada a melhor utilidade da cromodinâmica quântica, uma generalização *colorida* do eletromagnetismo, passou-se a utilizar a teoria de cordas no contexto de uma teoria unificada dos campos quantizados. Isso se deve a alguns fatos, dentre os quais destacamos haver, na teoria de cordas, no limite de teorias de campos, basicamente dividindo-se a corda em modos normais, uma partícula de massa zero e spin 2, que foi interpretada como o gráviton, acomodando portanto a gravitação e mesmo sua versão quântica!

Figura 10



Espalhamento de cordas.

As teorias de cordas têm uma formulação muito simples no que diz respeito à sua interação. Elas se mesclam e se dividem, tal como sugerimos na Figura 10. Há um número pequeno de teorias de cordas, já que sua formulação simples termina por ser quase única. Isso advém de um fato que gerou a chamada primeira revolução das cordas. É que a simetria subjacente tem um número pequeníssimo de possibilidades que levem a uma teoria de campos simples, e não ao que se costumou chamar de *teorias anômalas*.

Mais recentemente, acharam-se novas simetrias, dessa vez interligando as poucas e ainda diferentes teorias de cordas. Essa classe de simetrias foi de modo geral chamada de dualidade. Esta gerou a segunda revolução das teorias de cordas. Ela traz a suspeita de que haja uma única teoria dita teoria *M*, possivelmente em 11 dimensões, que gera as poucas e diferentes teorias de cordas ao mesmo tempo.

Como a teoria de cordas contém a teoria da gravitação, além das outras teorias de campos, ela se torna a candidata natural à teoria unificada dos campos quantizados.

Resta-nos, então, olhar para as conseqüências e expectativas que possam ser comprovadas ou que poderiam nos levar a conseqüências ainda mais profundas, modificando nossa visão de mundo.

Desse modo, assim como em todas as descrições acima, chegamos à conclusão de que a teoria de cordas apresenta uma notável unificação. Poderíamos resumir o que dissemos com uma antiga citação de um grande sufi de nome Rumi, que em um contexto completamente diferente disse: "*Even though you tie a hundred knots – the string remains one*".

Conseqüências e expectativas

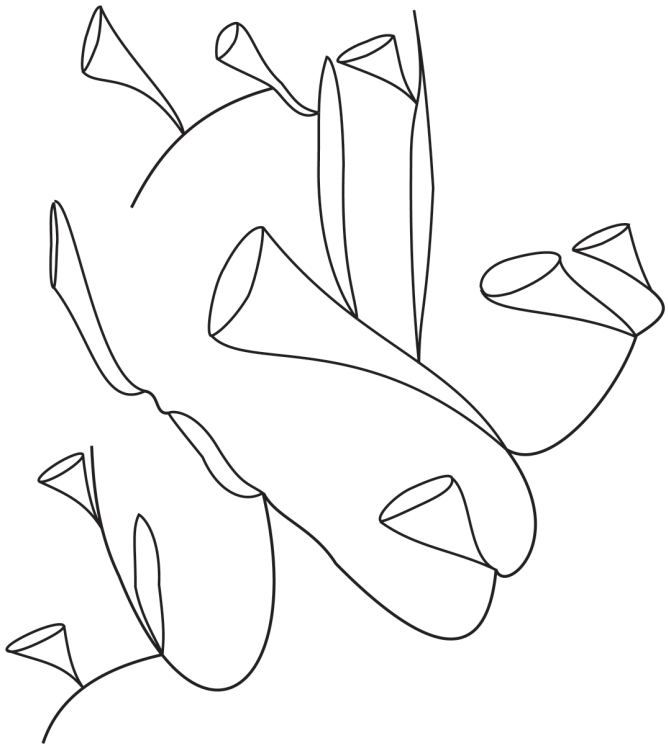
Nossos olhos passam então a questões que possam nos dar indicações de que compreendemos a estrutura do universo e suas leis. O fato experimental que nos pode levar à estrutura do universo em larga escala a partir de primeiros princípios são as ob-

servações do satélite Cobe, que nos dão a estrutura da radiação cósmica de fundo, 300.000 anos após a explosão inicial. Se pudermos seguir a evolução das inomogeneidades observadas, talvez possamos chegar às estruturas vistas hoje. Essa evolução terá como ingrediente essencial a teoria da relatividade geral.

Seguindo um pouco mais adiante, gostaríamos de saber as demais conseqüências da mecânica quântica diretamente sobre a relatividade geral, tal como discutimos. O estudo de buracos negros é a maneira mais direta de se chegar a uma compreensão mais profunda, não somente da relatividade geral clássica mas principalmente de uma teoria quântica da gravitação. Isso se deve à observação de que há leis para a dinâmica de buracos negros inerentes à relatividade geral, que são idênticas às leis da termodinâmica, uma vez que indentifiquemos a entropia termodinâmica com a área do buraco negro dividida por quatro vezes a constante de Newton. Tal identificação terá papel fundamental em processos puramente quânticos envolvendo a evaporação dos buracos negros. Mais recentemente, a relação da entropia de um sistema cosmológico arbitrário com a área que cerca esse mesmo sistema é vista como uma relação fundamental, o chamado princípio holográfico, que requer que a relação entre a entropia e a área seja sempre menor que o inverso do quádruplo da constante de Newton.

Tal relação é natural em certas teorias de cordas, e representaria um avanço teórico muito importante. Além disso, estaríamos em direção a uma completa quantização de toda a natureza incluindo o cosmo. Isso nos indica uma mudança mandatória dos conceitos, já que o observador é agora interno ao objeto quântico a ser estudado. Coloca-se então a pergunta: podem-se criar universos em processos quânticos análogos aos de formação de partículas elementares? Podem tais universos, incluindo o nosso, desaparecer em um processo quântico? Afinal, uma teoria de campos quantizados prevê, e até mesmo requer, que tais processos ocorram, e eles de fato ocorrem com freqüência no âmbito de partículas elementares. Deveríamos então poder calcular a função de onda do universo!

Figura 11



A criação de novos universos na teoria de cordas.

No contexto de teorias inflacionárias já se mostrou natural tal criação de universos. Agora poderíamos ter processos tais como na Figura 11.

CONCLUSÕES

Chegamos finalmente ao ponto em que ciência e filosofia imergem em preocupações atávicas do homem. Passamos, das preocupações práticas, técnicas e úteis em nossa vida diária colocadas pela física e realizadas pela tecnologia, a preocupações cada vez mais teóricas e especulativas.

Em primeiro lugar são misteriosas a origem e a estrutura da geometria do espaço-tempo. Uma geometria quântica não tem mais funções simples representando o es-

paço, mas operadores quânticos, e sua interpretação já não é mais tão simples. Mais ainda, no âmago da gravitação quântica, em buracos negros e a altíssimas temperaturas, é essencial que consideremos todas as partículas e interações, que são geradas em números infinitos nas teorias de cordas. Sobretudo, podem ainda intervir as dimensões extras das teorias de cordas, ou ainda outras das teorias *M*, colocando a complexidade do problema em patamares ainda mais altos. Prevêem alguns que as dimensões extras já se encontram em regiões próximas às observações. De todo modo, sua presença passou a ser bastante provável no âmbito de teorias gerais de campo quantizados, e a velha idéia de Kaluza e Klein dos anos 20 passa a fazer parte de um ideário quase quotidiano, onde outras dimensões passam a ser ubíquas.

Passamos a uma zona bastante mais especulativa, em que o observador não apenas é parte do objeto de estudo, mas muito mais que isso: o objeto de estudo transcende o observador, por ser não apenas muito maior, como é de fato nosso universo, mas por conter o observador de forma que este último não seja capaz, nem mesmo em princípio, de observar seu objeto de estudo, pois não há ligação causal entre um universo e outro.

Esta é a mecânica quântica vista sob uma nova dimensão, em que a medida, essencial para a própria interpretação da teoria, passa a ser impossível de ser realizada.

O DOSSIÊ COSMOLOGIA

Os fatos aqui descritos de modo resumido e unificado serão discutidos por especialistas em seus detalhes mais precisos. Inicialmente o prof. Henrique Fleming, do Instituto de Física da USP, fará uma síntese dos rumos tomados em direção à compreensão do cosmos. Subseqüentemente o artigo do prof. Augusto Damineli (IAG-USP) nos dará uma idéia sobre a possibilidade da vida no universo exterior à nossa Terra. A partir deste ponto, o dossiê passa a descrever o universo físico, sua história, e possivelmente uma certa compreensão da origem de todo o mundo físico, uma pergunta atávica do ser humano.

Primeiramente o prof. Luís Weber Abramo (IF-USP) descreve a geografia do universo, aquilatando vários problemas fundamentais sobre sua estrutua conforme vista hoje, e descrevendo várias idéias que fundamentalmente são necessidades teóricas, como a idéia de um universo inflacionário, descrevendo uma época distante em que o mundo multiplicou seu tamanho. Os elementos primordiais e sua formação no universo serão discutidos pelo prof. Walter Maciel (IAG-USP) e pelos profs. Valdir Guimarães e Mahir S. Hussein (IF-USP), que explicarão a origem dos elementos por dois pontos de vista complementares.

Posteriormente, dois aspectos relevantes da relatividade geral serão abordados, o primeiro concerne aos mais estranhos objetos previstos para o espaço, que são os chamamos buracos negros, apresentados pelo prof. George Matsas (do IFT-Unesp), especialista na área, que contará sobre seus detalhes e certas idiossincrasias destas incríveis soluções. Depois, o prof. Alberto Saa (Imec-Unicamp) apresentará a mais nova experiência concernente à veracidade da teoria da relatividade geral, cujas conseqüências têm sido medidas há cerca de 90 anos. Há várias experiências em curso para teste da relatividade geral, incluindo uma na Universidade de São Paulo, onde um grupo importante, especializado em física de baixas temperaturas, em colaboração com um grupo do Instituto de Pesquisas Espaciais, está em busca de ondas gravitacionais através da construção de sofisticada antena de ondas gravitacionais. A experiência descrita pelo prof. Saa se adiciona a tantas outras que visam confirmar a teoria.

Uma visão do universo primordial e da sua evolução, através da fotografia da radiação cósmica de fundo, será dada pelo artigo dos professores Thyrso Vilella, Ivan Ferreira e Alexandre Wuensche do Inpe. Essa descrição é um dos componentes mais importantes de nossa visão atual do univer-

so, podendo dar uma fotografia detalhada do cosmos primordial, e confirmando detalhes antes inimagináveis da teoria. É o início da chamada cosmologia de precisão. O problema das partículas elementares, e um de seus mais significativos representantes no aspecto de confirmação da teoria, o neutrino, será objeto do artigo da profª Renata Zukanovich Funchal (IF-USP), que mostrará também os vários experimentos sobre o assunto. Chegamos então a problemas importantes na descrição e observação do universo, que mencionamos anteriormente, e que são cruciais para o futuro da teoria, a matéria escura e a energia escura. Esses aspectos serão abordados por vários pesquisadores. O prof. José Ademir Sales de Lima descreve a surpreendente expansão acelerada do universo, e sua explicação através de uma energia escura, misteriosa entidade que nos lembra a antiga (ou quase vetusta) quintessência, e que compõe nada menos que 70% da energia total do universo. Posteriormente os professores Rogério Rosenfeld (IFT-Unesp) e João Antonio Freitas Pacheco (Observatório de Nice, França) continuam a falar sobre as formas da matéria escura. Sob forma inerte, esta representa cerca de 25% do universo. Os professores Jacques Lépine e Laerte Sodré, do IAG-USP, completam o impressionante quadro. De fato, pode acontecer que nada menos que 95% do universo seja completamente desconhecido. A profª Beatriz Barbuy (IAG-USP) nos traz vários outros aspectos observacionais importantes do universo com resultados importantes sobre a idade e a expansão do universo. A drª Bertha Cuadros-Melgar, do Instituto de Física, chega ao instante do próprio big-bang, a fronteira última deste nosso universo, e descortina um novo conjunto de idéias baseado na teoria das supercordas, com novas dimensões de espaço, e um tempo transcendente, assim como com criações múltiplas de universos. Ao final, o prof. Reuven Opher (IAG-USP) dará detalhes sobre a formação dos primeiros objetos do cosmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

The Cambridge Atlas of Astronomy.

GUTH, A. H. *The Inflationary Universe*. Perseus Books, 1997.

ABDALLA,E. "Supercordas", in *Revista USP*, 5. São Paulo, CCS-USP, 1990, pp. 183-90.

ABDALLA, E. & CASALI, A. G. *Scientific American*. Brasil, março 2003.

WEINBERG, S. *Gravitation and Cosmology*. New York, Wiley, 1972.

PEEBLES, P. J. E. *Principles of Physical Cosmology*. Princeton University Press, 1993.