

The background of the entire page is a grayscale map of the Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuations. It shows a complex, irregular pattern of light and dark regions, representing temperature variations across the sky. The pattern is most prominent in the lower half of the image, where it appears as a large, bright, irregular shape against a dark background. The upper half of the image is mostly a light gray rectangle containing the title text, with some faint, lighter patches from the CMB map visible behind it.

Cosmologia,
quintessência
e aceleração
do universo

E

PRELÚDIO DE UMA NOVA REVOLUÇÃO CIENTÍFICA?

m 1998, as medidas de distância e velocidade de afastamento das supernovas mostraram, com grande precisão, que o universo está se expandindo aceleradamente. Esse resultado alterou drasticamente a nossa visão do cosmos, pois, sendo a gravidade uma força atrativa, a expansão deveria ser desacelerada, conforme se acreditou durante muitas décadas.

No contexto da teoria da relatividade geral, proposta por Einstein em 1915, esse fenômeno pode ser explicado pela existência da chamada *quintessência* ou *energia escura*, uma componente extra e desconhecida de energia cujo efeito gravitacional líquido é repulsivo e supera a atração gravitacional ordinária entre as partes do universo. Isoladamente, essa descoberta gerou um novo desafio às próprias leis da física, já que a nova componente não é prevista pelo modelo padrão da física de partículas.

Qual é a natureza da quintessência? Será um campo cósmico fundamental que existe desde os primórdios do universo, e que se manifesta no presente apenas devido ao alto grau de diluição da matéria cósmica? Como serão os últimos estágios da evolução do universo se a quintessência for a componente dominante, ou seja, qual o destino do cosmos na presença dessa componente extra? Qual a razão do nome “quintessência”? Será essa substância uma versão pós-moderna do quinto elemento (transparente, inalterável e imponderável), que foi essencial para tornar a

JOSÉ ADEMIR SALES DE LIMA é professor do IAG-USP e da UFRN.

cosmologia grega consistente? Ou será apenas mais uma metamorfose do éter pré-relativístico?

O presente estágio acelerado do universo nos remete a outras perguntas não menos interessantes, por exemplo: sabemos que o universo se expande, mas desde quando está acelerado? Talvez mais importante: será possível acelerar o universo sem a presença da quintessência? Em caso afirmativo, qual a teoria que deverá substituir a relatividade geral?

Sem dúvida, as questões acima fazem parte das indagações mais candentes e palpitantes da ciência contemporânea, e tal como ocorreu na Grécia antiga e durante o Renascimento, estas e outras perguntas relacionadas empurram novamente a astronomia e a cosmologia para a fronteira do conhecimento científico.

RELATIVIDADE GERAL E COSMOLOGIA

Desde o seu nascimento na Grécia antiga (1), as pesquisas em cosmologia foram fundamentais para a formação de uma concepção científica da natureza. Mesmo na ausência de uma lei de movimento, Eudóxio, Aristóteles e Ptolomeu formularam um modelo cosmológico – esférico, finito e geocêntrico – que perdurou por mais de quinze séculos.

A “Revolução Astronômica”, iniciada com as contribuições de Copérnico, Kepler e Galileu, chegou ao apogeu com a teoria gravitacional newtoniana, e figura até os dias de hoje como uma coluna-mestra sobre a qual se apóia a nossa visão do mundo moderno. Essa afirmação adquire um significado mais contemporâneo quando consideramos o desenvolvimento alcançado pela física gravitacional do século XX.

A construção da relatividade geral por Einstein, baseada na idéia de um espaço-tempo curvo, revelou uma teoria de gravitação mais precisa e dotada de uma fenomenologia extraordinariamente mais rica

do que a teoria newtoniana. A teoria de Einstein generalizou a teoria de Newton em diversos aspectos prevendo, por exemplo, a existência das ondas gravitacionais. Tal fenômeno, de natureza tipicamente relativística, substituiu a noção – errônea – de ação a distância (presente na teoria de Newton) ao estabelecer um limite para a velocidade de propagação dos distúrbios gravitacionais. Sendo esse limite dado pela velocidade da luz no vácuo, a gravitação se reconcilia com a visão de um campo físico nascida e lapidada pelo eletromagnetismo de Faraday, Maxwell, Heaviside e Lorentz. É importante ressaltar que a relatividade geral também explica a origem da força gravitacional como sendo uma deformação do contínuo espaço-tempo. Quando os efeitos de curvatura são desprezíveis (campo fraco), a dependência da força com o inverso do quadrado da distância – fenomenologicamente adotada por Newton – é recuperada.

Atualmente, a compreensão fornecida pelo paradigma einsteiniano para uma ampla variedade de fenômenos já pode ser considerada uma parte essencial da história das ciências do século XX, embora muitas de suas conseqüências permanecam desconhecidas, ou não devidamente exploradas.

Mesmo durante seu período de consolidação, a relatividade geral foi aplicada com enorme sucesso, não apenas ao sistema solar (desvio do periélio de Mercúrio e deflexão da luz das estrelas no campo do Sol), mas também no *problema cosmológico*. Os resultados no domínio cosmológico foram confirmados com a descoberta da expansão do universo, em 1929, pelo astrônomo americano Edwin Hubble. O estado de expansão cósmica ou recessão das galáxias é um fenômeno que havia sido previsto alguns anos antes pelo físico-matemático russo Alexandr Friedmann através de seus modelos de big-bang. Em linhas gerais, o que atualmente chamamos de cosmologia moderna é um produto direto da teoria gravitacional de Einstein com as observações astronômicas dos grandes telescópios e, portanto, como os demais ra-

1 Os registros indicam que a astronomia nasceu na Babilônia, mas a cosmologia foi um produto da cultura grega. Surgiu como herdeira da tradição filosófica e matemática estabelecida na Grécia pelos filósofos pré-socráticos.

mos da física moderna, é tipicamente uma disciplina criada pela física do século XX (ver a linha evolutiva na Figura 1).

OS PILARES DO BIG-BANG

No modelo cosmológico padrão, o universo em grande escala é homogêneo e isotrópico. Essa hipótese é chamada de princípio cosmológico, e representa uma extensão cósmica do princípio de Copérnico (a Terra não ocupa uma posição privilegiada no espaço). Matematicamente, isso significa que todas as posições e todas as direções espaciais no universo são equivalentes.

Nesse modelo, o cosmos inicia sua evolução a partir de uma grande explosão (big-bang) com densidade e temperatura extremamente altas (densidade de Planck $\cong 10^{94}$ gramas/cm³ e temperatura de Planck $\cong 10^{32}$

K), valores que caracterizam o chamado estado singular inicial. Nos estágios subsequentes, o universo se expandiu e esfriou rapidamente, um efeito que permitiu a formação das galáxias, das estrelas e finalmente da própria vida. A fantástica variação de temperatura ao longo de sua evolução significa que o universo é um sistema físico ímpar, para o qual os conceitos e técnicas matemáticas desenvolvidas nos mais variados campos da física – de altas energias a baixas temperaturas – podem ser relevantes para estabelecer os detalhes da história cósmica.

As principais descobertas observacionais que sustentam a cosmologia do big-bang são:

- 1) A lei de Hubble, a manifestação mais direta da expansão universal.
- 2) A nucleossíntese cosmológica, que permitiu determinar a evolução e as abundâncias cósmicas dos elementos leves. Esse processo desempenha um papel crucial como condição de contorno para entender os primeiros instantes do big-bang, e também limitar os parâmetros físicos dos modelos (as abundâncias observadas dos elementos mais leves, tais como, hidrogênio, deutério, hélio e lítio, não são explicáveis por uma síntese exclusivamente estelar).
- 3) A radiação cósmica de fundo (RCF) de 3K, uma verdadeira pedra da Roseta (2) para a cosmologia, pois permitiu estabelecer as chamadas eras cósmicas, relacionando o tempo com temperatura, e assim determinando as condições físicas reinantes em cada estágio da evolução do universo.

2 A pedra da Roseta permitiu a decifração dos hieróglifos e a reconstituição da história egípcia. O papel correspondente na cosmologia é desempenhado pela radiação cósmica de fundo de 3K. A descrição do passado térmico do universo (e da física associada) só foi possível em 1965, ao se medir a temperatura dessa radiação.

Figura 1



A cosmologia moderna foi iniciada por Einstein (1917), ao propor um modelo de universo estático. Em 1922, Friedmann obteve as soluções expansionistas, posteriormente denominadas de cosmologias do big-bang (grande explosão) por Fred Hoyle. Desde a descoberta da expansão do universo (1929), acreditava-se que o universo se expandia desaceleradamente, pois a gravidade é uma força atrativa. Em 1998, as observações de supernovas do tipo Ia mostraram que a expansão está acelerada. Esse resultado marcou o início da cosmologia contemporânea.

4) As observações indiretas da matéria escura, uma componente não-luminosa de matéria (de origem primordial) que permeia o universo em diversas escalas, sendo muito mais abundante do que a matéria luminosa bariônica (ver artigo de Laerte Sodr e neste dossiê).

Uma descri o dinâmica do universo exige o conhecimento de pelo menos três parâmetros físicos: o parâmetro de Hubble – H_0 – que mede a presente taxa de expansão, o parâmetro de desacelera o – q_0 – que mede a varia o da taxa de expansão (se o universo acelera ou desacelera), e o parâmetro de densidade – Ω_i – que mede a contribui o relativa de cada componente do fluido cósmico ($i=1,2,3$, etc. denota uma componente específica). O valor total do parâmetro de densidade   também uma quantidade importante, pois determina se a geometria espacial do universo   fechada, aberta ou plana (ver Figura 3) .

No modelo padrão, o universo   uma mistura de quatro componentes: bárions

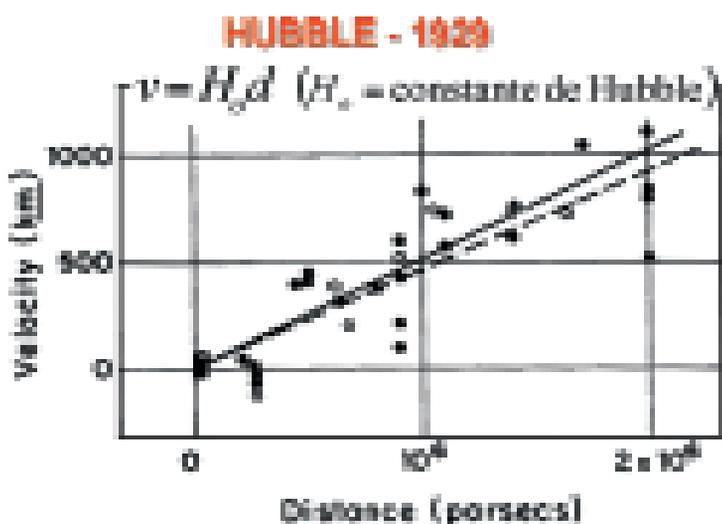
(prótons e nêutrons) que, juntamente com os elétrons, são responsáveis pela luz das galáxias (Ω_b), os fótons da radia o cósmica de fundo (Ω_γ), os neutrinos (Ω_ν) e a matéria escura (Ω_M). Este quadro não era ainda completamente coerente, pois havia dois problemas com o chamado modelo padrão, um teórico e outro observacional. No cenário favorito dos teóricos, o parâmetro de densidade total, ou seja, a soma dos parâmetros das quatro componentes, $\Omega_T = \Omega_b + \Omega_\gamma + \Omega_\nu + \Omega_M$,   igual a 1 e, portanto, o universo seria espacialmente plano (ver Figura 2). Essa condi o foi teoricamente prevista no início dos anos 80, pelos chamados cenários inflacionários (3) (ver artigo de Raul Abramo).

No entanto, diversas observa es independentes indicavam $\Omega_T \cong 0.3$, um valor bem menor do que a unidade. Esse valor corresponde, basicamente, ao parâmetro de densidade da matéria escura fria, cerca de 10 vezes maior do que Ω_b – o parâmetro de densidade da matéria luminosa – e aproximadamente 5.000 vezes maior do que a contribui o dos fótons e neutrinos.

Existia ainda o problema da idade. As estruturas mais velhas observadas no universo, os aglomerados globulares – grupos com cerca de 10^{5-6} estrelas – apresentavam uma idade entre 13 e 14 bilhões de anos (ver artigo de Beatriz Barbuy). Essa idade   muito maior do que os 9,9 bilhões de anos calculados pelo modelo com matéria escura fria e $\Omega_T = 1$. O quadro descrito acima resume a situa o até meados da década de 90. O modelo plano com matéria escura fria (*cold dark matter* na literatura inglesa)   um modelo desacelerado, pois tem $q_0 = 1/2$ (modelos com valores positivos de q_0 são sempre desacelerados). A rela o $\Omega_T = 2q_0$   sempre válida para modelos do tipo Friedmann, e como Ω_T   sempre positivo, isso significa

3 A infla o foi um breve evento de expansão acelerada, supostamente provocado por uma transi o de fase que aconteceu no universo primitivo. A ocorrência da infla o   fundamental para o processo de forma o de galáxias ter uma origem causal.

Figura 2



Descoberta da expansão do universo. Diagrama original de Hubble mostrando que as galáxias se afastam com uma velocidade proporcional   distância. Um resultado que foi confirmado para dezenas de milhares de galáxias. A recessão das galáxias foi a primeira previsão do big-bang observacionalmente verificada.

que o modelo padrão prevê um universo desacelerado ($q_0 > 0$) e, conseqüentemente, um baixo valor para a idade do universo. Em geral, um valor negativo de q_0 não era sequer considerado como hipótese de trabalho pelos teóricos, pois a gravidade é uma força atrativa.

É importante também mencionar que a constante cosmológica, Λ , foi introduzida por Einstein em 1917 com a finalidade exclusiva de obter um universo estático. Se Λ pode evitar o colapso da matéria sob ação de sua própria gravidade, tal como ocorre na solução estática, também será capaz de acelerar um universo em expansão. Contudo, após a descoberta da recessão das galáxias, o criador renegou a criatura. Em 1931, Einstein considerou que a introdução da constante cosmológica foi o grande equívoco de sua vida acadêmica, classificando-a não apenas como uma hipótese desnecessária, mas que também afetava a própria beleza da relatividade geral; uma teoria sem parâmetros livres (4).

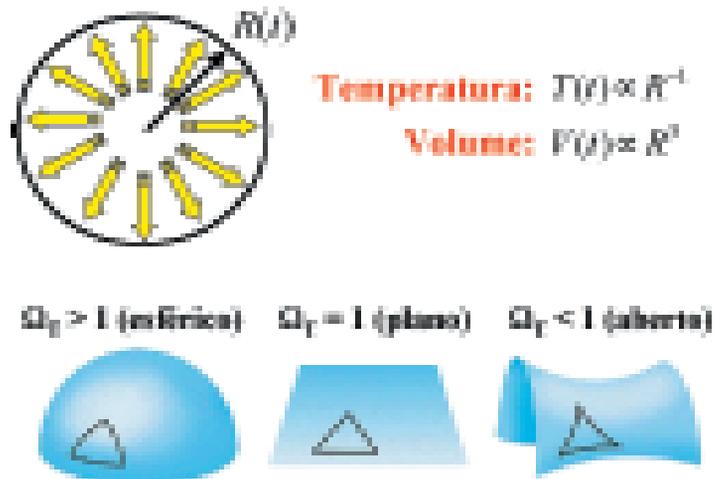
Fazendo um contraponto com a visão de Einstein, os cosmólogos, que não tinham um motivo observacional convincente para desprezar a constante cosmológica, continuaram com a mente aberta, tratando Λ como uma possibilidade teórica. O primeiro deles foi Georges Lemaître, ainda na década de 30, que associou a contribuição da constante cosmológica com uma possível solução para o problema da idade. Uma vez libertado, o gênio – Λ – não queria voltar para a garrafa! Como um resultado dessa prática, a comunidade científica vem assistindo, desde o início dos anos 30, a um verdadeiro festival de morte e ressurreição da constante cosmológica, a última delas provocada pelas recentes observações de supernovas.

SUPERNOVAS E ACELERAÇÃO DO UNIVERSO

Após o trabalho de Hubble, estabeleceu-se rapidamente um consenso nas comunidades dos astrônomos e cosmólogos. Para se ter mais informações sobre a geometria do universo e o seu estado de expansão seria necessário medir velocidades e distâncias de objetos cada vez mais afastados, de preferência, situados nos confins do universo. O objetivo central era medir o parâmetro q_0 . Medidas de velocidades são relativamente simples e de grande precisão, pois são baseadas no chamado efeito Doppler. Para um universo em expansão, tal efeito se traduz no desvio para o vermelho das linhas espectrais dos objetos distantes. Esse desvio espectral é quantificado pelo parâmetro de *redshift* z , que representa um tipo de medida ótica da velocidade de afastamento.

4 Teorias fundamentais da física geralmente não apresentam parâmetros livres, e representam o máximo do ideal teórico a ser atingido num determinado campo. Uma única previsão malsucedida é suficiente para eliminar tais teorias.

Figura 3



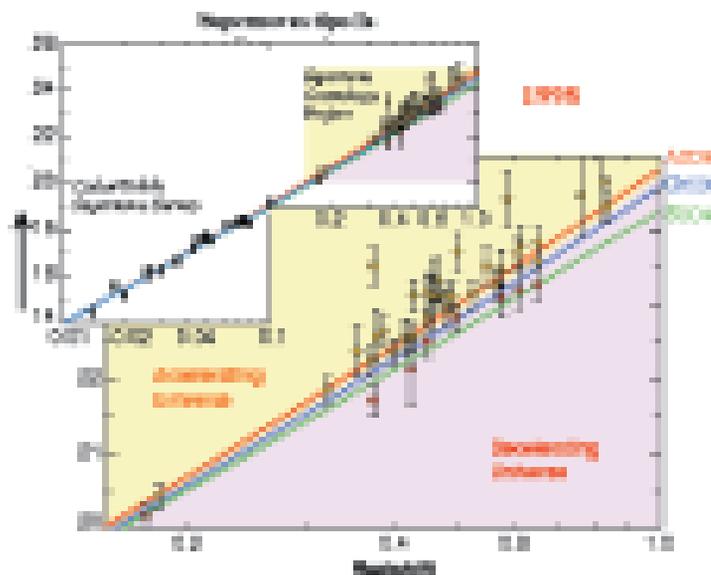
Toda porção esférica do universo pode ser vista como uma bola cujo raio $R(t)$ é uma função do tempo. O volume cresce com o cubo do raio e a temperatura diminui com o seu inverso: o universo se expande e esfria. A geometria espacial do universo é definida pelo parâmetro de densidade total Ω_T . A geometria do universo é esférica, plana ou aberta se Ω_T for, respectivamente, maior, igual ou menor do que 1.

Por outro lado, medidas de distância em cosmologia envolvem o conhecimento de duas quantidades físicas da luz emitida pelos objetos – L e F – chamadas de luminosidade absoluta e luminosidade relativa (ou fluxo de energia), respectivamente. Em termos dessas quantidades, a distância de luminosidade é empiricamente definida como $D_L = (L/4\pi F)^{1/2}$. A luminosidade absoluta, L , é a quantidade total de energia que o objeto emite por segundo, enquanto F é a quantidade de energia coletada por unidade de área e de tempo no espelho (ou no detector) do telescópio, ou seja, o fluxo de energia recebido. A segunda é facilmente mensurável, mas a primeira precisa ser estimada, o que é geralmente feito através de uma propriedade física do objeto. A curva experimental procurada pelos observadores é $D_L(z)$.

Um gigantesco esforço foi canalizado pelos astrônomos, ao longo de várias décadas, visando estabelecer os melhores indicadores de distância, conhecidos na literatura como velas-padrão. Embora as galáxias fossem os candidatos naturais, a determinação de sua luminosidade absoluta L (com a precisão necessária) envolve muitas dificuldades, já que galáxias são entidades compostas, formadas por uma infinidade de estrelas. Portanto, a grande solução para esse problema seria identificar objetos simples que brilhassem tanto quanto as galáxias, e que tivessem a sua luminosidade L definida com boa precisão. No início dos anos 90 começou a ficar claro que para seguir adiante era preciso apelar para o brilho extremo das supernovas.

A supernova é uma gigantesca explosão que representa a destruição termonu-

Figura 4



Distância em função redshift z para os dados de supernovas (adaptado de Perlmutter et al.). A parte colorida é um zoom do pequeno retângulo na parte superior. As regiões amarela e lilás representam os possíveis universos acelerados e desacelerados. As linhas verde (SCDM) e azul (OCDM) são as previsões teóricas dos modelos de Friedmann. SCDM e OCDM significam modelo padrão (plano) e modelo aberto com matéria escura fria. A linha vermelha é um modelo acelerado com constante cosmológica. Mesmo visualmente os dados favorecem o modelo acelerado.

clear de uma estrela. Essa explosão lança energia no espaço em quantidades extraordinárias. O brilho total de uma supernova é de cerca de 10 bilhões de estrelas iguais ao nosso Sol, e, portanto, rivaliza com o brilho de uma galáxia inteira e com uma vantagem adicional: sendo um único corpo, sua luminosidade absoluta pode ser (e tem sido) determinada com grande precisão.

Existia, contudo, uma dificuldade inerente ao uso das supernovas como velas-padrão. A frequência desse tipo de explosão numa galáxia é de cerca de um evento em média a cada 50 anos. Tínhamos portanto um grande dilema: precisávamos das supernovas, mas essas velas eram raras e aleatórias! Em termos práticos, seria um absurdo completo alguém pedir tempo de telescópio para observar futuras explosões de supernovas!

Duas equipes independentes de astrônomos, envolvendo diversas universidades em vários continentes, resolveram esse problema quase simultaneamente, estabelecendo o que podemos chamar de um verdadeiro experimento astronômico (para diferenciá-la da observação passiva). Os dois grupos, liderados, respectivamente, por Brian Schmidt (High Z Supernova Search Team) e Saul Perlmutter (Supernova Cosmology Project), adotaram a seguinte metodologia na caça das supernovas. No lugar de se observar uma única galáxia com um grande telescópio, faziam-se duas imagens consecutivas da mesma região do céu (separadas por um intervalo de três semanas), envolvendo cerca de 1.000 galáxias em diferentes distâncias. Repetindo a mesma estratégia para 100 regiões distintas teremos no total cerca de 100.000 galáxias observadas.

Porque o intervalo de três semanas entre as duas imagens? Pelo fato de a explosão de uma supernova do tipo Ia chegar ao seu brilho máximo aproximadamente nesse período, após o qual a intensidade decresce rapidamente e a supernova distante se torna invisível.

No final do mês as duas imagens são superpostas. Qualquer ponto luminoso adicional é um bom candidato a supernova, um evento que deve ser altamente provável de acontecer, pois agora se observam cerca de 100.000 galáxias simultaneamente. Uma vez identificado o ponto luminoso adicional aponta-se imediatamente o telescópio espacial Hubble para a supernova e determina-se a sua luminosidade absoluta L , o

Figura 5

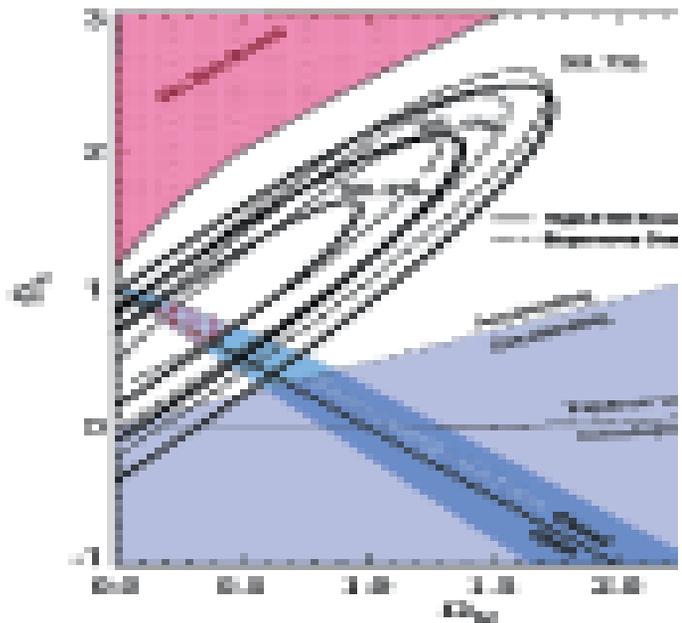


Diagrama no espaço $(\Omega_\Lambda, \Omega_M)$. Os contornos representam as análises realizadas pelos dois grupos. Os valores dos parâmetros se encontram na região acelerada (branca), com um elevado nível de confiança estatística. A faixa transversal azul são os dados da radiação cósmica de fundo obtidos pelos experimentos do Boomerang e Maxima em 2001. Esses experimentos foram os primeiros na história da cosmologia a fixar $\Omega_T = 1$. Note que os resultados de supernovas e da RCF são ortogonais (um fato referido como concordância cósmica!).

que permite calcular a distância. Naturalmente, a disponibilidade quase sincronizada dos grandes telescópios em terra com o telescópio espacial Hubble é uma boa medida da dimensão e da responsabilidade subjacente aos projetos envolvendo as observações de supernovas.

Essa verdadeira engenharia astronômica permitiu (até o ano de 1997) a identificação de mais de uma centena de supernovas (Figura 4). As medidas das distâncias e velocidades desses objetos – com a precisão necessária – estenderam o chamado diagrama de Hubble-Sandage para distâncias e velocidades inimagináveis até meados da década de 90. Os dados apresentados na Figura 4 podem também ser analisados de uma forma alternativa que também é bastante ilustrativa (ver Figura 5). A distância de luminosidade, $D_L(z)$, pode ser expressa como um produto do inverso do parâmetro de Hubble H_0 por uma função P que depende dos diversos parâmetros de den-

sidade e do *redshift* z . Para um modelo com constante cosmológica Λ , por exemplo, temos:

$$D_L(z) = cH_0^{-1} P(\Omega_\Lambda, \Omega_M, z)$$

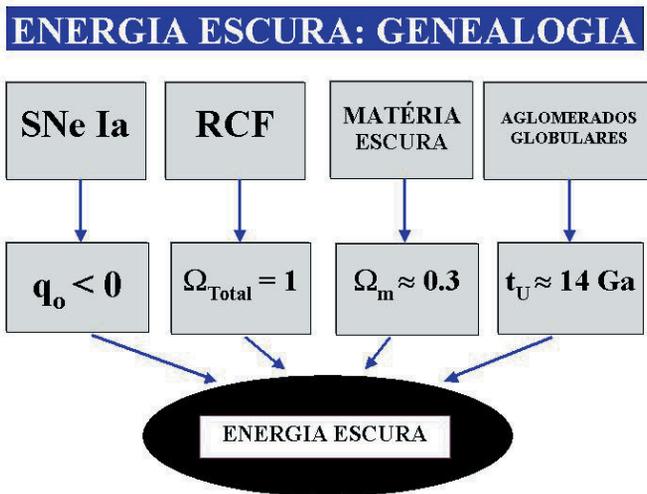
onde $c = 3.10^{10}$ cm/s é a velocidade da luz. Como a distância de luminosidade e o parâmetro z são medidos, no lugar de traçar um gráfico de D_L como uma função de z para valores fixos de Ω_Λ e Ω_M (Figura 4), é mais conveniente (e pedagógico) estudar o espaço dos parâmetros $(\Omega_\Lambda, \Omega_M)$, ou seja, construir o gráfico de Ω_Λ como uma função de Ω_M para os valores observados de D_L e z (Figura 5). É importante também enfatizar que a expressão exata para $D_L(z)$, tal como escrita acima, também está de acordo com a lei de Hubble para pequenos valores do *redshift*. De fato, no limite de baixos *redshifts* ($z = v/c \ll 1$), a expressão de $D_L(z)$ se torna bastante simples:

$$D_L(z) = cH_0^{-1} z = H_0^{-1} v$$

reproduzindo a expressão da lei de Hubble (ver Figura 2). Isso significa que o parâmetro de Hubble também pode ser medido a partir das observações de supernovas, pelos dados de baixos *redshifts*, para os quais a velocidade é proporcional à distância.

Os resultados das observações de supernovas foram complementados por muitos experimentos independentes, dentre os quais: as medidas das anisotropias da radiação de 3K e seu espectro angular de potência; os dados de raios-X dos aglomerados de galáxias; estimativas mais precisas da idade de aglomerados globulares (as mais antigas estruturas observadas no universo); estatística de lentes gravitacionais, além dos dados provenientes da distribuição de ma-

Figura 6



Árvore genealógica da quintessência. As supernovas (SNe) do tipo Ia fornecem a evidência mais direta da expansão acelerada ($q_0 < 0$). Os dados da Radiação Cósmica de Fundo implicam que o universo é plano ($\Omega_T = 1$). Por subtração da matéria escura temos $\Omega_Q = 0,7$ (70% do universo é quintessência!). Modelos com expansão acelerada resolvem facilmente o problema da idade do universo.

téria e sua estrutura de larga escala (ver Figura 6).

Esse conjunto de observações implica também que o universo atual é basicamente formado por bárions (elementos pesados), fótons, neutrinos, matéria escura, além da “substância” extra que acelera o universo. Sendo esse último o quinto e o mais abundante dos componentes básicos (cerca de 70% da energia e da matéria do universo), o que justifica sua denominação de quintessência – nome anteriormente consagrado pela tradição grega pré-socrática.

Embora os dados de supernovas tenham sido originalmente analisados no contexto dos modelos com constante cosmológica (energia do vácuo), atualmente existem vários candidatos a quintessência convivendo na literatura; todos compatíveis com os dados existentes até o presente. Portanto, mesmo considerando que o problema da multiplicidade de candidatos não foi ainda resolvido pelo confronto direto com os dados obtidos até o presente, muitas questões estão sendo investigadas. A mais importante delas, sem sombra de dúvidas, é saber qual a natureza da quintessência, pois sua abundância cósmica – caso esta componente exista – já está determinada (70% de todo o conteúdo cósmico).

COMO ACELERAR O UNIVERSO?

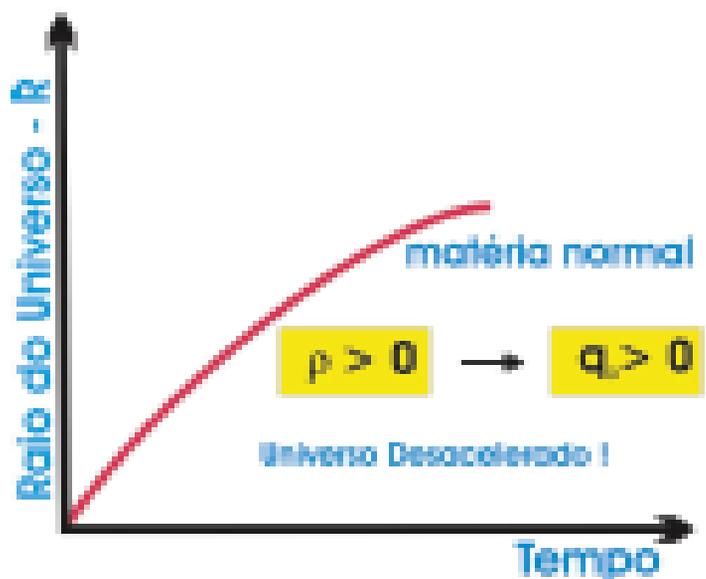
A idéia de quintessência – quinto elemento – como um tipo especial de matéria preenchendo o cosmos foi originalmente introduzida pelos gregos. Na cosmologia aristotélica, por exemplo, o universo seria finito, estático e formado por cinco elementos primordiais: água, ar, terra, fogo e quintessência. O quinto elemento seria uma substância diferente das outras; transparente, inalterável e imponderável; uma matéria-prima que formaria a Lua, os planetas (diferentes da Terra), o Sol e as estrelas. A quintessência era um elemento essencial para tornar o modelo cosmológico grego consistente. Na visão filosófica dos gregos, os elementos pesados deveriam cair

para o seu lugar natural (o centro da Terra), contudo, a Lua mesmo parecendo pesada não cai. Provavelmente, isso explica a origem da quintessência como substância formadora dos corpos celestes e, como tal, não precisaria cair.

À luz do renascimento científico e da revolução newtoniana, podemos afirmar que a quintessência surgiu para resolver um problema de aceleração, um conceito – desconhecido pelos gregos – que permitiria sustentar a Lua e os demais corpos celestes em suas órbitas.

Como foi visto, as observações de supernovas combinadas com outros resultados independentes estão indicando (com grande precisão) que o universo se expande aceleradamente. Portanto, é fundamental compreender como a quintessência (ou energia escura) pode acelerar o universo e, principalmente, no contexto da relatividade geral, qual deve ser o seu atributo básico.

Figura 7A



A gravidade da matéria normal (densidade positiva) é sempre atrativa e portanto provoca desaceleração, ou seja, o parâmetro $q_0 > 0$ (curva côncava para baixo).

Primeiro vamos entender como é possível acelerar o universo. Em grande escala, o universo é espacialmente homogêneo e isotrópico, sendo modelado por um fluido perfeito (na realidade uma mistura de fluidos) com densidade total de matéria-energia ρ e uma pressão p . Matematicamente, o universo será acelerado ou desacelerado se a curva descrevendo o fator de escala como uma função do tempo for côncava ou convexa, respectivamente (ver Figuras 7A e 7B). Esse comportamento depende apenas do sinal da soma $\rho + 3p$. No modelo sem quintessência essa soma é sempre positiva, o que implica uma curva côncava (Figura 7A). Nesses modelos (dominados por matéria escura fria), temos $\rho > 0$ e a pressão total é praticamente nula. De fato, a matéria escura se comporta como um fluido sem pressão, e devido ao alto grau de diluição do universo a pressão positiva oriunda das outras componentes (bárions, fótons e neutrinos) também é desprezível. Isso explica por que os modelos da classe de Friedmann são todos desacelerados, independente do valor do parâmetro de densi-

dade. Portanto, para se ter um parâmetro de desaceleração negativo (modelo acelerado), é preciso que exista uma componente com pressão suficientemente negativa, de forma tal que a soma $\rho_M + \rho_Q + 3p_Q$ seja menor do que zero.

Segue das considerações acima uma conclusão inevitável: no contexto da relatividade geral só é possível acelerar o universo se existir uma componente extra com pressão suficientemente negativa.

A pressão da quintessência deve satisfazer a desigualdade $p_Q < -(\rho_M + \rho_Q)/3$. Nesse caso, como mostrado na Figura 7B, a curva do fator de escala se torna convexa.

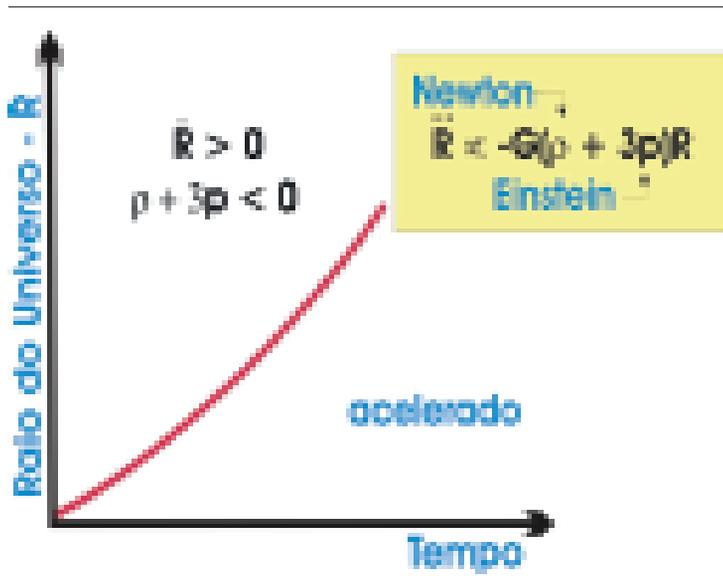
Embora considerando que essa nova componente modifica a visão tradicional do universo, o desconhecimento de sua natureza, ou equivalentemente, a inexistência de um candidato natural oriundo, por exemplo, da física de partículas, tem provocado um intenso debate e estimulado muitas especulações. Pelo menos cinco candidatos foram propostos na literatura recente:

- 1) constante cosmológica – Λ ;
- 2) campos escalares (Λ , $V(\phi)$);
- 3) modelos com decaimento do vácuo – $\Lambda(t)$;
- 4) matéria – X ($p_x = \omega\rho_x$, $\omega < 0$);
- 5) gás de Chaplygin.

A lista acima não é exaustiva o suficiente para incluir todos os candidatos possíveis como se poderia pensar à primeira vista. A propriedade comum desses candidatos é ter pressão negativa, e como essa é a condição básica para um universo acelerado, existem várias outras possibilidades, ocasionalmente, discutidas na literatura.

A constante cosmológica Λ – o candidato tradicional – é o mais simples do ponto de vista matemático (por ser constante!). É uma proposta de quintessência espacialmente uniforme e independente do tempo, interpretada como um fluido relativístico obedecendo a equação de estado, $p_\Lambda = -\rho_\Lambda$. Em teoria quântica de campos, Λ descreve a energia de ponto-zero de todas as partículas e campos presentes no universo. É um tipo de energia que se manifesta através de

Figura 7B



Uma quintessência com pressão negativa pode inverter o sinal da aceleração. Sua densidade de massa gravitacional efetiva, $\rho + 3p$, é negativa e provoca repulsão cósmica.

vários fenômenos quânticos, tais como o desvio espectral das linhas do átomo de hidrogênio (*lamb shift*) e no chamado efeito Casimir (atração de placas metálicas descarregadas no vácuo).

No entanto, existe um problema fundamental associado com esse candidato, o qual tem sido usualmente denominado de problema da constante cosmológica. Sendo breve, é no mínimo surpreendente que o limite cosmológico da densidade de energia do vácuo difira das expectativas teóricas em mais de 100 ordens de magnitude (10^{120}). Este é um problema localizado na interface unindo astrofísica, cosmologia e teoria quântica de campos, e que tem sido considerado por alguns autores como a maior crise da física moderna. Num certo sentido, podemos dizer que esse problema atua como uma verdadeira espada de Damocles sobre a solução de uma constante cosmológica para o presente estado acelerado do universo. Naturalmente, a existência desse problema tem sido um grande estímulo para as pesquisas por candidatos alternativos.

O segundo candidato – o campo escalar ϕ – é o que foi originalmente batizado de quintessência por Paul Steinhardt e colaboradores. Contudo, a denominação genérica de quintessência para qualquer um dos candidatos acima é apropriada, pois qualquer um deles é o quinto e mais abundante dos elementos. Como ocorre num sistema massa-mola, cada campo escalar é caracterizado pelo seu potencial $V(\phi)$. Embora não existam muitos exemplos concretos de partículas escalares na física, muitas soluções com pressão efetiva negativa são possíveis nesse caso, dependendo da forma do potencial. Por questões de generalidade e uma melhor fundamentação matemática, depois da constante cosmológica, o campo escalar tem a preferência dos teóricos.

O terceiro candidato (termo $-\Lambda(t)$) é baseado na idéia de que a densidade de energia do vácuo não precisa permanecer constante, podendo decair continuamente ao longo da história cósmica. A variação de Λ com o tempo seria devido à interação do vácuo (troca de energia) com as outras

componentes, com a densidade do vácuo diminuindo ao longo da expansão. Esses modelos tentam reconciliar o pequeno valor presentemente observado de Λ com o valor absurdamente alto sugerido pelas teorias de campo. Nesse sentido, pode-se dizer que Λ é pequeno porque o universo é muito velho. Esses modelos geram entropia, ocorrendo uma produção de matéria e energia a expensas da energia do vácuo.

O quarto candidato é uma simples parametrização que generaliza a forma tradicional das equações de estado, usualmente utilizadas em cosmologia. O parâmetro ω é negativo para poder acelerar o universo. Finalmente, temos o gás de Chaplygin (5), um candidato cuja descrição mais fundamental foi recentemente justificada via teoria de cordas, embora sua origem primeira tenha sido a teoria de fluidos.

Na realidade, mesmo considerando que estamos atravessando um período extraordinário na cosmologia observacional, os dados existentes ainda são insuficientes para determinar qual o melhor dentre os vários candidatos a energia escura; num claro sinal de que observações mais precisas são necessárias para testar as hipóteses e suas previsões básicas. Em particular, isso significa que a determinação de parâmetros cosmológicos continuará a ser a meta central das investigações no futuro próximo. O propósito fundamental da pesquisa atual em cosmologia é descobrir a natureza da quintessência. Naturalmente, a situação é um pouco desconfortável tanto do ponto de vista teórico quanto observacional, pois o paradigma emergente é mais complexo do que o cenário tradicional proporcionado pelo modelo de Einstein–de Sitter. Além disso, existe a matéria escura, o que pode induzir alguém a pensar que estamos diante de mais uma geração de epiciclos, equantes e deferentes tal como ocorreu no modelo ptolomaico. Contudo, é bom lembrar que os *status* da matéria escura e da quintessência são bem distintos. Embora a matéria escura não tenha também sido detectada em laboratório, existe uma série de candidatos oriundos da física de partículas cuja natureza é bem estabelecida. Atual-

5. S. A. Chaplygin foi um físico-matemático russo que deu importantes contribuições em mecânica de fluidos no início do século XX. A pressão de um gás do tipo Chaplygin é negativa. Sua equação de estado é dada por $p = -A/\rho$, onde A é um parâmetro positivo.

mente, vários experimentos visando a sua detecção em laboratórios terrestres estão em andamento (ver artigo de Rogério Rosenfeld).

A quintessência, junto com a matéria escura, responde por cerca de 95% do conteúdo total de matéria e energia que preenche o cosmos (os 5% restantes são das outras três componentes). Diferente da matéria escura, que é não relativística e sem pressão, a quintessência é relativística e tem pressão negativa. Embora dominante, sua densidade é extremamente pequena, e a fraca interação com a matéria ordinária, provavelmente, tornará impossível sua identificação em laboratório.

É realmente um tempo de conflitos e dúvidas. No entanto, estamos vivenciando o momento mais excitante do desenvolvimento da cosmologia, pois, embora preservando alguns aspectos da física básica, um novo protagonista invisível, que não foi previsto pela física de partículas, parece ter definitivamente tomado a cena. A quintessência é responsável por uma gravidade repulsiva e, potencialmente, pode alterar profundamente a nossa visão tradi-

cional de espaço, tempo e matéria.

Por outro lado, caso a quintessência não exista, nossa melhor teoria gravitacional sofrerá um golpe fatal, pois aparentemente não há outra maneira de acelerar o universo no âmbito da relatividade geral. Uma alternativa que vem sendo examinada na literatura é que a gravidade possa ser diluída nas dimensões extras. Esse é o esquema mais promissor oferecido pela atual teoria de cordas e de membranas. Um conflito de doutrinas será inevitável. Contudo, esse choque não deve ser visto como uma catástrofe para a ciência do cosmos, e sim como uma grande oportunidade para os espíritos criativos.

No atual estágio da física, para avançarmos no entendimento da natureza é preciso investir na compreensão do cosmos – o nosso sistema maior –, a última fronteira na busca do conhecimento. Nesse contexto, a natureza da quintessência (ou sua negação!) juntamente com outros problemas da cosmologia contemporânea irão desempenhar um papel extremamente relevante na construção do novo paradigma que norteará a ciência do século XXI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KRAUSS, L. "Antigravidade Cosmológica". *Scientific American Brasil* 1 (2003).
_____. *Quintessence: The Mystery of Missing Mass in the Universe*. New York, Basic Books, 2000.
LIMA, J. A. S. "Alternative Dark Energy Models: An Overview". *Brazilian Journal of Physics* 34, 194 (2004).
OSTRIKER, J. P. & STEINHARDT, P. J. "O Universo Quintessencial". *Scientific American Brasil* 1 (2003).
PEEBLES, P. J. "Cosmologia Moderna". *Scientific American Brasil* 1 (2003).
RIESS, A. G. & TURNER, M. S. "Da Desaceleração para a Aceleração". *Scientific American Brasil* 22 (2004).
-

