

# COSMOLOGIA, QUINTESSÊNCIA E ACELERAÇÃO DO UNIVERSO\*

**José Ademir Sales de Lima (IAG/USP)**

## I. PRELÚDIO DE UMA NOVA REVOLUÇÃO CIENTÍFICA?

Em **1998**, as medidas de distância e velocidade de afastamento das **Supernovas** mostraram, com grande precisão, que o universo está expandindo aceleradamente. Este 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 (TRG)**, 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 esta substância uma versão pós-moderna do **5º** elemento (transparente, inalterável e imponderável), que foi essencial para tornar a 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 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.

\* Publicado na Revista USP 62, Julho-Agosto 2004.

## II. RELATIVIDADE GERAL E COSMOLOGIA

Desde o seu nascimento na Grécia antiga<sup>1</sup>, 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 **XV** 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, substitui a noção - errônea - de ação à 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.

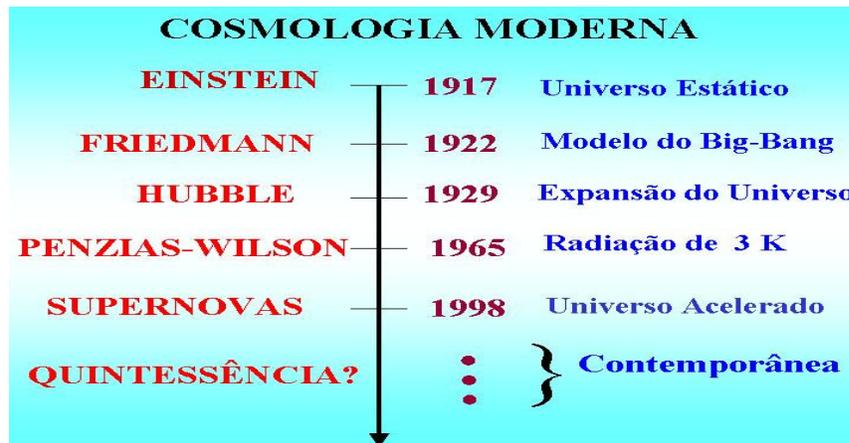
Atualmente, a compreensão fornecida pelo paradigma **einsteiniano** para uma ampla variedade de fenômenos já pode ser considerada uma parte essencial da **História das Ciências** do século **XX**, embora muitas de suas conseqüências permaneçam desconhecidas, ou não devidamente exploradas.

Mesmo durante seu período de consolidação, a **Relatividade Geral** foi aplicada com enorme sucesso, e 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

---

<sup>1</sup>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.

cosmologia moderna é um produto direto da teoria gravitacional de Einstein com as observações astronômicas dos grandes telescópios e, portanto, como os demais ramos da física moderna, é tipicamente uma disciplina criada pela Física do século **XX** (ver a linha evolutiva na **Figura 1**).



**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), se acreditava que o Universo expandia desaceleradamente, pois a gravidade é uma força atrativa. Em 1998, as observações de Supernovas do tipo Ia mostraram que a expansão está acelerada. Este resultado marcou o início da Cosmologia contemporânea.

### III. 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, isto significa que todas as posições e todas as direções espaciais no universo são equivalentes.

Neste 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/cm<sup>3</sup>** e temperatura de **Planck**  $\cong 10^{32}$  **K**), valores que caracterizam o chamado estado singular inicial. Nos estágios subseqüentes, o universo 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).

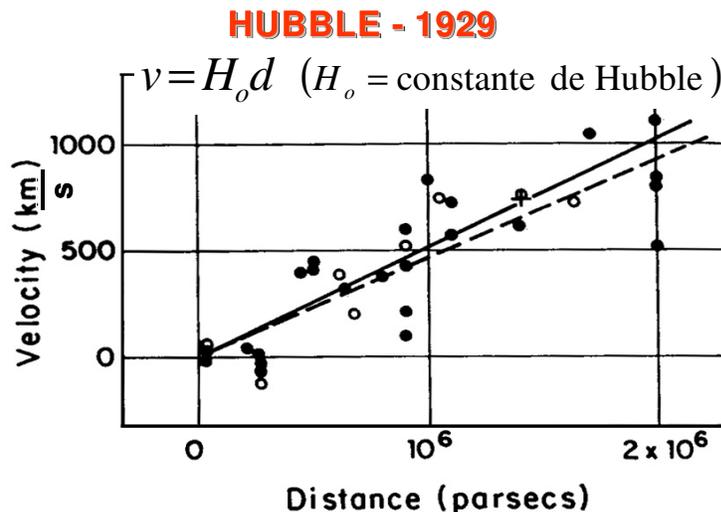


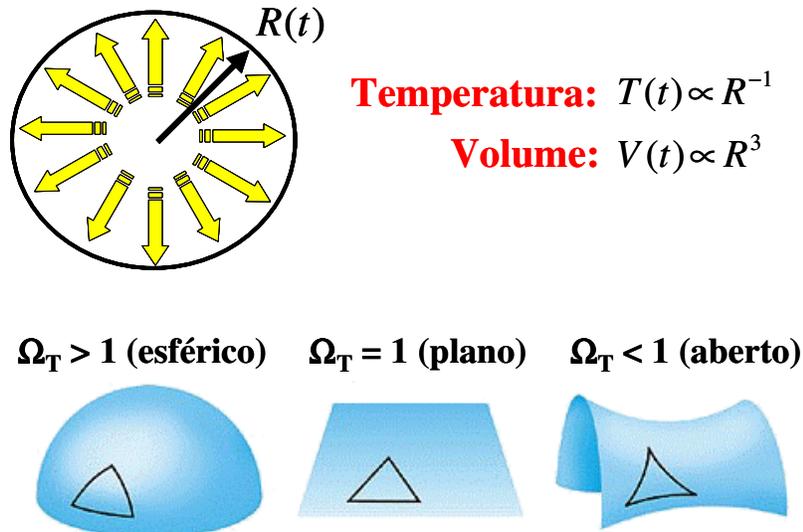
Figura 2. Descoberta da expansão do Universo. Diagrama original de Hubble mostrando que as galáxias se afastam com uma velocidade proporcional à distância. Um resultado que foi confirmado para dezenas de milhares de galáxias. A recessão das galáxias foi a primeira previsão do “**Big-Bang**” observacionalmente verificada.

3) **A Radiação Cósmica de Fundo (RCF) de 3K**, uma verdadeira pedra da **Roseta**<sup>2</sup> para a Cosmologia, pois permitiu estabelecer as chamadas eras cósmicas, relacionando tempo com temperatura, e assim determinando as condições físicas reinantes em cada estágio da evolução do universo.

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.

<sup>2</sup>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.

Uma descrição dinâmica do universo exige o conhecimento de pelo menos 3 parâmetros físicos: o parâmetro de **Hubble** -  $H_0$  - que mede a presente taxa de expansão, o parâmetro de desaceleração -  $q_0$  - que mede a variação da taxa de expansão (se o universo acelera ou desacelera), e o parâmetro de densidade -  $\Omega_i$  - que mede a contribuição relativa de cada componente do fluido cósmico ( $i = 1, 2, 3, \dots$ , denota uma componente específica). O valor total do parâmetro de densidade é também uma quantidade importante, pois determina se a geometria espacial do universo é fechada, aberta ou plana (ver **Figura 3**).



**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 expande e esfria. A geometria espacial do universo é definida pelo parâmetro de densidade total  $\Omega_T$ . A geometria do universo é esférica, plana ou aberta se  $\Omega_T$  for, respectivamente, maior, igual, ou menor do que 1.

No modelo padrão, o universo é uma mistura de 4 componentes: **Bárions** (prótons e nêutrons) que juntamente com os elétrons são responsáveis pela luz das galáxias ( $\Omega_b$ ), os **Fótons** da radiação cósmica de fundo ( $\Omega_\gamma$ ), os **Neutrinos** ( $\Omega_\nu$ ) e a **Matéria Escura** ( $\Omega_M$ ). Este quadro não era ainda completamente coerente, pois havia 2 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 4 componentes,  $\Omega_T = \Omega_b + \Omega_\gamma + \Omega_\nu + \Omega_M$ , é igual a 1, e portanto, o universo seria espacialmente plano (ver Figura 2). Esta condição foi teoricamente prevista no início dos anos **80**, pelos chamados cenários inflacionários<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> A inflação foi um breve evento de expansão acelerada, supostamente provocado por uma transição de fase que aconteceu no universo primitivo. A ocorrência da inflação é fundamental para o processo de formação de galáxias ter uma origem causal.

No entanto, diversas observações independentes indicavam  $\Omega_T \cong 0.3$ , um valor bem menor do que a unidade. Este valor corresponde, basicamente, ao parâmetro de densidade da matéria escura fria, cerca de **10** vezes maior do que  $\Omega_b$  - o parâmetro de densidade da matéria luminosa - e aproximadamente **5.000** vezes maior do que a contribuição 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. Essa idade é muito maior do que os **9,9** bilhões de anos calculada pelo modelo com matéria escura fria e  $\Omega_T = 1$ . O quadro descrito acima resume a situação até meados da década de **90**. O modelo plano com matéria escura fria (“**Cold Dark Matter**” na literatura inglesa), é um modelo desacelerado, pois tem  $q_0 = 1/2$  (modelos com valores positivos de  $q_0$  são sempre desacelerados). A relação  $\Omega_T = 2q_0$ , é sempre válida para modelos do tipo **Friedmann**, e como  $\Omega_T$  é sempre positivo, isto significa 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,  $\Lambda$ , foi introduzida por **Einstein** em **1917** com a finalidade exclusiva de obter um universo estático.

Se  $\Lambda$  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<sup>4</sup>.

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  $\Lambda$  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 -  $\Lambda$  - 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**.

---

<sup>4</sup> 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 mal sucedida é suficiente para eliminar tais teorias.

### III. 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.

Por outro lado, medidas de distância em cosmologia envolvem o conhecimento de 2 quantidades físicas da luz emitida pelos objetos - **L** e **F** – chamadas de luminosidade absoluta e luminosidade relativa (ou fluxo de energia), respectivamente. Em termos destas 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 padrões. 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 tivesse a sua luminosidade **L** definida com boa precisão. Nos 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 termonuclear de uma estrela. Essa explosão lança energia no espaço em quantidades extraordinárias. O brilho total de uma Supernova é igual ao de 10 bilhões de estrelas como o nosso sol, rivalizando 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 padrões. 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: precisamos das Supernovas, mas essas velas são raras e aleatórias!

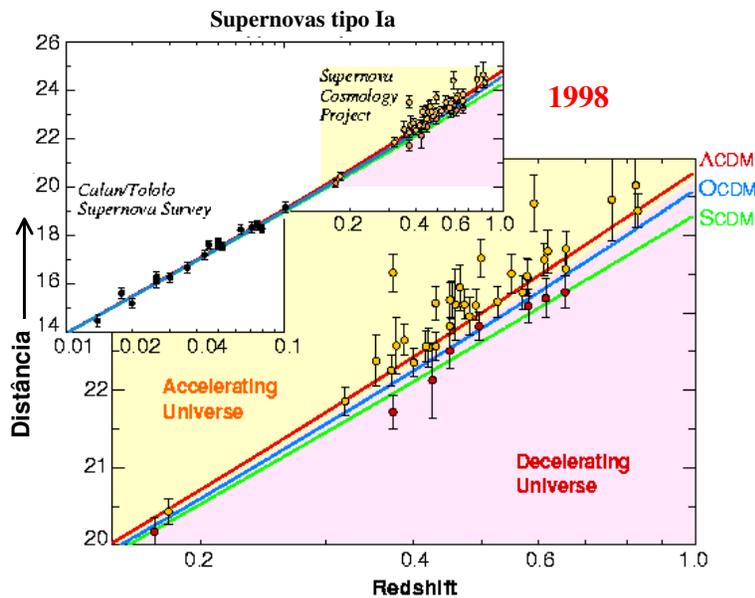


Figura 4. Distância em função “redshift”  $z$  para os dados de Supernovas (adaptado de Perlmutter et al.). A parte colorida é um “zoom” do pequeno retângulo na parte superior. As regiões amarela e lilás representam os possíveis universos acelerados e desacelerados. As linhas verde (SCDM) e azul (OCDM) 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.

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 este problema quase simultaneamente; estabelecendo o que podemos chamar de um verdadeiro experimento astronômico (para diferenciar 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, fazia-se 2 imagens consecutivas da mesma região do céu (separadas por um intervalo de 3 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 3 semanas entre as duas imagens? Pelo fato da 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.

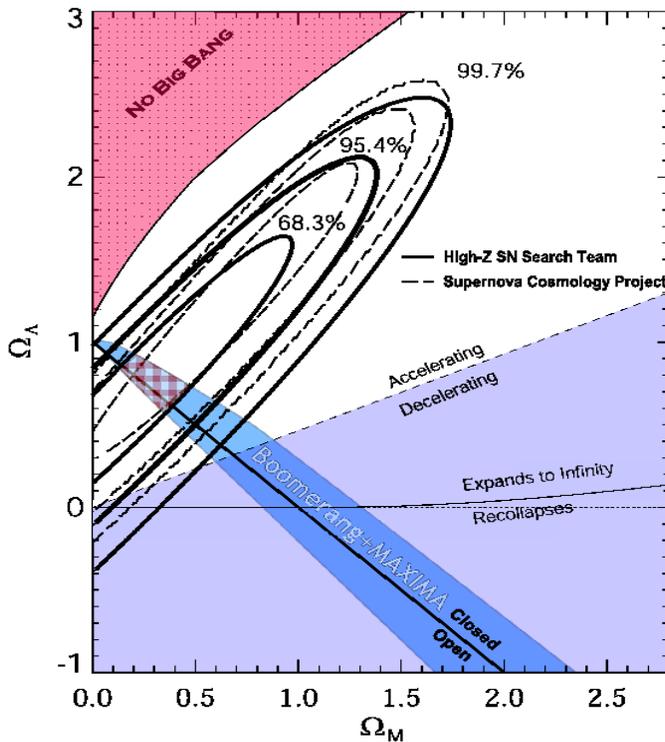
No final do mês as duas imagens são superpostas. Qualquer ponto luminoso adicional é um bom candidato a **Supernova**, um evento que deve ser altamente provável de acontecer, pois agora se observam cerca de **100.000** galáxias simultaneamente. Uma vez identificado o ponto luminoso adicional

aponta-se imediatamente o telescópio espacial **Hubble** para a **Supernova** e determina a sua luminosidade absoluta **L**; o 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 - estendeu 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<sub>L</sub>(z)**, pode ser expressa como um produto do inverso do parâmetro de **Hubble H<sub>0</sub>** por uma função **P** que depende dos diversos parâmetros de densidade e do "redshift" **z**. Para um modelo com constante cosmológica **Λ**, por exemplo, temos:

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



**Figura 5.** Diagrama no espaço ( $\Omega_\Lambda, \Omega_M$ ). Os contornos representam as análises realizadas pelos 2 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!).

onde  $c = 3.10^{10}$  cm/s é a velocidade da luz. Como a distância 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  $\Omega_\Lambda$  e  $\Omega_M$  (Figura 4), é mais conveniente (e pedagógico) estudar o espaço dos parâmetros  $(\Omega_\Lambda, \Omega_M)$ , ou seja, construir o gráfico de  $\Omega_\Lambda$  como uma função de  $\Omega_M$  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). Isto 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 a 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 matéria e sua estrutura de larga escala (ver Figura 6).

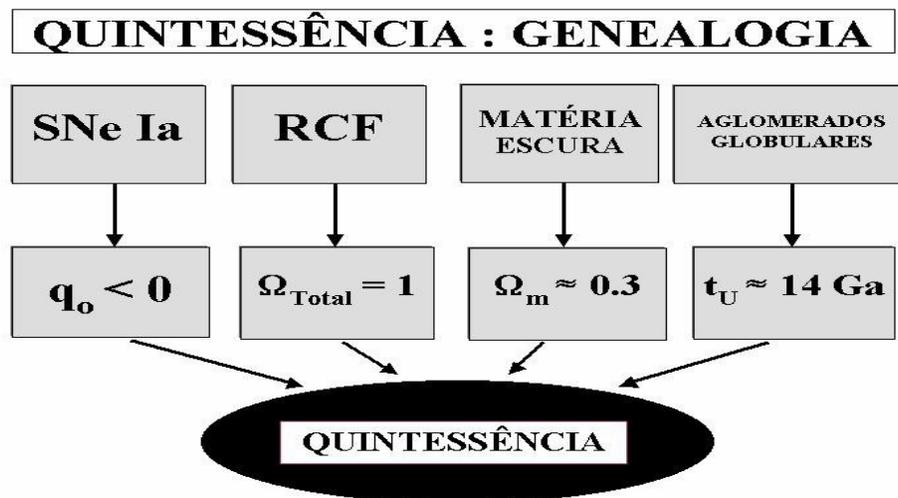


Figura 6. Árvore genealógica da Quintessência. As Supernovas (SNe) tipo Ia fornecem a evidência mais direta da expansão acelerada ( $q_0 < 0$ ). Os dados da radiação cósmica de fundo (RCF) implicam que o universo é plano ( $\Omega_T = 1$ ). Por subtração da matéria escura temos  $\Omega_Q = 0,7$  (70% do universo é Quintessência!). Modelos com expansão acelerada resolvem facilmente o problema da idade do Universo.

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 5<sup>o</sup> 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).

#### IV. COMO ACELERAR O UNIVERSO?

A idéia de **Quintessência** - 5<sup>o</sup> 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 5<sup>o</sup> 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 precisariam 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 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.

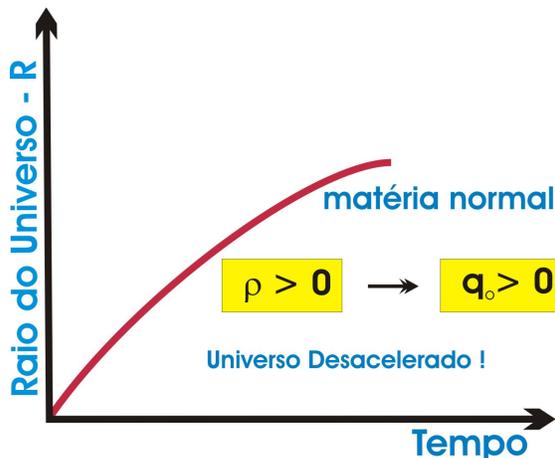


Figura 7A. A gravidade da matéria normal (densidade positiva) é sempre atrativa e portanto provoca desaceleração, ou seja, o parâmetro  $q_0 > 0$  (curva côncava para baixo).

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  $\rho$  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 numa 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. Isto explica porquê os modelos da classe de **Friedmann** são todos desacelerados, independente do valor do parâmetro de densidade. 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.

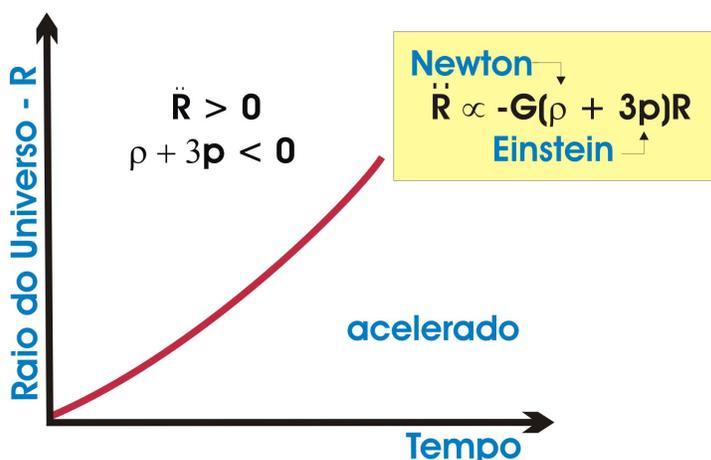


Figura 7B. Uma Quintessência com pressão negativa pode inverter o sinal da aceleração. Sua densidade de massa gravitacional efetiva,  $\rho+3p$ , é negativa e provoca repulsão cósmica.

Segue das considerações acima que a seguinte conclusão é 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  $p_Q < -(\rho_M + \rho_Q)/3$ . Neste 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 5 candidatos foram propostos na literatura recente:

1. **Constante Cosmológica -  $\Lambda$**
2. **Campos Escalares ( $\phi, V(\phi)$ )**
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 a primeira vista. A propriedade comum desses candidatos é ter pressão negativa, e como esta é a condição básica para um universo acelerado, existem várias outras possibilidades, ocasionalmente, discutidas na literatura.

A constante cosmológica  $\Lambda$  - 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**,  $\Lambda$  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 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  $\phi$**  - é o que foi originalmente batizado de **Quintessência** por **Paul Steinhardt** e colaboradores. Contudo, a

denominação genérica de **Quintêssencia** 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 baseada 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  $\Lambda$  com o tempo seria devido a 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  $\Lambda$  com o valor absurdamente alto sugerido pelas teorias de campo. Nesse sentido, pode-se dizer que  $\Lambda$  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  $\omega$  é negativo para poder acelerar o universo. Finalmente, temos o **Gás de Chaplygin**<sup>5</sup>, 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, isto 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 Epículos, Equantes e Deferentes tal como ocorreu no modelo ptolomaico. Contudo, é bom lembrar que o 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

---

<sup>5</sup> 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.

de Partículas cuja natureza é bem estabelecida. Atualmente, vários experimentos visando sua detecção em laboratórios terrestres estão em andamento.

A **Quintessência** junto com a **Matéria Escura** respondem por cerca de **95%** do conteúdo total de matéria e energia que preenche o cosmos (os **5%** restante é das outras **3** 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 tradicional 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**.

## **Bibliografia**

1. **A. G. Riess e M. S. Turner**, “Da desaceleração para à aceleração”, Scientific American Brasil, No.22, 2004.
2. **J. P. Ostriker e P. J. Steinhardt**, “O Universo Quintessencial”, Scientific American Brasil, No.1, 2003.
3. **P. J. Peebles**, “Cosmologia Moderna”, Scientific American Brasil, No.1 (2003).
4. **L. Krauss**, “Antigravidade Cosmológica”, Scientific American Brasil, No.1 (2003).
5. **L. Krauss**, “Quintessence: The Mistery of Missing Mass in the Universe”, Basic Books, New York (2000).
6. **J. A. S. Lima**, “Alternative Dark Energy Models: An Overview”, Brazilian Journal of Physics **34**, 194 (2004).