

Ensino a Distância

COSMOLOGIA

Da origem ao fim do universo

2015

Módulo 6

Algumas formas de descrever o Universo

Presidente da República
Dilma Vana Rousseff

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação
José Aldo Rebelo Figueiredo

Secretário-Executivo do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
Álvaro Doubes Prata

Subsecretário de Coordenação de Unidades de Pesquisas
Adalberto Fazzio

Diretor do Observatório Nacional
João Carlos Costa dos Anjos

Observatório Nacional/MCTI (*Site*: www.on.br)
Rua General José Cristino, 77
São Cristóvão, Rio de Janeiro - RJ
CEP: 20921-400

Criação, Produção e Desenvolvimento (*Email*: daed@on.br)



Carlos Henrique Veiga
Cosme Ferreira da Ponte Neto
Rodrigo Cassaro Resende
Sílvia da Cunha Lima
Vanessa Araújo Santos
Giselle Veríssimo
Caio Siqueira da Silva
Luiz Felipe Gonçalves de Souza



A NGC 2442 é uma galáxia espiral que contém estrelas brilhantes ao longo da sua região central, classificada como uma galáxia espiral barrada. Esta galáxia localiza-se na direção da constelação do Peixe Voador. Ela pode ser observada através de pequenos telescópios, desde que estejam instalados em regiões distantes das grandes cidades, onde a luminosidade e qualidade do céu prejudicam a observação astronômica.

Créditos:
NASA/ESA e ESO

Equipe de realização

Conteúdo científico e texto
Carlos Henrique Veiga

Projeto gráfico, editoração e capa
Vanessa Araújo Santos

Web Design
Giselle Veríssimo
Caio Siqueira da Silva

Colaboradores
Alexandra Pardo Policastro Natalense
Ney Avelino B. Seixas
Alex Sandro de Souza de Oliveira

Esta publicação é uma homenagem a Antares Cleber Crijó (1948 - 2009) que dedicou boa parte da sua carreira científica à divulgação e popularização da ciência astronômica.

© 2015 Todos os direitos reservados ao Observatório Nacional.

Ensino a Distância

COSMOLOGIA

Da origem ao fim do universo

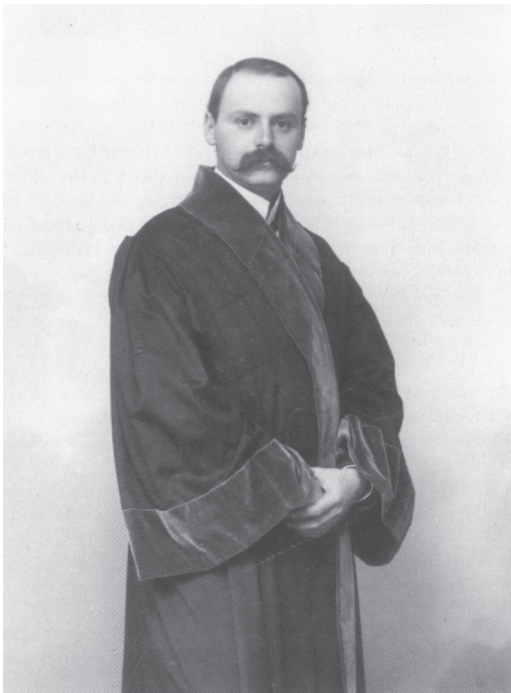
2015

Módulo 6

Algumas formas de descrever o Universo

43

As soluções cosmológicas das equações de Einstein



Karl Schwarzschild (1873 - 1916).

AS SOLUÇÕES COSMOLÓGICAS DAS EQUAÇÕES DE EINSTEIN

Vimos que a matéria existente em todas as partes do universo se apresenta sob as mais diversas formas e densidades. Ela pode formar grandes agregados de matéria, as galáxias por exemplo, mas também pode constituir nuvens de gás e poeira intergalácticas muitíssimo rarefeitas. Toda essa matéria está, localmente, em interação e isso quer dizer que inúmeros processos físicos acontecem a todo momento entre os átomos que a forma.

Todos os possíveis processos físicos que aí ocorrem são regidos pelas quatro interações fundamentais básicas existentes na natureza: as interações eletromagnética, forte, fraca e gravitacional. Veremos no próximo módulo as características de cada uma delas, mas no momento é suficiente saber que todos os fenômenos que ocorrem em larga escala no universo são muito mais fortemente afetados pela interação gravitacional do que por qualquer uma das outras. Embora a interação gravitacional seja a mais fraca entre as quatro fundamentais citadas acima, tendo em vista que os processos astronômicos que estamos considerando são somente aqueles de “grande escala”, ou seja, aqueles que ocorrem sobre distâncias muito grandes e não aqueles que ocorrem, por exemplo, no interior de uma estrela fazendo-a gerar energia, a gravitação é a interação dominante.

A teoria da gravitação que analisaremos aqui, e que sobrepujou a teoria da gravitação proposta anteriormente pelo físico inglês Isaac Newton, é aquela apresentada por Albert Einstein e David Hilbert. Essa é a teoria relativística da gravitação, regida por importantes equações matemáticas que descrevem como o campo gravitacional se comporta ao longo do espaço-tempo.

Logo após essa teoria relativística ter sido apresentada, a despeito da complexidade de suas equações, cientistas como o físico alemão Karl Schwarzschild conseguiram obter soluções locais, ou seja, soluções que descreviam fenômenos físicos que ocorriam em uma determinada região do espaço-tempo.

A pergunta que se colocava era a seguinte: as equações da teoria relativística da gravitação podem fornecer uma solução que descreva o universo em sua larga escala? Seria possível encontrar uma solução das equações da teoria relativística da gravitação ou, em outras palavras, um modelo do universo que fisicamente pudesse ser aceito como solução?

Uma solução cosmológica das equações relativísticas de campo está preocupada em explicar apenas os fenômenos de larga escala do universo. Esse tipo de solução não leva em consideração os fenômenos locais que estão ocorrendo no universo. Processos nucleares que ocorrem a todo instante no interior das estrelas, processos atômicos que ocorrem nas nebulosas gasosas e até mesmo os processos relativísticos que estão ocorrendo nas estrelas de nêutrons e nos buracos negros não fazem parte dessa solução em larga escala, ou seja, solução cosmológica. Tudo isso deve ser separado de qualquer solução cosmológica, cuja única preocupação é o processo de interação gravitacional que existe entre os superaglomerados de galáxias que permeiam o universo.

No entanto, uma solução cosmológica, estritamente falando, uma solução matemática das equações relativísticas que descrevem o comportamento do campo gravitacional em larga escala, não teria muita utilidade se não tivesse algum contato com os parâmetros físicos que podemos medir no universo. São esses parâmetros que iremos definir primeiro para depois vermos como os modelos cosmológicos podem ser validados ou não por eles.

O “FATOR DE ESCALA UNIVERSAL”

Vimos que ao interpretarmos o deslocamento para o vermelho das linhas espectrais (*redshift*) das galáxias distantes como sendo uma medida de sua velocidade de recessão, estamos de certa forma dizendo que o Universo está em expansão.

Consideramos que todos os pontos do universo se expandem com a mesma taxa. Lembre-se sempre que o nosso universo é considerado homogêneo e isotrópico. Assim, ao longo de um intervalo de tempo todas as distâncias entre pontos comóveis aumentam pelo mesmo fator. Isso quer dizer que se uma determinada distância aumenta 1% então todas as outras distâncias também aumentam por 1%. Lembre-se também que “pontos comóveis” são aqueles definidos em um mesmo sistema de referencial inercial que se desloca com esses pontos. Em outras palavras, um sistema de referencial que, embora se desloque, o faz com velocidade constante, não estando acelerado. Ele, portanto, não apresenta as chamadas forças fictícias que surgem em referenciais que não pertencem a essa categoria. Ao longo do texto, só trabalharemos com sistemas de referência inerciais.

Se imaginarmos um conjunto de três galáxias situadas nos vértices de um triângulo qualquer em um dado referencial comóvel, a afirmação acima nos diz que suas distâncias permanecerão as mesmas. Seus três lados serão alterados pelo mesmo valor e, conseqüentemente, o triângulo aumentado pela expansão do universo mantém sua forma original. Dizemos então que os três lados do triângulo sofreram uma transformação de escala gerada pelo mesmo “fator de escala”.

Como a expansão do Universo é, em um determinado instante, a mesma em todos os seus pontos, dizemos que existe um “fator de escala universal” que atua em todo o universo em um determinado instante. Esse fator de escala é usualmente representado pela letra R .

É importante notar que R em qualquer instante tem o mesmo valor em qualquer ponto do universo. No entanto, ele varia com o tempo, aumentando seu valor com o passar do tempo em um universo em expansão.

Deste modo, vemos que, em um universo em expansão, a distância entre pontos comóveis aumenta de uma maneira proporcional a R . As medidas de áreas, por serem bidimensionais, aumentam proporcionalmente a R^2 enquanto que os volumes, tridimensionais, aumentam proporcionalmente a R^3 .

O “fator de escala” R foi durante muito tempo (e ainda é!) chamado de “raio do universo”. Esse nome deve ser evitado porque, como veremos mais tarde, existem soluções cosmológicas cujas geometrias não permitem uma aceitação natural do termo “raio” (é o caso, por exemplo, das soluções planas do universo).

O fator de escala R mostra toda sua importância ao utilizarmos o conceito de distância entre duas galáxias, por exemplo, em um universo em expansão. Vimos anteriormente que conceitos físicos devem sempre ser definidos em relação a um determinado sistema de referência ou sistema de coordenadas. Vimos também que usamos os chamados “sistemas de coordenadas comóveis” quando queremos definir grandezas físicas. Um sistema de coordenadas comóveis é aquele que se desloca com o observador. Conseqüentemente, todos os pontos comoveis estão separados por distâncias que permanecem constantes e que chamamos de “distâncias coordenadas”. Mas se o universo está em expansão as distâncias coordenadas não são as distâncias verdadeiras entre os pontos considerados. Dizemos que a distância verdadeira é obtida multiplicando-se a distância coordenada pelo fator de escala R . Assim,

Distância verdadeira = distância coordenada x fator de escala R

Veja que a distância coordenada, aquela medida em um sistema de coordenadas comóvel, permanece constante, mas a distância verdadeira aumenta com a mesma taxa que o fator de escala do universo R .

Considere um corpo comóvel situado a uma distância coordenada de nós. Por estar em um sistema de coordenadas comóvel, essa distância coordenada é fixa. A distância real entre ele e nós é dada pela expressão mostrada acima. Veja que à medida que o fator de escala R aumenta (lembre-se que esse fator varia com o tempo) a distância real (que passaremos a citar simplesmente como distância) também aumenta, significando que o objeto está se afastando de nós. Quanto maior o valor de R , ou melhor, quanto mais rápido R aumenta, mais rápido o objeto se afasta de nós.

Se a distância entre corpos varia com o tempo, podemos definir uma velocidade, uma vez que sabemos que velocidade pode ser mais simplesmente definida como a variação da distância em um intervalo de tempo. Deste modo, a velocidade de recessão de um corpo comóvel é exatamente a taxa na qual sua distância está aumentando. Definimos então a velocidade de recessão de um objeto como sendo o produto entre a taxa de aumento de R (que sabemos variar no tempo devido à expansão do universo) e a distância coordenada (que é constante).

Velocidade de recessão = taxa de aumento de R x distância coordenada

O termo “taxa de aumento” de R nos diz como o “fator de escala” varia com o tempo. Vamos representar essa taxa de aumento pela mesma letra R com um pequeno ponto em cima dela ou seja, \dot{R} .

Temos então que:

$$\text{Velocidade de recessão} = \dot{R} \times \text{distância coordenada}$$

Se multiplicarmos e dividirmos o lado direito dessa expressão por R não a alteraremos. Temos então que:

$$\text{Velocidade de recessão} = \frac{\dot{R}}{R} \times \text{distância coordenada} \times R$$

e como sabemos que a distância coordenada multiplicada por R nos dá o valor da distância real (ou simplesmente distância) temos que

$$\text{Velocidade de recessão} = \frac{\dot{R}}{R} \times \text{distância}$$

Chamamos o termo $\frac{\dot{R}}{R}$ de H que é o termo de Hubble.

$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

ou seja,

$$\text{Velocidade de recessão} = H \times \text{distância}$$

Veja que a expressão acima é uma consequência direta da expansão uniforme do universo.

O PERÍODO DE HUBBLE E A IDADE DO UNIVERSO

Definimos “período de Hubble” como sendo a idade que o universo teria atingido se ele tivesse se expandido a uma taxa constante R igual à sua taxa atual de expansão que chamaremos de R_0 .

Vemos que o período de Hubble é uma medida de tempo, uma idade, e é dada por:

$$\text{Período de Hubble} = \frac{1}{H}$$

Algumas vezes o período de Hubble é chamado de **tempo de expansão**.

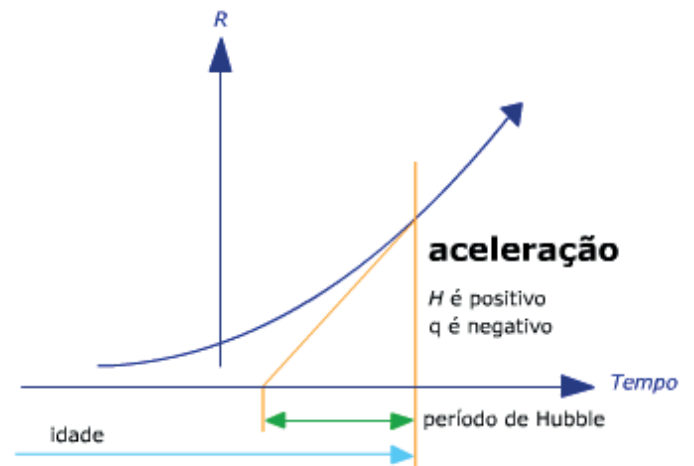
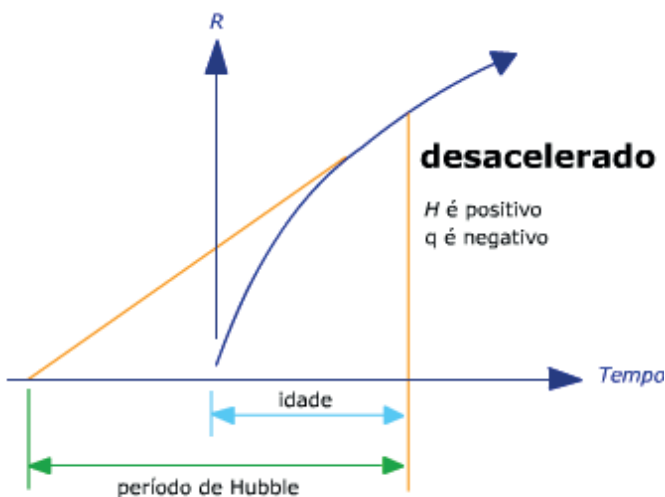
Note que o período de Hubble está diretamente associado com o fator de escala R e sua variação no tempo.

Em quase todos os modelos de universo estudados pelos cosmólogos o fator de escala R não aumenta a uma taxa constante. Em alguns casos R aumenta mais rapidamente com o passar do tempo e isso é interpretado como sendo um universo cuja expansão está acelerada. Em outros casos R aumenta mais lentamente à medida que o tempo passa. Nesse caso, dizemos que o universo está desacelerando.

Vemos, portanto, que a maneira como a variação do fator de escala R ocorre nos mostra que os modelos de universo podem estar ou acelerando ou desacelerando.

Quando o universo está acelerando, ou seja, quando R aumenta mais rapidamente com o passar do tempo, a idade real do universo é sempre maior do que o período de Hubble.

Quando o universo está desacelerando, ou seja, quando R aumenta mais lentamente à medida que o tempo passa, a idade do universo é sempre menor do que o período de Hubble.



O PARÂMETRO DE DESACELERAÇÃO DO UNIVERSO

Sabemos da física clássica que a taxa de variação temporal da velocidade de um corpo nos dá sua aceleração. Do mesmo modo como fizemos com o conceito de variação de distância no tempo, representando a sua variação no tempo por uma letra com um ponto em cima (\dot{d}), usaremos um ponto sobre a letra v para representar a variação da velocidade no tempo. Isso nos leva a representar então o símbolo R do fator de escala com dois pontos em cima nas equações da aceleração da recessão, uma vez que ele irá variar a primeira vez com a mudança da distância em função do tempo (um ponto em cima) e, em seguida, variará de novo com as alterações temporais da velocidade (um outro pontinho). Temos então que

$$\text{Aceleração de recessão} = \ddot{R} \times \text{distância coordenada}$$

Lembrando que a distância coordenada é constante.
Como já vimos:

$$\text{Distância} = R \times \text{distância coordenada}$$

ou então:

$$\text{Distância coordenada} = \frac{\text{distância}}{R}$$

Temos que, substituindo isso na expressão da aceleração de recessão,

$$\text{Aceleração de recessão} = \ddot{R} \times \frac{\text{distância}}{R}$$

ou seja,

$$\text{Aceleração de recessão} = \frac{\ddot{R}}{R} \times \text{distância}$$

O termo:

$$\frac{\ddot{R}}{R}$$

é chamado de “termo de aceleração” e algumas vezes é representado pela letra h (Observe com atenção a diferença entre H e h !).

O termo de aceleração definido acima não é usado com frequência. Ao invés dele, usamos o chamado “termo de desaceleração” ou “parâmetro de desaceleração”.

O parâmetro de desaceleração, representado pela letra q , é obtido matematicamente como sendo

$$q = - \frac{\ddot{R}R}{\dot{R}^2}$$

O termo “desaceleração” é usado por causa da relação linear existente entre q e $-\ddot{R}$

$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

Podemos escrever que:

$$q = - \frac{\ddot{R}R^2}{R\dot{R}^2}$$

e como:

$$\left(\frac{1}{H}\right)^2 = \left(\frac{R}{\dot{R}}\right)^2$$

Temos que:

$$q = - \frac{\ddot{R}}{RH^2}$$

NOTA:
Uma relação linear entre duas variáveis é representada num gráfico por um seguimento de reta.

Veja que o parâmetro de desaceleração q varia no tempo, tal como o termo de Hubble H . No entanto, em um determinado instante do tempo, o parâmetro de desaceleração q possui o mesmo valor em todos os pontos do universo.

Vejam alguns outros pontos interessantes do parâmetro de desaceleração q . Note que há um sinal negativo no lado direito dessa definição. Isso nos diz que o parâmetro de desaceleração q pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo dos sinais dos termos que fazem parte dessa expressão. Quando o parâmetro de desaceleração q é positivo há uma desaceleração no universo ou seja, uma diminuição da sua taxa de expansão. Quando q é negativo há uma aceleração no universo ou seja um aumento na taxa de expansão do universo.

Quando q é positivo, ou seja, nos universos em desaceleração, a idade do universo é menor que um período de Hubble. Quando q é negativo ou seja, nos universos que estão acelerados, a idade do universo é maior do que um período de Hubble.

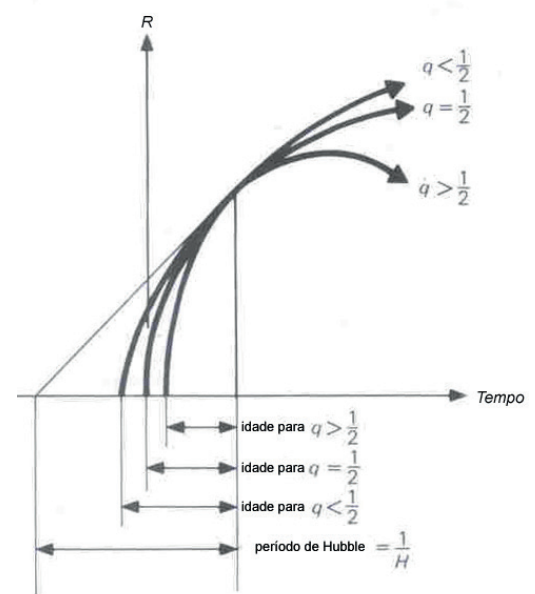
O parâmetro de desaceleração q também pode ser igual a zero. Isso ocorre quando a taxa de expansão R nunca muda e isso faz com que \ddot{R} seja zero. Nesse caso, o parâmetro de desaceleração q é igual a zero.

A imagem ao lado mostra os possíveis comportamentos do parâmetro de desaceleração do universo, tornando-se, como exemplo, o intervalo $\frac{1}{2}$ para q (Solução de Friedmann).

ATÉ ONDE PODEMOS “VER” NO UNIVERSO?

Sabemos que o período de Hubble nos dá a idade que o Universo teria se ele fosse representado por $1/H$ a uma taxa constante igual à atual de expansão. Isso é uma medida de tempo e, como sabemos da física clássica, a distância percorrida por um objeto é obtida como o produto entre sua velocidade e o intervalo de tempo em que o objeto se moveu.

Toda a informação que obtemos no universo nos chega sob a forma de radiação eletromagnética. A luz que observamos proveniente das estrelas, como já sabemos, é uma parte dessa radiação eletromagnética. A teoria da relatividade restrita nos diz que a radiação eletromagnética se propaga no



vácuo com a velocidade constante de aproximadamente 300.000 quilômetros por segundo.

Vemos, portanto, que se multiplicamos o período de Hubble pela velocidade da luz obtemos o chamado “comprimento de Hubble”.

$$\text{Comprimento de Hubble} = c \times \text{período de Hubble} = \frac{c}{H}$$

O comprimento de Hubble é a distância na qual a velocidade de recessão é igual à velocidade da luz.

Podemos então definir uma “esfera de Hubble” como sendo aquela que tem um raio igual ao comprimento de Hubble. Note que cada ponto no espaço é o centro de uma esfera de Hubble.

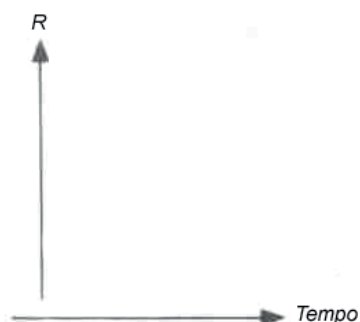
O **universo observável** é aquela parte do universo em torno de um observador que pode ser vista. Falando livremente, o universo observável tem um tamanho comparável com aquele apresentado pela esfera de Hubble.

No entanto, em quase todos os modelos de universos em expansão, a esfera de Hubble se expande mais rapidamente do que o próprio universo. A borda da esfera de Hubble se afasta mais rapidamente do que as galáxias e, ao longo do tempo, vemos mais e mais galáxias que eram previamente não observáveis.

PARA ENTENDER OS GRÁFICOS A SEGUIR

Vamos agora estudar as diversas soluções cosmológicas obtidas pelos cientistas para o conjunto de equações matemáticas que descrevem a teoria relativística da gravitação. Como veremos, algumas são fisicamente plausíveis, outras não. Algumas foram aceitas durante muito tempo mas agora novos dados físicos nos mostram que elas são inviáveis.

Antes de estudarmos essas soluções precisamos prestar muita atenção aos gráficos utilizados e, por esse motivo, discutiremos aqui um gráfico geral como o mostrado ao lado.



Note que temos dois eixos, chamados “eixos coordenados”, que, como o nome sugere, nos dão quais as propriedades físicas que estão ali descritas.

No nosso caso, o eixo vertical representará sempre o fator de escala R enquanto que o eixo horizontal será sempre o marcador de tempo. Um outro fato importante é que o eixo vertical tem seus valores aumentando à medida que nos deslocamos para cima enquanto que o eixo do tempo tem valores aumentando continuamente para a direita. Note também que esses eixos coordenados não possuem valores numéricos associados a eles e, portanto, esses valores são quaisquer. Não há qualquer marcação de valor zero neles e isso é muito importante.

Mais importante ainda é notar que os eixos coordenados **não se cruzam**. Com isso, não estamos definindo qualquer associação de par de coordenadas entre o fator de escala R e um determinado instante de tempo. Melhor dizendo, não estamos considerando que em um determinado instante de tempo o fator de escala R tem necessariamente um determinado valor.

Note também que embora algumas curvas que representam soluções cosmológicas matemáticas, obtidas pelos cientistas, se apresentem tocando ou cortando um dos eixos coordenados, seja ele o que representa o fator de escala R ou o tempo, tanto faz, em nenhum momento os dois eixos coincidem ou são cortados simultaneamente. Isso nos diz que não há cálculos associando as grandezas físicas envolvidas e, portanto, falar em valores numéricos (mesmo que seja tempo zero!) não é correto.

Certamente aqueles que têm interesse em cosmologia já se depararam com conceitos tais como “universo fechado”, aberto, finito, infinito, limitado, não-limitado, com contorno, sem contorno”, etc. Afinal, o que isso quer dizer?

Essa talvez seja a parte da cosmologia que mais causa “danos irreversíveis” ao cérebro de quem se interessa por esse assunto. Como alguma coisa pode ser infinita e ter contorno? Como alguma coisa pode ser não limitada mas finita?

Tudo isso é facilmente explicável se entendermos um pouco de...geometria! Vamos então por partes.

Vimos que o astrônomo norte-americano Edwin Hubble obteve dados observacionais que indicavam que o Universo estava em expansão. Observações de galáxias mostravam que suas linhas espectrais estavam deslocadas para a região vermelha do espectro eletromagnético, o *redshift*, e isso era um indicador de que elas estavam se afastando de nós.

Se a maior parte das galáxias apresenta deslocamento para o vermelho (*redshift*) em suas linhas espectrais, então nada mais normal do que entendermos que todas elas estão se afastando de nós. Como consequência dessa interpretação, podemos concluir que estamos no centro do Universo. Certo? Não! Daqui a pouco veremos porque isso não está correto.

Uma outra conclusão que podemos tirar dos resultados obtidos por Hubble é que se o Universo está expandindo, podemos fazer uma regressão temporal e concluir que ele teve um começo. Assim, a expansão detectada por Hubble nos mostra que a idade do Universo é finita. Dizendo de outra forma, o Universo não é infinito no tempo.

Fica ainda a velha pergunta: o Universo é infinito no espaço? Esta é a interrogação que incomoda os pesquisadores há milhares de anos!

A discussão sobre se o Universo é finito ou infinito não é nova. Ela pode ser encontrada nos primeiros estágios da civilização humana. De fato, em quase todas as civilizações que já existiram no nosso planeta, ao longo de toda a história do ser humano, podemos encontrar, com extensões variadas, pronunciamentos sobre a questão: o Universo é finito ou infinito?

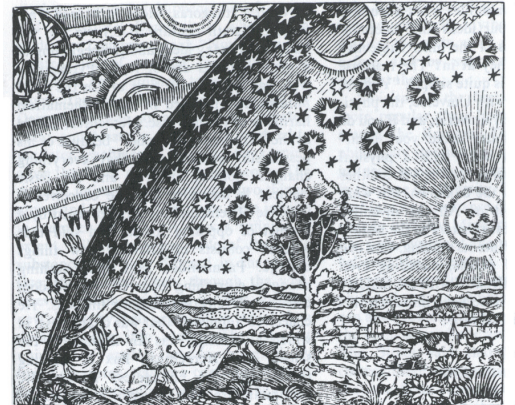
O mais interessante é que se olharmos para trás, ao longo dos vários milhares de anos da história, encontraremos quase o mesmo número de pesquisadores e filósofos que apresentam argumentos justificando um Universo finito ou infinito! Ao longo de todo esse tempo parece ter havido uma flutuação contínua entre essas duas visões opostas e isso dura até hoje.

Apesar das dificuldades, os cientistas têm procurado uma resposta para essa questão.

FINITO VERSUS INFINITO

Na antiga Grécia quase todos os modelos primitivos que tentavam descrever a estrutura do Universo supunham que ele era finito e não limitado. A cosmologia de Eudoxus e de Aristóteles é representativa dessa maneira de descrever o Universo. Nos seus esquemas eles apresentavam a Terra como uma bola circundada por uma série de esferas concêntricas e transparentes. A camada esférica mais externa tinha o nome de *esfera das estrelas fixas*. O cosmos material inteiro estava contido nessa esfera de estrelas fixas.

Por que praticamente não existiam modelos de Universo infinito? Em primeiro lugar, os modelos infinitos não têm bases empíricas diretas como os modelos finitos. Depois, é mais difícil para um modelo infinito explicar o fenômeno das estrelas que surgem no leste e se põem no oeste.



O fato da visão infinita ter dificuldade em fazer afirmações quantitativas não quer dizer que a visão finita tivesse uma posição dominante na história. Na verdade, a visão de um Universo finito era assunto de constante crítica.

Um tipo de crítica racional à visão de um Universo finito era a seguinte: ser finito significa que há um contorno e um contorno implica em uma existência além dele.

Com isso chegávamos a um dilema: o contorno tem um *além*? Se não tem, então isso contradiz a noção de um contorno. Se tem, então isso contradiz a própria noção de Universo. Universo significa todas as coisas: tudo em conjunto e não pode haver alguma coisa fora dele!

Aristóteles parece ter notado essa crítica fatal e tentou superar a dificuldade. Ele dizia que a esfera de estrelas fixas não era um contorno ordinário, que embora ela tenha um lado de dentro e um lado de fora, o *lado de dentro* é o espaço físico enquanto que o *lado de fora* é o mundo dos deuses. Além da esfera das estrelas fixas existem mais três camadas celestiais: a esfera de cristal, a esfera mais elevada e a esfera de puro fogo. Essas são espirituais e das almas e assim não ocupam o espaço físico. Com isso ele colocava uma existência não física além do contorno do Universo finito, removendo a contradição.

Certamente, do ponto de vista científico moderno, tal descrição não pode servir como razão suficiente. Consequentemente, depois da evolução da ciência moderna, esse ponto de vista foi rejeitado.

A VISÃO DA CIÊNCIA MODERNA

A ciência é epitomizada pela mecânica Newtoniana. O próprio Newton mantinha que o Universo era infinito. Um dos pontos de partida básico da mecânica Newtoniana é a existência do espaço absoluto, ou seja, o espaço Euclidiano infinito. Com isso, as esferas de cristal de Aristóteles foram esmagadas.

Entretanto, o debate não parou.

O contemporâneo de Newton, o grande cientista alemão Leibniz, também acreditava que o espaço era infinito. Entretanto, ele discordava fortemente de Newton no que diz respeito à distribuição das estrelas. Newton acreditava que as estrelas deviam estar distribuídas no espaço finito, mas se elas estivessem presentes no espaço infinito, deveriam ser em número infinito e um número infinito de estrelas teria uma gravitação infinita fazendo por conseguinte o sistema inteiro ser instável.

Leibniz mantinha a posição de que as estrelas deviam estar uniformemente distribuídas em todo um espaço infinito e sua razão era que se a distribuição de estrelas era finita, então o sistema físico inteiro está ainda limitado e tem um centro. Portanto, isso era inaceitável para qualquer cosmologia pós-copernicana.

Foi o filósofo alemão Kant quem encerrou este debate racionalista. Ele pensou ter encontrado uma resposta que finalizaria a questão para sempre - sua antinomia do espaço.

Kant diz: se nós insistirmos que o sistema de estrelas é estável, que o sistema de estrelas não tem centro e que o espaço é o espaço Euclidiano infinito, então possivelmente não podemos encontrar uma resposta lógica auto-consistente. Isso quer dizer que não somente é impossível construir um modelo de universo finito sem contradição interna, mas também é impossível para nós construir um modelo de universo infinito. A conclusão somente pode ser que o Universo não pode ser nem finito nem infinito. Daí a própria questão finito-infinito não tem significado e não devemos discuti-la de modo algum.

A análise de Kant era bastante perspicaz. Podemos dizer que sua teoria colocou um ponto final no debate racionalista finito-infinito que tinha durado



Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 - 1716).



Immanuel Kant (1724 - 1804).

pelo menos dois mil anos. A conclusão dele é que a própria questão finito-infinito é impossível.

Entretanto, a despeito de ser famoso pelo rigor de seus fundamentos, o argumento insolúvel de Kant não é de modo algum rigoroso. Um exame cuidadoso revelará que seu argumento implicitamente usou algumas teses não provadas. Elas são:

- finitude deve significar que existe um contorno
- ter um contorno deve significar finitude
- infinitude deve significar não ter contorno
- não ter contorno deve significar infinitude

Kant pensava estas serem as mais ordinárias teses de senso comum que não exigiam discussão cuidadosa.

Entretanto, a ciência frequentemente é a demonstração de construtividade no que é olhado como erro pelo senso comum.

FINITUDE NÃO LIMITADA

As afirmações acima, baseadas no senso comum, não são corretas. Na verdade, ter um contorno não necessariamente significa finitude. Isto é, podemos ter uma finitude sem um contorno, assim como uma infinitude com um contorno.

No século V antes de Cristo alguns estudiosos já discutiam se a Terra é infinita ou não. Aqueles que defendiam o argumento de infinito tinham a seguinte linha de raciocínio: se a Terra é finita, então certamente as pessoas cairão dela depois de terem alcançado o contorno? A outra escola acreditava, entretanto, que a Terra era finita mas não tinha contorno. As esferas têm essa propriedade. A superfície de uma esfera é finita mas ela não tem contorno. A idéia de que a Terra é uma esfera nasceu nessa época.

Partindo de uma Terra sendo finita e sem contorno, para um Universo sendo finito e sem contorno, precisamos apenas de uma pequena generalização na geometria, ou seja, uma generalização de duas para três dimensões. Em outras palavras: de duas dimensões finitas e sem contorno para três dimensões finitas e sem contorno. A humanidade levou dois mil anos para que esse pequeno passo fosse dado.

Em sua palestra “Sobre as Hipóteses das Bases da Geometria”, proferida em 1854, Riemann primeiro mostrou que a não existência de contorno do espaço não implica em infinitude do espaço. Ele disse:

“No nosso conhecimento do mundo externo, o espaço é suposto ser uma variedade tri-dimensional. O alcance de nossa consciência real está sendo reabastecido constantemente por esta afirmação e as possíveis posições de objetos que procuramos estão constantemente sendo determinadas por esta afirmação. Com aplicações em tais assuntos, esta suposição está continuamente sendo confirmada. É por causa dessa circunstância que a não existência de contorno do espaço tem um grau de certeza maior do que qualquer outra experiência externa. Mas nós certamente não devemos inferir a infinitude do espaço a

partir disso. Ao contrário, se supusermos que a existência da matéria é independente da posição - e daí podemos dotar o espaço com uma curvatura constante, então, contanto que essa curvatura tenha um valor positivo, embora pequeno, o espaço somente pode ser finito.”

Essas afirmações de Riemann são inteiramente análogas ao argumento, mostrando que a Terra é uma superfície curvada sem contorno e finita. Reconhecer a ausência de contorno da Terra não justifica a inferência de infinitude. Ao contrário, uma vez que a Terra tem mais ou menos a mesma curvatura positiva em todos os lugares, a área da Terra somente pode ser finita.

A pesquisa de Riemann nos libertou do impasse da antinomia do espaço de Kant e mostrou que a questão finito-infinito não é impossível. Um significado maior da teoria de Riemann é que ela terminou a era do estudo da questão de espaço finito ou infinito pelo pensamento puro e começou a era de estudar esta questão pelo método da verificação. De acordo com a teoria de Riemann, o Universo ser finito ou infinito é determinado pela curvatura do espaço, e esta última é, em princípio, uma quantidade mensurável.

Na verdade, algum tempo antes de Riemann, Gauss já havia descoberto certas partes da geometria Riemanniana, mas ele nunca ousou publicar seus resultados por que sentia que tal geometria do espaço curvo era demasiadamente contra o senso comum e provavelmente seria olhada como uma heterodoxia. Entretanto, Gauss era, no fim de tudo, um cientista que sabia que *ser contra o senso comum* não podia ser uma razão suficiente para rejeitar uma teoria. Afirmação ou negação em ciência somente podem ser realizadas por meio do método positivista. Daí, como a história conta, Gauss foi até as montanhas Harz medir se o espaço era curvo ou não. Ele selecionou três picos, Inselberg, Brocken e Hoher Hagen, como os vértices de um triângulo e mediu para ver se os três ângulos internos somados somavam 180° . Se isso ocorresse, então a geometria do espaço seria Euclidiana e não curva. Se isso não ocorresse, então o espaço seria curvo. Essa história é quase certamente fictícia, contudo é altamente filosófica: ela nos diz que para clarear a questão finito-infinito devemos recorrer a experiências.

A EXPANSÃO DO UNIVERSO E A QUESTÃO FINITO-INFINITO

Mesmo se a experiência de Gauss tivesse sido realizada, ela não teria tido sucesso porque exigiria medições de alta precisão, que são difíceis de obter, mesmo com a tecnologia de hoje. É somente confiando em medições em uma escala cósmica que uma abordagem experimental à questão finito-infinito é possível.

A expansão do Universo é o primeiro fenômeno observado sobre a escala cósmica. O que ele nos revela sobre a questão finito-infinito?

À primeira vista, poderia parecer que se o universo está em expansão, então o espaço cósmico deveria ser finito. A expansão de um sistema significa que o tamanho dele está aumentando e um sistema com um tamanho deve ser finito. Daí, para muitas pessoas, tão logo ouvem falar de expansão do Universo, pensam que o Universo é finito como se os dois fossem sinônimos. Mas isso é um erro.

Sistemas finitos podem se expandir, sistema infinitos também podem se expandir.

No instante t_1 as galáxias estão distribuídas em intervalos iguais, mostrando que a matéria cósmica é homogênea. Se esse Universo está se expandindo de modo que no instante t_2 a galáxia original 1 está agora na posição da galáxia original 2, a galáxia 2 está agora na posição da galáxia original 4, e assim por diante, então é uma expansão uniforme. Antes da expansão há um espaço infinito contendo um número infinito de galáxias, depois da expansão ele também é o mesmo.

Isso pode ser chamado expansão de infinitude para infinitude.

O matemático Cantor desenvolveu uma teoria que trata de infinitos, que pode ser usada para comparar vários tipos de infinitos. De acordo com sua teoria, as duas sequências seguintes representam o mesmo infinito:

$$\begin{aligned}n &= 1,2,3,4,5,\dots \\m &= 2,4,6,8,10,\dots\end{aligned}$$

Seu raciocínio é o seguinte: há uma relação biunívoca entre os elementos dessas duas sequências infinitas, ou seja, $m = 2n$. Ou os elementos de m e n podem ser colocados um contra um, de modo que nenhuma sequência é mais numerosa do que a outra e as duas sequências são a mesma. Esse argumento de Cantor pode ser aplicado palavra por palavra para elucidar a propriedade da expansão universal: o Universo está sempre expandindo, enquanto o espaço infinito sempre mantém o mesmo “caráter finito”.

Em resumo, meramente a partir da idéia grosseira de expansão universal, não podemos deduzir qualquer coisa nova no que diz respeito à questão finito-infinito.

MODELOS DE UNIVERSOS

A partir da apresentação das complicadas equações propostas por Albert Einstein e David Hilbert para a teoria relativística da gravitação, os cientistas passaram a investigar se era possível encontrar soluções deste conjunto de equações, puramente matemáticas, que pudessem ser interpretadas como representantes de situações físicas reais. Como já vimos, algumas soluções foram encontradas quase que imediatamente. Uma delas, a solução proposta pelo físico alemão Karl Schwarzschild, nos trouxe, junto a resultados simples, surpresas que nos remetiam a conceitos inteiramente novos como o de “buraco negro”.

No entanto, por ser uma teoria da gravitação universal, a teoria da relatividade não deveria oferecer apenas soluções locais, como no caso dos buracos negros, e sim globais, soluções fisicamente válidas que pudessem representar todo o universo ou seja, soluções cosmológicas.

Certamente essa era uma proposta ambiciosa mas perfeitamente justificável, pois se estamos tratando com uma teoria relativística da gravitação e a gravidade é a interação de longo alcance que domina todo o universo, nada mais razoável do que esperar que essa nova teoria, independente de sua complexidade matemática, nos trouxesse soluções válidas em todo o universo.

Havia alguma novidade nesse raciocínio? Não, nenhuma! A teoria da gravitação clássica não relativística, proposta muitos anos antes pelo físico inglês Isaac Newton, também se ocupava em tentar explicar todos os fenômenos de interação gravitacional existentes no universo.

No entanto, ao contrário do que muitos poderiam ser levados a pensar, as equações relativísticas da gravitação não nos conduziram a uma única solução cosmológica, a uma única descrição do Universo, e sim a várias descrições.

Vejamos a seguir algumas soluções obtidas e analisaremos rapidamente suas realidades físicas. Os modelos apresentados abaixo foram todos obti-

dos após cálculos matemáticos realizados sobre as equações relativísticas da gravitação, onde simplificações foram colocadas. Nenhum desses modelos é uma simples “opinião”, um “eu acho que é assim” de algum cientista. Todas as descrições foram obtidas matematicamente e estão comprometidas com as possibilidades de resolução das equações que existiam na época em que foram obtidas, muito diferente do que encontramos hoje com os poderosos computadores. Naquele momento, cosmologia era feita com lápis e papel ou giz e quadro-negro somente.

O UNIVERSO DE EINSTEIN

Einstein acreditava que o universo era estático. Para satisfazer a isso ele foi obrigado a modificar as equações de campo da gravitação que havia proposto anteriormente. Sua modificação foi a introdução de uma constante cosmológica Λ em suas equações de campo.

Quando esta nova constante Λ é positiva, ela age como uma força de repulsão que se opõe à gravitação universal. Essa constante reduz o efeito dinâmico da gravidade ou seja, sua possível expansão, mas não a curvatura do espaço.

É importante notar que um universo que é estático em um determinado instante de tempo não é necessariamente estático em momentos anteriores ou posteriores a este.

Um outro ponto importante é que para assegurar que o universo permaneça estático, em um estado de equilíbrio, Einstein mostrou que a curvatura do universo deve ser positiva. O universo estático de Einstein é, portanto, um espaço esférico. Ele é fechado e finito e contém uma misteriosa força Λ que compensa a atração gravitacional.

Existem algumas características importantes nesse modelo:

- quando medimos distâncias em termos do tempo de deslocamento da luz, o raio de curvatura do espaço no universo de Einstein é o fator de escala R .
- a distância em torno desse universo ou seja, o tempo de circunavegação da luz, é igual a $2\pi R$.
- o antípoda de um observador, ou melhor dizendo, o ponto do lado oposto a ele no universo, está a uma distância πR .
- um universo como esse, se o supusermos ser idealmente suave, age como uma gigantesca lente óptica: um corpo que se afasta de um observador parecerá a princípio ficar cada vez menor no sentido usual. Quando esse corpo estiver a meio caminho do antípoda, ele cessará de ficar menor e à medida que ele se afasta parecerá ficar cada vez maior. Todos os objetos colocados na região antípoda são vistos como imagens, como se eles estivessem bem perto da região local. Nesse universo estático de Einstein, pessoas na região antípoda nos veriam como se nós estivéssemos próximos a eles e nós os veríamos como se eles estivessem próximos a nós.
- curiosamente, tendo em vista que a luz circunavega o globo cósmico, também seríamos capazes de nos ver pelas costas!

O astrofísico inglês Arthur Eddington mostrou, em 1930, que o universo de Einstein é instável. Isso quer dizer que se existissem habitantes nele, eles deveriam fazer tudo de modo a não criar qualquer perturbação. Uma perturbação feita em um sentido poderia fazer a gravidade dominar e o universo colapsar para um futuro novo “Big Bang” em um intervalo de tempo igual

ao tempo de circunavegação. Se a perturbação fosse em outro sentido a força repulsiva Λ começaria a dominar, o universo inflaria e se transformaria em um universo oscilante. Veja que um universo estático não permitiria a criação de matéria pois isso é um efeito perturbativo!

Além dessas, existem algumas outras surpreendentes características, muito importantes, que podem ser percebidas no universo de Einstein. Estamos tratando com um continuum 4-dimensional de espaço-tempo e vemos que embora a distância em torno de um espaço esférico de raio R seja dada pela usual expressão $2\pi R$, o volume desse espaço esférico é dado por $2\pi^2 R^3$ e não pela familiar equação de um volume esférico que é $4\pi R^3/3$.

O UNIVERSO DE DE SITTER

O universo de de Sitter, proposto em 1917, no mesmo ano que o universo estático de Einstein, era tão simples que foi inicialmente considerado como uma diminuição no status da teoria cosmológica de Einstein.

O universo de de Sitter consiste de um espaço plano e é ligeiramente absurdo no sentido de que ele não contém matéria. Mas as galáxias nos mostram que matéria existe em todo o universo. Então, qual a utilidade de um modelo desse tipo? Simplesmente a maior facilidade de você estudar como se comportaria o universo em situações extremas.

Um universo vazio, de espaço euclidiano, ou seja, espaço plano, não deveria exibir propriedades não usuais e, no entanto, o universo de de Sitter o faz quando a intrigante força Λ não é zero.

O universo de de Sitter está em um estado estacionário e nada muda em qualquer momento. Os termos de Hubble e o parâmetro de desaceleração são constantes e não há matéria contida nele que seja diluída pela expansão.

O universo de de Sitter tem um passado infinito e um futuro infinito e ele acelera a uma taxa constante de $q = -1$, como mostra a figura.

O universo de Einstein, que contém matéria mas não tem movimento, e o universo de de Sitter, que tem movimento mas não tem matéria, foram os primeiros modelos cosmológicos propostos. A imagem ao lado compara o universo de Einstein com o proposto por de Sitter.

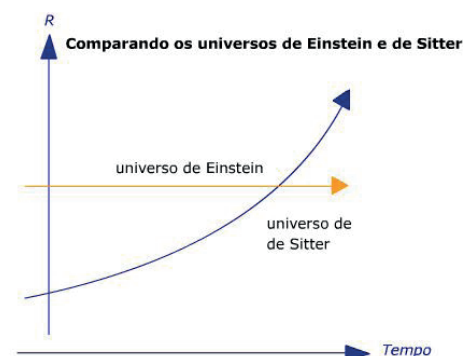
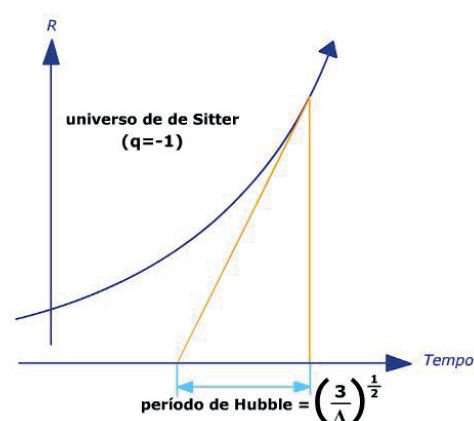
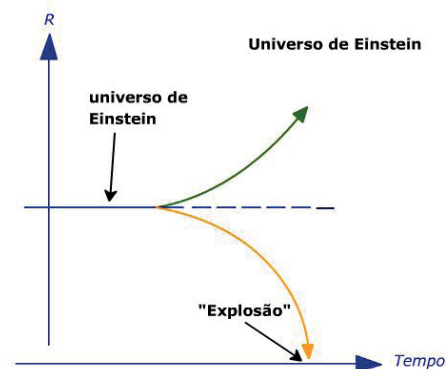
O UNIVERSO DE FRIEDMAN

Alexander Friedmann nasceu na Rússia em 1888. Embora sua família tenha sido de músicos, Friedmann logo se interessou por várias ciências e mais tarde tornou-se professor de matemática na Universidade de Leningrado.

Friedmann foi o primeiro a perceber que havia um erro no artigo sobre cosmologia publicado por Einstein em 1917. Foi esse erro que levou Einstein à conclusão de que o universo comportava-se necessariamente de modo estático quando a força Λ era introduzida nas equações relativísticas da gravitação.

Friedmann escreveu uma carta para Einstein mostrando suas conclusões mais gerais, porém não obteve qualquer resposta. Somente após a interferência de um amigo que estava visitando Berlin é que Friedmann obteve de Einstein o que ele chamou de "uma carta irritada". Nessa carta Einstein concordava com as conclusões de Friedmann.

Isso fez com que Friedmann publicasse em 1922, na conceituada revista científica alemã *Zeitschrift für Physik*, um importante artigo chamado "Sobre a Curvatura do Espaço". Em 1924 ele publicou, nesta mesma revista, um segundo artigo chamado "Sobre a Possibilidade de um Universo com Curvatura Negativa Constante". Esses dois artigos foram muito importantes para o desenvolvimento da cosmologia.



Curiosamente, os artigos de Friedmann surgiram no momento certo, no momento em que foram descobertos os deslocamentos para o vermelho (*redshift*) das linhas espectrais dos objetos extragalácticos. Mesmo assim, embora esses artigos tenham sido publicados em uma das mais importantes revistas científicas da época, eles foram praticamente ignorados pela comunidade científica, a razão disso sendo um completo mistério para os historiadores da ciência. Inacreditavelmente, os artigos de Friedmann não tiveram qualquer impacto sobre a cosmologia na época de sua publicação.

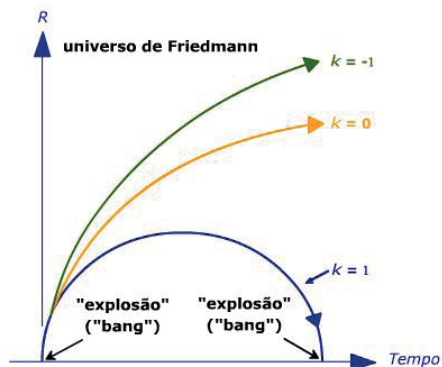
Somente em 1927 é que o abade francês George Lemaître redescobriu as equações originalmente formuladas por Friedmann e a cosmologia entrou em uma nova era.

Hoje, em homenagem ao trabalho pioneiro de Friedmann chamamos os universos de constante cosmológica zero e que se expandem uniformemente como sendo *universos de Friedmann*.

Vamos descrever os universos de Friedmann.

Todos os universos de Friedmann começam com “Big Bangs”.

A partir do valor do parâmetro de desaceleração $q = 1/2$ podemos dividir os modelos possíveis de universos em:



PARÂMETRO DE DESACELERAÇÃO	GEOMETRIA	CONSTANTE DE CURVATURA
$q > 1/2$	esférico	$k = + 1$ (fechado)
$q = 1/2$	plano	$k = 0$ (aberto)
$q < 1/2$	hiperbólico	$k = - 1$ (aberto)

Na cosmologia que surge a partir das equações relativísticas da gravitação a **curvatura do espaço** é definida pela expressão

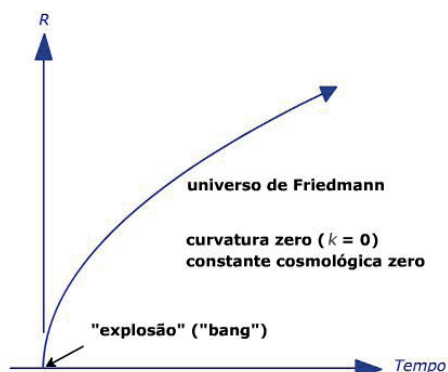
$$K = k/R^2$$

Nessa equação k é a conhecida constante de curvatura e R é o fator de escala do universo.

A constante de curvatura k tem sempre um dos três possíveis valores ou seja, $k = 0$ ou $k = + 1$ ou $k = - 1$.

O significado desses três valores diferentes é mostrado na tabela abaixo.

CONSTANTE DE CURVATURA k	ÓRBITAS NO ESPAÇO NEWTONIANO	ESPAÇO RELATIVÍSTICO EM EXPANSÃO
+ 1	elípticas	esférico
0	parabólicas	plano
-1	hiperbólicas	hiperbólico



Vejamos alguns detalhes desses modelos de Friedmann.

- $k = 0$

Neste tipo de universo o espaço-tempo que se expande é plano, infinito e não limitado. Esse universo se expande continuamente e é do tipo “grande explosão” - oscilante.

Como podemos facilmente notar, esse modelo de universo dura um período infinito de tempo no futuro.

O modelo de universo que estamos descrevendo é o mais simples de todos os universos conhecidos mas não foi considerado nem por

Friedmann nem por Lemaître, sendo primeiro proposto por Einstein e de Sitter em 1932. Mesmo assim ele é conhecido ou como **universo de Friedmann de curvatura zero** ou **universo de Einstein - de Sitter**.

Pensando em uma descrição Newtoniana do universo, esse modelo de Friedmann corresponderia a uma bola que se expande continuamente. Nesse universo, as partículas em queda livre seguem órbitas parabólicas e têm velocidades iguais às suas velocidades de escape.

- $k = + 1$

Nesse tipo de universo o espaço-tempo que se expande é esférico, finito e não limitado.

Esse universo se expande até um tamanho máximo e então colapsa. Ele é, portanto, do tipo “grande explosão” - “grande explosão” (“Big Bang” - “Big Bang”). Portanto esse universo existe somente por um período finito de tempo.

Esse modelo de universo foi descoberto por Alexander Friedmann em 1922 e posteriormente redescoberto pelo abade francês Georges Lemaître em 1927.

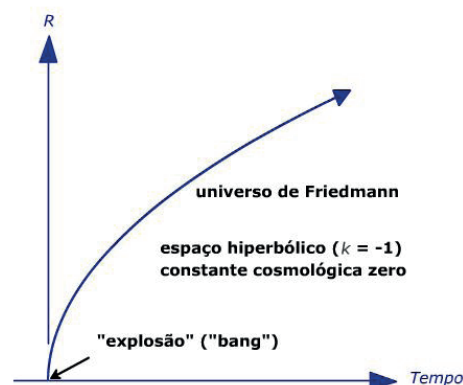
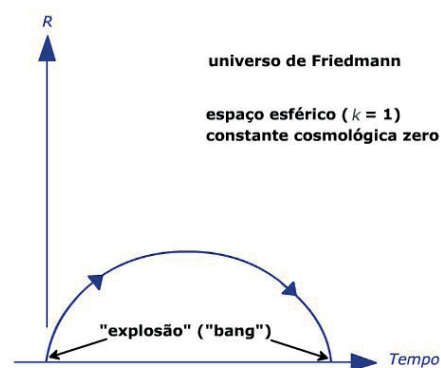
Pensando em uma descrição Newtoniana do universo, esse modelo de Friedmann corresponderia a uma bola que se expande e em seguida colapsa. Nesse universo, as partículas em queda livre seguem órbitas elípticas e têm velocidades menores do que suas velocidades de escape.

- $k = - 1$

Nesse modelo de universo de Friedmann o universo em expansão é hiperbólico, infinito e não limitado. Ele se expande continuamente e dura por um período infinito de tempo no futuro.

Esse modelo de universo foi descoberto por Friedmann em 1924 e foi investigado em 1932 pelo cosmólogo alemão Otto Heckmann.

Pensando em uma descrição Newtoniana do universo, esse modelo de Friedmann corresponderia a uma bola que se expande continuamente. Nesse universo as partículas em queda livre seguem órbitas hiperbólicas e têm velocidades maiores do que suas velocidades de escape.

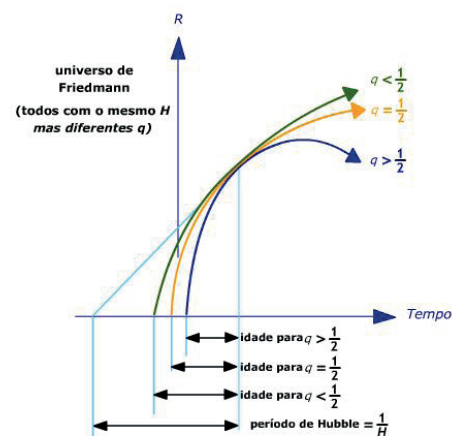


As soluções de Friedman também nos permitem concluir algo sobre a possível idade do universo. Temos que:

PARÂMETRO DE DESACELERAÇÃO	IDADE
$q > 1/2$	menor do que 2/3 do período de Hubble
$q = 1/2$	igual a 2/3 do período de Hubble
$q < 1/2$	maior do que 2/3 do período de Hubble

Note que, para as soluções obtidas por Friedmann consideradas com o mesmo H mas q diferente, quanto mais alto é o valor de q mais curta é a idade do universo.

As soluções de Friedmann também nos dizem algo sobre a densidade do universo. Vemos que:



PARÂMETRO DE DESACELERAÇÃO	DENSIDADE
$q > 1/2$	maior que a densidade crítica
$q = 1/2$	igual à densidade crítica
$q < 1/2$	menor que a densidade crítica

NOTA:

A densidade crítica é um parâmetro que considera a possibilidade do Universo colapsar devido a sua própria gravidade.

O UNIVERSO DE LEMAÎTRE

George Lemaître nasceu em 1894 e foi ordenado padre em 1922. Em 1927, no mesmo ano em que obteve seu Ph.D pelo Massachusetts Institute of Technology nos Estados Unidos, Lemaître publicou seu principal trabalho sobre a expansão do universo.

Como já dissemos, Lemaître redescobriu as equações cosmológicas que haviam sido desenvolvidas anteriormente por Friedmann.

No meio da discussão sobre o significado e o mérito dos universos de Einstein e de de Sitter, o trabalho de Lemaître não foi notado até que o físico inglês Arthur Eddington chamou a atenção para ele, três anos mais tarde, e fez com que ele fosse traduzido para o inglês.

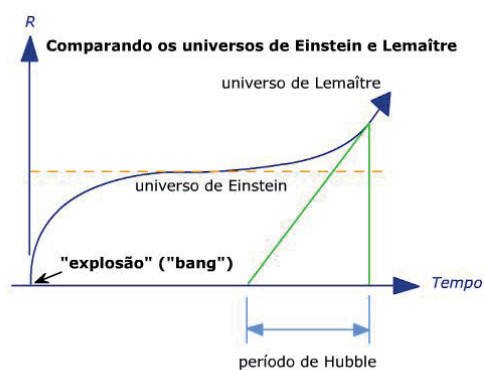
Lemaître foi o primeiro a advogar a existência de um estado inicial de alta densidade, que ele chamou de “átomo primitivo”. Por esse motivo, ele é considerado por muitos como o “pai do Big Bang”.

Lemaître destacou entre as várias possíveis soluções das equações de Friedmann aquela que descrevia um universo fechado com uma força repulsiva Λ . Neste caso a constante cosmológica é positiva.

O universo estudado por Lemaître tem os mesmos ingredientes básicos que o universo de Einstein com a importante diferença de que Λ tem um valor ligeiramente maior do que aquele escolhido anteriormente por Einstein. Por conseguinte, o universo de Lemaître não pode ser estático.

O universo de Lemaître começa com um Big Bang e tem dois estágios de expansão. No primeiro estágio a expansão desacelera porque a gravidade é mais forte do que a repulsão da força Λ . Ele então se aproxima lentamente do raio do universo de Einstein. Aproximadamente nessa fase a repulsão se torna maior do que a gravidade e tem início o segundo estágio de expansão. O universo agora se expande a partir do raio de Einstein, a princípio lentamente e então a uma taxa crescente.

O universo de Lemaître, por conseguinte, começa como um Big Bang, se desenvolve eventualmente em um estágio oscilante e, ao longo desse caminho, hesita quando passa pelo tamanho do universo de Einstein. Ele combina suavemente as propriedades dos universos de Einstein e de Sitter: ele é fechado como o universo de Einstein, ele tem repulsão cósmica como ambos os universos e, sob o estímulo dessa repulsão, ele mais tarde infla como o universo de de Sitter.



O UNIVERSO DE EDDINGTON

George Lemaître foi atraído pelo “Big Bang” possivelmente por motivos religiosos. O físico inglês Arthur Eddington não gostava da ideia e a achava esteticamente desagradável.

Em vez de adotar um começo abrupto para o universo, em 1930 Eddington passou a defender um novo modelo de universo no qual permitia-se que a evolução começasse em um instante de tempo infinito, o que é necessário se o universo deve ter um começo natural.

O universo de Eddington existe inicialmente, durante um período infinito de tempo, de modo semelhante a um universo estático de Einstein. Então,

como resultado de uma perturbação acidental, ele deixa de ser estático e começa a se expandir. Veja que esse universo existe inicialmente em um estado estático de Einstein e mais tarde muda seu comportamento para o estado de um universo de de Sitter no qual a repulsão domina a gravidade. Desse modo, o universo de Eddington junta os dois modelos de universo que previamente tinham sido discutidos por esses dois grandes cosmólogos que o antecederam.

É curioso notar que Eddington, o cientista que descobriu que o modelo de universo estático proposto por Einstein era instável, tenha escolhido uma solução de universo que existe, inicialmente, por um período indefinidamente longo no estado estático instável, exatamente como aquele descrito por Einstein. Já vimos que isso nos diz que nenhuma formação de galáxia poderia ter ocorrido e nenhuma vida existido nesse universo estático, precariamente equilibrado por tanto tempo, que acordou somente há 15 bilhões de anos.

Eddington foi forçado a postular um passado infinito para exorcizar o espectro de um começo catastrófico. Ele foi o primeiro, mas não o último, dos cosmólogos modernos a ficar terrificado pelo pesadelo de nascimento e morte cósmicos.

O universo de Eddington existe em um estado de inatividade. Ele começa a se manifestar, envelhece graciosamente e termina em uma oscilação. Entretanto, não se pode escapar da implacável lei da cosmogênese: criação não pode ser considerada apenas como um evento que ocorreu no passado infinito pois o universo contém tempo e o tempo, seja finito ou infinito, é criado com o universo, embora hoje já sejam levantadas dúvidas sobre essa última afirmação.

MAS, AFINAL, O QUE É ESSA “GRANDE EXPLOSÃO” CHAMADA “BIG BANG”?

O “Big Bang” frequentemente é citado como uma “grande explosão”. Esse termo pode nos levar a grandes erros de interpretação.

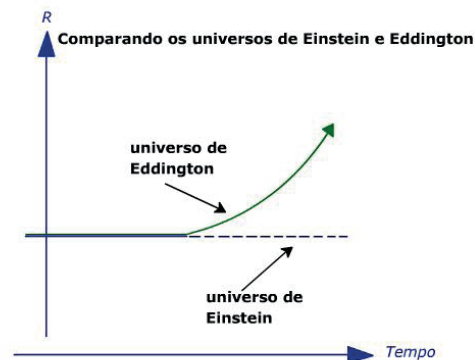
Uma explosão é algo que ocorre em um ponto no espaço enquanto que o “Big Bang” teria sido um fenômeno englobando **todo** o espaço-tempo existente.

Em uma explosão ordinária o gás é lançado para fora de uma determinada região bem localizada no espaço por um gradiente de pressão, ou seja, uma grande diferença de pressão entre o centro da explosão e a borda do gás em expansão. No universo não existem tais gradientes de pressão porque a pressão é a mesma em todos os lugares. Não existe centro e não existe borda.

O termo “bang”, que seria melhor traduzido como “barulho”, sugere que ondas sonoras são emitidas e que um ruído é ouvido. No entanto, as equações que definem a possível ocorrência desse processo no universo mostram que nenhuma onda sonora é produzida.

É muito comum encontrarmos, até mesmo em livros de cosmologia, termos tais como “a hipótese do Big Bang” e “a teoria do Big Bang”. Se essas expressões possuem algum significado elas devem ser apenas alguma maneira disfarçada de se referir ao estado singular encontrado em vários modelos de universo previstos pela teoria relativística da gravitação.

Isso nos leva a afirmar que a expressão “Big Bang”, ou em português “grande explosão”, embora seja algo fácil de imaginar, nos induz a uma ideia absolutamente errada sobre o que pode ter acontecido e deve ser evitada. É uma pena que o termo “Big Bang”, introduzido casualmente e ironicamente pelo cientista inglês Fred Hoyle em uma de suas críticas aos modelos de universo em expansão feita em um programa radiofônico da companhia inglesa BBC, tenha adquirido a divulgação que ele tem hoje, nos levando a entender de modo absolutamente errôneo o que pode ter acontecido nesse momento no universo.

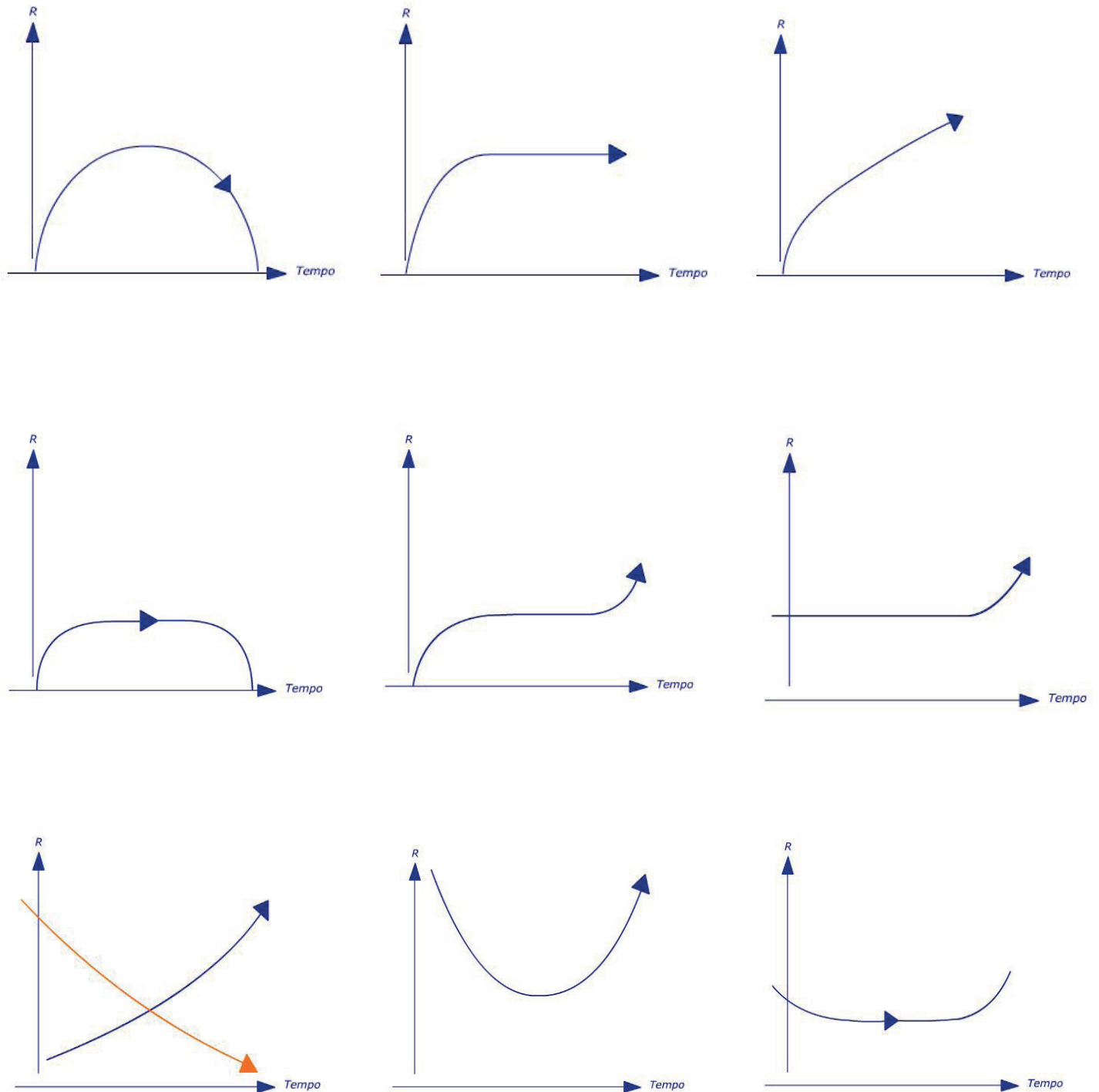


UM CATÁLOGO DE MODELOS DE UNIVERSO

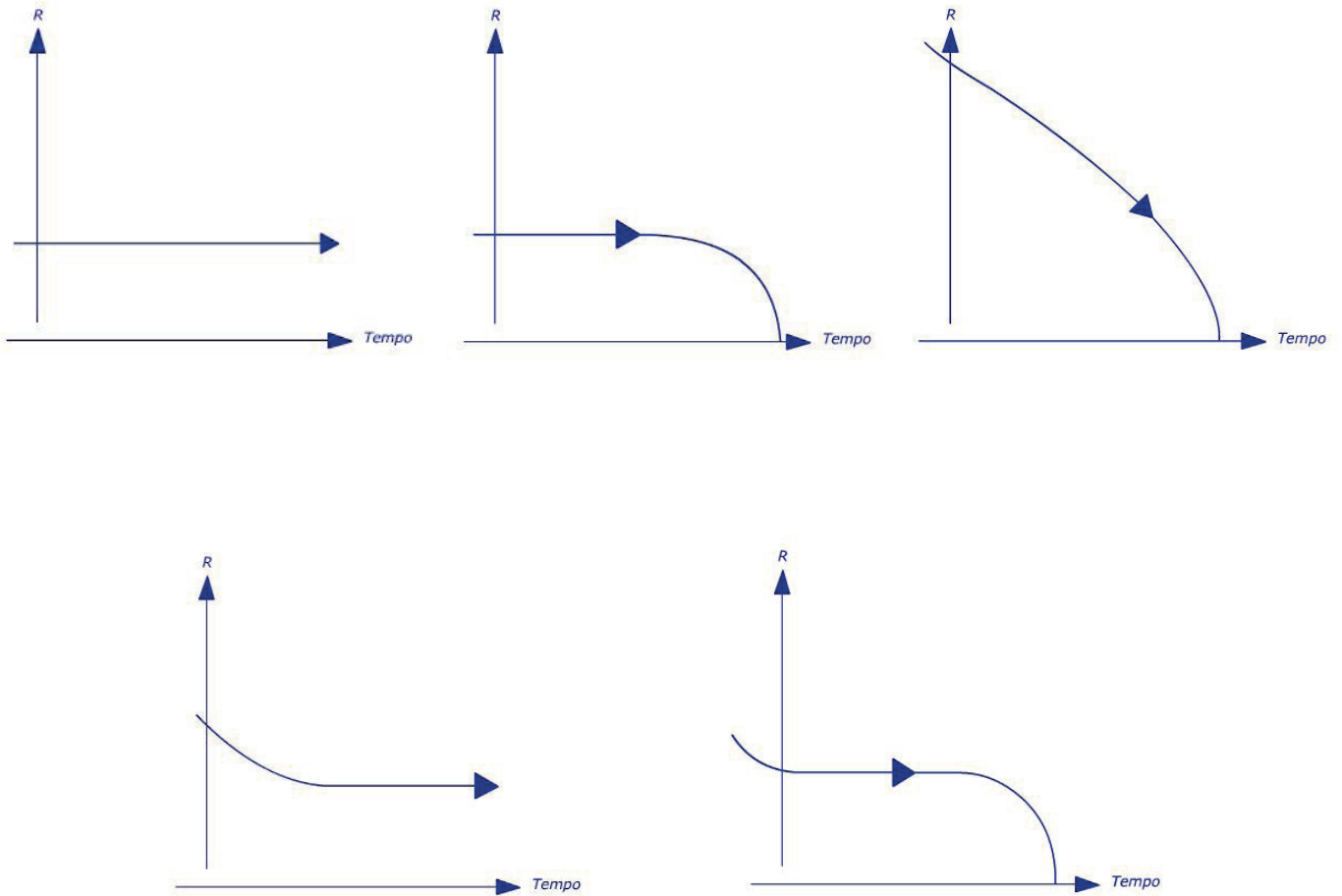
Classificação cinemática

Existem várias maneiras pelas quais podemos classificar os modelos de universo obtidos a partir das equações relativísticas da gravitação. Uma dessas maneiras é considerando de que modo o fator de escala R varia com o tempo nesses diferentes casos. As figuras abaixo mostram esse tipo de classificação.

Sabemos que o universo está se expandindo no momento. Então, podemos dizer que existem nove modelos possíveis aceitáveis. São eles:



Os outros cinco possíveis modelos são abandonados pelo fato de que eles não prevêem períodos de expansão. São eles:



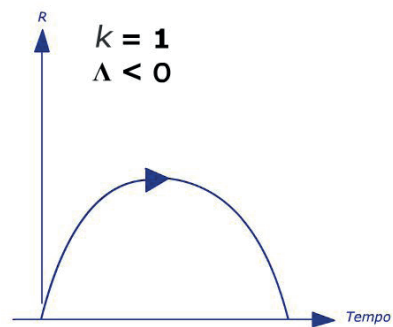
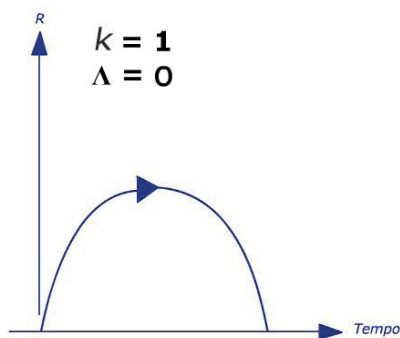
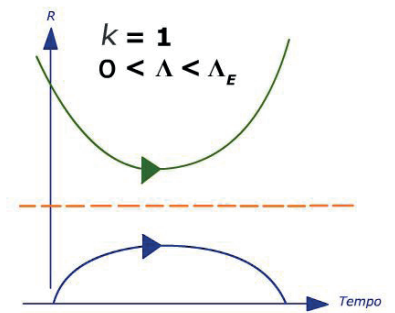
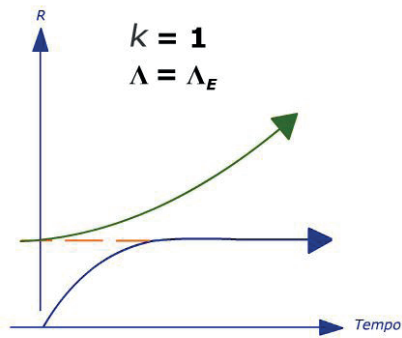
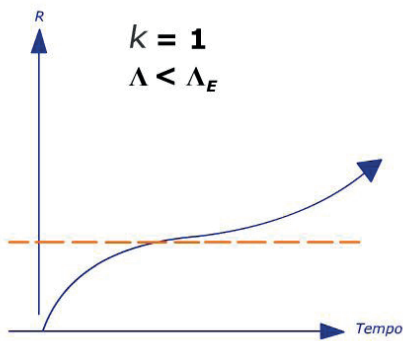
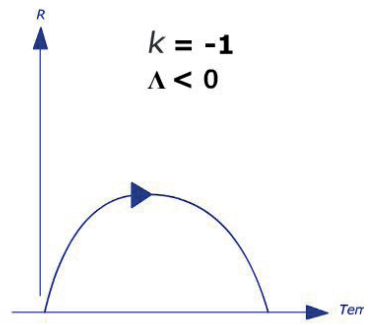
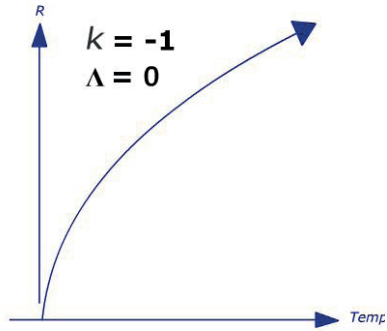
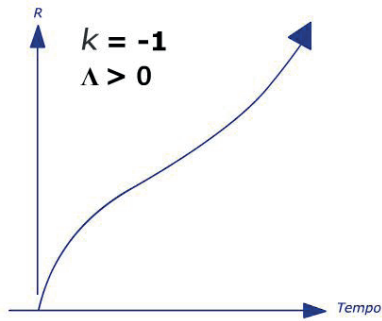
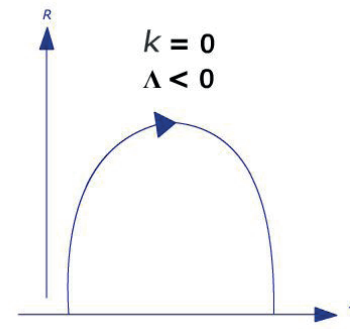
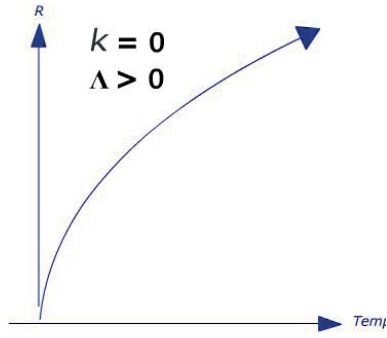
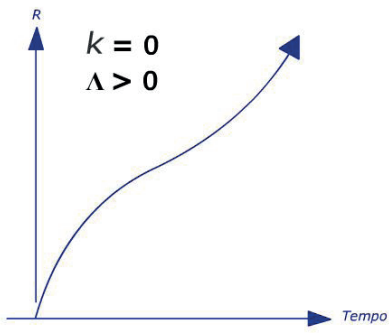
Classificação dinâmica

Uma outra maneira de classificar os possíveis modelos cosmológicos está fundamentada nas equações de Friedmann. Eles se baseiam nos três valores possíveis da constante de curvatura k , levando em consideração que para cada valor de k a constante cosmológica Λ pode ter dois valores específicos significativos, podendo ser igual a zero ou igual ao valor proposto por Einstein, Λ_E . Além disso, a constante cosmológica Λ pode ter três intervalos significativos de valores podendo ser menor que zero, maior do que zero, porém menor do que o valor de Einstein Λ_E , e maior do que o valor de Einstein Λ_E . Temos então 15 possíveis classes de modelos cosmológicos.

Tirando o caso óbvio quando $\Lambda = 0$, nos casos quando Λ é igual ao valor de Einstein Λ_E , ou está no intervalo em que é maior do que zero e menor do que o valor de Einstein Λ_E , ou então é maior do que o valor de Einstein Λ_E , a força Λ é repulsiva e se opõe à gravidade. No caso em que Λ é menor do que zero, a força Λ é atrativa e aumenta a gravidade.

No entanto, quando Λ é igual ao valor de Einstein Λ_E , ou maior do que zero e menor do que o valor de Einstein Λ_E , ou então é maior do que o valor de Einstein Λ_E , nos casos em que $k = 0$ ou $k = -1$ eles são dinamicamente equivalentes.

Ficamos então com apenas 11 classes distintas:



Note que nem todas as descrições cinemáticas são possíveis de acordo com o esquema de classificação dinâmica mostrada acima.