

Big bang & energia escura: problemas atuais da cosmologia

Winfried Zimdahl

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Os dados observacionais atuais indicam que aproximadamente 95% do substrato cosmológico é invisível e só se manifesta através de sua ação gravitacional. A conclusão mais aceita, baseada na teoria da relatividade geral de Einstein, é que estes 95% formam um “setor escuro”, de natureza não bariônica. Este setor é normalmente dividido em energia escura e matéria escura. Energia escura é uma componente exótica com uma pressão negativa que domina dinamicamente o Universo atual. Na teoria de Einstein uma pressão efetiva negativa é necessária para entender a expansão acelerada do Universo, detectada em 1998. Matéria escura, por outro lado, é matéria sem pressão, necessária para explicar a origem das estruturas cósmicas. A natureza da matéria escura e da energia escura é objeto de intensos estudos em todo o mundo, tanto do ponto de vista teórico, quanto observacional. Este artigo, baseado numa palestra para alunos do IFES Guarapari no mês de outubro de 2019, visa dar uma introdução geral nos problemas atuais da cosmologia.

Abstract

Current observational data indicate that approximately 95% of the cosmic substratum is invisible and manifests itself only via its gravitational interaction. The prevailing view, based on general relativity, is that these 95% are forming a “dark sector” of nonbaryonic origin. This sector is usually split into dark energy and dark matter. Dark energy is an exotic component with negative pressure that dominates the current Universe dynamics. In Einstein’s theory, a negative pressure is necessary to understand the accelerated expansion of the Universe, detected in 1998. Dark matter, on the other hand, is pressureless matter, necessary to explain the origin of cosmic structures. The nature of dark matter and dark energy is a matter of worldwide investigation from both the theoretical and observational viewpoints. This article, based on a lecture for high school students at IFES Guarapari in October 2019, aims to give a general introduction to current problems in cosmology.

Palavras-chave: big bang, energia escura, matéria escura, cosmologia.

Keywords: big bang, dark energy, dark matter, cosmology.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v2n1.33624](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v2n1.33624)

1 Introdução

Cosmólogos olham para o Universo como um sistema físico. No entanto, diferente de outros sistemas físicos, por definição, temos um único Universo.¹ Não tem nada “fora” do Universo. Não podemos isolar este sistema de outros objetos nem o preparar num laboratório.

O conjunto das observações sugere que o Universo de hoje é o resultado da evolução de um estado quente e denso primordial. A dinâmica do

Universo em escalas largas é determinada pela gravitação. A teoria padrão da gravitação é a relatividade geral de Albert Einstein (1879 – 1955), de 1915. A gravitação é a mais fraca das quatro interações fundamentais que a física moderna conhece. Estas interações são:

- Interação forte,
- Interação fraca,
- Interação eletromagnética,
- Interação gravitacional.

As interações fortes e fracas são interações microscópicas. A interação forte, com um alcance

¹Ignoramos aqui ideias especulativas sobre “multiversos”, que foram desenvolvidas para abordar certas coincidências cósmicas. Uma revisão crítica deste conceito pode ser encontrado na referência [1].

menor que 10^{-15} m, é relevante nos núcleos atômicos (quarks, glúons). A interação fraca é responsável pela radioatividade e tem alcance menor que 10^{-17} m. As interações eletromagnéticas e gravitacionais são interações macroscópicas. Elas têm alcance muito grande, até o infinito. No eletromagnetismo temos cargas positivas e negativas, ou seja, temos atração e repulsão. A marcação das cargas com “+” e “-” foi introduzida por Georg Christoph Lichtenberg (1742 – 1792). Sistemas com cargas positivas e negativas podem mostrar neutralidade para fora por causa do efeito de blindagem. O equivalente da carga na gravitação é a massa. Como a massa é sempre positiva, só temos atração e não temos blindagem. Por isso, a gravitação é a interação dominante em distâncias grandes.

2 História

Um passo crucial para o entendimento da gravitação foi a lei de inércia de Galileio Galilei (1564 – 1642). Galilei estudou a queda livre e enfatizou o papel da matemática no estudo da natureza. Virou famosa a frase dele, que o livro da natureza (uma metáfora de Agostinho de Hipona) seja escrito na língua da matemática. Isso pode ser visto numa tradição que começou na Grécia antiga. Pitágoras de Samos (ca.570 a.C. – ca.495 a.C.) já tinha declarado: “tudo é número”. Mais recentemente, o ganhador do Prêmio Nobel 1963, Eugene Wigner (1902 – 1995), escreveu: “The miracle of the appropriateness of the language of mathematics for the formulation of the laws of physics is a wonderful gift which we neither understand nor deserve”(O milagre da adequação da linguagem da matemática para a formulação das leis da física é um dom maravilhoso que não compreendemos nem merecemos).

Outro passo no entendimento da gravitação resulta dos dados observacionais de Tycho Brahe (1546 – 1601), quem, em particular, determinou as posições do planeta Marte. Tycho foi matemático imperial na corte de imperador Rudolf II em Praga. Com estes dados, Johannes Kepler (1571 – 1630) descobriu desvios do movimento circular do planeta Marte e estabeleceu as leis de Kepler: 1) Os planetas descrevem órbitas elípticas com o Sol num dos focos. 2) O raio vetor que liga um planeta ao Sol descreve áreas iguais em tempos iguais. 3) Os quadrados dos períodos de revo-

lução se comportam como as terceiras potências dos eixos maiores.

A contribuição decisiva para estabelecer a mecânica clássica foi a obra “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica”, de 1687, em que Isaac Newton (1643 – 1717) derivou as leis de Kepler a partir da lei da força gravitacional \mathbf{F} entre dois corpos com massas m_1 e m_2 , separadas pela distância \mathbf{r} ,

$$\mathbf{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}, \quad (1)$$

onde $r = |\mathbf{r}|$ e G é a constante da gravitação de Newton.

A característica importante da lei de gravitação é sua validade universal. Ela dá uma descrição unificada de fenômenos aparentemente diferentes como uma maçã que cai de uma árvore, a Lua e seu movimento em torno da Terra, ou as trajetórias dos planetas em torno do Sol. Este aspecto de unificação no entendimento teórico é um elemento crucial na física até hoje, e abrange outras interações também. Um exemplo recente é a unificação das interações fracas e eletromagnéticas numa teoria eletro-fracas por Sheldon Glashow (nascido em 1932), Abdus Salam (1926 – 1996), e Steven Weinberg (nascido em 1933).

3 Distâncias no Universo

A estrela mais próxima à Terra é Alpha Centauri, que fica a uma distância de 4,28 anos-luz. Um ano-luz é a distância que a luz atravessa no vácuo durante o período de um ano e corresponde a $9,46 \times 10^{12}$ km. A Via Láctea, nossa galáxia, consiste em mais de 100 bilhões estrelas e tem um diâmetro de 100.000 anos-luz com um buraco negro no centro. Uma galáxia na nossa “vizinhança” cósmica é a Grande Nuvem de Magalhães (distante 163.000 anos-luz), descrita por Fernão de Magalhães, em 1519, mas antes já observada por Al Sufi, em 964, na Pérsia. Outra galáxia no chamado *grupo local*, de aproximadamente 30 membros, é a galáxia de Andrômeda, a uma distância de 2,5 milhões anos-luz. Estruturas ainda maiores são aglomerados de galáxias com cerca de mil membros. Um exemplo bem conhecido é o aglomerado de Coma na distância de 300 milhões anos-luz com um diâmetro de 20 milhões anos-luz. O Universo inteiro observado, finalmente, tem uma extensão de mais de três bilhões anos-luz.

4 Teoria de relatividade geral

Modelos cosmológicos históricos acreditaram numa extensão infinita do Universo. Ademais, foi considerado “natural” que o Universo fosse invariável, ou seja estático. No entanto, surgiram dúvidas já antes da época da cosmologia moderna. No ano 1826, Heinrich Wilhelm Olbers (1758 – 1826) perguntou: por quê o céu noturno é escuro? Em um Universo infinito e estático deveríamos ver uma estrela em cada direção! O céu deveria ser brilhante! Isso é conhecido como o paradoxo de Olbers. Mas demorou mais ou menos cem anos até os trabalhos de Alexander Friedmann (1888 – 1925), George Lemaître (1894 – 1966) e Edwin Hubble (1889 – 1953), que foram decisivos em estabelecer o conceito de um Universo em expansão. A base teórica para tal progresso foi a teoria da relatividade geral, formulada em 1915 por Albert Einstein. As famosas equações de Einstein são

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} R g_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}. \quad (2)$$

No lado esquerdo aparecem quantidades geométricas (o tensor de Ricci $R_{\alpha\beta}$, o escalar de curvatura R , a métrica $g_{\alpha\beta}$ e a constante cosmológica Λ), no lado direito temos o tensor de energia-momento $T_{\alpha\beta}$ que caracteriza a matéria (o símbolo c é a velocidade de luz, os índices α e β identificam as 4 coordenadas do espaço-tempo). Ou seja, o conjunto das equações de Einstein representa uma relação entre a geometria do espaço-tempo e a matéria. Esta relação se manifesta numa curvatura do espaço-tempo. O espaço-tempo faz parte da dinâmica, algo fundamentalmente diferente da teoria newtoniana onde o espaço tem o papel de um contêiner fixo. As equações de Einstein são equações diferenciais parciais não lineares para a métrica $g_{\alpha\beta}$. A métrica determina o quadrado do elemento de comprimento ds^2 , através de

$$ds^2 = g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta, \quad (3)$$

onde x^α , com $\alpha = 0, 1, 2, 3$, são as coordenadas do espaço-tempo (“0” para a coordenada temporal, 1, 2, 3 para as coordenadas espaciais). Adotamos aqui a convenção de somatório de Einstein que implica somas sobre todos índices que apareçam repetidos (α e β na equação acima). O elemento de comprimento ds no espaço-tempo é composto de distâncias temporais e espaciais. No caso mais simples, sem a gravitação, no espaço-tempo de

Minkowski (Hermann Minkowski, 1864 – 1909), este elemento ds_M^2 (índice M para Minkowski) é dado por

$$ds_M^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2, \quad (4)$$

ou seja, as componentes da métrica são $g_{00} = -c^2$ e $g_{xx} = g_{yy} = g_{zz} = 1$. Mesmo que a relatividade geral seja bem diferente conceitualmente da gravitação newtoniana, esta última pode ser obtida da teoria de Einstein como um caso limite nas condições em que a velocidade da matéria é muito menor do que a velocidade de luz, e para gravitação fraca. No sistema solar, as diferenças observacionais entre os resultados das teorias de Einstein e de Newton são muito pequenas, quantitativamente. Por outro lado, existem problemas e fenômenos que só podem ser tratados dentro da teoria de relatividade. Entre eles destacam-se:

- Ondas gravitacionais,
- Buracos negros,
- Cosmologia (relativista).

Com respeito ao último item, a cosmologia, mesmo que exista uma cosmologia newtoniana (veja [2, 3]), as condições da aplicabilidade desta teoria só podem ser entendidas na base da relatividade geral.

5 Cosmologia relativista

5.1 O princípio cosmológico

Para aplicar o formalismo da relatividade geral ao estudo do Universo observado, certas especificações têm que ser feitas. Na maioria dos casos, os modelos cosmológicos são baseados no princípio cosmológico. Este princípio é uma suposição sobre simetrias do espaço-tempo. Ele diz que, em uma boa aproximação, nosso Universo é espacialmente homogêneo e isotrópico, ou seja, não tem uma posição preferencial e nem uma direção espacial preferencial. Com uma formulação matemática correspondente, este princípio leva à simplificações substanciais, primeiramente do lado esquerdo (parte geométrica) das equações de Einstein. Em particular, a métrica do espaço-tempo tem que ser a métrica de Robertson-Walker (Howard P. Robertson, 1903 –

1961, Arthur G. Walker, 1909 – 2001) com o elemento de comprimento quadrado

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \right], \quad (5)$$

onde t é o tempo cósmico e r, θ e φ são coordenadas esféricas. O parâmetro k , que pode assumir os valores 0 ou ± 1 , caracteriza a curvatura espacial. Ou seja, as componentes do tensor métrico podem ser escritas como $g_{00} = -c^2$, $g_{rr} = \frac{a^2}{1-kr^2}$, $g_{\theta\theta} = a^2 r^2$ e $g_{\varphi\varphi} = a^2 r^2 \sin^2\theta$. A grandeza dinâmica de interesse principal é o fator de escala a , que depende do tempo cósmico t . Para descrever o lado direito das equações (2), um modelo para a matéria cosmológica é necessário. O modelo preferido é o modelo do fluido perfeito, caracterizado por uma densidade da energia ρc^2 e uma pressão p junto com uma equação de estado tipo $p = p(\rho)$. As equações de estado mais aplicadas são $p = \rho c^2/3$ (radiação) e $p \ll \rho c^2$ (matéria não relativística).

5.2 O fator de escala

Com a métrica (5) e com o modelo do fluido perfeito, as equações de Einstein podem ser reduzidas a duas equações diferenciais ordinárias para o fator de escala a , a equação de Friedmann

$$3\frac{\dot{a}^2}{a^2} \equiv 3H^2 = 8\pi G\rho - \frac{3kc^2}{a^2} + \Lambda c^2, \quad (6)$$

onde o ponto significa uma derivada com respeito ao tempo cósmico e H é a taxa de expansão de Hubble, e a equação,

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -4\pi G \left(\rho + 3\frac{p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}. \quad (7)$$

As soluções mais relevantes do sistema (6) e (7) (para um Universo espacialmente plano com $k = 0$) são $a \propto t^{1/2}$, o que corresponde à $\rho \propto a^{-4}$, para $p = \rho c^2/3$ (radiação) e $a \propto t^{2/3}$ com $\rho \propto a^{-3}$ para $p \ll \rho c^2$ (matéria não relativística).

A lei de expansão é atribuída usualmente a Edwin Hubble, 1929, mas ela já havia aparecido dois anos antes num artigo pouco conhecido na época de Georges Lemaître. A expansão do Universo indica que havia um estado denso e quente no passado. O modelo padrão tradicional da cosmologia prevê uma fase primordial de dominância da radiação seguida de um período de dominância da matéria não relativística. A cosmologia atual acrescenta uma fase inflacionária antes do

período de radiação e uma fase da energia escura (que inclui o tempo atual), após do período da matéria não relativística.

5.3 Radiação cósmica de fundo em micro-ondas

Obviamente, uma descrição baseada no princípio cosmológico exclusivamente, não pode ser realista. Sem dúvida observamos estruturas no Universo como galáxias e aglomerados de galáxias que claramente representam inhomogeneidades na distribuição da matéria cósmica. O método de levar em conta inhomogeneidades deste tipo consiste em estudar desvios da homogeneidade e da isotropia. O mecanismo principal para explicar as estruturas cósmicas é a aglomeração gravitacional de “inicialmente” pequenos desvios de homogeneidade e isotropia. “Inicialmente”, neste contexto, pode ser entendido como na chamada época de recombinação durante qual aconteceu o desacoplamento de radiação e matéria bariônica. Antes deste desacoplamento havia um equilíbrio entre a radiação e a matéria bariônica por causa de interações entre estas componentes. Pequenas inhomogeneidades na distribuição dos bárions causaram flutuações na radiação também. Desacoplamento significa que aquela interação virou ineficaz. A radiação se espalhou independentemente da matéria, mas ficou com as flutuações impressas. Desacoplamento também significa que o Universo virou transparente de maneira que podemos ver hoje esta radiação flutuante. Pequenas flutuações na temperatura num fundo homogêneo e isotrópico foram observadas pelo satélite COBE (Cosmic Background Explorer)² da NASA (National Aeronautics and Space Administration) no início dos anos 90 do século passado. Essa mesma radiação cósmica de fundo em micro-ondas já tinha sido detectada na ano 1964 por Arno Penzias (nascido em 1933) e Robert Wilson (nascido em 1936). A existência de uma radiação deste tipo foi prevista teoricamente em 1948, por Alpher (Ralph Alpher, 1921 – 2007) e Herman (Robert Herman, 1914 – 1997). Ela nos dá informação do tempo quando o Universo tinha aproximadamente 1/1000 da extensão atual. A temperatura na época era por volta de 3000 Kelvins (K). Ela diminuiu até hoje pelo fator 1000, o valor atual mais preciso é $T_0 = 2,75\text{K}$ (o índice 0 indica o

²science.nasa.gov/missions/cobe.

valor de hoje). É comum medir a expansão do Universo em termos do parâmetro de desvio para o vermelho z , definido por

$$z \equiv \frac{a_0}{a} - 1, \quad (8)$$

ou seja, $z = 0$ para os dias atuais ($a = a_0$) e $z \approx 1000$ para $a = a_0/1000$ (época de desacoplamento).

5.4 Estruturas cósmicas através de instabilidade gravitacional

As flutuações acompanhantes da matéria, pequenas na época de desacoplamento, crescem durante do período da dominância da matéria por causa de algo chamado de instabilidade gravitacional, um fenômeno descrito pela teoria de Einstein, aplicada aos desvios pequenos do fundo homogêneo e isotrópico de todas as variáveis da métrica e do fluido. Este crescimento implica regimes lineares e não-lineares no desvio de homogeneidade e isotropia e resulta nas estruturas cósmicas que observamos hoje, como galáxias e aglomerados de galáxias. Fontes principais do nosso conhecimento da distribuição da matéria cósmica são catálogos de galáxias como o 2dF Galaxy Redshift Survey (2dFGRS)³ e o SDSS (Sloan Digital Sky Survey).⁴ Um papel crescente no mapeamento das estruturas cósmicas faz uso de lentes gravitacionais fracas.⁵

5.5 Nucleossíntese primordial

Dentro dos primeiros três minutos da história do Universo se formam os elementos leves hidrogênio e hélio e uma fração pequena de lítio, como foi previsto 1948 por Alpher, Bethe (Hans Bethe, 1906 – 2005) e Gamov (George Gamov, 1904 – 1968). Os elementos mais pesados aparecem só mais tarde como resultado de processos da fusão no interior das estrelas. A abundância dos elementos leves encontrados (aproximadamente 75 % hidrogênio e 25% hélio) e a coincidência com os valores que a teoria fornece representam a evidência mais primordial para o modelo de “big bang”.

³www.2dfgrs.net/.

⁴www.sdss.org/.

⁵www.cfhtlens.org/, hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/science/weak-lensing-cosmology/.

5.6 Evidências cosmológicas

A investigação da radiação cósmica do fundo junto com o estudo da distribuição da matéria no Universo têm sido fontes principais para estabelecer o modelo padrão atual do Universo. Este modelo é baseado nos fatos seguintes:

- A expansão do Universo,
- A abundância dos elementos leves,
- A radiação cósmica de fundo em micro-ondas (existência e propriedades),
- As estruturas cósmicas através de instabilidades gravitacionais.

5.7 O Universo inflacionário

Acreditamos que faz sentido extrapolar as leis conhecidas e testadas na vizinhança da Terra e no sistema solar até regiões de alta energia onde não existem provas diretas de validade. Um conceito adotado hoje por muitos pesquisadores é o conceito da inflação. A idéia básica, desenvolvida em 1981 por Alan Guth (nascido em 1947), quem cunhou tal nome, e Alexei Starobinsky (nascido em 1948) e Andrei Linde (nascido em 1948) já nos anos 70, é postular uma fase primordial com expansão exponencial, ou seja, uma expansão acelerada com um crescimento do fator de escala exponencialmente com o tempo cósmico, $a \propto \exp(Ht)$. Na base desta suposição se pode esclarecer várias propriedades do Universo observado que ficariam enigmáticas sem uma fase inflacionária. Entre eles destacam problemas como: por quê o nosso Universo aparece espacialmente plano? (“flatness problem”), e por quê regiões distantes, sem a possibilidade de contato causal entre elas durante o tempo da vida do Universo, parecem estar em equilíbrio? (“horizon problem”). Após o fim da época com expansão exponencial, o Universo, conforme este conceito, entra numa fase com expansão desacelerada segundo uma lei de potência. A transição entre estes regimes é chamado de reaquecimento (reheating). Existem muitos argumentos para a existência de uma fase inflacionária, mas não há evidência direta. As escalas energéticas envolvidas ultrapassam as energias acessíveis no laboratório por muitas ordens de magnitude. A incerteza sobre a natureza do substrato primordial gerou uma quantidade de

modelos inflacionárias diferentes. Diferentes modelos fazem previsões diferentes com respeito às consequências, e.g., para as propriedades detalhadas da radiação cósmica do fundo. Isso abre a possibilidade de discriminar entre eles de maneira indireta por causa de efeitos que são produzidos em escalas energéticas menores. É possível, em particular, descartar modelos não compatíveis com dados já existentes (veja, por exemplo, [4]).

5.8 Escalas de energia

É útil listar escalas características da energia durante a expansão cósmica. É comum na literatura cosmológica utilizar a unidade energética GeV, onde $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-3} \text{ erg} = 1,6022 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. As energias mais altas acessíveis no laboratório são $1,4 \times 10^4 \text{ GeV}$, a energia máxima no LHC (Large Hadron Collider) no CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire). A escala de Planck é de ordem de 10^{19} GeV e fica completamente fora de alcance de qualquer experimento terrestre. Os limites extremos de validade de teorias estabelecidas são dados por comprimentos de ordem de comprimento de Planck (Max Planck, 1858 – 1947). Esta quantidade é construída a partir das três constantes fundamentais: constante de Newton $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, velocidade da luz $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, e constante de Planck $\hbar = 6,626 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Então o comprimento de Planck, l_P , é

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,61 \cdot 10^{-35} \text{ m}. \quad (9)$$

O tempo correspondente de Planck é

$$t_P = \frac{l_P}{c} = 5,39 \cdot 10^{-44} \text{ s}. \quad (10)$$

Para comprimentos e tempos próximos desses valores de Planck espera-se que efeitos quânticos se tornem efetivos, o que requer uma estrutura teórica além da relatividade geral clássica. Isto toca no problema, por enquanto em aberto, da compatibilidade da teoria da gravitação e da teoria quântica em altas energias.

As escalas energéticas de épocas relevantes para a cosmologia e os tempos cosmológicos correspondentes são:

- Era de Planck: 10^{19} GeV , 10^{-43} s ,
- Era de inflação: 10^{16} GeV , 10^{-35} s ,

- Escala eletro-fracas: 10^2 GeV , 10^{-13} s ,
- Nucleossíntese: 1 MeV , 1 s ,
- Desacoplamento da radiação: 1 eV , 10^5 anos ,
- Hoje: 10^{-2} eV , $2 \times 10^{10} \text{ anos}$.

6 O Universo atual

6.1 A situação observacional

Como já foi dito, o conjunto dos dados observacionais atuais está sugerindo que a dinâmica do Universo em largas escalas é dominada por um setor escuro que consiste em energia escura e matéria escura. O conceito da energia escura foi introduzido para explicar a expansão acelerada do fator de escala, detectada em 1998 pelos projetos High-z Supernova Search Team e Supernova Cosmology Project [5]. As observações decisivas para obter esta conclusão foram medições de distância de luminosidade de objetos chamados de supernovae tipo Ia. As supernovae pareciam mais fracas (distância de luminosidade maior) do que se espera num modelo sem algo como a energia escura. Supernovae são objetos que parecem ser estrelas novas porque são resultados de uma explosão muito brilhante. Depois de umas semanas ou meses, a visibilidade delas cai e elas aparentemente desaparecem. Um exemplo famoso na Via Láctea é a supernova de Tycho, descoberta em 1572. Matematicamente, uma expansão acelerada é descrita por $\ddot{a} > 0$. Obviamente, as fases com $a \propto t^{1/2}$ (radiação) e $a \propto t^{2/3}$ (matéria não relativística), descritas anteriormente, depois da equação (7), têm $\ddot{a} < 0$. Como segue da equação (7), uma constante cosmológica $\Lambda > 0$, ou uma pressão negativa $p < -\rho c^2/3$, é necessária para obter $\ddot{a} > 0$ (assumindo uma densidade da energia sempre não negativa). O modelo padrão ΛCDM (veja o próximo item) usa a constante cosmológica, enquanto modelos alternativos postulam uma forma da matéria exótica dinâmica com pressão efetiva negativa para descrever uma expansão acelerada.

A outra parte do setor escuro, a matéria escura, é matéria sem pressão, necessária para explicar a origem das estruturas cósmicas. O conceito de uma matéria invisível que tem um efeito gravitacional foi introduzido já no ano 1933 por Fritz Zwicky (1898 – 1974). A evidência da existência

de matéria escura aumentou com os resultados de Vera Rubin (1928 – 2016) nos anos 60 do século passado. Ela mostrou que a matéria visível não é suficiente para explicar as curvas de rotação de galáxias espirais. A natureza microscópica da matéria escura ainda é desconhecida. Candidatos hipotéticos mais favoráveis são as partículas massivas de interação fraca (WIMPs: Weakly Interacting Massive Particles). Apesar de muitos esforços (um experimento conhecido é o XENON⁶), uma detecção direta de partículas da matéria escura não foi possível até agora.

6.2 O modelo padrão

Existe um modelo, o modelo Λ CDM (o Λ representa a constante cosmológica nas equações (2), (6) e (7), CDM significa Cold Dark Matter (matéria escura fria)) que é muito bem sucedido na explicação de grande parte dos dados observacionais cosmológicos disponíveis, o que o elevou ao status de modelo cosmológico padrão. Do ponto de vista teórico, um problema maior já mencionado é a natureza ainda desconhecida da matéria escura, que requer partículas fora do modelo padrão das partículas elementares (áxions, neutralinos, etc.), que não foram ainda detectadas em aceleradores de partículas. Da mesma forma, a energia escura, representada pela constante cosmológica, é interpretada como uma manifestação do vácuo quântico. No entanto, existe uma discrepância de muitas dezenas de ordens de grandeza entre o valor estimado teoricamente e o valor observado.

Um outro problema que aflige o modelo Λ CDM é conhecido como sendo o da coincidência cósmica. A energia escura deste modelo tem uma densidade da energia constante, enquanto a densidade da matéria escura decresce, à medida que o Universo expande, com o inverso do cubo do fator de escala (veja-se a discussão após equação (7)). Apesar deste comportamento temporal bastante distinto, essas duas componentes exóticas possuem valores semelhantes a partir do desvio para o vermelho cosmológico $z \sim 1$: isto pode ser considerado como sendo o momento atual, no espaço dos z 's. Dada a possibilidade de que as densidades da energia dessas componentes poderiam ser bem diferentes, isso pode gerar a impressão de que estamos vivendo numa época muito es-

pecial. Uma discussão detalhada deste problema pode ser encontrada na Ref. [6].

De todo modo, a natureza da matéria escura e da energia escura (o candidato mais natural é a constante cosmológica, cujo valor preciso ainda não é compreendido) é desconhecida e virou objeto de intensos estudos em todo o mundo, tanto do ponto de vista teórico quanto observacional.

Para resumos da situação teórica depois das observações de [5, 7, 8] veja, por exemplo, [9–13].

6.3 Abordagens alternativas

Os problemas abertos no entendimento do setor escuro provocaram abordagens alternativas tanto dentro como fora da teoria de Einstein.

6.3.1 Teorias escalares tensoriais

Existe uma linha de pesquisa que tenta atribuir os fenômenos descritos através de um setor escuro à geometria do Universo. Em vez de introduzir componentes materiais não conhecidas, como energia escura e/ou matéria escura, no tensor de energia-momento no lado direito das equações de Einstein, nestas abordagens é o lado esquerdo, descrevendo a geometria, que é modificado. Ou seja, a lei de gravitação de Einstein é alterada nas grandes escalas. As modificações mais investigadas são teorias escalares tensoriais nas quais um campo escalar entra na dinâmica gravitacional adicionalmente ao tensor métrico. O protótipo desta classe é a teoria de Jordan-Brans-Dicke (Pascual Jordan, 1902 – 1980, Carl H. Brans, nascido em 1935, Robert H. Dicke, 1916 – 1997).

6.3.2 Contrarreação cinemática

Outra linha de pesquisa generaliza o princípio cosmológico, mas fica dentro da teoria de Einstein. Aqui o fundo cosmológico aparece como o resultado de uma média espacial sobre as inhomogeneidades. Como as equações de Einstein são não lineares, a média de tensor de Einstein (a combinação $R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} R g_{\alpha\beta}$ na equação (2)) não coincide com o tensor de Einstein da métrica média. Aparecem termos de uma contrarreação cinemática (*kinematical backreaction*) no equivalente das equações de Friedmann que modificam a dinâmica do fundo do modelo padrão [14]. Sob certas condições, os efeitos de contrarreação cinemática podem ser modelados como fluidos efetivos e campos escalares efetivos, possivelmente

⁶www.xenon1t.org/.

com pressão negativa o que é importante para descrever a expansão acelerada observada. Isso abre o caminho para estudar a dinâmica cosmológica com métodos já conhecidos, mas num contexto teórico mais avançado, que poderia fazer supérfluo a introdução da energia escura. Atualmente prevalece a opinião que uma contrareação deste tipo não é suficiente para substituir a energia escura.

6.4 Perspectivas

Um número de projetos recentes foi crucial em acumular dados para confrontar as observações, sobretudo de fundo de radiação cósmica em micro-ondas e da distribuição da matéria cósmica, com os modelos teóricos. Para o fundo de micro-ondas tem-se os projetos WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)⁷, um satélite da NASA e PLANCK,⁸ um satélite da ESA (European Space Agency), que forneceram informações abundantes que viraram referências padrões para qualquer estudo na área. No que se refere à distribuição da matéria no Universo, o nosso conhecimento atual vem dos catálogos de galáxias. O SDSS (Sloan Digital Sky Survey) está coletando espectros de mais de três milhões objetos astronômicos. Outro projeto atual é o DES (Dark Energy Survey),⁹ dedicado especialmente ao problema de energia escura que já monitorou 300 milhões de galáxias. O projeto DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument)¹⁰ visa medir posições e velocidades de 40 milhões galáxias. O telescópio espacial EUCLID,¹¹ com lançamento previsto para 2022, vai investigar a expansão do Universo até valores de desvio para o vermelho $z \approx 2$, o que é equivalente a olhar para trás no tempo por 10 bilhões anos.

Espera-se que todos esses e outros projetos, em andamento ou planejados, ajudem a esclarecer os problemas fundamentais ainda em aberto no momento:

- O que é a matéria escura?
- O que é a energia escura?
- A teoria de Einstein está correta?

⁷map.gsfc.nasa.gov/.

⁸www.cosmos.esa.int/web/planck.

⁹www.darkenergysurvey.org/.

¹⁰www.desi.lbl.gov/the-desi-survey/.

¹¹sci.esa.int/web/euclid.

Sobre o autor

Winfried Zimdahl (winfried.zimdahl@gmail.com) é pesquisador do núcleo Cosmo-ufes e um dos fundadores do PPGCosmo. Doutorou-se pela Universidade de Rostock, Alemanha, em 1975, com uma tese sobre física estatística. Autor de quase cem artigos científicos, foi citado recentemente na lista dos pesquisadores mais influentes do mundo, elaborada pela Universidade de Stanford (EUA). Desenvolve pesquisas em cosmologia e gravitação, com especial ênfase nos estudos do setor escuro do Universo. Orientou mais de uma dezena de estudantes de mestrado e doutorado.

Referências

- [1] G. F. R. Ellis, *The Domain of Cosmology and the Testing of Cosmological Theories*, in *The Philosophy of Cosmology*, editado por S. Saunders, J. Silk, J. D. Barrow e K. Chamcham (2018), 3.
- [2] E. A. Milne, *A newtonian expanding universe*, *The Quarterly Journal of Mathematics* **os-5** (1), 64 (1934).
- [3] W. H. McCrea e E. A. Milne, *Newtonian universes and the curvature of space*, *The Quarterly Journal of Mathematics* **os-5** (1), 73 (1934).
- [4] J. Martin, C. Ringeval, R. Trotta e V. Venin, *The best inflationary models after planck*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2014** (03), 039 (2014).
- [5] A. G. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, *Astro. J.* **116** (3), 1009 (1998).
- [6] H. E. S. Velten, R. F. vom Marttens e W. Zimdahl, *Aspects of the cosmological "coincidence problem"*, *Eur. Phys. J. C* **74** (11), 3160 (2014).
- [7] N. A. Bahcall, *The cosmic triangle: Revealing the state of the universe*, *Science* **284** (5419), 1481 (1999).

- [8] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber et al., *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae*, *Astrophys. J.* **517** (2), 565 (1999).
- [9] N. Straumann, *On the cosmological constant problems and the astronomical evidence for a homogeneous energy density with negative pressure*, arXiv: astro-ph/0203330 (2002).
- [10] T. Padmanabhan, *Cosmological constant—the weight of the vacuum*, *Physics Reports* **380** (5-6), 235 (2003).
- [11] E. J. Copeland, M. Sami e S. Tsujikawa, *Dynamics of dark energy*, *International Journal of Modern Physics D* **15** (11), 1753 (2006).
- [12] T. Padmanabhan, *Dark energy and gravity*, *General Relativity and Gravitation* **40** (2-3), 529 (2007).
- [13] R. Durrer e R. Maartens, *Dark energy and dark gravity: theory overview*, *General Relativity and Gravitation* **40** (2), 301 (2008).
- [14] T. Buchert, *Toward physical cosmology: focus on inhomogeneous geometry and its non-perturbative effects*, *Classical and Quantum Gravity* **28** (16), 164007 (2011).