

O DILEMA DA MATÉRIA, A ENERGIA ESCURA E A EXPANSÃO DO
UNIVERSO: ALGUNS FATOS EXPERIMENTAIS RELEVANTES

*The dilemma of Matter, Dark Energy, and the Expansion of the Universe: some relevant
experimental facts*

Juan Alberto Leyva-Cruz^{1*} e Carlos Eduardo M. Batista²

¹Laboratório de Instrumentação em Física - LINFIS, Departamento de Física, Universidade Estadual de
Feira de Santana-UFES, Feira de Santana, BA 44031-460, Brasil, *E-mail: juan@uefs.br.

²Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana-UEFS, Feira de Santana, BA 44031-
460, Brasil, E-mail: cedumagalhaes@uefs.br

Neste trabalho apresentamos uma breve revisão sobre a composição do Universo. Discutimos assuntos sobre o dilema entre a matéria e a energia escuras e sua importância na expansão do Universo atual. Apesar de sabermos que a verdadeira natureza da matéria e energia escuras ainda são desconhecidas, apresentamos alguns fatos relevantes experimentais no sentido das observações astronômicas, que “mostram” evidências de sua existência. Dessas observações e de acordo com modelo padrão Λ CDM, os cosmólogos consideram que a idade do Universo é de 13.82 bilhões de anos, o conteúdo massa e energia do universo é 5 % de matéria comum (ou bariônica), 26.8 % de matéria escura e 68.2 % de energia escura. Assim, a energia escura e a matéria escura constituem 95 % do conteúdo total de massa-energia, e responsável pela taxa de expansão acelerada do Universo (constante de *Hubble*) de 67.15 km/s/Mpc , contrabalançando a força da gravidade.

Palavras-chaves: Universo, Big Bang, Matéria Escura, Energia Escura, Cosmologia.

In this work we present a brief review of the composition of the Universe. We discussed topics about the dilemma between dark matter and dark energy and their importance in the expansion of the current Universe. Although we know that the true nature of dark matter and dark energy are still unknown, we present some relevant experimental facts in the sense of astronomical observations, which “show” evidence of their existence. From these observations and according to the standard Λ CDM model, cosmologists consider that the age of the Universe is 13.82 billion years, the mass and energy content of the universe is 5 % ordinary (or baryonic) matter, 26.8 % dark matter and 68.2 % dark energy. Thus, dark energy and dark matter constitute 95 % of the total mass-energy content and are responsible for the accelerated expansion rate of the Universe (*Hubble* constant) of 67.15 km/s/Mpc , counterbalancing the force of gravity.

Keywords: Universe, Big Bang, Dark Matter, Dark Energy, Cosmology.

INTRODUÇÃO

Nós humanos desde os primórdios de nossa existência até hoje, quando observamos o céu noturno em qualquer direção, somos capturados pela indescritível beleza das estrelas e suas constelações. Esa beleza têm despertado a nossa curiosidade até levarmos à fazermos algumas perguntas que até hoje ainda não conhecemos as respostas certas, por exemplo, quais os detalhes da origem de essas estrelas, de onde viemos?, para onde iremos?, e para que existimos?. Temos direito de fazermos esses questionamentos porque somos habitantes do terceiro planeta, a Terra, do sistema planetário solar, e existimos graças a nossa grande estrela o Sol. Na realidade essas perguntas nós conduzem até o próprio conceito de Universo, que podemos imaginar como se fosse um livro gigante que não sabemos quem é o autor ou autores, e o desafio de lê-lo e entender as suas entrelinhas,

nós darão as repostas certas a todas essas perguntas. Para tentar conhecermos melhor o que é o Universo e os desafios que nós impõe, vamos fazer uma viagem.

Imaginemos que podemos viajar mais além do que hoje conhecemos de Universo observável. Em nosso destino, ao comprar a passagem de volta, teríamos que escolher o endereço de nossa casa, certamente de forma muito diferente da nossa direção postal atual. A uma distância talvez maior que 93 bilhões de anos-luz (diâmetro aceito do Universo observável), para chegar em casa, então devemos dar o endereço aproximadamente da seguinte forma. Nome, Casa x, Bairro, Cidade, Estado, País, Planeta Terra, Sistema Solar, Braço de Órion, Via Láctea, Grupo Local, Superaglomerado Virgem, Complexo de Superaglomerados Peixes-Baleia, Universo Observável. Podemos dizer que em nossa volta impossível devemos viajar por tudo o que existe fisicamente, incluindo o espaço o tempo, através das maiores estruturas da teia cósmica como o filamento de galáxia, da qual o Complexo de Superaglomerados de Galáxias Peixes-Baleia faz parte. Para seguir a viagem no espaço intergaláctico, passaríamos por Superaglomerados de Galáxias, por Aglomerados de Galáxias, até chegarmos a nossa Galáxia a Via Láctea. Prosseguiríamos viagem até um de seus braços espirais, o Braço de Órion e de lá atravessando uma Nuvem Interestelar passamos pelo Sistema Solar até arribamos ao Planeta Terra onde habitamos. Finalmente, desde qualquer ponto do planeta, de pose da direção postal podemos facilmente chegar em casa de Uber. O conjunto de lugares ou estruturas cósmicas por onde viajamos de volta é quase o que conhecemos hoje como o Universo constituído de matéria bariônica (se refere a todo o material composto principalmente de prótons, nêutrons e elétrons). Para uma compreensão, mas completa do Universo atual, também é necessário consideramos a existência das misteriosas chamadas matéria e energias escuras. A dinâmica de todos estes objetos cósmicos obedece a gravitação. A ciência que estuda essas megas estruturas é chamada de Cosmologia, da qual fazem parte principalmente Físicos, Astrofísicos, Astrônomos etc.

A teoria atual da cosmologia que melhor explica a criação (desde os primeiros 10^{-44} segundos, chamado de tempo de Planck) e evolução de nosso Universo até os dias atuais é o modelo do Big Bang [1]-[2]. Esta teoria física afirma que o Universo se formou a partir de um estado extremamente quente e denso, na qual flutuações quânticas deram o ponta pé inicial para a constante criação do espaço tempo, todas as formas de matéria e energia que até hoje se estão expandindo. O modelo baseia-se na famosa teoria da relatividade geral de Einstein, a qual considera o Universo homogêneo e isotrópico. Vários outros modelos surgiram nos últimos 100 anos a fim de generalizar a relatividade geral ou até mesmo confrontá-la. O modelo padrão Λ CDM consiste em adicionar uma constante cosmológica à equação de Einstein original. O modelo é de grande aceitação, pois é capaz de prever a aceleração do universo a partir de um efeito antigravitacional promovido pela constante cosmológica. A constante cosmológica é responsável por uma força repulsiva proporcional à distância [3].

O Big Bang possui três alicerces que a sustentam por meio das observações astronômicas usando principalmente, os telescópios espaciais *Hubble*, *Webb* e o satélite *Planck*, estas são: (1) o desvio para o vermelho das galáxias ou *redshift* cosmológico,

quanto maior o desvio para o vermelho, maior será a distância que a luz percorreu, (2) a radiação cósmica de fundo de microondas, e (3) a nucleossíntese estelar.

Desde a época de Planck, o Universo vem se expandindo para sua forma atual e o faz, a uma velocidade de 74 quilômetros por segundo por megaparsecs (Mpc), de acordo com as últimas estudos. A energia escura é uma forma hipotética de energia que estaria distribuída por todo espaço e responsável por acelerar a expansão do Universo [21].

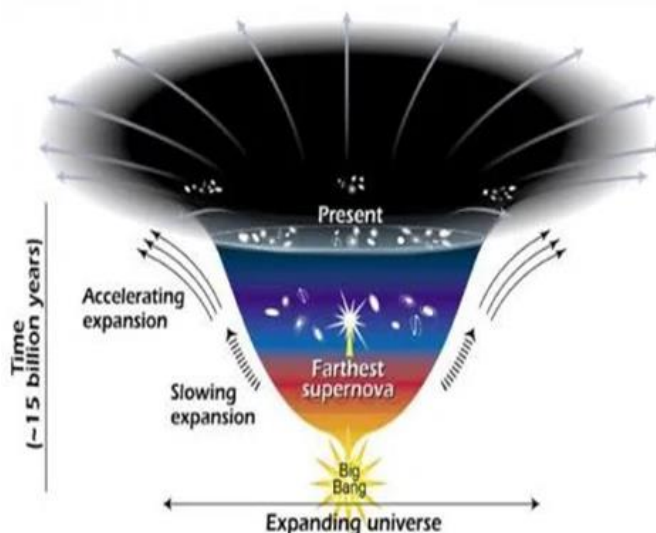


Figura 1: Representação do Universo em expansão. Crédito: NASA/STSci/Ann Feild. [4].

Na Figura 1 mostramos o diagrama que revela mudanças na taxa de expansão desde o nascimento do Universo, há 15 mil milhões de anos. Quanto mais superficial for a curva, mais rápida será a taxa de expansão. A curva mudou visivelmente há cerca de 7,5 mil milhões de anos, quando os objetos no Universo começaram a separar-se a um ritmo mais rápido [4]. Das observações astronômicas e de acordo com modelo padrão Λ CDM, os cosmólogos consideram que o conteúdo massa e energia do universo é 5% de matéria comum (ou bariônica), 26.8% de matéria escura e 68.2% de energia escura. Assim, a energia escura e a matéria escura constituem 95% do conteúdo total de massa-energia, e constituem a causa da expansão acelerada do universo, contrabalançando a força da gravidade [21].

Neste trabalho faremos uma revisão sobre os conceitos de energia, matéria escura, sua relação com a expansão do Universo, mostrando alguns fatos ou observações astronômicas relevantes.

MATÉRIA ESCURA

Por mais de sete décadas [5] a matéria escura tem sido postulada para explicar as grandes velocidades de partículas (estrelas e gases) na periferia das galáxias (formando uma curva de rotação plana a poucos kiloparsecs do centro, onde $1\text{pc} \approx 3.26$ anos luz), mantendo para isso a gravitação Newtoniana intacta. A noção de matéria escura vai desde sistemas constituídos por galáxias anãs esferóides com massa aproximadamente de 10^7 massas solares até grandes agrupamentos de galáxias detentoras de massa na faixa de 10^{14}

massas solares [6]-[7]. De acordo com as medidas de supernovas tipos Ia e da anisotropia da radiação de fundo, cerca de 1/3 da densidade de energia do universo deveria estar na forma de matéria escura e bariônica e os outros 2/3 em um universo plano seria devido a uma componente pouco conhecida denominada energia escura [8]-[9]. Em um universo plano, a contribuição da densidade de energia da matéria bariônica seria aproximadamente 5% e a da não bariônica 25%. A maior parte da matéria não visível estaria na forma não bariônica. Inicialmente supôs-se que toda matéria escura estaria na forma de neutrinos, entretanto hoje é sabido que isso não seria possível se sua massa estiver em torno de 0.05 eV; neste caso a razão entre a densidade de energia dos neutrinos e a densidade de energia total do universo para curvatura nula é dado por $\Omega_\nu = \rho_\nu / \rho_c \approx 10^{-3}$ [9]. Se a matéria escura fosse composta de neutrinos apenas, a massa dos neutrinos deveria estar em torno de 30 – 70 eV para valores razoáveis da constante de Hubble. Experimentos realizados por Mains e Troisk [7] mostraram que o limite máximo para a massa dos neutrinos seria de aproximadamente 2.2 – 2.5 eV. Por este ponto de vista, os neutrinos não poderiam ser a componente dominante da matéria escura.

Segundo a referência [10], o universo seria bem diferente do observado caso os neutrinos dominassem a matéria escura. Historicamente a ideia de matéria escura surgiu em 1933 quando Zwicky [3] percebeu que as velocidades das galáxias individuais dentro do aglomerado de Coma eram grandes, e este aglomerado só poderia estar gravitacionalmente ligado se a massa total do aglomerado fosse superior à soma das massas das galáxias individuais. Parte da matéria não luminosa nos aglomerados de galáxias estaria em torno das galáxias, região denominada halo, enquanto outra parte estaria distribuída em outras regiões.

Ao se observar o gráfico da velocidade de uma partícula teste (estrela) em função de sua distância ao centro da galáxia (geralmente espiral), gráfico também chamado de curva de rotação, percebe-se que ao invés da velocidade decair nas regiões onde a luz emitida pela galáxia cessa, ela se torna aproximadamente constante. Isso só poderia ser possível caso fosse postulado a existência de uma componente invisível de matéria, com características diferentes da bariônica. Por exemplo, a massa bariônica é proporcional ao cubo do raio, $m_b(r) \propto r^3$ admitindo densidade constante, enquanto a massa não bariônica seria proporcional ao raio, $m_D(r) \propto r$ a fim de explicar as curvas planas de rotação de galáxias. Não se sabe quase nada a respeito desta componente, e existem modelos que preferem mudar a gravidade e manter apenas a matéria luminosa das galáxias. A distribuição da matéria escura nas galáxias e nos aglomerados de galáxias é bem diferente [1]. Nas galáxias a matéria escura aumenta proporcionalmente com a distância ao centro. Nos aglomerados de galáxias, a medida do forte desvio da luz por estes aglomerados de galáxias indica que neles a matéria escura está fortemente concentrada em uma região central de raio aproximadamente igual a 0.2 a 0.3 Mpc. A matéria não luminosa também pode ser composta por matéria bariônica não detectada, já que podem existir estruturas como planetas gigantes e estrelas afastadas que não seriam capazes de emitir quantidade de luz suficiente para serem observadas. Uma característica da matéria escura não bariônica, é que ela não interage com as ondas eletromagnéticas e,

por isso não pode ser detectada observando fótons nas várias frequências. A maior parte da matéria bariônica nos aglomerados de galáxias está na forma de gases quentes emitindo raio X [10].

Contudo, nenhuma evidência direta foi encontrada para supor a existência de matéria escura, apesar dos inúmeros esforços. A postulação da matéria escura visa manter a relatividade geral intacta para explicar as lentes gravitacionais e reproduzir as curvas planas de rotação de galáxias. As curvas de rotação de galáxia são vistas como sendo planas além da região dominada pela matéria luminosa. O problema é explicar por que isto acontece. Se mantivermos a relatividade geral (G.R) na sua forma original, então uma certa quantidade de matéria escura deve existir em torno das galáxias. É principalmente nas galáxias espirais que as curvas ficam planas, enquanto nas elípticas a curva tende a declinar como se fosse composta por apenas matéria visível. Medir a massa de uma galáxia através de métodos dinâmicos significa detectar efeitos gravitacionais da massa desta galáxia de uma forma ou de outra. Pela terceira lei de Kepler tem-se:

$$GM(r) = V^2 r \quad (1)$$

onde V é a velocidade orbital da partícula teste (por exemplo uma estrela ao redor da galáxia), e $M(r)$ é a massa da galáxia no interior do raio r [10]. Atualmente,

$$\Omega_{LUM} \approx 0.04 \quad (2)$$

$\Omega_T = \sum_i \Omega_i = 1$, onde i designa cada componente, e representa a componente luminosa LUM . Continuando a utilizar a dinâmica Newtoniana para além da região visível, através da medida da linha dos 21 cm emitida pelo hidrogênio neutro, deveria surgir uma queda na curva do gráfico velocidade orbital no eixo Y vs a distância do centro da galáxia no eixo x [9,10]. Porém não é o que os astrônomos observam, isto é, observa-se uma curva plana a partir da periferia da galáxia, que é justamente onde cessa sua componente visível, como ilustra a Figura 2 [12].

Então uma saída foi manter a gravidade convencional e introduzir uma componente não visível de matéria. O resultado foi uma componente com massa cerca de 10 vezes o valor da massa luminosa, que estaria localizada em torno da região visível da galáxia, região denominada halo. Portanto,

$$\Omega_H \approx 0.1 \quad (3)$$

A ideia da matéria escura nas galáxias é capaz de explicar duas questões. Em primeiro lugar as mencionadas curvas planas de rotação baseando-se na dinâmica Newtoniana e em segundo lugar compreender o motivo do forte desvio da luz nas periferias das galáxias a partir da relatividade geral, o conhece efeito de lente gravitacional (LG) que se refere a deflexão da luz pelo campo gravitacional da distribuição de matéria no Universo. Este último é uma das comprovações experimentais aceita da GR [12].

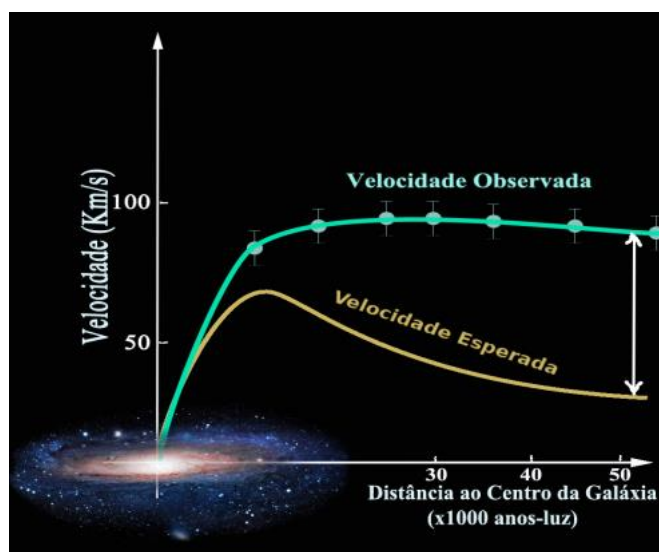


Figura 2: Curva de rotação de uma galáxia espiral. “A diferença entre a curva superior (onde estão os dados) e a inferior teórica pode ser explicada pela presença de uma componente invisível que interage apenas gravitacionalmente”, extraída de [12]

Nas periferias e nas regiões das galáxias espirais onde não há mais matéria luminosa, as medidas são realizadas a partir da observação de estrelas raras ou medindo o efeito Doppler na linha dos 21 *cm* emitido pelo hidrogênio neutro (HI) que se encontra na forma de gás [11]. A partir dos dados obtidos plota-se o gráfico da velocidade da partícula teste em torno da galáxia em função da distância ao centro da galáxia, e o resultado é uma velocidade relativamente constante da partícula teste na região onde não há mais matéria luminosa. Introduzindo-se uma certa quantidade de matéria escura em torno da região visível da galáxia e mantendo-se a dinâmica Newtoniana, obtém-se a observada velocidade constante na região onde a luz da galáxia cessa. O halo é suposto dominar o campo gravitacional na parte exterior da galáxia, e na prática a noção de halo só funciona após um ajuste fino [3]. Também é observado que as curvas de rotação começam a se tornar planas a partir de cerca de 10Kpc do centro da galáxia. Ainda na região plana, a velocidade da partícula teste em galáxias espirais é em torno de 200 – 300 *km/s* [13].

ENERGIA ESCURA

As observações do Telescópio Espacial Hubble (HST) de supernovas muito distantes mostraram que, há muito tempo, o Universo estava na verdade a expandir-se mais lentamente do que é hoje. Portanto, a expansão do universo não tem diminuído devido à gravidade, como todos pensavam, tem sido acelerada. Ninguém esperava isso, ninguém sabia como explicar. Mas algo estava causando isso.

Eventualmente, os teóricos surgiram com três tipos de explicações. Talvez tenha sido o resultado de uma versão há muito descartada da teoria da gravidade de Einstein, que continha o que foi chamado de “constante cosmológica”. Talvez houvesse algum tipo estranho de fluido energético que preenchia o espaço. Talvez haja algo errado com a teoria

da gravidade de Einstein e uma nova teoria poderia incluir algum tipo de campo que cria esta aceleração cósmica. Os teóricos ainda não sabem qual é a explicação correta, mas deram um nome à solução. É chamada de energia escura.

Há várias indicações de que o universo é plano, isto é, $\Omega_0 = 1$. De acordo com a inflação este valor deve ser o correto, no entanto existem outras formas de confirmação. Existe outro método, que consiste em relacionar o número de galáxias contadas em função do redshift z [13], que também prevê o valor unitário para Ω_0 . As medidas da anisotropia da radiação e fundo associada às observações das supernovas tipo Ia com alto redshift [14] também fazem previsões de que a densidade de energia da matéria corresponde a aproximadamente 1/3 e os outros 2/3 a uma componente exótica de propriedades ainda não bem conhecidas e, por isso chamada de energia escura.

Estas observações também sugerem que o universo deve estar numa fase de aceleração. Em 1998, dois grupos observando supernovas informaram evidência direta da energia escura a qual é responsável pela aceleração do universo [10]. A evidência é baseada na diferença entre a distância luminosa de um universo dominado por matéria escura e outro dominado por energia escura. A distância luminosa é maior em um universo dominado por energia escura e, por isso objetos com brilho fixo aparecerão mais fracos em um universo dominado por energia escura do que em um composto exclusivamente por matéria [10]. Devido as supernovas tipo Ia serem bastante brilhantes, elas se tornam ideais para estudar as propriedades do universo a grandes distâncias [3]. Em um universo plano dominado exclusivamente pela matéria ($\Omega_m = 1$), a distância luminosa para $z = 0.83$ é igual a $0.95 H_0^{-1}$, enquanto em um universo dominado pela energia escura, $\Omega_\Lambda = 0.7$ e $\Omega_m = 0.3$, a distância luminosa passa a ser igual a $1.23 H_0^{-1}$. O primeiro caso, que consiste em um universo dominado somente pela matéria pode ser excluído com confiança [10].

O exemplo mais simples de energia escura, é o da constante cosmológica introduzido por Einstein em 1917. O objetivo inicial era bastante diferente do de hoje. Einstein tinha suposto um universo estático, e para não haver colapso gravitacional, ele introduziu uma constante cosmológica com efeito antigravitacional. Com a descoberta de que o universo se expandia, ela perdeu seu sentido e desapareceu. Contudo, ao se descobrir posteriormente que o universo estava acelerando, a constante cosmológica foi novamente aproveitada, a fim de reintroduzir o efeito antigravitacional.

A indicação de que o universo está acelerando provém de dados das supernovas tipo Ia e medidas da anisotropia de radiação de microondas de fundo [10]-[15], e esta expansão acelerada é responsável pelas supernovas serem vistas de forma muito fraca, que só pode ser causada por uma energia escura com pressão negativa. Pressão negativa é algo que não nos é familiar; matéria não relativística pode ter uma pequena pressão e é positiva, e no caso da radiação $p = +\rho/3$ que é novamente positiva [10]. Na relatividade geral de Einstein temos:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{-4\pi G}{3}(\rho + 3p) \quad (4)$$

A partir desta equação, vê-se claramente que $\ddot{a} = 0$ somente se radiação $p = -\rho/3$, isto é, o universo começa a acelerar a partir de $p < -\rho/3$, com pressão obviamente negativa já que a densidade de energia é sempre positiva.

A presença de pressão negativa também aparece na inflação, período em que o termo cinético em, $\rho_\phi = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi)$ é desprezado e sobra apenas o potencial $V(\phi)$, originando $\rho_\phi = -p_\phi = V(\phi)$. A variável ϕ é o campo escalar.

O primeiro candidato que surgiu para representar esta desconhecida forma de energia foi a constante cosmológica, consistindo no modelo Λ CDM. Variações surgiram com uma ‘variável constante cosmológica’. Atualmente existem vários candidatos que solucionam um problema e deixam outros em aberto, entre eles estão o modelo Λ CDM, quintessência, o caso fantasma, a K-essence, branas, gás de Chaplygin, cordas cósmicas [16] etc.

OBSERVAÇÕES RELEVANTES SOBRE MATERIA E ENERGIA ESCURA

A matéria escura, que compreende 85% da massa do universo, é invisível porque não interage com a luz. De acordo com a Física já se sabe quanta energia escura existe porque sabemos como ela afeta a expansão do universo. A sua existência se faz necessária para ajustar as observações. Mas, é imperativo fazermos a seguinte pergunta, quais são as evidências experimentais, aqui podemos entender isto como as análises das observações astronômicas, de que a energia escura existe? Para começar vamos descrever algumas destas evidências.

Observações do DES

Em um estudo recente [17] DES estudou galáxias próximas, bem como aquelas a milhares de milhões de anos-luz de distância, os seus mapas fornecem tanto um instantâneo da atual estrutura em grande escala do Universo como uma visão de como essa estrutura evoluiu ao longo dos últimos 7 mil milhões de anos, ver Figura 3.



Figura 3. Imagem de campo profundo de galáxias e ajudando a determinar sua distribuição 3-D no cosmos. Foto: Dark Energy [17].

Para quantificar a distribuição da matéria escura e o efeito da energia escura, o DES baseou-se principalmente em dois fenômenos. Primeiro, em grandes escalas, as galáxias não estão distribuídas aleatoriamente pelo espaço, mas formam uma estrutura semelhante a uma teia que se deve à gravidade da matéria escura. O DES mediu como esta teia cósmica evoluiu ao longo da história do Universo. O aglomerado de galáxias que forma a teia cósmica, por sua vez, revelou regiões com maior densidade de matéria escura [17].

Em segundo lugar, o DES detectou a assinatura da matéria escura através de lentes gravitacionais fracas. À medida que a luz de uma galáxia distante viaja através do espaço, a gravidade da matéria comum e escura em primeiro plano pode desviar o seu caminho, como se fosse através de uma lente, resultando numa imagem distorcida da galáxia vista da Terra. Ao estudar como as formas aparentes das galáxias distantes estão alinhadas entre si e com as posições das galáxias próximas ao longo da linha de visão, os cientistas do DES foram capazes de inferir a aglomeração da matéria escura no Universo [17]. A matéria comum representa apenas cerca de 5% do universo. A energia escura, que os cosmólogos assumem como impulsionadora da expansão acelerada do universo, contrabalançando a força da gravidade, é responsável por cerca de 70%. Os últimos 25% são a matéria escura, cuja influência gravitacional une galáxias [17]

Aglomerado de galáxias em fusão Abell 520

Na figura 4 mostramos uma imagem composta da distribuição de matéria escura, nas galáxias e gás quente no núcleo do aglomerado de galáxias em fusão Abell 520 [18], formado a partir de uma colisão violenta de aglomerados de galáxias massivos. O resultado pode representar um desafio para as teorias básicas da matéria escura.

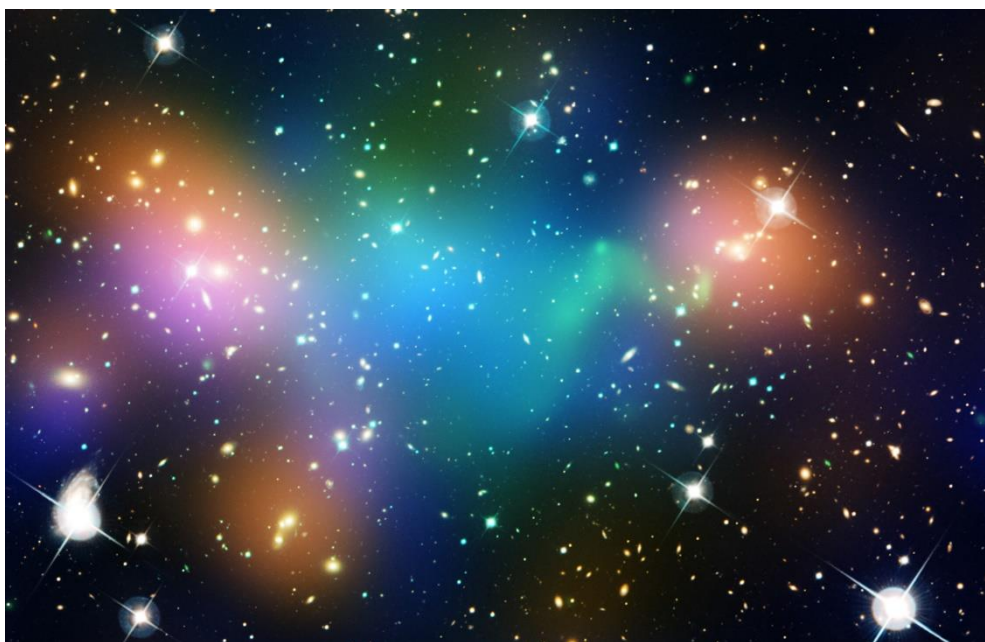


Figura 4. Imagem da distribuição de matéria escura, nas galáxias e gás quente no núcleo do aglomerado de galáxias em fusão Abell 520, extraída de [18].

Na Figura anterior, a imagem em cores naturais das galáxias foi obtida com o Telescópio Espacial Hubble da NASA e com o Telescópio Canadá-França-Havaí, no Havaí. Sobrepostos à imagem estão mapas de “cores falsas” que mostram a concentração de luz estelar, gás quente e matéria escura no aglomerado. A luz das estrelas das galáxias, derivada de observações do Telescópio Canadá-França-Havaí, é de cor laranja. As regiões de cor verde mostram gás quente, conforme detectado pelo Observatório de Raios-X Chandra da NASA. O gás é evidência de que ocorreu uma colisão. As áreas azuis identificam a localização da maior parte da massa no aglomerado, que é dominado pela matéria escura [18].

O mapa da matéria escura foi derivado das observações da Câmera Planetária de Campo Amplo 2 do Hubble, detectando como a luz de objetos distantes é distorcida pelo aglomerado de galáxias, um efeito chamado lente gravitacional. A mistura de azul e verde no centro da imagem revela que um aglomerado de matéria escura reside perto da maior parte do gás quente, onde são encontradas muito poucas galáxias. Esta descoberta confirma observações anteriores de um núcleo de matéria escura no aglomerado. O resultado pode representar um desafio às teorias básicas da matéria escura, que prevêm que as galáxias deveriam estar ancoradas na matéria escura, mesmo durante o choque de uma colisão [18].

Abell 2744: Cluster de Pandora revelado

Uma das colisões mais complicadas e dramáticas entre aglomerados de galáxias já vistas é capturada nesta nova imagem composta de Abell 2744. O azul mostra um mapa da concentração total de massa (principalmente matéria escura), como ilustra a Figura 5.

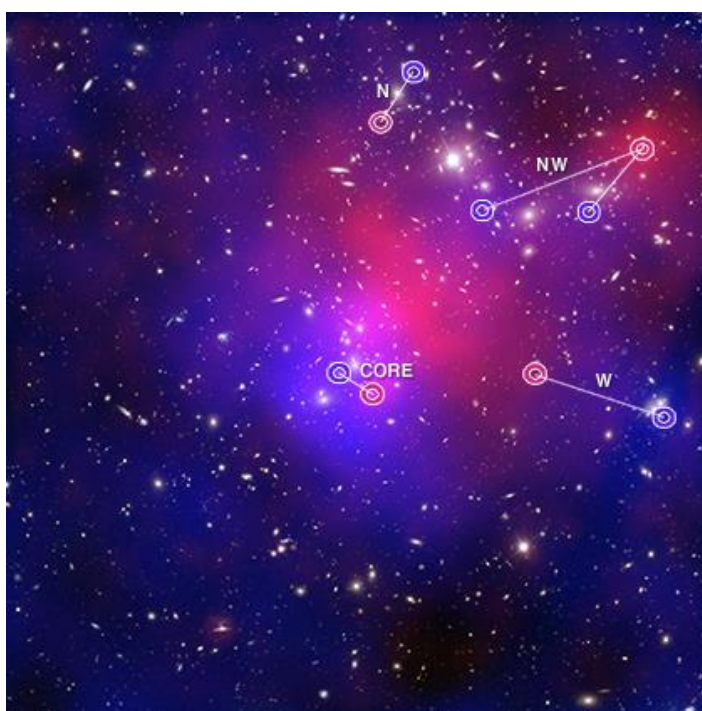


Figura 5. Imagem do aglomerado de Pandora de composta de Abell 2744, extraída de [19].

Na Figura 5 podemos ver o local de colisão, conhecido oficialmente como Abell 2744, foi apelidado de "Aglomerado de Pandora" devido à grande variedade de diferentes estruturas vistas. Os dados do Observatório de Raios-X Chandra da NASA são coloridos em vermelho, mostrando gases com temperaturas de milhões de graus. Em azul está um mapa que mostra a concentração total de massa (principalmente matéria escura) com base em dados do Telescópio Espacial Hubble (HST), do Very Large Telescope (VLT) do Observatório Europeu do Sul e do telescópio japonês Subaru. Os dados ópticos do HST e do VLT também mostram as galáxias constituintes dos aglomerados [19].

A região do "núcleo" mostra uma estrutura em forma de bala no gás quente emitindo raios X e uma separação entre o gás quente e a matéria escura. (Como orientação, os picos locais na distribuição de gás quente e matéria global nas diferentes regiões são mostrados com círculos vermelhos e azuis, respectivamente). Esta separação ocorre porque as forças elétricas entre as partículas em colisão nas nuvens de gás quente criam uma fricção que as abrandam, enquanto a matéria escura não é afetada por tais forças. Na região Noroeste ("NW"), observa-se uma separação muito maior entre o gás quente e a matéria escura. Surpreendentemente, o gás quente está à frente do aglomerado "escuro" (principalmente matéria escura) em cerca de 500.000 anos-luz. Esta configuração incomum pode exigir um cenário de estilingue, como sugerido anteriormente pelos cientistas, para lançar o gás quente à frente da matéria escura durante uma interação anterior. No Norte ("N") e no Oeste ("W") podem ser visíveis dois exemplos adicionais de gás quente separado da matéria escura. Este último parece exibir a maior separação observada até agora entre o gás quente e a matéria escura [19].

Galáxia "fantasmagórica" NGC 1052-DF2

Os investigadores ficaram surpresos quando descobriram a galáxia NGC 1052-DF2, que carece da maior parte, se não de toda, a sua matéria escura. Esperava-se que a galáxia contivesse 400 vezes mais matéria escura do que as observações mostram. A maioria das galáxias são estruturas majestosas em espirais como a nossa Via Láctea, com um centro galáctico extremamente brilhante. Mas outras a pesar de serem grandes têm tão poucas estrelas para o seu tamanho que parecem muito tênues e difusas, parecendo bolas de algodão gigantes [20].

As observações feitas pelo Telescópio Espacial Hubble da NASA de uma dessas galáxias revelaram que continham pouca ou nenhuma matéria escura, a estrutura subjacente sobre a qual as galáxias são construídas. A galáxia chamada NGC 1052-DF2, apelidada de galáxia "fantasmagórica" contém no máximo 1/400 da quantidade de matéria escura que os astrônomos esperavam. Como se formou é um mistério completo. O excêntrico galáctico é tão grande quanto a nossa Via Láctea, mas a galáxia escapou à atenção porque contém apenas 1/200 do número de estrelas da nossa galáxia. Com base nas cores dos seus aglomerados globulares, NGC 1052-DF2 tem cerca de 10 mil milhões de anos. Ele reside a cerca de 65 milhões de anos-luz de distância da terra, uma foto desta galáxia pode ser vista na figura 6 [20]. A galáxia fantasmagórica não possui uma região central perceptível, nem mesmo braços espirais e um disco, características típicas de uma galáxia espiral. Mas também não parece uma galáxia elíptica. A galáxia também não

mostra nenhuma evidência de que abrigue um buraco negro central. Até mesmo os aglomerados globulares são estranhos: eles são duas vezes maiores que os agrupamentos estelares típicos vistos em outras galáxias [19].



Figura 6. Imagem do Galáxia “fantasmagórica” NGC 1052-DF2, extraída de [20].

Esta galáxia desafia as ideias consolidadas de como se acredita que as galáxias funcionam e mostra que a matéria escura é real. Também sugere que existe provavelmente que existe mais de uma maneira de as galáxias se formarem. Outro estudo recente, sugere que a falta de matéria escura pode ser explicada pelos efeitos da perturbação das marés. Segundo os autores as forças gravitacionais da enorme galáxia vizinha NGC 1035 estão destruindo NGC 1052-DF4. Durante este processo, a matéria escura é removida, enquanto as estrelas sentem os efeitos da interação com outra galáxia numa fase posterior [20].

Radiação cósmica de fundo em micro-ondas (CMB) com o satélite Planck

A Agência Espacial Europeia (ESA) lançou o satélite Planck em 14 de Maio de 2009, a uma distância de 1,5 milhões de quilômetros da Terra, para observar a radiação Cósmica de Fundo de Microondas (CMB). Recentemente publicou a imagem da CMB baseaa nos dados iniciais de 15,5 meses do Planck e é a primeira imagem de todo o céu da missão da luz mais antiga do nosso Universo, impressa no céu quando tinha apenas 380 000 anos de idade, como podemos ver na Figura 7 [21]. O atual Modelo Cosmológico Padrão (Λ CDM) possui um conjunto de parâmetros e a colaboração Planck relatou os valores desses parâmetros ajustando o modelo aos dados. Por exemplo, os parâmetros Λ CDM de melhor ajuste resultaram em um valor 6% menor para o parâmetro de densidade da energia escura (Planck: $\Omega_L=0,686\pm0,020$ vs WMAP-9: $\Omega_L=0,721\pm0,025$) e um valor 18% maior para a densidade parâmetro da matéria escura (Planck: $\Omega_m=0,314\pm0,020$ vs WMAP-9: $\Omega_m=0,279\pm0,025$) do que os resultados do levantamento CMB anterior de todo o céu, ou seja, WMAP. Como pode ser visto a partir destes

números, os dois parâmetros são consistentes entre si dentro das incertezas de medição. Assim, a missão Planck confirmou perfeitamente a adequação do WMAP ao modelo padrão da cosmologia. Aqui WMAP é acrônimo de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) [21].

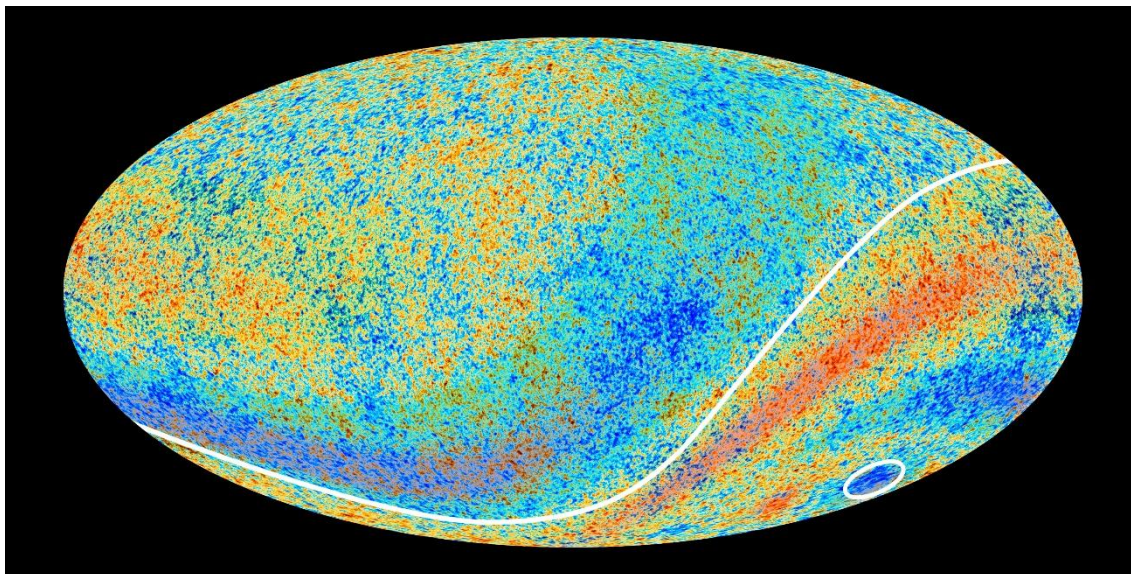


Figura 7. Map da temperatura da radiação cósmica de fundo de Microondas, nos primórdios do Universo, obtidas pelo satélite Planck. Direitos autorais: ESA e Colaboração Planck [21].

Duas características anômalas de fundo de micro-ondas cósmicas sugeridas pelo antecessor do Planck, a WMAP da NASA, são confirmadas nos novos dados de alta precisão do Planck. Uma delas é uma assimetria nas temperaturas médias em hemisférios opostos do céu (indicadas pela linha curva), com temperaturas médias ligeiramente mais altas no hemisfério eclíptico sul e temperaturas médias ligeiramente mais baixas no hemisfério eclíptico norte. Isto vai contra a previsão feita pelo modelo padrão de que o Universo deveria ser amplamente semelhante em qualquer direção que olhamos. Há também uma mancha fria que se estende por uma área do céu que é muito maior do que o esperado (circulado). Nesta imagem as regiões anômalas foram realçadas com sombreamento vermelho e azul para torná-las mais claramente visíveis [21].

Naquela época, o jovem Universo estava cheio de uma sopa quente e densa de prótons, elétrons e fótons em interação a cerca de 2700°C. Quando os prótons e os elétrons se juntaram para formar átomos de hidrogênio, a luz foi liberada. À medida que o Universo se expandiu, esta luz foi hoje esticada até comprimentos de onda de micro-ondas, equivalentes a uma temperatura de apenas 2,7 graus acima do zero absoluto [20].

As pequenas flutuações de temperatura, que mostra a imagem CMB correspondem a regiões de densidades ligeiramente diferentes em tempos muito antigos, representando as sementes de toda a estrutura futura: as estrelas e galáxias de hoje. De acordo com o modelo padrão da cosmologia, as flutuações surgiram imediatamente após o Big Bang e foram estendidas a escalas cosmológicamente grandes durante um breve período de expansão acelerada conhecido como inflação. O Planck foi projetado para mapear essas flutuações em todo o céu com maior resolução e sensibilidade do que nunca.

Ao analisar a natureza e distribuição das sementes na imagem CMB do Planck, podemos determinar a composição e evolução do Universo desde o seu nascimento até aos dias de hoje [21].

A luz do Universo primitivo mostra que não é suave. Se você aumentar o contraste, verá pontos um pouco mais brilhantes e um pouco mais escuros. Estas correspondem a mudanças na temperatura do Universo numa escala de 1 parte em 100.000. Isso é incrivelmente pequeno, mas tem implicações profundas. Acharmos que essas flutuações foram impressas no Universo quando ele tinha apenas um trilionésimo de trilionésimo de segundo e cresceram com o Universo à medida que ele se expandia. Eles também foram as sementes das galáxias e dos aglomerados e galáxias que vemos hoje [20]. O que começou como flutuações quânticas quando o Universo era menor que um próton, agora cresceu e se tornou as maiores estruturas do cosmos, com centenas de milhões de anos-luz de diâmetro. Deixe isso se instalar em seu cérebro por um momento [21].

Depois de anos examinando os dados do Planck, as descobertas sobre o Universo podem resumir-se a [21]:

- A idade do Universo é um pouco maior do que esperávamos. O Universo tem 13,82 bilhões de anos.
- Universo se expande, e o que Planck descobriu é que o Universo está ficando maior a uma taxa de 67,3 quilômetros por segundo por megaparsec.
- A quantidade de flutuações na luz do Universo primitivo, bem como a forma como elas são distribuídas, podem ser usadas para descobrir do que o Universo é feito. Os ingredientes e quantidades dos constituintes do Universo: 4.9 por cento de matéria normal 26.8 por cento de matéria escura 68.3 por cento de energia escura.

Planck possui detectores especiais que podem captar luz polarizada. A maior parte vem da poeira dentro da nossa galáxia, mas uma fração muito pequena viaja até nós desde o início dos tempos, a bilhões de anos-luz de distância. Essa antiga luz polarizada contém pistas sobre o nascimento do nosso universo e o seu período explosivo de crescimento chamado inflação [21].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Lineweaver, Charles; Tamara M. Davis (2005). Misconceptions about the Big Bang. *Scientific American*. Consultado em 6 de novembro de 2008.
- [2]. Big-Bang: como tudo começou. chc.cienciahoje.uol.com.br.
- [3] V. Sahni, Dark Matter and Dark Energy, *Lect. Notes Phys.* 653, 141–179 (2005). https://doi.org/10.1007/978-3-540-31535-3_5
- [4] Model of expanding Universe. <https://esahubble.org/images/opo0109g/>. Consultado no dia 22 de setembro de 2022.
- [5] L.M. Diaz-Rivera, L. Samushia, e B. Ratra, *PRD* 73, 083503 (2006)
- [6] J.D. Bekenstein, *Phys. Rev. D*, 70, 083509 (2004)

- [7] J.D. Bekenstein, *Comtemp. Phys.* 47, 387(2006)
- [8] J. Grande, J. Sola, S. Hrvoje, *JCAP*(2006)
- [9] C. Armendariz-Picon, V. Mukhanov, *Phys. Rev. D*, 63, 103510 (2001)
- [10] S. Dodelson, (2003), *Modern Cosmology*, Academic press
- [11] E. Kolb, M. S. Turner, (1994), *The early universe*, (Addison-Wesley Publishing Company).
- [12] LIMA, José Ademir Sales; SANTOS, Rose Clivia. Do eclipse solar de 1919 ao espetáculo das lentes gravitacionais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 41, p. e20190199, 2019. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0199>
- [13] F.S.N. Lobo, *Current Advances and Ideas (Research Signpost, Kerala, India)*(2009)[arXiv:gr-qc/0807164].
- [14] M. Szydlowski, A. Krawicc, W. Czaja, *Phys. Rev.* 72,036221 (2005).
- [15] C. Armendariz-Picon, V. Mukhanov, P.J. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* 85, 21, 4438, (2000)
- [16] N. Constantinos Skordis. *Class. Quantum Grav.* 26 143001 (2009).
<https://doi.org/10.1088/0264-9381/26/14/143001>
- [17] C Doux, et al., Dark energy survey internal consistency tests of the joint cosmological probes analysis with posterior predictive distributions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021; 503 (2): 2688 DOI: 10.1093/mnras/stab526
- [18] Créditos. NASA/ESA, CFHT, CXO, MJ Jee (Universidade da Califórnia, Davis) e A. Mahdavi (Universidade Estadual de São Francisco).
- [19] MERTEN, J. et al. Creation of cosmic structure in the complex galaxy cluster merger Abell 2744. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 417, n. 1, p. 333-347, 2011.
- [20] van Dokkum, P., Danieli, S., Cohen, Y. et al. A galaxy lacking dark matter. *Nature* 555, 629–632 (2018). <https://doi.org/10.1038/nature25767>.
- [21] N° 7–2013: Planck reveals an almost perfect Universe.
https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/Planck_reveals_an_almost_perfect_Universe.
Consultado em 15 de agosto de 2022.