



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA E MATEMÁTICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

RALINE SILVA DE ARAÚJO

UM PANORAMA HISTÓRICO-COSMOLÓGICO DA ENERGIA ESCURA

CUITÉ – PB

2021

RALINE SILVA DE ARAÚJO

UM PANORAMA HISTÓRICO-COSMOLÓGICO DA ENERGIA ESCURA

Monografia apresentada à Banca Examinadora,
como exigência parcial à conclusão do Curso de
Licenciatura em Física, da Universidade Federal de
Campina Grande, Campus Cuité.

Orientador(a): Joseclécio Dutra Dantas

CUITÉ - PB

2021

RALINE SILVA DE ARAÚJO

UM PANORAMA HISTÓRICO-COSMOLÓGICO DA ENERGIA ESCURA

Monografia apresentada à Banca Examinadora, como exigência parcial à conclusão do Curso de Licenciatura em Física, da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Cuité.

Aprovada em: 28 de maio de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas - UFCG
(Orientador)

Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros- UFCG
(Examinador interno)

Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde - UFCG
(Examinador interno)

CUITÉ - PB

2021

À minha família e amigos.

A663p

Araújo, Raline Silva de.

Um panorama histórico-cosmológico da energia escura. / Raline Silva de Araújo. - Cuité, 2021.

72 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde, 2021.

"Orientação: Prof. Joseclécio Dutra Dantas".

Referências.

1. Cosmologia. 2. Energia escura. 3. Evidências observacionais. 4. Modelo Λ CDM. 5. Modelo de quintessência. I. Dantas, Joseclécio Dutra. II. Título.

CDU 52(043)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer ao Senhor por ter sido tão bondoso comigo, me sustentou e me deu equilíbrio para lidar com todas as tribulações que enfrentei no decorrer desta trajetória.

Quero agradecer grandemente aos meus pais, Maria das Dores e Geraldo Silva, que mesmo não tendo formação básica souberam valorizar a minha escolha de optar por estudar e seguir uma formação superior, me apoiar e “segurar as pontas” nos momentos mais difíceis. Também aos meus irmãos Geraldo, Leonardo, Lidiane, Aline, Marias das Vitórias, Maria das Mercês e Alice.

Agradeço ao meu companheiro de estudos e da vida, Max Wendell. Ele que sempre foi minha motivação diária e me fez enxergar que é possível quando se deseja algo. Muito obrigada por me passar fortaleza e conforto em todos os momentos. Obrigada pelos melhores momentos destes últimos anos da minha vida.

Aos meus colegas de curso Damião Franceilton, Reinaldo, Luís Gomes, Ruam, Ketly Santos e Ticyane Marques, muito obrigada pelos momentos de descontração, pelas risadas e por compartilhar os momentos de estudo e os de angústia.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Joseclécio Dutra por tantos ensinamentos, por toda paciência e cuidado que teve comigo durante todo o curso, pela confiança depositada em mim, pelos conselhos que serviram para o meu crescimento profissional e pessoal, estes que vou levar para toda a minha vida. Obrigada por ser exemplo para mim de profissional e de ser humano.

Aos professores do curso de física do CES, Prof. Dr. José de Miranda, Prof. Dr. Jair Stefanini, Prof. Dr. Pedro Segundo, Prof. Dr. Heron Neves, Prof. Dr. João Batista, Prof. Dr. Luiz Terrazos, Prof. Dr. Pedro Segundo, Prof. Dr. Danyel Judson, Prof. Dr. Nilton Frazão e Prof. Dr. Rafael Rodrigues pelas conversas, conselhos e ensinamentos. E em especial o Prof. Dr. Fábio Ferreira por ter sido além de professor um amigo, por inúmeros conselhos, motivação diária, por todas as caronas, por depositar não só em mim como a todos os alunos a verdade de que nós podemos ir além do que pensamos. Com todos eles eu pude aprender algo, seja positivo ou negativo, tudo é aprendido.

Também não posso deixar de agradecer as professoras do curso de matemática, Prof. Dr. Célia Rufino e Prof. Dr. Maria de Jesus, pelo cuidado e apoio nas disciplinas de cálculo. Obrigada por todo o conhecimento compartilhado.

Por fim, agradeço aos programas de auxílio estudantil por ter me possibilitado permanecer no curso, sem isso esse momento não seria possível. E, que iniciativas de apoio estudantil e a pesquisa sejam abundantes, assim faremos do ensino e da produção de ciência uma prioridade do nosso país. Enfim, agradeço a UFCG como

um todo e em especial ao CES e todos os que mantêm o seu funcionamento impecável.

RESUMO

Neste presente trabalho temos o objetivo de fazer uma revisão bibliográfica sobre a componente escura do universo, que é tão peculiar, a energia escura. Partiremos de uma introdução histórica da cosmologia e o seu contexto atual, visto que o objeto de nosso interesse é um dos mais visados nos estudos em cosmologia na atualidade. É importante notar que a cosmologia vem fazendo descobertas recentes, como podemos perceber pelos prêmios Nobel de Física, em 2006, 2011 e 2019. Para falarmos na possibilidade de existir uma componente tão exótica como é a energia escura, vamos expor quais principais evidências observacionais que apontam para um cenário onde tem-se a necessidade desta componente. Assim, poderemos entender melhor o que é a energia escura e qual os efeitos causados por ela ao nosso universo. Por fim, trataremos dos modelos de energia escura mais aclamados pelos estudos que tratam da área, sendo que, trataremos de maneira mais aprofundada os modelos Λ CDM (Λ cold dark matter) e de quintessência, alguns modelos alternativos serão apenas citados. O modelo Λ CDM é também chamado de modelo de concordância cósmica, não por acaso este é o modelo que mais se ajusta às observações e aos dados disponíveis. Por meio de nossa pesquisa bibliográfica, fica claro a superioridade do modelo Λ CDM nas bibliografias disponíveis, apesar de apresentar problemas, como o problema de ajuste fino e da coincidência.

PALAVRAS CHAVES: Energia Escura, Evidências Observacionais, Modelo Λ CDM, Modelo de Quintessência.

ABSTRACT

In this present work, we aim to do a bibliographic review on the dark component of the universe, which is so peculiar, dark energy. We will start from a historical introduction to cosmology and its current context, since the object of our interest is one of the most targeted in studies in cosmology today. It is important to note that cosmology has had recent discoveries as the target of Nobel Prizes in Physics, in 2006, 2011 and 2019. In order to talk about the possibility that there is a component as exotic as dark energy, we are going to expose which main observational evidences that point to a scenario where there is a need for this component. Thus, we will be able to better understand what dark energy is and what its effects are on our universe. Finally, we will deal with the dark energy models most acclaimed by the studies that deal with the area, and we will deal more deeply with the Λ CDM (Λ cold dark matter) and quintessence models, some alternative models will only be mentioned. The Λ CDM model is also called the cosmic concordance model, not by chance this is the model that best fits the observations and available data. Through our bibliographic research, it is clear the superiority of the Λ CDM model in the available bibliographies, despite presenting problems, such as the problem of fine adjustment and coincidence.

KEYWORDS: Dark Energy, Observational Evidences, Λ CDM Model, Quintessence Models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: mapa das anisotropias na RCF, obtidos a partir dos dados coletados pelo instrumento DMR levado com o COBE.

Figura 2: combinação de contornos de confiança de parâmetros cosmológicos em uma variedade de modelos de energia escura.

Figura 3: possíveis geometrias para o universo.

Figura 4: potenciais possíveis no modelo de quintessência.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. COMO SURTIU A HIPÓTESE DA ENERGIA ESCURA	14
3. ENERGIA ESCURA.....	21
2.1 EVIDÊNCIAS OBSERVACIONAIS	27
2.1.1 IDADE DO UNIVERSO EM COMPARAÇÃO COM A IDADE DE ESTRELAS DE BAIXA MASSA EM AGLOMERADOS GLOBULARES.....	28
2.1.2 OBSERVAÇÕES DE SUPERNOVAS (SN Ia).....	30
2.1.3 RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO (RCF).....	32
2.1.4 ESTRUTURAS EM LARGA ESCALA.....	37
4. MODELOS DE ENERGIA ESCURA.....	39
4.1 MODELO Λ CDM	39
4.1.1 O PROBLEMA DA CONSTANTE COSMOLÓGICA E DA COINCIDÊNCIA.....	47
4.2 MODELOS DE ENERGIA ESCURA ALTERNATIVOS	50
4.2.1 MODELO DE QUINTESSÊNCIA.....	52
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
APÊNDICE	60
DA DEFINIÇÃO DE TENSOR À EQUAÇÃO DE CAMPO DE EINSTEIN	60
6. REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

Muitas pessoas podem confundir a cosmologia com a astronomia e astrofísica, a verdade é que, a cosmologia e a astrofísica são ramos da astronomia. A cosmologia se dedicada a estudar a origem, a estrutura e a evolução do nosso universo. Já a astronomia se ocupa a estudar a estrutura geral do universo e as leis que o regem em um sentido mais amplo. Porém, a cosmologia e astrofísica seguem caminhos paralelos em muito.

Nos tempos mais primitivos da existência humana já havia um tipo de cosmologia, esta chamamos de cosmogonia. No entanto, a cosmogonia tentava explicar aspectos do universo, origem, formação e evolução, por meio das religiões e mitos. A cosmologia estuda os mesmos aspectos do universo utilizando métodos científicos.

Atualmente existe um grande mistério na astronomia moderna, a questão é que, de toda matéria e energia que compõe o nosso vasto universo, aproximadamente, 95% possuem origem e conteúdo totalmente desconhecidos da ciência (TYSON, 2018). Estes aproximados 95% de matéria e energia são ditos escuros, pois não se consegue atribuir características físicas específicas a ambos, o que se pode observar são os efeitos da sua presença.

Estas características ordinárias do nosso universo são incrivelmente curiosas, motivação suficiente para o desenvolvimento da revisão bibliográfica proposta neste trabalho. Aqui faremos uma revisão bibliográfica acerca do panorama histórico-cosmológico da energia escura.

O caminho que trilharemos nos leva desde os mitos de criação, uma percepção extraordinariamente cultural dos povos antigos acerca do nosso universo, até os conceitos e modelos cosmológicos mais atuais e mais bem aceitos pela comunidade científica que compõe a física do nosso século.

No primeiro capítulo iremos revisar o panorama histórico da cosmologia que nos leva até a aceitação da energia escura como uma componente do universo. No capítulo seguinte iremos tratar especificamente de energia escura e das principais evidências observacionais que nos possibilita enxergar os efeitos causados pela sua presença e, que sustentam a sua credibilidade na comunidade científica. Por último, abordaremos os modelos de energia escura mais frequentes na bibliografia disponível, principalmente o modelo de concordância cósmica, Λ CDM, e os modelos de quintessência. Alguns modelos alternativos serão citados de forma breve. Seguindo teremos as considerações finais e as referências bibliográficas.

2. COMO SURTIU A HIPÓTESE DA ENERGIA ESCURA

Desde muito antes de saber o que era ciência o ser humano já buscava explicações para os fenômenos que eram observados no céu noturno e formulavam suas teorias para tentar explicar o que era visto.

Provavelmente, a maioria dos povos, em diferentes regiões do nosso planeta Terra e em diferentes épocas, tinham ao menos uma crença na qual se baseavam para responder às questões mais perguntadas em todo o planeta Terra, “Qual a origem do universo? Quem criou o universo? De que é feito o universo?”. Uma das possíveis respostas para essas perguntas seria, como o renomado astrofísico Neil deGrasse Tyson diria: “a maior história já contada”. Essas crenças têm por base o que chamamos de Mito de Criação que busca contar, a sua maneira, essa história. Esses mitos de criação datam de uma época muito remota, quando a Natureza era idolatrada, sendo a única responsável pela sobrevivência de nossa espécie, a qual vivia basicamente da caça e de uma agricultura bastante rudimentar (GLEISER, 2006). Os mitos de criação são essencialmente religiosos e essa essência religiosa nos faz perceber que, se voltarmos no tempo veremos uma relação bastante forte entre a Natureza e a religião, pois na esperança de que catástrofes naturais tais como vulcões, tempestades ou furacões não destruíssem as suas casas e plantações, como também matassem rebanhos, várias culturas atribuíam caráter divino à Natureza. Esses mitos de criação são uma expressão do fascínio com que as mais variadas culturas encaram o mistério da criação (GLEISER, 2006).

Cada mito, para cada povo em específico, tem sua relevância na explicação de como possivelmente aconteceu o processo de criação do universo, como também exprime características que são intrínsecas a cada povo e de como surgiu, ou quais os primeiros vestígios do pensamento científico em cada cultura. E como não poderia ser diferente, para o desenvolvimento do pensamento científico foi necessária uma espécie de revolução quanto aos modelos de universo, que eram produzidos pelos povos antigos, não substituindo os mitos de criação, mas, dando início a uma nova etapa na construção e busca por um modelo ideal para o universo. Pois, os mitos de

criação possuem uma identidade cultural, e permanecerão enquanto houver preservação cultural, neles não há caráter científico.

Dois modelos que se mostraram relevantes para tal avanço foram, o modelo geocêntrico de Claudio Ptolomeu e o modelo heliocêntrico de Nicolau Copérnico. Segundo Claudio Ptolomeu (90 – 168 d.C.), o universo era constituído pela Terra, Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno. A Terra se encontrava no centro do universo e todos os outros corpos celestes giravam ao seu redor, nessa sequência apresentada. Já Nicolau Copérnico (1473 - 1543) defende a teoria do heliocentrismo, afirmando que o centro do universo é o Sol e que os planetas orbitam em volta do Sol, desenvolvendo órbitas circulares, na seguinte ordem: Mercúrio, Vênus, Terra, Lua, Marte, Júpiter, Saturno e depois as estrelas fixas. Apesar de mais tarde novas descobertas alterarem alguns dos aspetos da teoria heliocêntrica apresentada por Copérnico, esta ideia foi realmente muito importante para o progresso da astronomia (GLEISER, 2006).

Desde então a física tem se dedicado a responder as questões citadas inicialmente, e, não muito diferente dos povos antigos, determinar um modelo do universo que represente sua realidade, até seus componentes mais extraordinários. Para isso, muitos cientistas da atualidade e de décadas não muito distantes tem dedicado suas vidas a essas descobertas, a exemplo temos o físico Albert Einstein (1879 - 1955) com a sua teoria geral da relatividade publicada em 1916, que nos fornece informações importantes acerca do universo em que vivemos e seu comportamento e evolução, apresentando os detalhes matemáticos relevantes de como tudo no universo se move sob a influência da gravidade.

Em décadas recentes foi descoberto que o universo exerce uma pressão misteriosa que vem do vácuo espacial e age em oposição à gravidade cósmica. Não apenas isso, mas essa “gravidade negativa” acabará vencendo, já que obriga a expansão cósmica a acelerar exponencialmente rumo ao futuro (TYSON, 2017).

Quando são sugeridos pela primeira vez, a maioria dos modelos científicos está apenas pela metade, deixando espaços para que parâmetros sejam ajustados para

melhor se encaixar no universo conhecido. A exemplo temos o universo “heliocêntrico” baseado no Sol, posto no centro da órbita dos planetas. A parte de orbitar o Sol estava correta, e foi um grande avanço que proporcionou uma revolução científica àquela época, porém quanto a ideia das órbitas descritas pelos planetas era um pouco equivocada, pois as órbitas descritas pelos planetas sabemos que são como círculos achatados que chamamos de elipses, essa foi umas das contribuições dadas a física pelo astrônomo Johannes Kepler (1571 - 1630) (GLEISER, 2006). A ideia básica de Copérnico estava correta, e isso era o que mais importava. Ela apenas precisava de alguns ajustes para se tornar mais acurada. Isso acontece o tempo todo no processo de construção do conhecimento, uma ideia é formulada e fornecida à comunidade científica e logo após vários outros cientistas vão complementando essa ideia, quando necessário, até se formar uma teoria consistente.

No caso da relatividade de Einstein, os princípios fundamentais da teoria exigem que tudo aconteça exatamente como previsto. Nas equações de Einstein um termo foi incluído, o qual ele deu o nome de “constante cosmológica” e que representou com a letra grega maiúscula lambda (Λ). Este era um termo matematicamente permitido, mas opcional, a constante cosmológica lhe autorizou representar um universo estático. Naquela época a ideia de que o nosso universo fazia algo mais além de existir era pouco ou nada creditada. Einstein não foi o único cientista que partilhava essa ideia de um universo estático, o astrofísico De Sitter também formulou teorias nas quais o universo era estático (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2015). Então, o único papel desta constante cosmológica era se opor a gravidade no modelo de Einstein, de modo que o universo se mantinha equilibrado, resistindo à tendência natural da gravidade de atrair o universo inteiro para uma massa gigantesca. Assim, Einstein inventou um universo que não se expande nem se contrai, coerente com as expectativas de todos da época.

Depois o físico Alexander Friedmann demonstrou matematicamente que o universo de Einstein, embora equilibrado, estava em um estado de instabilidade. De modo que, o universo de Einstein estava precariamente equilibrado entre um estado de expansão e colapso total (TYSON, 2017). Einstein sabia que o Λ como uma força

da natureza de gravidade negativa, não tinha equivalente conhecido no universo físico.

A teoria geral da relatividade de Einstein divergia de todo o raciocínio sobre atração gravitacional desenvolvido por Isaac Newton. A relatividade geral vê a gravidade como uma reação de uma massa à curvatura local do espaço e do tempo causada por alguma outra massa ou um campo de energia. Existe uma definição melhor para este conceito, que foi definido pelo físico teórico do século XX John Archibald Wheeler como: “A matéria diz ao espaço como se curvar; o espaço diz à matéria como se mover” (TYSON, 2017).

A relatividade geral descrevia dois tipos de gravidade. Um é o tipo comum, como a atração entre a Terra e um objeto lançado ao ar, ou entre o Sol e os planetas. Ela também previa outra variedade, que seria uma misteriosa pressão que atua em sentido contrário à gravidade associada ao vácuo do próprio espaço-tempo. A constante cosmológica Λ preservou o que Einstein e muitos outros físicos de sua época presumiam fortemente ser verdadeiro: o status quo de um universo estático – um universo estático instável. Porém, invocar uma condição de instabilidade natural de um sistema físico viola a crença científica, uma vez que, você não pode afirmar que o universo inteiro é uma situação especial que por acaso está equilibrada para todo o sempre. Nada já visto, medido ou imaginado se comportou desse modo na história da ciência, o que é um poderoso precedente (TYSON, 2017).

Em 1928, o astrofísico americano Edwin Hubble compareceu a um simpósio da União Astronômica Internacional, que naquele ano ocorreu na Holanda e teve a oportunidade de discutir teorias cosmológicas com o astrofísico De Sitter. Ao retornar ao Mount Wilson Observatory, seu lugar de trabalho, Hubble estava determinado a testar a teoria de De Sitter de que o Universo era estático. Para isso Hubble instruiu seu assistente Milton Humason, um talentoso e meticuloso observador, a estudar “nebulosas” fracas, que, presumivelmente, estariam particularmente distantes de nós (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2015). A pergunta que eles queriam responder era: a frequência da luz proveniente dessas “nebulosas” distantes é diferente da luz proveniente das “nebulosas” mais próximas? Uma frequência mais baixa (mais lenta)

corresponde a um maior comprimento de onda da luz, ou seja, a luz estaria mais próxima a extremidade vermelha do espectro. Deste modo, o que Hubble e Humason estavam procurando era um deslocamento de linhas existentes no espectro na direção do “vermelho”.

Humason mais tarde explicou que tal deslocamento era o que “deveria ser esperado na teoria de espaço-tempo curvo de De Sitter”. Humason obteve as velocidades e Hubble obteve as distâncias. Eles encontraram uma relação linear que nos dizia, aproximadamente, que quanto maior fosse a velocidade de recessão de uma “nebulosa” maior seria a distância até ela (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2015). Somente em 1935, quando Hubble provou que os cálculos feitos por outros astrônomos estavam errados, é que seus resultados foram amplamente aceitos. Agora os astrônomos acreditavam que o universo estava se expandindo, um resultado que já havia sido demonstrado por Carl Wirtz em 1922¹.

Einstein, constrangido pela constante cosmológica, que não correspondia a nenhuma força conhecida da Natureza, e pela oportunidade perdida de prever ele mesmo o universo em expansão, descartou totalmente a constante Λ , que acabou chamando-a de “a maior burrada” de sua vida. Após descartar Λ da equação, ele supôs que seu valor fosse zero, considerando-a desnecessária.

Ao longo das décadas, diversos teóricos tentaram reviver a constante cosmológica de Einstein, imaginando como seria um universo que a tivesse presente.

No início de 1988, foram feitos anúncios impressionantes por duas equipes concorrentes de astrofísicos: uma liderada por Saul Perlmutter, do laboratório Nacional de Lawrence Berkeley, em Berkeley, Califórnia, e outra por Brian Schmidt, dos observatórios de Mount Stromlo e Siding Spring, em Camberra, na Austrália, e Adam Riess, da Johns Hopkins University, em Baltimore, Maryland. Dezenas das mais distantes supernovas – um tipo específico de estrela, definiremos este termo um pouco mais adiante – já observadas pareciam perceptivelmente menos brilhantes do

¹ Em 1918 Carl Wirtz observou um desvio para o vermelho sistemático de nebulosas espirais. Apesar desse feito, a evidência observacional de Wirtz não é comumente citada.

que se esperava considerando o comportamento bem documentado desse tipo de estrela explodida. A solução para isso exigia que as supernovas distantes se comportassem diferentemente de suas irmãs mais próximas, ou que estivessem pelo menos 15% mais distante do que os modelos cosmológicos válidos as colocavam. A única justificativa “natural” para essa aceleração é a constante cosmológica λ criada e descartada por Einstein. Astrofísicos a recolocaram de volta nas equações originais de Einstein para a relatividade geral, de modo que o estado conhecido do universo correspondeu ao estado das equações de Einstein (TYSON, 2017).

As supernovas utilizadas nos estudos de Perlmutter e Schmidt são do tipo Ia, encontradas em todos os tipos de galáxias; seu espectro é caracterizado pela emissão dos elementos: cálcio, enxofre e silício durante a fase de pico de luminosidade e ausências das linhas de hidrogênio, uma vez que, esgotaram toda sua reserva deste elemento durante sua evolução (RIBEIRO, 2013). Uma vez que as condições iniciais são bem homogêneas para esta classe de supernovas, elas podem ser boas candidatas a velas padrão, uma espécie de parâmetro para calcular distâncias cósmicas até as galáxias nas quais explodem, até os cantos mais distante do universo (TYSON, 2017).

Como todas supernovas deste tipo possuem a mesma potência, as mais fracas estão mais distantes e as mais brilhantes estão próximas. Então, pela medida do seu brilho podemos nos informar a qual distância essas supernovas estão de nós e uma das outras. No próximo capítulo retomaremos a abordagem das supernovas tipo Ia como uma evidência observacional.

Um outro método para medir a distância das galáxias, é tomando a sua velocidade de recessão em relação a nossa galáxia, a Via Láctea. Essa recessão é parte essencial da expansão cósmica em geral. Hubble foi o primeiro a demonstrar que o universo em expansão faz com que objetos mais distantes se afastem mais rapidamente de nós que aqueles que estão mais próximos, ou seja, medindo a velocidade de recessão de uma galáxia é possível dizer a qual distância ela se encontra.

Esses dois métodos bastante testados resultam em distâncias diferentes para o mesmo objeto e, portanto, algo deve estar errado. Acontece que as supernovas eram velas padrão esplendidas, então os astrofísicos ficaram com um universo que se expandira mais rapidamente do que tinham pensado, colocando as galáxias mais longe do que sua velocidade de recessão de outro modo indicara. E não havia uma forma mais fácil de explicar a expansão extra sem apelar para Λ , a constante cosmológica de Einstein (TYSON, 2017).

Desse modo surgia a primeira evidência direta que uma força repulsiva permeava o universo, se opondo à gravidade, que é como e porque a constante cosmológica foi retomada.

Tão logo, devido a sua realidade física, Λ precisava de um novo nome e “energia escura” foi o termo escolhido. Perlmutter, Schmidt e Riess dividiram o Prêmio Nobel de física de 2011 por essa descoberta (TYSON, 2017).

Em 2013, dados do satélite Planck ²mostraram que a energia escura é responsável por 68,3% de toda massa-energia³ no universo; a matéria escura corresponde a 26,8% e a matéria comum 4,9% (SPARROW, 2018). A energia escura ocupa uma porcentagem bem acima das demais componentes, porém a sua natureza ainda é desconhecida, muitos cientistas trabalham arduamente na sua busca, e daí surge a nossa curiosidade acerca de tal componente, que é extraordinariamente desconhecida e necessária para explicar o nosso universo tal como está.

Os estudos nesse campo da física têm se mostrado tão relevantes nesse século que tem sido merecedor de prêmios Nobel, como no ano de 2006, 2011 e de 2019. O Nobel de física de 2019 foi concedido para descobridores de exoplanetas e estudo da evolução do cosmos (MEDIIVILLA, 2019).

² A Planck foi uma sonda espacial operada pela Agência Espacial Europeia (ESA) entre os anos 2009 e 2013, com o objetivo de estudar o nascimento do universo e sua evolução.

³ Quando dizemos “massa-energia”, nos referimos a equivalência existente entre massa e energia. Onde uma pode ser transformada na outra.

No próximo capítulo, buscaremos responder questões relacionadas à energia escura, abordando a história de sua origem e existência; também serão apresentadas as evidências observacionais para a existência da energia escura.

3. ENERGIA ESCURA

Hoje nós sabemos que o universo se divide em dois tipos de conteúdo, um luminoso e um escuro. O conteúdo luminoso do universo é constituído basicamente por planetas, estrelas e alguns escombros cósmicos menores que talvez não emitam luz visível, mas que emitem outra forma de radiação eletromagnética, seja infravermelha ou ondas de rádio. O conteúdo escuro abrange a famosa matéria escura, esta é detectada apenas por sua influência gravitacional sobre a matéria visível, sua forma e composição são, ainda, desconhecidas.

Também no lado escuro do universo, há um outro aspecto, muito diferente. Este aspecto não é encontrado em nenhum outro tipo de matéria, mas no próprio universo. Como vimos no capítulo anterior, podemos dizer que a descrição deste se deve ao pai da cosmologia moderna, Albert Einstein (TYSON, 2015).

Já ouvimos um pouco desta mesma história, agora vamos entender melhor. Para isso devemos voltar no tempo, especificamente ao período da Primeira Guerra Mundial (1914 - 1918). Einstein, enquanto trabalhava num escritório de patentes, passou por uma tentativa frustrada de petição contra a guerra, ao mesmo tempo, ele reunia esforços para encontrar equações que pudessem descrever o cosmos com exatidão. Como fruto de seu empenho, em 1915, antes do término da guerra, Einstein alcançou seu objetivo.

Em novembro daquele ano, ele produziu uma teoria que levaria seu nome, a Teoria da Relatividade Geral de Einstein, para os mais íntimos apenas TRG. Esta teoria descreve como o espaço e a matéria interagem: a matéria “diz” ao espaço como se curvar, e o espaço “diz” a matéria como se mover (TYSON, 2017).

A TRG de Einstein o levou à equação que liga os conteúdos do espaço a seu comportamento global. Estudando essa equação, Einstein previu a expansão do universo, doze anos antes das observações de Edwin Hubble que revelaram a expansão. Isto não aconteceu de fato porque Einstein era apenas um teórico, nunca pisou em um laboratório, e não havia observações astronômicas que apoiassem suas ideias, apesar de sua equação mais básica lhe dizer que o universo não pode ser “estático”, mas em sua totalidade, deve estar expandindo ou contraindo (TYSON, 2015). Essa ideia não agradou a Einstein.

Apesar de Einstein propor um modelo estático para o Universo, havia um problema: a TRG mostrava que modelos contendo matéria não podiam ser estáticos. Se o universo fosse estático desde o seu início, a atração gravitacional da matéria faria todos os corpos existentes colapsarem sobre si mesmos. Isso parecia ridículo, pois não havia qualquer razão que justificasse um espaço tão instável. Para Einstein tudo isso era implausível e ele imediatamente decidiu modificar sua teoria a fim de obrigar a existência de uma solução cosmológica estática, mas estável (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2015). Sendo assim, Einstein segue agora em busca de um meio para imobilizar o cosmos.

A solução obtida por Einstein consistia em um termo agregado a sua equação, este de valor constante. Essa constante foi posta à mão, na equação, por ele. Esta representa a quantidade de energia contida em cada metro cúbico de espaço vazio, porém com valor desconhecido. Então, como nada sugeria um valor para essa constante, Einstein lhe havia atribuído valor igual a zero. Posteriormente, ele demonstrou que para um determinado valor, o espaço poderia ser estático. Dessa forma, não entraria em conflito com as observações já realizadas. Finalmente, esse termo constante levou o nome de “Constante Cosmológica”, representada pela letra grega lambda maiúscula (Λ).

Em 1922, Alexander Friedmann, um matemático russo, provou que o universo estático de Einstein era instável, dividindo-se entre a expansão e a contração. Friedman publicou um conjunto de soluções matemáticas possíveis das equações de campo da teoria relativística da gravitação. A análise dos resultados obtidos mostrava

um comportamento não estático para o Universo! Ao contrário do que havia sido previsto por Einstein, Friedmann apresentava uma solução das equações relativísticas nas quais o universo estava em expansão (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2015). Após relutar, Einstein concordou com Friedmann e teve o prazer de saber que Hubble, ao término da década de 1920, descobrira que o universo está se expandindo, e considerou que a constante cosmológica, segundo relato fornecido por George Gamow, foi sua “maior burrada” (TYSON, 2015).

Muitos cosmólogos continuaram a invocar a constante cosmológica com outros valores em busca de explicações para observações enigmáticas, mas os cientistas de todo o mundo suspiraram de alívio por acreditar que o espaço não tinha necessidade dessa constante.

No final do século XX, veio à tona uma descoberta surpreendente, anunciada pela primeira vez em 1998, de que o universo possui realmente uma constante cosmológica não nula. O espaço vazio contém energia, chamada energia escura, esta possui características altamente inusitadas que determinam o futuro de todo o universo. O termo Energia Escura foi dado por Michael Turner em 1998 para descrever a misteriosa aceleração cósmica (SPARROW, 2018).

Mas, nós precisamos entender melhor como e por que podemos afirmar que o universo possui essa forma misteriosa de energia que chamamos de energia escura.

A equação fundamental de Einstein leva em conta a possibilidade de que o espaço é capaz de ter curvatura, descrita matematicamente como positiva, negativa ou zero. Friedmann foi o responsável por “ligar” todas essas três geometrias às equações da TRG de Einstein (HALPERN, 2015). Apesar da TRG descrever um espaço-tempo quadridimensional, para ajudar na visualização dessas geometrias utilizamos uma analogia com um espaço bidimensional. A curvatura positiva descreve um espaço bidimensional cuja curvatura podemos ver usando a terceira dimensão. Todas as superfícies positivamente curvadas contêm uma quantidade finita de área e volume. Por outro lado, a curvatura negativa descreve um espaço que se estende ao

infinito mesmo que não seja plano. Já a curvatura zero descreve o “espaço plano” que se estende ao infinito em todas as direções (HALPERN, 2015).

Se a constante cosmológica for igual a zero, podemos medir ou descrever as propriedades globais do universo com apenas dois números. Um, a constante de Hubble, produto de uma tendência global entre distâncias e velocidades. Este mede a velocidade com que o universo está se expandindo agora; o outro mede a curvatura do espaço. Este é revelado por meio de pequenos desvios dessa tendência geral, que só aparecem quando observamos os objetos mais distantes de nós (TYSON, 2015). Esses dois números podem ser encontrados por meio de medições acuradas das velocidades com que objetos localizados a diferentes distâncias estão se movendo em relação a nós.

Observações de galáxias localizadas 5 bilhões de anos-luz, ou mais, da Via Láctea permitem que os cosmólogos reconstruam uma parte significativa da história do universo em expansão. Em particular, eles podem ver como a taxa da expansão mudou com o tempo, que é a chave para determinar a curvatura do espaço (TYSON, 2015).

Inicialmente, os astrofísicos foram incapazes de realizar essas medições, pois não conseguiam fazer estimativas confiáveis das distâncias até os aglomerados de galáxias a muitos bilhões de anos-luz da Terra. Entretanto, se eles conseguissem medir a densidade média de toda a matéria no universo, eles poderiam comparar esse número com a “densidade crítica”, um valor previsto pelas equações de Einstein que descrevem o universo em expansão.

Com a melhoria do aparato tecnológico utilizado para coletar dados e medidas do universo, os astrofísicos conseguiram estimar a densidade real de matéria (densidade média de toda a matéria do universo), a partir disto teríamos três casos a analisar. Primeiro, se a densidade real for maior que a densidade crítica, o universo tem curvatura positiva. Daí, supondo que a constante cosmológica seja igual a zero, o cosmos vai finalmente parar de se expandir e em algum momento começar a se contrair. Segundo, se a densidade real for exatamente igual a densidade crítica, ou

menor por uma quantidade desprezível, o universo se expandira para sempre, isso ocorre num universo com curvatura zero. Terceiro, se a densidade real é menor que a densidade crítica o universo apresenta curvatura negativa.

Por volta da década de 1990, os cosmólogos já conseguiam estimar a densidade de matéria do universo, e sabendo disso, mesmo depois de incluir a matéria escura que tinham detectado à soma total de matéria do universo, a densidade total da matéria no universo só chegava a cerca de um quarto da densidade crítica. Sendo assim, o universo deve se expandir para sempre e possuir curvatura negativa, o que feria cosmólogos de orientação teórica, porque eles tinham passado a acreditar num universo de curvatura igual a zero, no universo plano proposto por Alan Guth (TYSON, 2015).

Essa crença baseava-se no “modelo inflacionário” do universo (GUTH, 1981). Essa teoria diz que a planura do espaço nasce da enorme expansão que ocorreu na era inflacionária. Este modelo prediz que o espaço no universo deve ser plano, nem positivamente curvado nem negativamente curvado, mas tão plano o quanto o podemos imaginar.

Vimos que, até então, a densidade de massa é de apenas um quarto da densidade crítica. Então, como pode o universo ser plano? Onde ou em que está o restante da massa do universo? Essas perguntas são importantíssimas neste momento.

Em 1998, duas equipes rivais de astrônomos anunciaram novas observações realizadas de um tipo particular de explosão estelar, ou supernova, as supernovas do tipo Ia sugerindo a existência de uma constante cosmológica não zero. Os resultados da observação não só implicavam uma constante cosmológica diferente de zero, mas também atribuíam a essa constante um valor que torna o espaço plano (JESUS, 2010).

Sabendo, por observações realizadas, que o universo deve conter uma componente descrita por uma constante cosmológica diferente de zero e é estrutura

espaço-temporal plana, voltamos, agora de maneira mais firme a uma questão muito importante: onde está o restante da massa do universo?

Viu-se, então, que o espaço que parecia vazio contém energia, e essa energia deve contribuir com massa para o cosmos, assim como indica a famosa equação de Einstein, $E = mc^2$. Se existe alguma energia E , você pode concebê-la como uma quantidade correspondente de massa m , pois, a massa de um corpo é a medida de seu conteúdo de energia. Assim a densidade total deve ser igual ao total dessa densidade contribuída pela matéria, mais a densidade contribuída pela energia (TYSON, 2015).

Essa energia que contribui para a densidade total de massa do universo é o que já chamamos de energia escura, pois pouco sabemos sobre ela. Estamos, ainda, no “escuro” a seu respeito.

A proposição da energia escura como alternativa teórica para explicar a expansão acelerada foi motivada pelas observações de 1998, e então foi adotada pelos cientistas com o intuito de explicar tal aceleração do universo. Essa energia escura é uma componente de natureza ainda não conhecida e representa 2/3 da densidade de energia que compõe o universo (BATISTA, 2010). A mesma, ainda tem características como:

- Não emite radiação eletromagnética;
- Apresenta pressão negativa;
- É homogênea e não se manifesta nas escalas dos aglomerados de galáxias.

A evidência crucial que sugere uma constante cosmológica não zero, e assim a existência da energia escura, veio das observações de supernovas tipo Ia. Esta evidência, junta a outras mais, foram responsáveis pela adesão de tantos adeptos da teoria da constante cosmológica zero à essa.

O campo de estudo acerca dessa componente misteriosa do nosso universo está em constante “movimento”. Visto que, este é um conhecimento em desenvolvimento, que está sendo construído e verificado “hoje” em diversos centros

de pesquisas espalhados pelo nosso planeta. Precisamos saber, conhecer, muito mais sobre energia escura, sobre sua composição, interação e sua influência no destino do universo. Precisamos de mais informação sobre ela! Vários cientistas se dedicam a juntar informações suficientes, que respondam a parte das perguntas que existem sobre energia escura, não sabemos quando ou quem vencerá esta corrida, mas quando houver um vencedor será fantástico. Pois, está é uma das corridas mais importantes e mais disputadas deste século (TYSON, 2017).

A seguir veremos as principais evidências observacionais que sustentam a existência da energia escura.

2.1 EVIDÊNCIAS OBSERVACIONAIS

Vamos agora entender como e por que podemos considerar e afirmar a existência de uma componente chamada energia escura, a qual está acelerando o processo de expansão do Universo. Veremos as principais evidências observacionais da energia escura.

Assim como em meados de 1998 houve um “rebuliço” na comunidade de cosmologia e astrofísica, devido a descoberta da existência de uma constante cosmológica (RIESS et. al, 1998), em 2019 podemos experimentar um pouco deste “rebuliço”, porém, com pouca animação.

Muitos trabalhos têm surgido com o objetivo de verificar a validade das evidências que justificam a existência da energia escura. Mais adiante veremos a principal evidência observacional para a energia escura, as observações de supernovas do tipo Ia, e que no ano de 2019 foi publicado um trabalho que põe esta evidência “contra a parede” (KANG et al., 2019). Diante disso, um ponto de vista a ser considerado é que, estas possíveis refutações de evidências dizem, de fato, respeito a própria existência da energia escura ou é apenas uma questão de buscar uma nova forma de percebê-la e detectá-la, de forma que não exclua sua existência, mas sim, o meio pelo qual estamos procurando. Talvez só estejamos indo pelo caminho errado,

se encontrarmos o caminho certo a seguir iremos chegar até o nosso destino, a comprovação da existência da energia escura de forma clara e concreta.

2.1.1 IDADE DO UNIVERSO EM COMPARAÇÃO COM A IDADE DE ESTRELAS DE BAIXA MASSA EM AGLOMERADOS GLOBULARES

A idade do universo é discutida a partir de diferentes indicadores: idade de aglomerados globulares, idade a partir de abundância de urânio em estrelas velhas, sequência de resfriamento de anãs brancas, constante de Hubble, e medidas de flutuação da radiação de fundo (BARBUY, 2004).

Um aglomerado globular é um tipo de aglomerado estelar cujo formato é esférico e cujo interior é muito denso e rico em estrelas antigas, podendo, inclusive, ter até um milhão de estrelas, mantidas juntas pela ação da gravidade. A grande maioria desses aglomerados se formaram há mais ou menos 13 bilhões de anos e possuem algumas das estrelas mais velhas já catalogadas. São constituídos por estrelas formadas ao mesmo tempo, com semelhante composição química, e se encontrando todas à mesma distância de nós (BARBUY, 2004).

A evolução das estrelas ao longo de suas fases é bem conhecida e pode ser calculada em computadores. A idade dos aglomerados globulares é calculada pela comparação de cálculos com observações. A principal incerteza no cálculo de sua idade se dá pela imprecisão das distâncias desses aglomerados. Em 2003 foi anunciado o resultado do cálculo da idade das estrelas mais velhas do aglomerado globular M4, a partir de 123 órbitas do telescópio Hubble⁴, o qual forneceu uma idade de aproximadamente 13 bilhões de anos para essas estrelas e conseqüentemente para esta galáxia (BARBUY, 2004).

Esse resultado aponta a idade das estrelas mais velhas de um aglomerado globular de estrelas, isso nos permite afirmar que, o nosso universo tem no mínimo

⁴ O telescópio Hubble é um satélite artificial que passeia pelo universo sozinho, este transporta um grande telescópio para a luz visível e radiação infravermelha. O Hubble foi posto em órbita em 24 de abril de 1990, desde então ele tem sido um dos nossos "olhos" mais importante para a contemplação do universo escuro e distante.

aproximados 13 bilhões de anos, já que não é possível que as estrelas deste aglomerado sejam mais velhas que o próprio universo.

Nós podemos estimar a idade máxima do universo t_0 , calculando o tempo que as galáxias distantes, movendo-se à mesma velocidade de hoje, levaram para chegar aonde estão⁵, assumindo energia escura nula (FILHO, 2019). Fazendo uso da Lei de Hubble, que relaciona a velocidade de expansão da galáxia e a distância até ela, que é dada por:

$$v = H \times d \quad \rightarrow \quad v = \frac{d}{t_0} \quad \rightarrow \quad t_0 = H^{-1} \quad (1)$$

H é a constante de Hubble que possui um valor medido diretamente de galáxias entre 67 Km/s/Mpc e 74 Km/s/Mpc , o que fornece um resultado de $t_0 \leq 13$ a 15 bilhões de anos para o universo (FILHO, 2019). Sendo que, $1 \text{ Mpc} = \text{mega parsec} = 3,086 \times 10^{19} \text{ Km}$.

Se houvesse desaceleração causada pela atração gravitacional, a idade seria $t \geq 2/3 t_0$, isto é, entre 6 e 10 bilhões de anos. Por outro lado, nós vimos que as estrelas mais velhas encontradas em aglomerados globulares têm idade de aproximadamente 13,8 bilhões de anos. Mas se a energia escura não é nula, o universo está acelerando e sua idade é maior do que H^{-1} . Isto é, se o universo está se acelerando, pela presença de energia escura, ele estava se expandindo mais lentamente no passado e, portanto, levou mais tempo para chegar ao presente. O valor de 13,8 Giga-anos leva em consideração esta correção (FILHO, 2019).

Desta forma, podemos afirmar que a energia escura pode explicar esta discrepância no cálculo de idade do universo, pois sua presença pode aumentar a idade cósmica (FERREIRA, 2014).

⁵ Levando em consideração o fato de que, se “algo” ou “alguma coisa” cumpre uma determinada trajetória a uma determinada velocidade, isto se dará em um intervalo de tempo x . Agora, se esta mesma “coisa” cumpre esta mesma trajetória a uma velocidade que aumenta de forma acelerada, o tempo necessário para o mesmo trajeto será menor que x . Se você não tem conhecimento de que a velocidade variou, os resultados para o primeiro e segundo caso, serão diferentes, apresentarão discrepâncias de um para o outro.

2.1.2 OBSERVAÇÕES DE SUPERNOVAS (SN Ia)

O termo Supernova, ou SN, surgiu em 1934 quando a primeira supernova foi reconhecida como tal. Esta ocorreu quase meio século antes nas imediações da galáxia de Andrômeda. Para tornar claro como tinha sido violenta a explosão da “S Andromedae” ou SN 1885A, uma supernova na galáxia de Andrômeda, em 1885, foi necessário um grande avanço nos métodos de medida de distâncias. Dois astrônomos, Walter Baade e Fritz Zwicky, enquanto trabalhavam no Observatório Mount Wilson, na Califórnia, calcularam que aquela explosão estelar deva ter sido pelo menos 1 milhão de vezes mais brilhante que o Sol, daí nasce o termo “supernova” (SPARROW, 2018). Em 1934, estes ainda mostraram que, uma explosão de supernova consiste em uma conversão de enormes quantidades de massa em energia pura, como a famosa equação de Einstein nos diz, $E = mc^2$.

Mais adiante, nos estudos relacionados a pesquisa sobre supernovas, temos três grandes nomes, Zwicky, Baade e Rudolph Minkowski. Estes realizaram um intenso estudo de levantamentos sobre supernovas. Em 1941, Zwicky e Minkowski apresentaram um sistema de classificação cujas características fundamentais são utilizadas até os dias de hoje. Este foi baseado em dados de mais de uma dúzia de supernovas individuais (SPARROW, 2018).

A importância do estudo das observações de supernovas tipo Ia na cosmologia moderna não devem ser subestimadas. As observações das SN Ia pouco antes da virada do século forneceram a primeira evidência clara de uma expansão acelerada do universo e observações subsequentes combinadas com o agrupamento de galáxias⁶ e o fundo cósmico de microondas apontam para esse ponto, uma aceleração causada por um fluido de pressão negativa, apelidado de energia escura (Cinabro et. al, 2016).

As supernovas são classificadas em dois tipos, tipo I que não apresentam hidrogênio no espectro e tipo II que apresentam linhas de emissão ou absorção de

⁶ Um agrupamento de galáxias é um agregado de galáxias, compreendendo, pelo menos, 50 membros ligados gravitacionalmente. A exemplo, a nossa Via Láctea, a galáxia onde vivemos, é parte de um agrupamento de galáxias chamado de Grupo Local.

hidrogênio no espectro, alargadas pela alta velocidade de ejeção do gás. As supernovas do tipo I ocorrem tanto em galáxias espirais quanto em elípticas. Recentemente algumas SN Tipo I e, portanto, sem linhas de hidrogênio, foram descobertas nas vizinhanças de regiões H II e em braços espirais, e receberam a denominação de tipo Ib, enquanto as do tipo I clássicas, que apresentam forte absorção de silício, são chamadas de tipo Ia (FILHO e SARAIVA, 2004).

Regiões de HII são conhecidos como berçários estelares, sendo formado por restos gasosos da formação estelar recente. Dentre as regiões H II conhecidas, pode-se encontrar desde regiões compactas, com dimensões inferiores a 1 pc, até regiões H II gigantes, com cerca de 100 pc. Estas são frequentemente relacionadas com regiões formadoras de estrelas, pois as estrelas ionizantes encontradas são jovens, com menos de 10 milhões de anos, e ainda estando na sequência principal. Nas galáxias espirais, as regiões H II são principalmente encontradas sobre os braços espirais, nas elípticas são raras. Já nas galáxias irregulares, as regiões H II são encontradas por toda a galáxia (OLIVEIRA, 2014).

As supernovas de tipo Ia, que são associadas com a queima explosiva do carbono, ocorrem em sistemas binários, quando uma estrela anã branca com massa próxima à massa de Chandrasekhar recebe massa da companheira, que preenche seu lóbulo de Roche por expansão devido à evolução, ou podem ser originárias da coalescência de duas anãs brancas. A massa de Chandrasekhar é aproximadamente $3 \cdot 10^{30} Kg$, cerca de 1,44 vezes a massa do Sol. (EVANGELISTA, 2018). Quando a anã branca de carbono e oxigênio chega próximo da massa de Chandrasekhar, inicia-se a queima explosiva de carbono e oxigênio em níquel. O níquel decai radioativamente em cobalto, e este em ferro, liberando a energia que mantém a supernova brilhante. Sua curva de luz é tão similar de supernova para supernova, que as SN tipo Ia são utilizadas como indicadores de distâncias das galáxias (FILHO, 2016).

Uma das principais observações dessas supernovas foi realizada simultaneamente por duas equipes em colaboração em 1994, High-z Supernova Search Team (HSST) e o Supernova Cosmology Project SCP (SILVA, 2014). As duas

equipes buscavam as mesmas medições, porém com metodologias diferentes. Uma diferença entre as duas equipes foi como tratar a família das supernovas do tipo Ia de forma que o efeito da relação entre o brilho máximo da SN Ia e o declínio da luz fosse levado em consideração. Isso foi feito de maneira diferente em cada colaboração, mas os resultados foram os mesmos. Nos dois experimentos, as supernovas pareciam 10 a 15% mais distantes do que o esperado para um universo com baixa densidade de matéria (ou pior ainda, se fosse com alta densidade de matéria) (TYSON, 2017). As observações eram explicadas apenas se o universo tivesse sido acelerado de tal maneira que as distâncias das supernovas em um dado momento na evolução de sua expansão fossem maiores do que se não houvesse essa aceleração. E essa aceleração só poderia ser causada por um componente agindo contra a gravidade (uma antigravidade) (LAPUENTE, 2019).

Quando falamos em antigravidade nos vem à mente a constante cosmológica de Einstein, pois a constante cosmológica age como uma antigravidade que aponta no sentido contrário ao campo gravitacional. Por isso, estas observações de SN Ia são consideradas a principal evidência observacional da existência da energia escura. Duas equipes documentaram as mesmas observações e as mesmas constatações sobre o comportamento esperado e observado dessas supernovas, para que esta evidência seja descartada é necessário que sejam feitas novas observações, ainda mais precisas, e que elas forneçam dados que coloquem em risco o que já foi afirmado anteriormente, em 1994. Uma evidência deste tipo, como foi estabelecida, não é descartada tão facilmente.

Por fim, temos o mais importante, estas observações são comprovações de que o universo está expandindo de forma acelerada devido a energia escura, que age contra a gravidade.

2.1.3 RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO (RCF)

A existência da radiação cósmica de fundo foi prevista pelo físico americano de origem russa George Gamow e outros colegas nos anos 1940 (TYSON, 2017). A radiação cósmica de fundo é uma radiação remanescente do universo primordial, cuja

detecção foi tratada em estudo publicado por Arno Penzias⁷ e Robert Wilson⁸ em 1965 (HAWKING, 2015).

A primeira observação da RCF foi feita por Penzias e Wilson, do Bell Telephone Laboratories (a divisão de pesquisa da AT&T⁹), em 1964. Como o famoso físico George Gamow já havia previsto sua existência, nos anos 1960 todos sabiam sobre essa radiação e especulavam sobre a previsão de Gamow, que se apresenta em micro-ondas. No entanto, o Bell Labs foi o primeiro a detectá-la, por meio de uma enorme antena em forma de tuba unicamente desenvolvida com o propósito de detectar radiação em micro-ondas (TYSON, 2017).

O Bell Labs pertencia ao setor de telecomunicações. Eles não estavam empenhados a detectar a RCF, mas em abrir um novo canal de comunicação para a AT&T, mas para que esse canal fosse de qualidade, eles precisavam garantir que ao enviar ou receber um sinal, não iria haver contaminação por outras fontes. Penzias e Wilson não eram cosmólogos, eram físicos que trabalhavam naquela empresa de telecomunicações, e estavam buscando medir interferências de fundo em micro-ondas em seu receptor, para que assim pudessem fornecer uma comunicação limpa e livre de ruídos nessa faixa do espectro (TYSON, 2017). Eles conseguiram detectar e eliminar todas as fontes de interferência terrestre e cósmica conhecidas, entretanto, havia uma parte do sinal que eles não conseguiam eliminar. Penzias e Wilson observaram que na antena havia sujeira, ninhos de pombos, então pensaram que esse era o motivo de ainda haver interferência no sinal. Eles limparam a antena, mas, o sinal continuava com ruído, em todas as direções que o receptor apontava, o ruído estava presente (HAWKING, 2015).

⁷ Arno Allan Penzias foi um físico e astrônomo estadunidense da Universidade Columbia, premiado com as medalhas Henry Draper e Herschel em 1977, e com o Nobel de Física de 1978.

⁸ Robert Woodrow Wilson Penzias foi um físico e astrônomo estadunidense da Universidade Rice, premiado com as medalhas Henry Draper e Herschel em 1977, e juntamente com Arno Penzias, com o Nobel de Física de 1978.

⁹ AT&T é uma companhia americana de telecomunicações que provê serviços de telecomunicação de voz, dados de internet e dados para empresas de agências governamentais e particulares. Esta companhia se mantém ativa até os dias de hoje.

Mais tarde, em 1965, Penzias e Wilson publicaram um estudo onde tratavam esse ruído como um “excesso de temperatura de antena” que não podia ser atribuído a nada.

Ao mesmo momento, uma equipe de físicos em Princeton, liderada por Robert Dicke, estava construindo um detector específico para encontrar a radiação cósmica de fundo, porém sem sucesso. No instante em que Dicke tomou conhecimento do trabalho de Penzias e Wilson, a equipe soube do que se tratava aquele “excesso de temperatura de antena”. Ele percebeu que tudo estava se encaixando, inclusive o fato de que o sinal vinha de todas as direções no céu (TYSON, 2015).

Esse “excesso de temperatura” é o que conhecemos como radiação cósmica de fundo. E por tal descoberta, Penzias e Wilson receberam o Prêmio Nobel em 1978. A RCF rendeu mais um Prêmio Nobel em 2006, os astrofísicos americanos John C. Mather e George F. Smoot dividiram o prêmio. Eles conseguiram observar a RCF em uma ampla gama do espectro, levando a cosmologia para o âmbito de uma ciência experimental de precisão (TYSON, 2017).

Sua detecção permitiu estabelecer as chamadas eras cósmicas, relacionando tempo e temperatura e, assim, determinar as condições físicas dominantes em cada estágio da evolução do universo. Esta radiação foi precisamente caracterizada pelo satélite COBE (Cosmic Background Explorer) como uma radiação de corpo negro com temperatura de $T_0 = 2,725 \pm 0,001$ K (ALCANIZ, 2010).

Pensando no universo primordial denso e quente, a radiação interagiu constantemente com os elétrons e o universo era opaco, uma vez que o caminho livre médio era pequeno. Contudo, à medida que o universo se expandia, ele esfriava. Assim, quando a temperatura atingiu $T \approx 3000$ K (RYDEN, 2003), os íons e os elétrons se combinaram formando átomos neutros. Quando o universo atingiu um número significativo de elétrons livres, a radiação de fundo começou a percorrer livremente o universo sem interagir mais com os elétrons. Esta época é conhecida como “recombinação”, quando o universo ficou transparente à radiação. Gamow estimou a temperatura da RCF como sendo de $T \approx 5$ K (ALPHER, HERMAN, 1949). A diminuição

da temperatura desta radiação é uma consequência direta da expansão do universo (RIBEIRO, 2013).

Apesar de parecer uniforme, a RCF apresenta anisotropias. Em 1989, os dados recolhidos do COBE¹⁰ (Cosmic Background Explorer) puderam, pela primeira vez, comprovar a existência dessas anisotropias intrínsecas a RCF (JUNIOR, 2012).

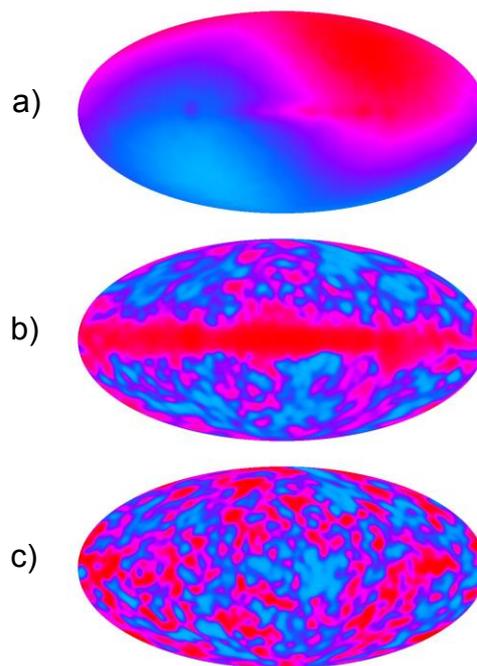


Figura 1: mapa das anisotropias na RCF, obtidos a partir dos dados coletados pelo instrumento DMR levado com o COBE. A imagem em a) ilustra o dipolo da RCF e dos movimentos relativos do Sistema Solar, Galáxia e Grupo Local em relação ao referencial da RCF. Na imagem em b) o efeito dipolo foi extraído, ficando evidente a contribuição da nossa galáxia. Na imagem em c) fica apenas a contribuição da RCF. Imagem extraída de (JUNIOR, 2012).

Juntamente com o COBE foram enviados três instrumentos para a coleta de dados: o DMR (*Differential Microwave Radiometer*), FIRAS (*Far Infrared Spectrophotometer*) e o DIRBE (*Diffuse InfraRed Background Experiment*).

As anisotropias na RCF nos revelam que esta radiação não se distribuiu uniformemente como havíamos pensado, existem regiões em que a temperatura da

¹⁰ O COBE foi um satélite lançado em 1989, o primeiro dedicado à cosmologia. Este tinha o objetivo de investigar a radiação cósmica de fundo do universo e coletar dados e medidas.

RCF se apresenta em maior valor. Na figura 1, as regiões em tons de rosa e vermelho apresenta temperatura maior que as regiões em azul, bem como maior concentração de matéria bariônica, como aglomerados de galáxias.

O que nos interessa saber neste ponto é que, as evidências que a RCF fornece para existência da energia escura vêm das observações dessas anisotropias na temperatura da RCF. A presença da energia escura tem influência sobre as anisotropias na RCF, o primeiro efeito observado é a mudança dos picos acústicos, e o segundo efeito é chamado de efeito SACHS-WOLF INTEGRADO (ISW), causado pela variação do potencial gravitacional. O segundo efeito é limitado à cálculos muito extensos, vamos nos concentrar no primeiro efeito e buscar compreendê-lo.

A mudança observada nos picos acústicos da RCF é originada das flutuações de temperatura que se deve a interação fóton-bárion no plasma primordial; essas flutuações, ainda, podem ser chamadas de oscilações acústicas. A partir destas oscilações, pode-se representar o primeiro pico acústico em termos de um harmônico fundamental que, por sua vez, pode fornecer informações sobre a curvatura do universo (MARQUES, 2015).

Tomando uma combinação de curvas geradas por dados de diversos modelos de energia escura e dados de parâmetros cosmológicos estimados por diferentes observáveis, incluindo medidas da RCF pelo satélite Planck, o que se observa é um bom ajuste para o modelo Λ CDM (Λ cold dark matter), que admite a componente Λ para a energia escura e a existência de matéria escura fria. Na figura 2 podemos observar a combinação de parâmetros cosmológicos e suas curvas, o que se observa é um bom ajuste das curvas de contorno para o modelo Λ CDM, representado na primeira imagem da respectiva figura.

Portanto, a RCF tem sido um parâmetro importante para a validação de um modelo cosmológico, através de seu espectro e propriedades das anisotropias de temperatura e polarização. Detecções mais sensíveis da RCF combinadas com outros observáveis (supernovas, por exemplo), podem ajudar a preencher as lacunas que permanecem em aberto sobre o “setor” escuro do universo (MARQUES, 2015).

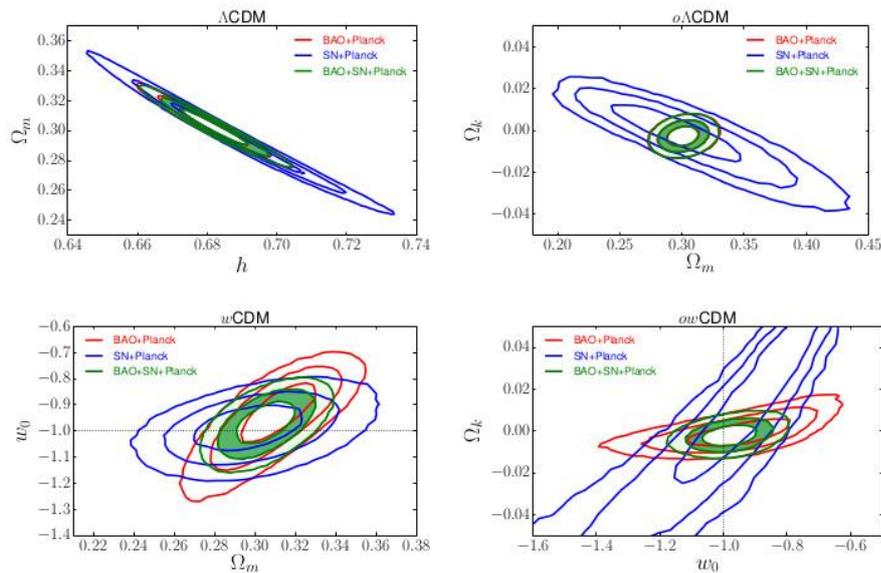


Figura 2: Combinação de contornos de confiança de parâmetros cosmológicos em uma variedade de modelos de energia escura: Λ CDM (superior esquerda), ω CDM (inferior esquerda), $\omega\Lambda$ CDM (superior direita), $\omega\omega$ CDM (inferior direita).¹¹ Imagem extraída de (AUBOURG, 2014).

As principais medidas de anisotropias são fornecidas pelo WMAP¹² (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) e pelos experimentos BOOMERanG¹³ e MAXIMA.

2.1.4 ESTRUTURAS EM LARGA ESCALA

Hoje existem boas evidências de que o Universo está em expansão acelerada, ou seja, não só distâncias entre corpos “estacionados” aumentam conforme o tempo, mas a velocidade desse distanciamento também (BERNARDI, 2020). Entre as

¹¹ Para fins de comparativo de ajuste de curvas, tomou-se os parâmetros dos modelos Λ CDM, ω CDM, $\omega\Lambda$ CDM e $\omega\omega$ CDM, respectivamente. Na referência (RIBEIRO, 2013), há um melhor detalhamento do estudo de comparativos deste tipo.

¹² A WMAP é sonda da NASA que tem o objetivo de estudar o espaço profundo e medir as diferenças de temperatura da RCF. Foi lançada em 2001 no Cabo Canaveral.

¹³ Telescópio no estilo balão, foi projetado para a realização do experimento cósmico de fundo de microondas. Foi o primeiro a obter imagens de alta fidelidade das anisotropias de temperatura da RCF. Ficou bastante conhecido pela descoberta de que a geometria do universo é quase plana, no ano de 2002.

maiores estruturas conhecidas de todo nosso Universo estão os aglomerados de galáxias. Estes podem ser formados por centenas e até milhares de galáxias.

Desde a formação das primeiras galáxias, existe uma tendência destas se atraírem gravitacionalmente. Este efeito provoca a aglomeração desses objetos (DES-Brazil). Produzindo um efeito contrário, a energia escura tende a interromper o crescimento destas estruturas, produzindo um estiramento no espaço, cujo crescimento se dá de forma acelerada (DES-Brazil). Por meio do estudo de número de aglomerados e da distribuição de massa deles ao longo de várias épocas do Universo será possível entender melhor este “cabo de guerra cósmico” entre a gravidade e a energia escura (DES-Brazil). Essa energia escura provoca um efeito dramático sobre a dinâmica do Universo, mudando a maneira como estruturas cosmológicas crescem. Isto fornece a possibilidade de que observações de formação de estruturas em larga escala possam fornecer um teste mais aprofundado das propriedades da energia escura, complementares às informações derivadas dos dados de supernovas Ia (LIBERATO, 2007).

Em diversos estudos, o desenvolvimento de estruturas no Universo com energia escura é assunto de grande relevância, particularmente através do modelo de colapso esférico (GUNN et al., 1972), em associação com funções de massa como a do formalismo trazido por Press & Schechter (PRESS AND SCHECHTER, 1974).

4. MODELOS DE ENERGIA ESCURA

Um modelo cosmológico tenta reunir respostas para as questões mais antigas já elaboradas pelo ser humano no tocante ao estudo do cosmos: “qual a origem do universo?” ou “de que é feito o universo?”. Como já vimos, os povos antigos elaboraram modelos cosmológicos para explicar o mundo como era observado. Atualmente não é diferente, o homem ainda busca elaborar um modelo cosmológico que explique o universo em que vivemos e suas distintas características observadas.

Neste capítulo abordaremos um dos importantes modelos cosmológicos, o modelo Λ CDM; veremos também, os problemas trazidos pelo referido modelo. Mais adiante apresentaremos, sem “profundidade”, alguns modelos alternativos para a energia escura, em especial, trataremos do modelo de Quintessência com mais rigor.

4.1 MODELO Λ CDM

Aqui, nós iremos dar ênfase ao modelo cosmológico mais concordante com as observações já aferidas na cosmologia, como as evidências observacionais que vimos no capítulo anterior. Este ainda deixa questões em aberto, que falaremos mais adiante, porém é o mais simples e em acordo com os dados observacionais.

O modelo cosmológico padrão (MCP), ou modelo Λ CDM, fornece uma descrição observacionalmente testada para a evolução do universo desde seus primeiros centésimos de segundos até o tempo presente.

Este modelo se sustenta em três pilares. O primeiro é o princípio cosmológico, este princípio diz que o universo é homogêneo e isotrópico, ou seja, não há pontos ou direções privilegiadas em nosso universo. O segundo é a hipótese de que todo o conteúdo do universo pode ser descrito como um gás perfeito clássico, ou seja, um gás que possui pressão diretamente proporcional a sua densidade. O terceiro pilar, é

composto pela teoria da relatividade geral de Einstein, que descreve a dinâmica do universo.

Apesar de estar sendo alvo de discussões acaloradas, a curvatura do universo, segundo o MCP é plana. Trabalhos recentes têm explorado novos métodos para a verificação desta afirmativa. Um deles traz o método de combinação dos dados colhidos pelo satélite Planck 2018 CMB com os dados mais recentes de cronômetros cósmicos¹⁴, obtendo resultado $\Omega_k = 0,0054 \pm 0,0055$ concordante com um universo espacialmente plano ¹⁵(VAGNOZZI et. al, 2020).

Em 1915, Albert Einstein chegou a sua equação final para a Teoria da Relatividade Geral, sendo está escrita por ele como (GRAEF, 2012):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}, \quad (2)$$

onde no lado esquerdo da equação temos o tensor¹⁶ métrico $g_{\mu\nu}$ que representa a geometria que é gerada pelo conteúdo material e energético do universo, que por sua vez, é representado, no lado direito da equação, pelo tensor energia-momento $T_{\mu\nu}$. A dedução desta equação está disponível no apêndice.

O tensor métrico, da equação (2), vem da equação que descreve um elemento de linha ds^2 , que é a distância entre dois eventos no espaço-tempo quadridimensional e é escrito como

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu. \quad (3)$$

Também no lado esquerdo da equação (2), aparece o termo $R_{\mu\nu}$. Este chamamos de tensor simétrico de Ricci, que vem da relação e símbolos de Christoffel

¹⁴ São objetos cósmicos de onde pode-se obter medidas da taxa de expansão das idades relativas de galáxias massivas em evolução passiva de tipo precoce. Dos dados de redshift é possível determinar cada taxa de expansão respectiva. Como a taxa de expansão depende dos parâmetros cosmológicos, incluindo o de curvatura, é possível medi-lo. Obtendo, por fim, o parâmetro de curvatura do universo.

¹⁵ Ω_k é o que chamamos de parâmetro de curvatura, que para esse resultado se aproxima de zero, apontando para um universo com geometria plana.

¹⁶ Um tensor é uma ferramenta geométrica utilizada para generalizar as entidades matemáticas, escalares e vetores, conforme sua ordem. Um escalar é um tensor de ordem 0, e um vetor é um tensor de ordem 1.

$$R_{\mu\nu} = \Gamma_{\mu\beta,\nu}^{\beta} - \Gamma_{\mu\nu,\beta}^{\beta} + \Gamma_{\mu\beta}^{\alpha}\Gamma_{\alpha\nu}^{\beta} - \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}\Gamma_{\alpha\beta}^{\beta}. \quad (4)$$

Os símbolos de Christoffel, por sua vez, são escritos em termos de tensores métricos, segundo a equação

$$\Gamma_{\mu\beta}^{\sigma} = \frac{g^{\sigma\nu}}{2} (g_{\mu\nu,\beta} + g_{\nu\beta,\mu} - g_{\mu\beta,\nu}). \quad (5)$$

O termo R é o escalar de Ricci ou escalar de curvatura, este é dado pela seguinte contração

$$R = R_{\mu}^{\mu} = g^{\mu\alpha}R_{\alpha\mu}. \quad (6)$$

A equação escrita em (2) foi elaborada por Einstein na intenção de encontrar uma solução matemática para um universo estático. Naquela época não havia evidências que apontassem para um universo em evolução, ou ainda, em expansão acelerada. Einstein, ainda, buscava que suas equações estivessem em acordo com o princípio de Mach¹⁷, que diz que a matéria determina a inércia (GRAEF, 2012).

Não alcançando seu objetivo, pois suas equações levaria a conclusão de que o universo, em algum momento, iria colapsar sobre si mesmo ou estaria expandindo para sempre. Einstein, então, adicionou o termo Λ a sua equação, com o objetivo de manter sua ideia, de que o universo seria estático, válida. Portanto, a equação (2) se torna:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}. \quad (7)$$

O modelo Λ CDM (Λ Cold Dark Matter) assume que o universo é preenchido por um fluido ideal, este fluido por sua vez é constituído por matéria escura fria¹⁸, matéria bariônica¹⁹ e uma componente Λ , que já chamamos de lambda, devido a presença de energia escura (MIRANDA, 2017). Inclusive, a letra grega Λ que compõe o nome do modelo em questão, que também é comumente chamada de constante cosmológica, foi introduzida por Einstein em 1917, em suas equações, para descrever um modelo cosmológico estático (RIBEIRO, 2013). Da mesma forma que diversos modelos

¹⁷ O princípio de Mach possui várias interpretações diferentes, uma delas diz que “a massa lá fora influencia a inércia aqui”.

¹⁸ Tipo de matéria “invisível” que não interage com fótons, daí vem sua a nomenclatura, pode ser encontrada em objetos muito massivos, como os buracos negros.

¹⁹ Matéria comum, composta principalmente por prótons, elétrons e nêutrons.

cosmológicos modernos, o modelo Λ CDM tem como base o princípio cosmológico²⁰. O universo apresenta geometria plana ($k = 0$), ou seja, não possui curvatura (ALCÂNTARA, 2017).

Para seguir adiante, tomamos por base os escritos matemáticos trazidos por Ahmad Borzou em sua obra intitulada *Theoretical and Experimental Approaches to Dark Energy and the Cosmological Constant Problem - Abordagens teóricas e experimentais para a energia escura e o problema da constante cosmológica* - publicada em 2018 pela Springer Theses. Ainda, o procedimento matemático que veremos adiante pode ser encontrado em diversas obras que abordem o conteúdo aqui tratado.

Vamos partir da métrica de Robertson-Walker dada pela equação:

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2] \right). \quad (8)$$

Esta é a métrica que melhor representa as simetrias de um espaço-tempo homogêneo e isotrópico. E sua assinatura é $(1, -1, -1, -1)$. A quantidade representada por k é o que chamamos de constante de curvatura do universo, podendo ter valores $k = 1$, $k = 0$ ou $k = -1$, para curvatura esférica, plana ou hiperbólica, respectivamente. Como já vimos, os dados experimentais apontam para um universo plano, ou seja, $k = 0$.

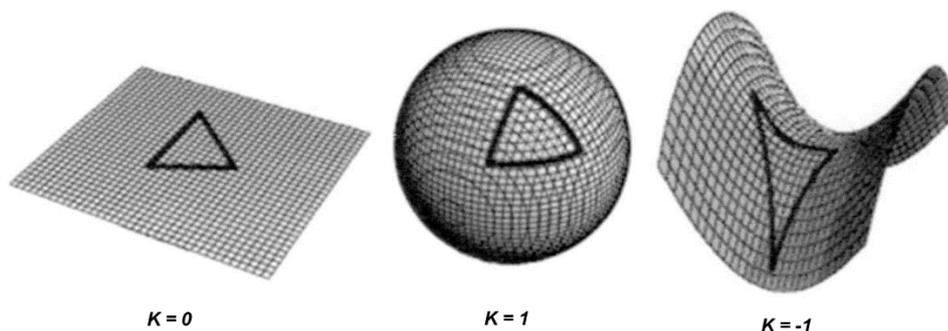


Figura 3: Possíveis geometrias para o universo. A primeira imagem representa curvatura plana, a segunda curvatura esférica e por último curvatura hiperbólica. Imagem extraída de (COSTA FILHO, 2009).

²⁰ O princípio cosmológico é o pressuposto básico de toda cosmologia moderna. Enunciamos como: o universo, em grande escala, é homogêneo e isotrópico. Homogêneo porque, segundo mapeamentos do céu para determinar a distribuição de galáxias, o universo apresenta uma distribuição uniforme de matéria, e isotrópico porque não há direção privilegiada dentro do nosso universo.

A distribuição do tensor energia-momento também deve ser homogênea e isotrópica. Para o caso em questão, fluido perfeito, podemos escrevê-lo como:

$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \rho(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -p(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p(t) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

onde ρ é a densidade de matéria do universo e p é a pressão.

Lembremos que, nos primeiros estágios de expansão, uma superioridade da densidade de energia da radiação com relação a energia da matéria. Mas, o que observamos hoje é que temos uma porcentagem muito pequena da densidade de radiação com relação a energia da matéria. Esse fato é atribuído a queda de temperatura pela qual o universo passou; essa queda de temperatura alterou as condições as quais as partículas estavam submetidas e, conseqüentemente, alterou a forma como interagiam. Daí, podemos afirmar que o universo passou por duas fases, uma chamamos de era da radiação e outra, era da matéria, esta última é a que o universo se encontra no tempo presente (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2015).

Sabendo da relação histórica da radiação e da matéria, vamos considerar, como de costume, dois tipos diferentes de energia-momento, como visto na equação (9), um descrito em termos da densidade e outro da pressão. Aqui, consideremos, radiação com pressão $p = \rho/3$ e a matéria sem pressão $p = 0$. Agora, conhecendo as quantidades que nos dão informações sobre a geometria e energia do universo, basta introduzir as equações (8) e (9) na equação de campo de Einstein (7), para que tenhamos uma equação que descreva bem a dinâmica do universo (BORZOU, 2018).

Se calcularmos, para a métrica de Friedmann-Robertson-Walker, os símbolos de Christoffel, as componentes do tensor de Ricci, o escalar de curvatura e o traço do tensor energia-momento, e substituirmos na equação de Einstein (7), chegamos nas equações de Friedmann,

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}, \quad (11)$$

para as componentes de índices 00. E,

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{-4\pi G(\rho + 3p)}{3} + \frac{\Lambda}{3}, \quad (12)$$

para as componentes de índices 11, 22 e 33. Reescrevamos a equação (11), de tal modo que:

$$H^2 = H_0^2 \left(\frac{8\pi G\rho}{3H_0^2} - \frac{k}{a^2 H_0^2} + \frac{\Lambda}{3H_0^2} \right), \quad (13)$$

onde H_0^2 é a constante de Hubble no tempo presente e é igual aos valores predefinidos de H . Podemos, ainda, reescrever essa última equação da seguinte maneira:

$$H^2 = H_0^2 \left(\Omega_m \frac{\rho}{\rho_0} - \frac{\Omega_k}{a^2} + \Omega_\Lambda \right), \quad (14)$$

onde

$$\Omega_m = \frac{8\pi G\rho_0}{3H_0^2},$$

$$\Omega_k = \frac{-k}{H_0^2}, \quad (15)$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2},$$

onde Ω_m , Ω_k e Ω_Λ são respectivamente, parâmetros de densidade de matéria, curvatura e energia escura. O subscrito 0 indica o valor presente das quantidades. Agora, é importante que saibamos como a densidade de matéria ou radiação muda em função do fator de escala $a(t)$.

Para obtermos essa informação, vamos utilizar a propriedade de conservação do tensor energia-momento:

$$\nabla_{\mu} T_{\nu}^{\mu} = \partial_{\mu} T_{\nu}^{\mu} + \Gamma_{\alpha\mu}^{\mu} T_{\nu}^{\alpha} - \Gamma_{\nu\mu}^{\alpha} T_{\alpha}^{\mu} = 0, \quad (16)$$

onde ∇_{μ} representa derivada covariante. Esta última equação é composta por outras quatro equações distintas. Sendo assim, para facilitar e chegar aonde pretendemos, vamos lidar apenas com um dos coeficientes e, portanto, vamos substituir $\nu = 0$. Logo, temos

$$\begin{aligned} \partial_{\mu} T_0^{\mu} + \Gamma_{\alpha\mu}^{\mu} T_0^{\alpha} - \Gamma_{0\mu}^{\alpha} T_{\alpha}^{\mu} &= 0, \\ \partial_0 T_0^0 + \Gamma_{0\mu}^{\mu} T_0^0 - \Gamma_{0\mu}^{\alpha} T_{\alpha}^{\mu} &= 0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \Gamma_{0\mu}^{\mu} \rho - \Gamma_{0\mu}^{\alpha} T_{\alpha}^{\mu} &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Sendo que,

$$\begin{aligned} \Gamma_{0\mu}^{\mu} &= 3 \frac{\dot{a}}{a}, \\ \Gamma_{0\mu}^{\alpha} T_{\alpha}^{\mu} &= -3 \frac{\dot{a}}{a} p. \end{aligned} \quad (18)$$

Daí, substituindo na equação (17):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\dot{a}}{a} [3\rho + 3p] = 0. \quad (19)$$

Para um universo dominado por matéria, $p = 0$ ²¹,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -3 \frac{\dot{a}}{a}. \quad (20)$$

As quantidades descritas por Γ (gama), é o que chamamos de símbolos de Christoffel, essas quantidades são formadas por derivadas parciais, e, portanto, essas derivadas aparecem nas equações subsequentes.

Integrando os dois lados da igualdade na equação (20), obtemos

$$\int_{\rho_0}^{\rho} \frac{1}{\rho} \partial \rho = -3 \int \frac{1}{a} \partial a \quad (21)$$

²¹ A matéria que consideramos é a matéria relativística, que não exerce pressão. Essa matéria relativística é equivalente a energia relativística de um corpo, de acordo com a equivalência massa-energia.

$$\ln(\rho) - \ln(\rho_0) = -3 \ln(a) \rightarrow \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) = -3 \ln(a)$$

$$e^{\ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)} = e^{-3 \ln(a)} \rightarrow \frac{\rho}{\rho_0} = a^{-3}.$$

Finalmente,

$$\rho = \frac{\rho_0}{a^3}. \quad (22)$$

Agora, para um universo dominado por radiação, $p = \rho/3$,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -4 \frac{\dot{a}}{a}. \quad (23)$$

Repetindo o processo de integração feito na equação (20) para obter (22), obtemos o resultado para (23):

$$\rho = \frac{\rho_0}{a^4}. \quad (24)$$

As equações (22) e (24) indicam que conforme o universo se expande, a densidade de energia da matéria relativística cai mais rápido do que a matéria não relativística (BORZOU, 2018). Daí, podemos dizer que existiu um momento, um ponto de cruzamento, em que o universo, que no início era dominado por radiação, passou a ser dominado pela matéria, uma vez que a densidade de radiação cai mais rapidamente. Esses resultados permitem reescrever a equação (14) como

$$H^2 = H_0^2 \left(\frac{\Omega_r}{a^4} + \frac{\Omega_m}{a^3} + \frac{\Omega_k}{a^2} + \Omega_\Lambda \right), \quad (25)$$

onde Ω_r representa o parâmetro de densidade para radiação. Podemos, ainda, fazer uma observação matemática desta última equação, veja que, com o passar de um longo período, todas essas quantidades desaparecem, menos a densidade de energia escura. De onde podemos concluir que em algum momento o universo será dominado pela constante cosmológica.

Partindo da afirmação feita anteriormente, justificando a escrita da equação (14), de que H_0 é igual aos valores predefinidos de H , decorre da equação (25), que

$$\Omega_r + \Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1. \quad (26)$$

Precisamos esclarecer dois pontos, o primeiro é que, como já sabemos, as observações apontam para um universo plano, ou seja, $\Omega_k = 0$. O segundo é que, a densidade de radiação do universo no tempo presente é perfeitamente desprezível, ou seja, $\Omega_r = 0$, sendo assim,

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1. \quad (27)$$

Tem havido várias tentativas para medir, de formas distintas, a densidade de matéria do universo. Um dos resultados mais precisos vêm da Colaboração Planck. Os dados anunciados sugerem uma densidade de matéria de $\Omega_m \simeq 0.3$ e densidade de energia escura de $\Omega_\Lambda \simeq 0.7$ (BORZOU, 2018).

Tendo conhecimento destas medidas do conteúdo de energia do universo, podemos estudar a dinâmica do universo. Vamos fazer uso do segundo conjunto de equações de campo de Einstein, na equação (12).

Em um universo sem energia escura, a equação (12) tem uma taxa de expansão positiva $\ddot{a} > 0$, se

$$\rho + 3p < 0. \quad (28)$$

Como é quase impossível encontrar matéria com densidade negativa, nós podemos afirmar com segurança que $\rho > 0$. Logo, da equação (28), concluímos que a pressão deve ser negativa. O modelo cosmológico de constante cosmológica apresenta essa característica de pressão negativa, e a equação de estado para a energia do vácuo é

$$p = -\rho, \quad (29)$$

que significa

$$\rho + 3p = \rho - 3\rho = -2\rho, \quad (30)$$

que é negativo devido a positividade de ρ , e de acordo com a equação (28), resulta em uma expansão com taxa positiva.

4.1.1 O PROBLEMA DA CONSTANTE COSMOLÓGICA E DA COINCIDÊNCIA

Como já vimos anteriormente, cerca de 68,3% do conteúdo presente no universo é proveniente de uma componente pouco conhecida que chamamos de energia escura. Vimos também que existe um modelo cosmológico bem simples e que corresponde bem a experimentos e a teoria da relatividade geral. A esse modelo damos o nome de Λ CDM, onde Λ representa a energia do vácuo e CDM representa a matéria escura fria.

Apesar de ser chamado modelo de concordância cósmica, o modelo Λ CDM não concorda em alguns aspectos observados, apresentando problemas. O primeiro problema pode ser chamado de problema de ajuste fino. E consiste na existência de uma discrepância entre o valor esperado para a constante cosmológica, com base nos princípios da física de partículas, e o valor observado cosmologicamente²². A invariância de Lorentz²³ nos diz que no vácuo o tensor energia-momento deve ter a forma²⁴

$$\langle T_{\mu\nu} \rangle = \langle \rho \rangle g_{\mu\nu}. \quad (31)$$

Daí, e de uma análise da equação (11), podemos dizer que a constante cosmológica de Einstein contribui com um termo $\Lambda/8\pi G$ à energia do vácuo efetiva (JESUS, 2010). Podemos justificar que a energia do vácuo não é fisicamente importante²⁵, mas na teoria de campos, existe uma energia de ponto zero cujo valor é maior que zero.

Na visão clássica, o vácuo é entendido como uma região desprovida de matéria ou qualquer tipo energia. No entanto, na visão quântica, o vácuo é entendido como uma região que possui um estado de mínima energia (RIBEIRO, 2013).

²² Dizer que determinado valor é observado cosmologicamente, quer dizer que este valor pode ser obtido por meio de medidas coletadas a partir de observações.

²³ Um invariante de Lorentz é uma quantidade que se mantém inalterada sobre uma transformação de Lorentz. Esta por sua vez, mantém as equações da relatividade inalteradas de um sistema inercial para outro.

²⁴ O tensor energia-momento possui essa forma, proporcional ao tensor métrico, porque ele é o único tensor de segunda ordem que é invariante de Lorentz.

²⁵ A energia do vácuo só possui valor diferente de zero quando partimos para o estudo quântico, no entanto, estudo da física clássica a energia do vácuo não é fisicamente importante.

Se somarmos as energias de ponto-zero de um campo de massa m até uma energia de corte Λ , a densidade de energia do vácuo pode ser calculada da seguinte maneira (LIMA, 2009),

$$\langle \rho \rangle = \int_0^\Lambda \frac{4\pi k^2 dk}{(2\pi)^3} \frac{1}{2} \sqrt{k^2 + m^2} \approx \frac{\Lambda^4}{16\pi^2}. \quad (32)$$

Levando em consideração que a relatividade geral é válida até a escala de Planck, tomamos Λ como a massa de Planck, ou seja, $\Lambda = 10^{19} GeV$. Finalmente, o resultado encontrado para a densidade de energia do vácuo é (FERREIRA, 2014)

$$\rho_{vác} \sim 10^{74} GeV^4. \quad (33)$$

E assim chegamos ao principal problema do modelo de constante cosmológica. Apesar do valor encontrado em (33), observações atuais indicam que o valor para a densidade de energia do vácuo equivale a

$$\rho_{obs} = \Lambda = 2.1 H_0^2 \sim 10^{-47} GeV^4. \quad (34)$$

Podemos enxergar o problema mais claramente se calcularmos a proporção do valor esperado sobre o valor observado

$$\frac{\rho_{exp}}{\rho_{obs}} \sim 10^{121}, \quad (35)$$

que possui uma discrepância de 121 ordens.

No ano 2000, S. Weinberg propôs uma solução para esse problema. Por meio do princípio antrópico, ele afirma que o nosso universo seria apenas mais um dentre vários outros, onde cada um destes possuem uma constante cosmológica. E o nosso universo possui um valor de constante cosmológica que o possibilita desenvolver vida inteligente, e, portanto, seres capazes de perguntar sobre o valor da constante cosmológica. Apenas universos com constante cosmológica com valor próximo ao do nosso universo poderia desenvolver vida inteligente (WEINBERG, 2001). Apesar de parecer resolver o problema, fica claro que não há sustentação científica para sua proposição.

Para mais detalhes matemáticos você pode consultar a referência (BORZOU, 2018).

Há outro problema, chamado de problema da coincidência cósmica. Esse problema consiste em dizer que existe uma coincidência aproximada entre a densidade de energia do vácuo e a densidade de matéria no universo, tendo em vista que a densidade de energia escura só passou a dominar o universo recentemente (BATISTA, 2010). Essas energias variam conforme o universo expande, e conforme uma cresce a outra decresce, então, existe um período em que houve a transição de uma fase para a outra, e esse período está sendo vivido e observado, coincidentemente, no tempo presente. Hoje vivemos em uma época privilegiada, onde acontece o encontro entre as eras do universo, a primeira dominada por matéria e a segunda dominada por radiação.

Vários modelos cosmológicos diferentes surgiram com a intenção de solucionar os problemas do modelo Λ CDM. Apesar de serem modelos de aspectos atraentes, estes possuem e levantam novos problemas.

4.2 MODELOS DE ENERGIA ESCURA ALTERNATIVOS

Todos os modelos que serão citados surgem da falta de justificativa para o problema da constante cosmológica. No entanto, iremos apenas citá-los, trataremos com mais afinco, apenas, o modelo de quintessência. Este tem sido “alvo” em diversos trabalhos e com abordagens promissoras, sendo um dos modelos que consegue suprir as “brechas” deixadas pelo modelo de constante cosmológica.

Na referência (JESUS, 2010), o autor cita uma espécie de classificação de modelos de energia escura considerando que existem três maneiras para que uma explicação à aceleração da expansão, determinada pelas observações de supernovas, seja atingida. Nós iremos adotar tal classificação, vendo o que propõe cada uma e a que modelos nos leva.

Na primeira classe, nós iremos considerar que a teoria da gravitação, dada pela Relatividade Geral e os princípios de isotropia e homogeneidade, que levam a métrica de Friedmann se mantém inalterados. Aqui, é permitido substituir a componente escura Λ por outra componente com pressão negativa e assim obter aceleração ou, pode-se substituir pela criação de matéria a partir das flutuações quânticas do campo gravitacional, que também podem gerar uma pressão negativa e por consequência, aceleração.

Dentre os substitutos a componente escura Λ , temos: os modelos de campos escalares (consideram que a energia escura se comporta como um campo escalar), como por exemplo os modelos de quintessência; os modelos CCDM, que supõem que a matéria escura fria é criada a partir de flutuações quânticas do campo gravitacional, devido à sua variação, gerando assim, pressão negativa levando a aceleração; os modelos XCDM²⁶, onde se considera a interação entre energia e matéria escuras, este é um modelo mais complexo, porém uma possibilidade de contornar o problema da constante cosmológica e o problema da coincidência.

No segundo caso, consideramos que apenas a Relatividade Geral e a isotropia se mantêm inalteradas, a homogeneidade por sua vez, é modificada. Isso nos leva aos modelos inomogênicos. Estes por sua vez nos levam a métricas distintas da métrica FRW. Estes modelos são os menos encontrados nas bibliografias, encontramos apenas os modelos inomogênicos de Lamaître-Tolman-Bondi (VARGAS, 2016), que são abordados de forma muito superficial.

Em terceiro caso, temos os modelos de gravidade modificada. Estes modelos propõem modificações na teoria da gravitação, o que leva a modelos $F(R)$ ou modelos de branas. Uma possível gravitação quântica também pertenceria a essa categoria. Os modelos de branas supõem que o universo possui uma dimensão espacial a mais, que é percebida apenas pelos grávitons, que são as partículas mediadoras do campo gravitacional, e provoca uma diluição da gravitação (JESUS, 2010). Apesar desses modelos possuírem recursos promissores, ainda não existe um modelo bem

²⁶ Assim como CCDM, XCDM é a nomenclatura dada a um modelo de energia escura, onde se considera que a energia escura se comporta como um campo escalar, assim como no modelo de quintessência que veremos a seguir.

estabelecido, isso devido a uma gama de condições que eles ainda precisam satisfazer (BORZOU, 2018).

4.2.1 MODELO DE QUINTESSÊNCIA

Como vimos acima, os modelos de quintessência consideram que a energia escura se comporte como um campo escalar²⁷. A quintessência²⁸ seria um campo invisível (similar aos campos eletromagnético e gravitacional) que muda lentamente à medida que o Universo se expande (LIVIO, 2009). No modelo de constante cosmológica nós identificamos uma componente fixa Λ , no modelo de quintessência nós temos uma componente dinâmica ϕ , campo escalar, e um potencial $V(\phi)$.

A densidade lagrangeana da quintessência padrão é dada por (BATISTA, 2010):

$$\mathcal{L} = \frac{\partial_\mu \phi \partial^\mu \phi}{2} - V(\phi). \quad (36)$$

Tomemos o tensor energia-momento,

$$T_{\mu\nu} = \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - g_{\mu\nu} \mathcal{L}. \quad (37)$$

Aplicando o tensor métrico $g^{\alpha\mu}$, iremos chegar a T_ν^μ para um fluido perfeito.

$$T_\nu^\alpha = g^{\alpha\mu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - g^{\alpha\mu} g_{\mu\nu} \mathcal{L} = \partial^\alpha \phi \partial_\nu \phi - \mathcal{L}. \quad (38)$$

Por fim, teremos o tensor energia-momento:

$$T_\nu^\mu = \partial^\mu \phi \partial_\nu \phi - \mathcal{L}. \quad (39)$$

Onde, de acordo com a matriz diagonal de T_ν^μ , e substituindo a lagrangeana:

²⁷ Um campo escalar, na física e na matemática, associa um escalar a todo ponto no espaço, onde o escalar tanto pode ser um número matemático, como pode ser uma grandeza física. Campos escalares podem ser utilizados, por exemplo, para indicar a distribuição de temperatura pelo espaço. Este depende apenas da componente temporal.

²⁸ Essa nomenclatura vem do fato de que a energia escura seria mais uma componente além dos fótons, bárions, neutrinos e matéria escura (BATISTA, 2010).

$$\rho = T_0^0 = \partial_0 \phi \partial^0 \phi - \left[\frac{g^{\alpha\beta} \partial_\alpha \phi \partial_\beta \phi}{2} - V(\phi) \right],$$

$$T_0^0 = \rho = \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi), \quad (40)$$

$$T_1^1 = T_2^2 = T_3^3 = -p = \partial_1 \phi \partial^1 \phi - \left[\frac{g^{\alpha\beta} \partial_\alpha \phi \partial_\beta \phi}{2} - V(\phi) \right] = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi).$$

Sendo, $\partial_0 \phi = \partial^0 \phi = \dot{\phi}$, $\partial_1 \phi = \partial^1 \phi = 0$, $g^{00} = 1$ e $g^{11} = -1$, temos os resultados:

$$T_0^0 = \rho = \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi), \quad (41)$$

$$T_1^1 = T_2^2 = T_3^3 = -p = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi).$$

Obtendo densidade e pressão, respectivamente:

$$\rho = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi), \quad (42)$$

$$p = \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi).$$

Para determinarmos uma equação de movimento para este campo escalar no espaço-tempo plano de Friedmann-Robertson-Walker, façamos o seguinte procedimento matemático:

$$H = \frac{\dot{a}}{a} \rightarrow \dot{H} = \frac{\ddot{a}}{a} - \frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{\ddot{a}}{a} - H^2,$$

$$H^2 = \frac{2}{3} \rho - \frac{k}{a^2}. \quad (43)$$

Derivando a última equação em (43),

$$2H\dot{H} = \frac{2}{3} \dot{\rho} + 2 \frac{k}{a^2} \frac{\dot{a}}{a}, \quad (44)$$

$$H\dot{H} = \frac{1}{3} \dot{\rho} + \frac{k}{a^2} H,$$

$$\dot{H} = \frac{1}{3H}\dot{\rho} + \frac{k}{a^2} = \frac{\ddot{a}}{a} - H^2.$$

Das equações de Friedmann²⁹, temos

$$\frac{1}{3H}\dot{\rho} + \frac{k}{a^2} = -\frac{1}{3}\rho - p - \frac{2}{3}\rho + \frac{k}{a^2},$$

$$\frac{1}{3H}\dot{\rho} = -\rho - p, \quad (45)$$

$$\dot{\rho} = -3H(\rho + p),$$

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0,$$

que chamamos de equação de continuidade ou da conservação de energia. Esta equação nos diz que o conteúdo do universo possui característica contínua, ou seja, não existe nenhuma fonte ou sumidouro, o conteúdo se mantém em conservação (MOTA, 2015).

Sendo $\rho = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi)$, segue que:

$$\dot{\rho} = \dot{\phi}\ddot{\phi} + V(\phi)\dot{\phi},$$

$$\dot{\phi}\ddot{\phi} + V(\phi)\dot{\phi} + 3H\left(\frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi) + \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi)\right) = 0, \quad (46)$$

$$\dot{\phi}\ddot{\phi} + V(\phi)\dot{\phi} + 3H\dot{\phi}^2 = 0,$$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V(\phi) = 0.$$

Por fim, esta última em (46) chamamos de equação de movimento para um campo escalar. Esta equação mostra como o campo ϕ evolui com o tempo, bastando que o potencial $V(\phi)$ seja conhecido. Ainda, podemos destacar aqui, que sendo determinado um potencial, pode-se determinar um modelo. Ou seja, teremos modelos diferentes para potenciais diferentes. Na figura 4, podemos observar alguns potenciais possíveis para o modelo de quintessência. Com base nessa afirmação, surgiram diversos modelos com campos escalares, cada um considerando um potencial

²⁹ As equações de Friedmann que aparecem em (11) e (12) possuem o termo da constante cosmológica Λ , nesse caso, este termo deve ser desconsiderado. Assim como, $4\pi G = 1$ e $8\pi G = 2$.

diferente, levando a comportamentos diferentes para a dinâmica do universo (MOTA, 2015).

O parâmetro da equação de estado ³⁰ para esse caso é dado por:

$$\omega_\phi = \frac{p_\phi}{\rho_\phi} = \frac{\frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi)}{\frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi)}. \quad (47)$$

Sendo desta forma, podemos fazer algumas observações. Perceba que, se $\dot{\phi} \gg V(\phi)$ temos parâmetro da equação de estado igual a 1. Se $\dot{\phi} \ll V(\phi)$ o parâmetro da equação de estado é igual a -1, que é o caso de constante cosmológica. E, se $\dot{\phi} = V(\phi)$, o parâmetro da equação de estado é igual a zero.

$V_0 \exp(-\lambda\phi)$	Ratra & Peebles (1988), Wetterich (1988), Ferreira & Joyce (1998)
$m^2\phi^2, \lambda\phi^4$	Frieman et al (1995)
$V_0/\phi^\alpha, \alpha > 0$	Ratra & Peebles (1988)
$V_0 \exp(\lambda\phi^2)/\phi^\alpha$	Brax & Martin (1999,2000)
$V_0(\cosh \lambda\phi - 1)^p$	Sahni & Wang (2000)
$V_0 \sinh^{-\alpha}(\lambda\phi)$	Sahni & Starobinsky (2000), Ureña-López & Matos (2000)
$V_0(e^{\alpha\kappa\phi} + e^{\beta\kappa\phi})$	Barreiro, Copeland & Nunes (2000)
$V_0(\exp M_p/\phi - 1)$	Zlatev, Wang & Steinhardt (1999)
$V_0[(\phi - B)^\alpha + A]e^{-\lambda\phi}$	Albrecht & Skordis (2000)

FIGURA 4: potenciais possíveis no modelo de quintessência. Figura extraída de (BATISTA, 2010).

Substituindo o parâmetro de densidade e o de pressão nas equações de Friedmann nós obtemos,

³⁰ Uma equação de estado estabelece relação matemática entre grandezas termodinâmicas, esta equação terá a função de descrever o estado da matéria sob um conjunto de condições físicas.

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right),$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8\pi G}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi) \right).$$
(48)

No caso de um universo dominado por fluido com equação de estado constante, podemos descrever sua evolução por meio das seguintes equações:

$$H = \frac{2}{3(1+\omega)(t-t_0)},$$

$$a(t) \propto (t-t_0)^{\frac{2}{3(1+\omega)}},$$

$$\rho \propto a^{-3(1+\omega)}.$$
(49)

Note que, as equações em (49) são válidas apenas para $\omega \neq -1$, com t_0 sendo uma constante (GRAEF, 2012).

Em um universo dominado por radiação $\omega = 1/3$. Neste caso, temos o seguinte parâmetro de aceleração e densidade:

$$a(t) \propto (t-t_0)^{\frac{1}{2}},$$

$$\rho \propto a^{-4}.$$
(50)

Em um universo dominado por matéria $\omega = 0$, temos:

$$a(t) \propto (t-t_0)^{\frac{2}{3}},$$

$$\rho \propto a^{-3}.$$
(51)

Já, em um universo dominado por energia escura $\omega < -1/3$, temos:

$$a(t) \propto (t-t_0)^p, \text{ sendo } p > 1.$$
(52)

Modelos que consideram campos escalares, como os modelos de quintessência, precisam considerar que o campo escalar em questão possua comportamento semelhante ao de uma constante cosmológica, pois só assim estará de acordo com os dados observacionais. Porém, isso significa dizer, que esses modelos sofreriam dos mesmos problemas que o modelo de constante cosmológica. Mas, o parâmetro ω possui uma certeza que varia de 5% à 10% apenas, dando

margem para possíveis correções (CLEMSON et. al, 2011). Com essa intenção foram propostos modelos que corrigem esse valor utilizando-se da interação entre energia escura e partículas da matéria escura, podendo resolver os problemas que ainda permanecem no modelo de quintessência. Este modelo é chamado de interagente.

Nestes modelos, é considerada uma interação entre a energia escura e a matéria escura, de modo que estas duas componentes do setor escuro do universo não possuem uma evolução independente, mas possuem conservação conjunta. E a troca de energia entre as duas componentes em questão, pode levar a determinados valores para este acoplamento que podem explicar o modo como objetos cósmicos muito antigos, como os quasares, evoluíram ao longo do tempo (WANG et. al, 2007). Assim, por meio do decaimento de energia escura em matéria escura e vice-versa, o problema da coincidência pode ser suavizado (GRAEF, 2012).

A correlação entre o setor escuro do universo pode deixar marcas nos aglomerados de galáxias. Foi observado, por meio do efeito de lentes gravitacionais, que existe um desalinhamento entre a matéria escura e a matéria bariônica, e viu-se que este desalinhamento pode ter sido causado pela interação que a matéria escura tem com a energia escura (BALDI et. al, 2011) e (PELLICER et. al, 2011).

Os modelos de interação do setor escuro tem sido alvo de diversos trabalhos, entre estes (BERNARDI, 2020), (FENG et. al, 2008) e (HE et. al, 2008). Daí a importância de se destacar os modelos interagentes como uma alternativa para solucionar os problemas trazidos pela constante cosmológica que persiste mesmo quando consideramos outra forma de representação da energia escura.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa proposta buscou-se investigar, por meio da bibliografia disponível, a história relacionada a energia escura, quais aspectos do universo sustentam a necessidade da energia escura, bem como os principais candidatos a energia escura. Partindo da história primitiva da investigação sobre o cosmos, passando pelos principais eventos do desenvolvimento da cosmologia moderna, a exemplo os escritos de Einstein (teoria da relatividade geral), a descoberta do universo em expansão e a detecção da radiação cósmica de fundo até pesquisas mais recentes na área como o estudo das anisotropias da radiação cósmica e fundo e os efeitos que a energia escura têm sobre estas.

Também foi feito, em apêndice, o tratamento matemático necessário para a obtenção das equações de campo de Einstein, visto que, nos modelos de energia escura é imprescindível a apresentação dos procedimentos matemáticos que estão por trás dos conceitos envolvidos na abordagem de tal conteúdo.

Dos modelos apresentados, mesmo possuindo “brechas” ou “furos”, o modelo da constante cosmológica ou modelo de concordância (Λ CDM) se apresenta como o candidato favorito para explicar a expansão acelerada do universo, a existência da componente energia escura. Modelos alternativos, como os modelos de quintessência são apresentados como alternativas ao modelo Λ CDM, porém os problemas encontrados em Λ CDM permanecem.

É importante destacar que, este é um trabalho estritamente de revisão bibliográfica, os conteúdos necessários para um aprofundamento no tema proposto não é parte do currículo do curso de licenciatura em física, esta parte fica de interesse individual do pesquisador. Portanto, para a realização desta revisão foi necessária uma leitura de diversos materiais, indo de pesquisas em cumprimento a exigências de cursos de graduação, mestrado e doutorado a revistas, artigos etc. Pode-se observar um aspecto em comum a todos estes trabalhos, todos eles possuem uma escrita muito específica e um tratamento matemático muito rigoroso, o que exige do leitor

conhecimentos que não estão disponíveis. Daí vem um aspecto importante deste trabalho, onde buscou-se simplificar conceitos muito específicos, possibilitando o acesso desse conhecimento a leitores leigos no assunto.

Podemos ainda, acreditar que, com a melhoria da tecnologia disponível para obtenção de dados dos principais observáveis, como a radiação cósmica de fundo, seja possível solucionar os problemas encontrados no modelo Λ CDM, sem ter que descartá-lo em favor de outro modelo para energia escura. Como o nosso conhecimento sobre a origem e comportamento das componentes do setor escuro, matéria e energia escura, ainda são minimamente conhecidos, podemos em algum momento tratar com mais afinco os modelos interagentes, assim poderemos investigar o quão uma componente pode influenciar sobre a outra, seja no modo de detecção ou de interação propriamente dita entre elas.

APÊNDICE

DA DEFINIÇÃO DE TENSOR À EQUAÇÃO DE CAMPO DE EINSTEIN

Para dar início aos estudos dos elementos da álgebra tensorial, foram tomadas por base duas referências (DALARSSON, M.; DALARSSON, N., 2003) e (FLEICH, 2012).

Começemos por definir o que é um tensor e qual a diferença de um tensor para um vetor. Um escalar é um único valor sem direção indicada, que representa uma quantidade que não varia entre sistemas de coordenadas. Já um vetor é uma matriz de três valores (no espaço tridimensional) chamados componentes vetoriais, que combinados com vetores de base (indicadores direcionais) formam uma quantidade que não varia conforme o sistema de coordenadas é alterado. Já um tensor de classificação n é uma matriz de 3^n valores (espaço tridimensional) que combinam com múltiplos indicadores direcionais (vetores de base) para formar uma quantidade que não varia conforme o sistema de coordenadas é alterado. O número de componentes de um tensor é dado por 3^n , onde n é a classificação do tensor. Por exemplo, um tensor de segunda ordem tem $3^2 = 9$ componentes, de ordem zero tem $3^0 = 1$ componentes e assim por diante.

Os tensores podem ser somados e subtraídos, assim como vetores. Para os vetores, sabemos que a soma entre eles é dada, simplesmente, adicionando seus respectivos componentes. Vejamos:

$$\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}. \quad (\text{A.1})$$

Assim, o vetor \vec{C} é a soma resultante dos respectivos componentes dos vetores \vec{A} e \vec{B} , e para os tensores trata-se de forma análoga. É importante lembrar que, os tensores a serem adicionados devem ter o mesmo número de cada tipo de índice.

Para realizar a multiplicação de tensores, temos duas possibilidades, uma chamada de produto exterior e outra chamada de produto interno (ou ponto). O produto exterior entre dois tensores tem como resultado um novo tensor de ordem igual a soma das ordens individuais de cada tensor, por exemplo:

$$A_j^i B_{lm}^k = C_{jlm}^{ik}. \quad (\text{A.2})$$

Notemos que, o tensor A é de ordem dois e o tensor B é de ordem três, e o tensor resultante C de ordem cinco.

O produto interno entre tensores pode ser entendido como uma generalização do produto escalar. Lembrando que o produto interno entre dois vetores produz um resultado escalar, então podemos esperar que o produto interno entre dois tensores produza um tensor de menor grau. Para entender esse processo, precisamos entender como funciona a contração de um tensor. Para contrair um tensor, basta definir um índice repetido. Vejamos:

$$C_{jl}^{ij} = C_{1l}^{i1} + C_{2l}^{i2} + C_{3l}^{i3} = D_l^i. \quad (\text{A.3})$$

Só fazemos o uso de componentes contravariantes ou covariantes quando selecionamos um sistema de coordenadas. Podemos optar por um sistema de coordenadas que tornem invariante quantidades como comprimento e ângulo, para isso precisamos de um tensor que forneça a métrica. Para entender o papel do tensor métrico consideremos dois pontos separados por uma distância infinitesimal ds . Se o vetor $d\vec{r}$ se estende de um ponto a outro, em seguida o elemento diferencial de comprimento será: $ds^2 = d\vec{r} \cdot d\vec{r}$. O vetor $d\vec{r}$ pode ser escrito usando componentes contravariantes e coordenadas de base (\vec{e}_i), como umas das duas formas:

$$\begin{aligned} d\vec{r} &= \vec{e}_i dx^i, \\ d\vec{r} &= \vec{e}^i dx_i. \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Escrevamos ds^2 com componentes contravariantes dx^i em ambos os lados:

$$ds^2 = d\vec{r} \cdot d\vec{r} = \vec{e}_i dx^i \cdot \vec{e}_j dx^j = (\vec{e}_i \cdot \vec{e}_j) dx^i dx^j = g_{ij} dx^i dx^j, \quad (\text{A.5})$$

onde g_{ij} envolve apenas componentes covariantes. Note que, podemos obter o tensor métrico envolvendo apenas componentes contravariantes:

$$ds^2 = d\vec{r} \cdot d\vec{r} = \vec{e}^i dx_i \cdot \vec{e}^j dx_j = (\vec{e}^i \cdot \vec{e}^j) dx_i dx_j = g^{ij} dx_i dx_j, \quad (\text{A.6})$$

onde g^{ij} envolve apenas componentes contravariantes. A outra opção é obter, de modo análogo, ds^2 com componentes contravariantes de um lado e componentes covariantes do outro.

$$ds^2 = dx^i dx_j. \quad (\text{A.7})$$

Não é necessário para o caso acima escrever um tensor métrico devido aos tensores de base para esse caso. Se o elemento de linha ds^2 está escrito de uma dessas duas formas, podemos ter certeza de uma coisa: a distância entre dois pontos deve ser a mesma. Portanto, é trabalho do tensor métrico ligar o produto de incrementos e mudanças nas coordenadas expressas em qualquer componente (covariante ou contravariante) para tornar a distância dentre dois pontos invariante. Por isso, que a tensor métrica nos informa a geometria do espaço.

O tensor métrico g_{ij} , num espaço tridimensional, pode ser escrito em forma matricial como:

$$g_{ij} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix}. \quad (\text{A.8})$$

Podemos usar o tensor métrico para aumentar ou diminuir índices de outros tensores, que foi usado para converter um índice contravariante em um covariante (assim baixando um índice). Esse procedimento pode também ser utilizado para tensores de ordem maior.

Se tivermos um vetor \vec{A} expresso em coordenadas gerais, com vetores de base covariantes \vec{e}_i como:

$$\vec{A} = A^i \vec{e}_i. \quad (\text{A.9})$$

A derivada de \vec{A} em relação a coordenada x^1 é:

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial x^1} = \frac{\partial A^i}{\partial x^1} \vec{e}_i + A^i \frac{\partial \vec{e}_i}{\partial x^1}, \quad (\text{A.10})$$

Para entendermos o processo de derivada covariante iremos introduzir os símbolos de Christoffel, escrito como a letra grega maiúscula gama (Γ), que

simplesmente representa o coeficiente de ponderação para um dos vetores de base. Daí, o relacionamento para os símbolos de Christoffel:

$$\Gamma_{ij}^k e_k = \frac{\partial \vec{e}_i}{\partial x^j}. \quad (\text{A.11})$$

Na equação (A.11), Γ dá a magnitude de um componente do vetor derivado, k diz quais os pontos vetoriais de base estão na direção desse componente no vetor derivado, i diz qual a mudança de base do vetor que está sendo considerado e j diz qual coordenada está sendo variada para causar uma mudança no vetor de base.

Realizando a substituição da equação (A.11) na equação (A.10), obtemos:

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial x^j} = \frac{\partial A^i}{\partial x^j} \vec{e}_i + A^i (\Gamma_{ij}^k \vec{e}_k). \quad (\text{A.12})$$

Fazendo o intercambio dos índices i e k no segundo termo e extraindo o fator comum, que é agora o vetor de base \vec{e}_i :

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial x^j} = \left(\frac{\partial A^i}{\partial x^j} + A^k \Gamma_{kj}^i \right) \vec{e}_i. \quad (\text{A.13})$$

Essa definição nos é importante, pois iremos formular muitas outras definições e fazer passagens que utilizam esta definição. Vamos estudar como ocorre o transporte paralelo de um vetor ao longo de um caminho fechado que possuiu curvatura entre dois pontos. Em particular, se um vetor é transladado paralelamente ao longo de algum caminho fechado e volta ao mesmo ponto de origem, ele não coincidirá com o vetor original. Essa alteração no vetor transladado é indicada por ΔA_m e é dado por:

$$\Delta A_m = \frac{1}{2} \oint_C (\partial_k \Gamma_{mp}^n - \partial_p \Gamma_{mk}^n + \Gamma_{mp}^l \Gamma_{lk}^n - \Gamma_{mk}^l \Gamma_{lp}^n) A_n ds^{kp}, \quad (\text{A.14})$$

onde inserimos nesse ponto a notação:

$$R_{mkp}^n = \partial_k \Gamma_{mp}^n - \partial_p \Gamma_{mk}^n + \Gamma_{mp}^l \Gamma_{lk}^n - \Gamma_{mk}^l \Gamma_{lp}^n, \quad (\text{A.15})$$

que é conhecido como Tensor de Curvatura ou Tensor de Riemman (DALARSSON, M.; DALARSSON, N, 2005). Com o tensor de curvatura, podemos realizar a contração do índice contravariante com o segundo índice covariante, é possível construir um tensor covariante de ordem reversa chamado de tensor de Ricci, como segue:

$$R_{mn} = R_{mnp}^p = -R_{mpn}^p. \quad (\text{A.16})$$

Outra ferramenta que é usada extensivamente na cosmologia é o escalar de Ricci, que é obtida pela contração dos índices covariantes da seguinte forma:

$$R = g^{mn}R_{mn} = g^{mn}g^{pk}R_{kmnp}. \quad (\text{A.17})$$

Neste ponto, podemos introduzir o princípio de mínima ação, onde as variações de campo gravitacional e campos de matéria são representados respectivamente por:

$$\delta I = \delta I_G + \delta I_M = 0, \quad (\text{A.18})$$

onde cada termo da equação acima é deduzido utilizando as definições já estudadas e seguindo todos os passos apropriados nesta parte, obtemos (DALARSSON, M.; DALARSSON, N, 2005):

$$\delta I_G = -\frac{c^3}{16\pi G} \int_{\Omega} \left(R_{kn} - \frac{1}{2} g_{kn} R \right) \delta g^{kn} \sqrt{-g} d\Omega, \quad (\text{A.19})$$

$$\delta I_M = \frac{1}{2c} \int_{\Omega} T^{kn} \delta g_{kn} \sqrt{-g} d\Omega. \quad (\text{A.20})$$

Substituindo as equações (A.19) e (A.20) que representam as variações de cada ação na equação (A.18) segue que:

$$\frac{c^3}{16\pi G} \int_{\Omega} \left(R_{kn} - \frac{1}{2} g_{kn} R \right) \delta g^{kn} \sqrt{-g} d\Omega = -\frac{1}{2c} \int_{\Omega} T^{kn} \delta g_{kn} \sqrt{-g} d\Omega. \quad (\text{A.21})$$

Como as variações do tensor métrico são arbitrários, chegamos às equações de campos de Einstein, que são dadas por:

$$R_{kn} - \frac{1}{2} g_{kn} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{kn}. \quad (\text{A.22})$$

O lado esquerdo da equação diz respeito a geometria e o lado direito diz respeito a matéria. Esta pode também ser escrita como:

$$R_{kn} = \frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{kn} - \frac{1}{2} g_{kn} T \right). \quad (\text{A.23})$$

Para reescrever as equações de Einstein no contexto da métrica de Friedmann-Robertson-Walker, usamos a métrica Robertson-Walker, que é dada como:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left(\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d^2\theta + r^2 \text{sen}^2(\theta) d^2\varphi \right). \quad (\text{A.24})$$

E a métrica covariante do tensor para a métrica de Robertson-Walker é dada pela seguinte matriz:

$$[g_{mn}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R^2(1-kr^2)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R^2 r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R^2 r^2 \text{sen}^2\theta \end{bmatrix}. \quad (\text{A.25})$$

Usando a matriz em (A.25) podemos escrever que:

$$\begin{aligned} g_{00} &= 1, \\ g_{11} &= \frac{-R^2}{(1-kr^2)}, \\ g_{22} &= -R^2 r^2, \\ g_{33} &= -R^2 r^2 \text{sen}(\theta). \end{aligned} \quad (\text{A.26})$$

De coordenadas diferenciais da métrica do tensor os componentes em (A.26) podem ser calculados:

$$\begin{aligned} \partial_k g_{00} &= 0, \quad (k = 0,1,2,3) \\ \partial_0 g_{11} &= \frac{-2R\dot{R}}{1-kr^2}, \\ \partial_r g_{11} &= \frac{-2krR^2}{(1-kr^2)^2}, \\ \partial_\theta g_{11} &= \partial_\varphi g_{11} = 0, \\ \partial_0 g_{22} &= -2R\dot{R}r^2, \\ \partial_r g_{22} &= -2R^2 r, \\ \partial_\theta g_{22} &= \partial_\varphi g_{22} = 0, \\ \partial_0 g_{33} &= -2R\dot{R}r^2 \text{sen}^2(\theta), \\ \partial_r g_{33} &= -2R^2 r \text{sen}^2(\theta), \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

$$\partial_{\theta} g_{33} = -2R^2 r^2 \text{sen}(\theta) \cos(\theta),$$

$$\partial_{\varphi} g_{33} = 0.$$

Nesses resultados e nos cálculos seguintes, por meio das derivadas da escala $R(t)$ em relação a coordenada temporal $x^0 = ct$ em vez de em relação ao tempo cósmico para simplificar os cálculos e para fazer os resultados compatíveis com os resultados em outros lugares na literatura usando as unidades com $c = 1$, assim temos:

$$R(t) = \frac{dR(t)}{dx^0} = \frac{1}{c} \frac{dR(t)}{dt}. \quad (\text{A.28})$$

Agora, nós temos que os símbolos de Christoffel do segundo tipo para a métrica em questão é calculado usando a seguinte definição:

$$\Gamma_{kn}^p = g^{pj} \Gamma_{j;kn}. \quad (\text{A.29})$$

Calculando esses símbolos de Christoffel podemos obter seus resultados e algumas generalizações, que podem ser facilmente encontrados em livros que tratem desse formalismo matemático que está sendo abordado aqui.

O tensor de Ricci para a métrica pode ser calculado usando a seguinte definição:

$$R_{kn} = \partial_n \Gamma_{kj}^j - \partial_j \Gamma_{kn}^j + \Gamma_{kj}^p \Gamma_{pn}^j - \Gamma_{kn}^p \Gamma_{pj}^j. \quad (\text{A.30})$$

O tensor de Ricci é um tensor simétrico, e suas componentes independentes podem ser facilmente calculadas ou encontradas em tabelas prontas de acordo com (DALARSSON, M.; DALARSSON, N., 2003). Partindo de algumas generalizações e determinações do tensor de Ricci, podemos escrever o escalar de Ricci da seguinte maneira:

$$R_j^j = \frac{3\ddot{R}}{R} + 3 \left(\frac{\ddot{R}}{R} + \frac{2\dot{R}^2 + 2k}{R^2} \right) = 6 \left(\frac{\ddot{R}}{R} + \frac{\dot{R}^2 + k}{R^2} \right). \quad (\text{A.31})$$

Tendo essas informações em mãos, podemos agora, determinar um tensor misto G_n^k . De forma que, em coordenadas mistas:

$$G_n^k = R_n^k - \frac{1}{2} \delta_n^k R_j^j = \frac{-8\pi G}{G^4}. \quad (\text{A.32})$$

Ou, em coordenadas covariantes,

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu}. \quad (\text{A.33})$$

6. REFERÊNCIAS

ALCANIZ, Jaílson S. **Cosmologia: de Einstein à energia escura**, 2010. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/ciencia-saude/2010/06/30/interna_ciencia_saude,200057/cosmologia-de-einstein-a-energia-escura.shtml. Acesso em: 16 de Março de 2020.

ALCÂNTARA, Patrícia M. de Carvalho. **Modelo LAMBDA-CDM emergente**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, RR, 2017.

ALPHER, HERMAN, R. A. e C. R. “**Remarks on the Evolution of the Expanding Universe**”. *Physical Review*, v.75, p.1089-1095, April 1949.

AUBOURG, É., et al., **Cosmological implications of baryon acoustic oscillation (BAO) measurements**, arXiv preprint arXiv:1411.1074, 2014.

BALDI, M. et. al., *Astroph. J.* 732,112 (2011).

BARBUY, Beatriz. **A idade, a massa e a expansão do universo**. *Revista USP*, São Paulo, n. 62, p. 194-199, 2004.

BATISTA, Carlos Eduardo M. **Modelos de matéria e energia escuras alternativos ao cenário padrão**. Tese (Doutorado) – Departamento de Física e Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

BERNARDI, Fabrizio Fogaça. **Modelos de energia escura acoplada à matéria escura**. Tese (Doutorado) – Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

BORZOU, Ahmad. **Theoretical and Experimental Approaches to Dark Energy and the Cosmological Constant Problem**. Springer Theses, 2018.

CINABRO, David. et al. **Search for Type Ia supernova NUV–optical subclasses**. Royal Astronomical Society, 466: 884–891 (2017).

CLEMSON, T. et. al., 1109.6234 [astro-ph], (2011).

COSTA FILHO, Francisco Geraldo da. **Formalismo de primeira ordem em Cosmologia de Branas**. 2009. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, Joao Pessoa, 2009.

DALARSSON, M.; DALARSSON, N. **Tensor Calculus, Relativity and Cosmology**. California: Elsevier Academic Press, 2005.

DES-Brazil, **Dark Energy Survey**. Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://des-brazil.linea.gov.br/> . Acesso em: 17 de Março de 2020.

EVANGELISTA, Edgard de F. D. **Dedução do limite de Chandrasekhar: uma abordagem didática dos trabalhos originais do autor**. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 41, 2019.

FENG, C. et. al., Phys Lett B 665, 111 (2008).

FERREIRA, Carolina Gribel de Vasconcelos. **Confrontando modelos de energia escura com a taxa de formação estelar cósmica, LGRB e fundos estocásticos de ondas gravitacionais**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

FILHO, Kepler de Souza Oliveira. Astronomia e astrofísica. **O universo como um todo**, 2019. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/univ/>. Acesso em: 05 de julho de 2020.

FILHO, Kepler de Souza Oliveira. **Novas; Supernovas e Hipernovas**, 2016. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/evol/node51.htm>. Acesso em: 16 de julho de 2020.

FILHO, SARAIVA, Kepler de Souza Oliveira e Maria de Fátima Oliveira. **Astronomia & Astrofísica**. – 2. ed. – São Paulo: Livraria da Física, 2004.

FLEICH, D. A. **A Student's Guide to Vectors and Tensors**. New York: Cambridge University Press, 2012.

GLEISER, M. **A Dança do Universo: Dos Mitos de Criação ao Big-Bang**. São Paulo: 2006.

GRAEF, Leila Lobato. **Um modelo para o decaimento da energia escura**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

GUTH, Allan. **Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems**; Allan H. Guth; PRD, 23, 2. (1981).

HALPERN, Paul. **Fronteiras do universo: uma viagem aos limites do horizonte cósmico**. São Paulo: Cultrix, 2015.

HAWKING, Stephen. W. **Uma breve história do tempo**. – 1. ed. – Rio de Janeiro: Intrínseca, 2015.

HE, J. H; WANG, B. JCAP 06, 010 (2008).

J.E. Gunn and I. Gott, J. Richard, **Astrophys. J.** 176, 1 (1972).

JESUS, José Fernando de. **Energia Escura e Aceleração do Universo: Aspectos Conceituais e Testes Observacionais**. Tese (Doutorado) – Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

KANG, Yijung. et al. **Early-type host galaxies of type Ia supernovae. ii. Evidence for luminosity evolution in supernova cosmology**. arXiv:1912.04903v2 [astro-ph.GA] 18 Jan 2020.

LAPUENTE, Pilar Ruiz. **¿Qué sabemos de? La aceleración del universo**. Madrid: CSIC, 2019.

LIBERATO, Lamartine. **Energia escura e formação de estruturas em larga escala.** Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Física Teórica, São Paulo, 2007.

LIMA, Gustavo Gazzola. **Teoria de Casimir para a Energia Escura Revisitada.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009.
LIVIO, M. **A energia escura e o destino do universo.** Dicta&Contadicta. Campinas, n.4, 2009.

MARQUES, Gabriela Antunes. **Radiação cósmica de fundo em microondas.** Universidade de Brasília, Physicae Organum, Brasília, vol. 1, n. 2, 2015.

MEDIAVILLA, Daniel. Nobel de Física 2019 para descobridores de exoplanetas e estudo da evolução do cosmos. **El País.** Brasil, 08 de outubro de 2019. Disponível em: https://brasil.elpais.com/brasil/2019/10/08/ciencia/1570525586_219318.html. Acesso em: 18 de maio de 2021.

MIRANDA, Welber L. de Araújo. **A radiação cósmica de fundo e a interação entre energia e matéria escuras.** Tese (Doutorado) – Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2017.

MOTA, Clésio Evangelista. **As equações de Friedmann.** Monografia (Graduação) – Curso de Licenciatura em Física, Unidade Acadêmica de Física e Matemática, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité-PB, 2015.

OLIVEIRA, Vinicius de Abreu. **Estudos de regiões III: Uma análise das propriedades físicas.** Editora: Novas edições acadêmicas, 2014.

ON, Observatório Nacional. Ensino a Distância. **Cosmologia: do início ao fim do universo.** 2015.

PELICER, C. E. et. al., 1102.5113 [astro-ph], (2011).

RIBEIRO, Altimare Maíres. **Modelos cosmológicos de energia escura: aspectos teóricos e vínculos observacionais.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

RIESS, Adam G. et al. **Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant.** The astronomical journal, 116:1009 – 1038, 1998.

RYDEN, B. **Introduction to Cosmology.** San Francisco, United States of America: Addison Wesley, 2003.

SILVA, Heydson Henrique Brito da. **Setor escuro do universo: uma análise Termodinâmica.** Tese (Doutorado) – Departamento de Física Teórica e Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SILVA, Judismar Tadeu Guaitolini. **Radiação cósmica de fundo: anisotropias, polarização e parâmetros cosmológicos.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2012.

SPARROW, Gilles. **50 ideias de astronomia que você precisa conhecer.** – 1. Ed. – São Paulo: Planeta, 2018.

TYSON, Neil de Grasse. **Origens: catorze bilhões de anos de evolução cósmica.** São Paulo: Planeta do Brasil, 2015.

TYSON, Neil Degrasse. **Astrofísica para apressados.** – 1. ed. – São Paulo: Planeta, 2017.

TYSON, Neil de Grasse. **Star Talk: tudo o que você sempre precisou saber sobre viagem espacial, ficção científica, a raça humana, o universo e além.** – 1. ed. – Rio de Janeiro: Harper Collins, 2018.

VAGNOZZI, Sunny. et. al. ***Epper è piatto? The cosmic chronometer take on spatial curvature and cosmic concordance.*** Institute for Cosmology, University of Cambridge, Reino Unido, 2020.

VARGAS, Cristofher Zuñiga. **Testando universos inomogêneos com as supernovas tipo Ia e as oscilações acústicas de bárions.** Tese (Doutorado) – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2016.

W. H. Press and P. Schechter, **Astrophys. J.** 187, 425 (1974).

WANG, B. et. al., Nucl. Phys. B 69, 778 (2007).

WEINBERG, S. ***The Cosmological constant problems***, publicado em Cline, D. B., *Sources and detection of dark matter and dark energy in the universe: Proceedings*, Springer-Verlag (2001), [astro-ph/0005265].