



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA UNIDADE  
ACADÊMICA DE FÍSICA PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

**CANDIDATOS À MATÉRIA ESCURA NO  
UNIVERSO: MACHOs E WIMPs**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ELIZANGELA ANAZILDA DO NASCIMENTO**

**CAMPINA GRANDE**

**-Fevereiro 2018-**

**ELIZANGELA ANAZILDA DO NASCIMENTO**

**CANDIDATOS À MATÉRIA ESCURA NO UNIVERSO: MACHOs E WIMPs**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador Prof. Dr Francisco de Assis de Brito.

N244c Nascimento, Elizangela Anazilda do.  
Candidatos à matéria escura no universo: MACHOs e WIMPs /  
Elizangela Anazilda do Nascimento. – Campina Grande, 2018.  
37 f.

Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Campina  
Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.  
"Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis Brito".  
Referências.

1. Universo – Matéria Escura. 2. Física. 3. Cosmologia. 4. Universo -  
MACHO – LIGO – WIMP. I. Brito, Francisco de Assis. II. Título.

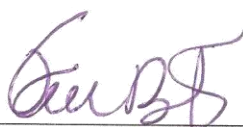
CDU 53:524.8(043)

**ELIZÂNGELA ANAZILDA DO NASCIMENTO**

**CANDIDATOS À MATÉRIA ESCURA NO UNIVERSO: MACHOs E WIMPs**

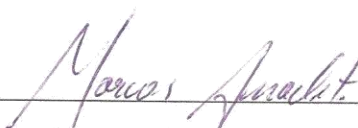
Dissertação aprovada em 23/02/2018

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Francisco de Assis de Brito  
Unidade Acadêmica de Física – UFCG  
(Presidente)



---

Prof. Dr. Marcos Antônio Anacleto  
Unidade Acadêmica de Física – UFCG  
(Membro interno)



---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Morgana Lígia de Farias Freire  
Departamento de Física - UEPB  
(Membro externo)

Para minha mãe Severina Anazilda (*in memoriam*).

Para meu marido Hamza Hajri

“Comece fazendo o que você quer fazer agora. Não estamos vivendo na eternidade. Temos apenas este momento, brilhando como uma estrela em nossa mão e derretendo com um floco de neve”.

Francis Bacon

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar a Deus por toda força pra superar os desafios para seguir minha jornada.

Ao orientador de todos os momentos Francisco de Assis de Brito que com toda serenidade e tranquilamente me conduziu a chegar aonde cheguei. A ele sem dúvida toda minha gratidão respeito e admiração.

Aos Professores da Unidade Acadêmica de Física. Em especial, aos Professores João Rafael, Eduardo Passos e Marcos Anacleto por toda paciência e compreensão nos momentos mais difíceis da minha vida, esses mesmos momentos estava a cursar as disciplinas do mestrado.

Aos Funcionários da Unidade Acadêmica de Física. Em especial, Ao secretário da Pós-Graduação em Física, Seu Hélio, pelo apoio técnico durante estes quase dois anos de curso.

Ao meu marido Hamza e a minha família por toda dedicação, companheirismo e encorajamento.

As minhas eternas amigas de trabalho Camila, Kamilla e Aline pelos momentos inesquecíveis que tivemos desde a graduação e a CAPES pelo apoio financeiro.





## SUMÁRIO

Lista de Abreviaturas	
Lista de Figuras	
Resumo	
Abstract	
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2 COSMOLOGIA E MATÉRIA ESCURA</b>	<b>16</b>
2.1 Cosmologia	16
2.1.1 Observações com a luz visível	19
2.1.2 Observações com bandas de onda	19
2.1.3 Outras Observações	20
2.2 Evidências da Matéria Escura	21
2.2.1 Movimentação de clusters de galáxias	21
2.2.2 O halo de massa que envolve as galáxias	22
2.3 Esclarecendo a Matéria Escura	22
2.3.1 Rotação das galáxias	25
2.3.2 Simulações computacionais	25
2.3.4 Lente gravitacional	26
<b>3 CANDIDATOS PARA A MATÉRIA ESCURA</b>	<b>29</b>
3.1 MACHO	29
3.2 LIGO	30
3.3 Buraco Negro Primordial	31
3.4 WIMPs	33
<b>4 CONCLUSÕES</b>	<b>35</b>



## LISTA DE ABREVEATURAS

CDM -Cold Dark Matter (matéria escura fria)

CIB- Fundo cósmico infravermelho

CXB- Fundo cósmico de raio x

COBE -Cosmic Background Explorer

DM- Dark Matter (Matéria Escura)

GW- Gravitational waves(Ondas gravitacionais)

FIRAS Far InfraRed Absolute Spectrophotometer(Espectrofotômetro Absoluto de Infravermelho Distante)

HDM -Hot Dark Matter (matéria escura quente)

LIGO- Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (Observatório de Onda Gravitacional por Interferômetro Laser)

LRAS Satélite Astronômico InfraRed

MACHO- Massive Compact Halo Object (objeto maciço compacto de halo)

ME- Matéria Escura

PBH- Primordial Black Holes (Buracos Negro Primordial)

WIMP- weakly interacting massive particles (Partícula maciça fracamente interagente)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Galáxia da Via Láctea imageada pelo Telescópio Espacial Hubble.

Figura 2.2: Halos internos e externos da Via Láctea. Um halo é uma nuvem esférica de estrelas que cercam uma galáxia

Figura 2.3: Um mapa de posições de galáxia em uma fatia estreita do Universo

Figura 2.4: Imagens do grupo Coma de galáxias em luz visível (esquerda) e em raios-X (à direita), na mesma escala.

Figura 2.5: A distribuição de 2 milhões de galáxias.

Figura 2.6: Halo de matéria escura envolvendo uma galáxia, segundo simulações computacionais

Figura 2.7: Curva de rotação de galáxias obtida teoricamente, o crescimento linear da velocidade com o raio representa o centro da galáxia que se movimenta como um disco rígido

Figura 2.8: Curva de rotação de galáxias típica obtida através de observação

Figura 2.9: Curva de rotação da galáxia M33, as bolas amarelas representam os valores observados e a linha segmentada corresponde à curva de rotação esperada teoricamente. A imagem da galáxia está na mesma escala do gráfico

Figura 2.10: Ilustração da curva esperada pela física newtoniana (esquerda) e o que se observa experimentalmente (direita)

Figura 2.11: Halo de matéria escura envolvendo uma galáxia, segundo simulações computacionais.

Figura 2.12: Efeito de lente gravitacional

Figura 2.13: Visão do efeito de lente gravitacional para alinhamento perfeito

Figura 2.14: Objeto deformado pelo efeito de lente gravitacional

Figura 2.15: Efeito de lentes gravitacionais no aglomerado de galáxias Abell 2218

Figura 3.1: Grande nuvem de Magalhães

## RESUMO

Um enigma que observamos na contemporaneidade é a discrepância entre a massa total prevista pela Lei da gravidade de Newton ou de Einstein e a massa total observada no Universo. Como grande parte do conteúdo que compõe o Universo é constituída por algo ainda não determinado e que não emite luminosidade, que é denominado Matéria Escura(ME). Existem alguns caminhos propostos que tenta explicar esse desvio da previsão teórica. A proposta da existência da matéria escura é observada a partir do surgimento de alguns candidatos que possam explica-las, porém, ainda não foi observada de forma direta. Nesta dissertação apresentaremos uma revisão teórica sobre os modelos candidatos a ME dando ênfase aos candidatos do grupo MACHO (*Massive Compact Halo Object* – Objeto Halo Compacto Massivo), aos WIMPs (*weakly interacting massive particles*- partícula maciça fracamente interagente) e as perspectivas das descobertas do LIGO como suporte para a confirmação da existência da ME.

**Palavras-Chave:** Matéria Escura, MACHO, LIGO, WIMP.

## **ABSTRACT**

An enigma we observe in contemporaneity is the discrepancy between the total mass predicted by the Law of gravity of Newton or Einstein and the total mass observed in the Universe. As much of the content that makes up the Universe consists of something not yet determined and that does not emit luminosity, which is called Dark Matter (M E). There are some proposed paths that attempt to explain this deviation from the theoretical prediction. The proposal of the existence of dark matter is observed from the appearance of some candidates who can explain them, however, has not yet been observed directly. In this dissertation, we will present a theoretical review of the candidate ME models emphasizing the MACHO (Massive Compact Halo Object), weakly interacting massive particles (WIMPs) and the perspectives of the LIGO as support for the confirmation of the existence of the ME.

**Keywords:** Dark Matter, MACHO, WIMP, LIGO.

## Introdução

Os astrônomos, durante muito tempo, achavam que a expansão do Universo ocorria de forma desacelerada, devido à força gravitacional da matéria que o constitui. Em 1912 descobriu-se que as linhas espectrais das estrelas na galáxia de Andrômeda mostravam um enorme deslocamento para o azul, indicando que ela está se aproximando do Sol. No entanto, Slipher realizou trabalhos por duas décadas para mostrar que para 41 galáxias estudadas, a maioria apresentava deslocamento espectral para o vermelho, o que indicava que as galáxias estavam se afastando. Assim, quanto mais fraca a galáxia e, portanto mais distante maior era o deslocamento para o vermelho de seu espectro .

Estas e outras descobertas contribuíram para estudo da cosmologia moderna como o estudo da Matéria Escura. Podemos observar que em sistemas de galáxias e grupos de galáxias existem uma diferença muito grande entre a massa inferida pela luminosidade e a massa inferida pela dinâmica do sistema.

Fritz Zwicky [1], fazendo observações do aglomerado de Coma através da comparação da massa inferida pela luz e da calculada pela dinâmica do sistema observou incompatibilidade nos valores de massa obtidos por esses métodos, a massa inferida pela dinâmica é muito maior que a massa inferida pela luminosidade. A matéria escura descrita é a matéria faltante necessária para explicar as curvas de rotação das galáxias e as velocidades observadas das galáxias em aglomerados. Além disso, observou que as velocidades das galáxias em aglomerados eram muito maiores e que a massa do aglomerado deveria ser pelo menos dez vezes maior do que a massa inferida pela luminosidade.

Vera Cooper Rubin[5] mostrou que a ME também está presente em galáxias individuais, através velocidades de rotação das galáxias.

Dessa forma, tem-se que a matéria escura possui gravidade, exercendo força de atração sobre a matéria. A ME é assim chamada porque não emite radiação eletromagnética, e não pode ser detectada em nenhuma faixa do espectro eletromagnético.

Este cenário abre as portas para o estudo dos candidatos a modelos de ME, sendo assim o objetivo deste trabalho é estudar os possíveis candidatos à matéria escura e como as



novas descobertas do LIGO podem contribuir para a confirmação da existência da matéria escura.

Esta dissertação está organizada conforme segue. No capítulo 2, introduzimos os conceitos da cosmologia e da matéria escura. No capítulo 3, abordamos os candidatos para a matéria escura. No capítulo 4, apresentamos nossas conclusões.

## Capítulo 2

# COSMOLOGIA E MATÉRIA ESCURA

### 2.1 Cosmologia

A matéria presente no Universo é composta por átomos, que são formados por prótons, nêutrons e elétrons. Porém existem evidências de que a maior parte da matéria existente no Universo não se constitui dessa maneira [1]. Essas partículas não interagem com a radiação eletromagnética, e isto faz com que elas sejam invisíveis e não absorve ou reflete luz de qualquer comprimento de onda. Este é o motivo pelo qual ela é chamada de ME . Também, ela não pode ser vista por telescópios só é detectada através de sua interação gravitacional, que afeta o movimento de objetos que são visíveis como planetas, estrelas e galáxias [2].

Entre algumas evidências da existência de ME encontramos a taxa de rotação de estrelas e gás em torno de galáxias espirais, a velocidade das galáxias em aglomerados e lentes gravitacionais. Mas, uma das principais evidências da existência de ME é a curva de rotação de galáxias, que de acordo com a gravitação newtoniana, para estrelas bem distantes do núcleo galáctico a velocidade orbital deveria diminuir à medida que o raio da órbita aumenta, mas não é isso o que se observa nas galáxias espirais. A explicação para esse comportamento das curvas de rotação é a existência de um halo de ME que envolve a galáxia e vai bem mais além da região luminosa [8].

#### 2.1.1 Observações com a luz visível

A imagem do Universo foi construída através de observações usando luz visível, através de estrelas e galáxias descritas a seguir.

*Estrelas:* A principal fonte de luz visível no universo é a fusão nuclear que acontece no interior das estrelas. No estudo da cosmologia, dificilmente se considera individualmente uma estrelas e é preferível levar em consideração os aglomerados de galáxias [2].

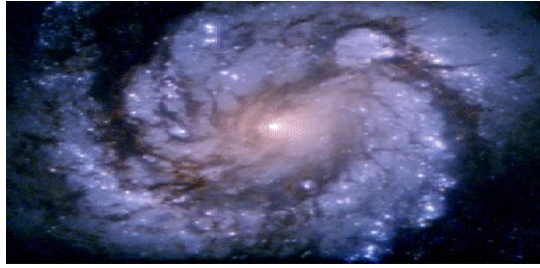


Figura 2.1: Galáxia da Via Láctea imageada pelo Telescópio Espacial Hubble.[2]

*Galáxias:* o nosso sistema solar situa se fora de centro em uma estrutura de disco gigante conhecida e chamada galáxia Via Láctea. Ela contém centenas de milhões de estrelas. Nossa galáxia está cercada por algumas coleções de estrelas conhecidas e chamadas de globular clusters. Eles contém milhões de estrelas, acredita-se que todo o disco e o sistema de agrupamento globular podem ser inseridos em uma estrutura esférica maior que é o halo galáctico [2]. As galáxias são os objetos que exibem uma vasta gama de propriedades. Porém, na cosmologia, os detalhes da estrutura de uma única galáxia são normalmente insignificantes, e elas são imaginadas como objetos parecidos com pontos que emitem luz [2].



Figura 2.2: Halos internos e externos da Via Láctea. Um halo é uma nuvem esférica de estrelas que cercam uma galáxia.[22]

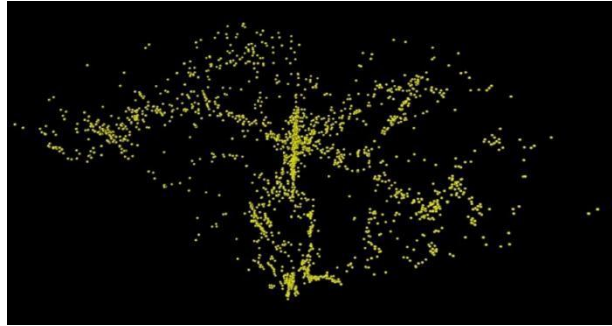
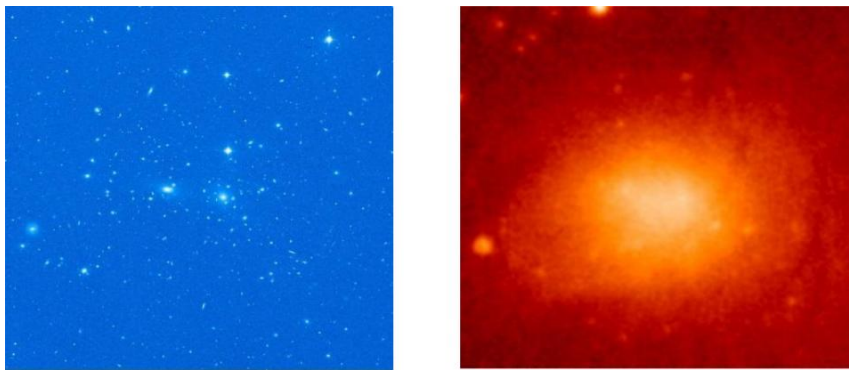


Figura 2.3: Um mapa de posições de galáxia em uma fatia estreita do Universo.[2]

*Grupo local:* nossa galáxia habita no interior de um grupo concentrado de galáxias conhecidas como o grupo local. A galáxia vizinha é uma galáxia pequena não regular conhecida como a grande Magellanic Cloud, situada a 50 kpc do Sol. A galáxia vizinha com tamanho que se assemelha à nossa é Andrômeda, situada a uma distância de 770 kpc. No grupo local a Via Láctea é uma das maiores galáxias que existe [2].

Clusters de galáxias, superaglomerados e vazios: Nas maiores regiões do Universo, em uma escala de 100 Mpc, observamos varias estruturas em larga escala (Figura 2.3) e eles são agrupados em super clusters juntos por filamentos e paredes de galáxias.



2.4-Imagens do grupo Coma de galáxias em luz visível (esquerda) e em raios-X (à direita), na mesma escala.[2]

Suavidade em larga escala: Quando observamos a escalas bem maiores, centenas de megaparsecs o Universo torna-se suave, os superclusters de galáxia e os vazios, certamente, são as maiores estruturas que existem no Universo. Ele efetivamente torna-se suave nas escalas maiores confirmando o princípio cosmológico, que é o alicerce da cosmologia moderna [2].

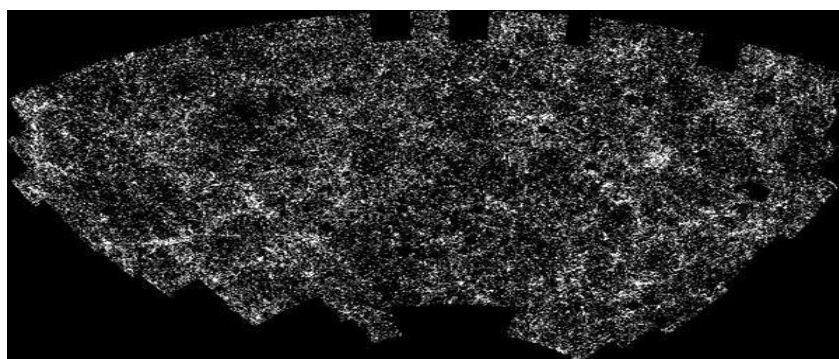


Figura 2.5: A distribuição de 2 milhões de galáxias.[2]

### 2.1.2 Observações com bandas de ondas

*Radiação cósmica de fundo em microondas:* Resolvendo o problema do ruído de fundo para um satélite de comunicações, Arno Penzias e Robert Wilson, perceberam a existência de uma radiação insistente, na banda das microondas, cuja intensidade era igual em todas as direções [2]. Por isso, uma antena foi construída com a qual realizaram várias medidas. Portanto, o Universo é uma enorme fonte de radiação em microondas, que vem de todas as direções, e sua intensidade faz reluzir um brilho comparado com o da Via Láctea. As observações que usam luz visível propicia uma imagem do que acontece no Universo. Todavia, outras bandas de ondas fazem contribuições necessárias para o nosso entendimento da composição do Universo [2].

*Microondas:* Na cosmologia, é mais uma importante banda de ondas. Penzias e Wilson descobriram que a Terra é banhada pela radiação de microondas, seu espectro de corpo negro tem uma temperatura por volta de 3 K, que deu suporte a teoria do Big Bang. Observações do FIRAS (*Far InfraRed Absolute Spectrophotometer*) e do COBE (*Cosmic Background Explorer*) confirmaram que a radiação é extremamente parecida com a do corpo negro a uma temperatura de  $2,725 \pm 0,001$  K. E mais, a temperatura que provem de diferentes partes do céu é uniforme, evidenciando o uso do princípio cosmológico como justificativa no estudo da cosmologia. [2]

*Ondas de rádio:* Utilizada para fazer um mapeamento de alta resolução de galáxias bastante distantes. Várias galáxias distantes que conhecemos foram detectadas através desse mapeamento [2].

*Infravermelho:* É utilizado para detectar galáxias novas, onde a formação estelar está em seu estágio inicial. O infravermelho serve para detectar através da poeira em nossa galáxia objetos que estão longe, uma vez que é absorvido e espalhado com a intensidade menor do que a radiação visível. Assim sendo, permite analisar a região perto do nosso plano galáctico onde a escuridão pelo pó é mais forte [2].

*Raios-X:* No meio das galáxias existe gás quente e ele emite na parte de raios-X do espectro, e corresponde a uma temperatura de milhões de Kelvin. Emissão de raios-X do agrupamento Coma Galaxy é apresenta na Figura 2.4. As galáxias vistas na imagem da luz visível no painel esquerdo são quase todas invisíveis em raios-X, com a emissão de raios-X difusos brilhantes do gás quente sobressaindo a imagem [2].

### **2.1.3 Outras Observações**

Nosso entendimento do que visualizamos no Universo provem da radiação eletromagnética e que esta na sua grande variação de frequências permeia o Universo. Já na mecânica quântica a concepção de luz, pode ser considerada como constituído por partículas individuais como pacotes de energia conhecidos como fótons, esta energia é dada pela sua energia cinética e tem relação com sua frequência. A seguir apresentamos descrições breves dos bárions e dos neutrinos.

*Bárions:* Os bárions são partículas massivas que estão sujeitas à interação forte e com  $\text{spin} = 1/2$ . Como exemplos têm os prótons e os nêutrons e seus respectivos estados excitados. Estas partículas são compostas por 3 quarks. No universo atual, os bárions geralmente se movem não relativisticamente, sugerindo que sua energia cinética é inferior a sua energia de massa [2].

*Neutrinos:* Existem três tipos de neutrinos, neutrino de elétrons, neutrino de múons e neutrino de tau. Suas interações são tão fracas e, portanto difíceis de serem detectadas diretamente. Originalmente, sua presença foi inferida por motivos unicamente teóricos, apesar de que a existência do fundo dos neutrinos cósmicos pode ser deduzida indiretamente por observações cosmológicas [2].

Dessa forma, a ME não irradia radiação eletromagnética e, portanto, apenas pode-se detectá-la através da força gravitacional que ela efetua sobre os objetos. A detecção da existência de ME apresenta-se no estudo do movimento de estrelas individuais em galáxias e do movimento de galáxias em cúmulos de galáxias, e também pelo seu efeito

em lentes gravitacionais. Quando aplicada a lei da gravitação a estes movimentos, detectamos que a massa é muito superior à massa perceptível em estrelas e gás.

## **2.2 Evidências da Matéria Escura**

A Primeira evidência da ME foi dada no estudo de aglomerados de galáxias por Zwicky [1], que descobriu uma enorme quantidade de massa em aglomerados do que era relacionada às estrelas. Em meados de 1970 aparecem as curvas de rotação de galáxias espirais, e depois as simulações numéricas e o modelo CDM. Após estas evidências sugeriram as técnicas de medida de massa com lentes gravitacionais.

Através da determinação da massa do grupo Coma de galáxias em 1933 por Zwicky, cuja técnica foi medir a velocidades das galáxias neste cluster apoiado na mudança Doppler. Com o uso do teorema virial deduziu que o potencial gravitacional em que essas galáxias se movimentavam, e estimou a massa necessária para gerar o potencial. A massa estimada foi 400 vezes a massa das estrelas perceptíveis em galáxias no cluster [1].

Nos anos de 1970, os astrônomos iniciaram um estudo com medições sistemáticas da velocidade de rotação e curvas de rotação, para muitas galáxias. Assim, houve a previsão de que a massa de uma galáxia se concentra em região onde as estrelas são perceptíveis [8].

### **2.2.1 Movimentação de clusters de galáxias**

Zwicky investigou a dinâmica do aglomerado de galáxias Coma [1]. Determinou a velocidade das galáxias que o compõem e efetuou aos resultados um teorema que é aplicado a qualquer sistema de partículas que interaja com uma força que proporcional ao o inverso do quadrado das distâncias, como ocorre na força gravitacional. O teorema evidencia que o valor positivo da energia cinética das muitas galáxias é igual à metade do valor negativo da energia potencial gravitacional do aglomerado. Mas para que o aglomerado esteja de acordo com o teorema, sua massa haveria de ser bem maior do que a observada. Estimada somente a gravidade das massas observadas, a energia potencial

era muito pequena e o aglomerado Coma não se manteria coerente, porém não existia qualquer indicativo dessa ocorrência [1].

### 2.2.2 O halo de massa que envolve as galáxias

A dinâmica da matéria perceptível em uma galáxia espiral é irregular. A galáxia não se apresenta com capacidade de se manter rodando em volta do seu centro. Então para gerar uma galáxia regular foi colocado nas simulações computacionais um halo uniforme de matéria imperceptível contornando a galáxia. As simulações apresentaram que a galáxia só se torna regular quando o halo maior do que a galáxia e tem massa maior do que a massa da sua matéria perceptível.

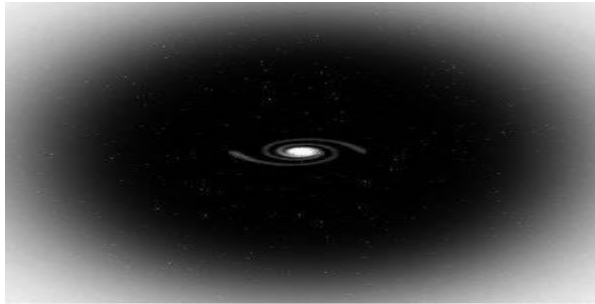


Figura 2.6: Halo de matéria escura envolvendo uma galáxia, segundo simulações computacionais.[23]

### 2.3 Esclarecendo a Matéria Escura

Os sistemas de galáxias e grupos de galáxias apresentam a existência de uma discordância entre a massa deduzida pela luminosidade e a massa deduzida pela dinâmica do sistema [1], indicando que o campo gravitacional gerado pela massa observada não é eficiente para explicar a movimentação dos corpos nesses sistemas galácticos e de grupos de galáxias. Em sistemas galácticos esperava-se que, na curva de rotação (velocidade de órbita versus a distância ao centro da galáxia), a velocidade de órbita para distâncias afastadas do centro galáctico diminuísse de acordo com a lei de Newton da gravitação, ou seja:

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}},$$



onde  $v(r)$  é a velocidade de órbita em função do raio  $r$ ,  $G$  é a constante universal da gravitação e  $M(r)$  é a massa da galáxia que existe dentro do raio  $r$ . Porém, o que se observa é que a velocidade fica constante. Isto foi apontado por Vera Rubin et al. [5] em 1960 no estudo da curva de rotação de galáxias, por intermédio da observação do efeito Doppler da luz oriunda de diversas partes das galáxias. Mesmo em observações realizadas através do efeito Doppler da luz para gases girando ao redor de galáxias a distâncias maiores do que a parte que emite luz, a velocidade continua constante (Figura 2.7), e em certos casos continua aumentando assintoticamente para determinado valor (Figura 2.8) [20].

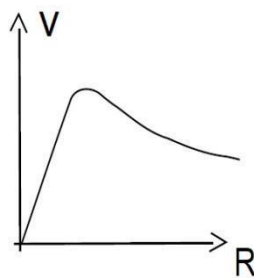


Figura 2.7: Curva de rotação de galáxias obtida teoricamente [20]

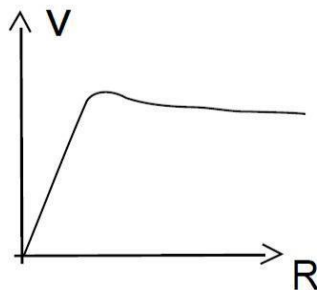


Figura 2.8: Curva de rotação de galáxias típica obtida através de observação[20]

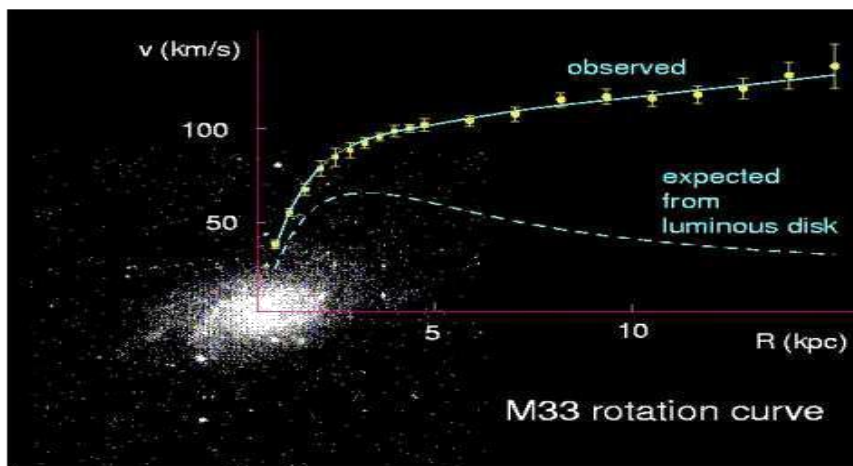


Figura 2.9: Curva de rotação da galáxia M33, as bolas amarelas representam os valores observados e a linha segmentada corresponde à curva de rotação esperada teoricamente. A imagem da galáxia está na mesma escala do gráfico.[20]

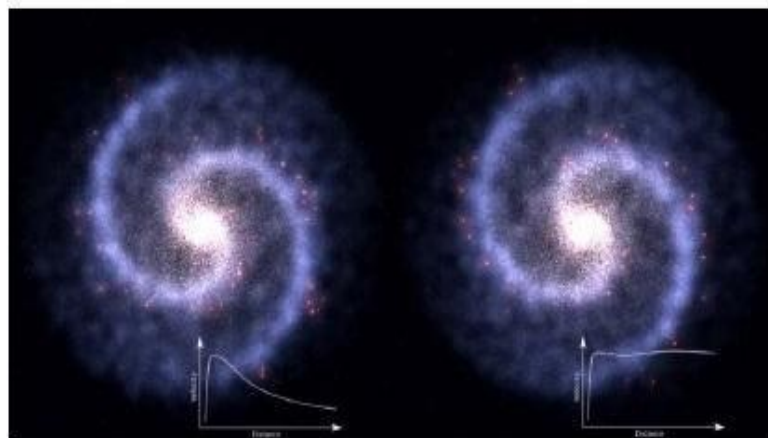


Figura 2.10: Ilustração da curva esperada pela física newtoniana (esquerda) e o que se observa experimentalmente (direita).[21]

Conforme as leis de Newton esses elementos afastados do centro galáctico escapariam de suas órbitas. Nessa situação, estamos nos deparando com um problema a baixas velocidades e campo gravitacional fraco, o que entra na barreira clássica da teoria de Einstein. Para tentar solucionar este problema pressupõe-se a existência de ME onde a mesma gera o campo gravitacional essencial para sustentar galáxias e sistemas de galáxias, mas que não exerce interação com a luz [20]. A Previsão é de que há bem mais ME que matéria bariônica no Universo. Em consequência das evidências que sugerem que existe uma matéria faltante no Universo nos deparamos com os candidatos a modelos de matéria escura e como principais candidatos temos os WIMPs (*weakly-*

*interacting massive particles*) e os MACHOs (*MAssive Compact Halo Objects*), entre outros candidatos.

### **2.3.1 Rotação das galáxias**

As velocidades de rotação das galáxias espirais são grandes, e não existe matéria perceptível dentro da órbita das estrelas com capacidade de preservá-las em órbita com velocidades enormes [20].

A velocidade orbital esperada para uma estrela com estimativa na massa perceptível no interior à sua órbita teria que diminuir com a sua distância ao centro, mas a velocidade se mantém constante e o que se verifica é consistente com a evidência de que existe uma densidade invariável de massa em toda a galáxia.

### **2.3.2 Simulações computacionais**

Para criar uma galáxia invariável, foram feitas simulações que introduziam um halo de matéria não perceptível contornando a galáxia [2]. Essas simulações sugeriram que a galáxia fica invariável quando o halo é bem maior do que a própria galáxia e tem massa bem maior do que a massa da sua matéria percebida. A Figura 2.11 apresenta o halo obtido via simulações computacionais.

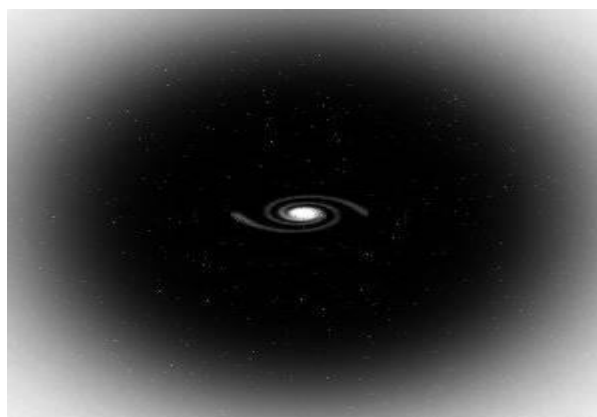


Figura 2.11: Halo de matéria escura envolvendo uma galáxia, segundo simulações computacionais.[23]

### 2.3.4 Lente gravitacional

Lente gravitacional é uma consequência prevista pela teoria da relatividade geral, ilustrado na Figura 2.12. Na figura, tem-se uma estrela em cujo trajeto até um observador há um corpo de grande massa  $M$ . Dessa forma, o objeto encurva o caminho da luz provocada pela distorção gravitacional do espaço. Então, o que se vê é dois objetos fictícios e a projeção do que resulta em um plano. Porém, a luz pode contornar a massa  $M$  por todos os lados e o que se vê é um anel (Figura 2.13). Para objetos afetados por lente gravitacional tem-se a forma apresentada na Figura 2.14, o objeto se assemelha a um pequeno arco.

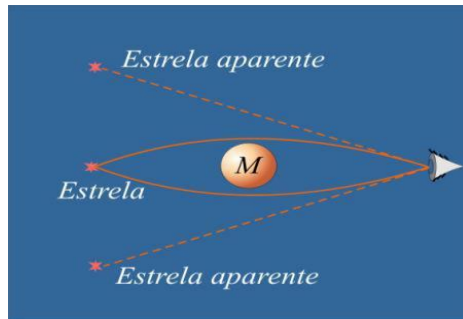


Figura 2.12: Efeito de lente gravitacional. [24]

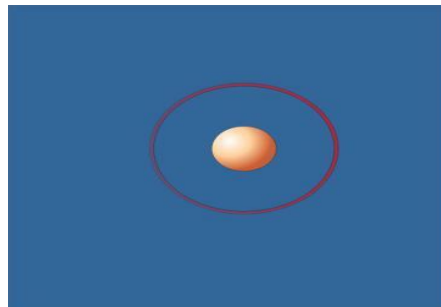


Figura 2.13: Visão do efeito de lente gravitacional para alinhamento perfeito.[24]

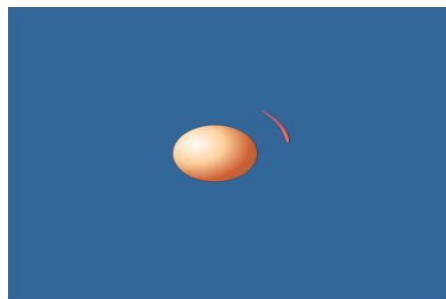


Figura 2.14: Objeto deformado pelo efeito de lente gravitacional. [24]

As Observações de efeitos de lentes gravitacionais somente podem ser explicadas levando em consideração a existência da ME. A Figura 2.15 apresenta uma foto do aglomerado de galáxias Abell 2218, em que é possível observar que galáxias mais afastadas se parecem com arcos, porém não é possível enxergar a matéria causadora deste efeito.



Figura 2.15: Efeito de lentes gravitacionais no aglomerado de galáxias Abell 2218.[25]

Na busca da identificação da ME, consideramos alguns modelos candidatos a desvendar o enigma da ME entre eles encontramos duas importantes possibilidades os MACHOs e WIMPs.

As curvas de rotação de galáxia são observadas como curvas planas que ultrapassam a área ocupada pela matéria luminosa. O problema é saber o motivo deste acontecimento. As curvas de rotação das galáxias espirais ficam planas, e nas elípticas declinam-se como se sua composição fosse apenas de matéria visível [20].

Estimar a massa de uma galáxia por de métodos dinâmicos implica em detectar os efeitos gravitacionais da massa da galáxia. A ideia da existência de ME nas galáxias é eficiente para explicar as curvas planas de rotação com base na dinâmica Newtoniana e também para compreender o motivo pelo qual a luz é desviada nas periferias das galáxias a partir da relatividade geral [8].

Em galáxias espirais com a ausência da luminosidade as medidas são realizadas por observação de estrelas ou medindo o efeito Doppler. Com os dados obtidos gera-se o gráfico da velocidade da partícula teste que está em volta da galáxia em função da

distância ao centro da galáxia, obtendo uma velocidade relativamente constante da partícula na área onde não existe luminosidade [8].

Já nos aglomerados de galáxias, a massa total detectada por métodos dinâmicos, como, por exemplo, o teorema virial, supõe que a massa total deve ser superior à soma das massas das galáxias individuais (massa enxergada). Segundo Zwicky [1], a matéria predita pelo teorema virial é cerca de 20 vezes o valor da matéria bariônica.

## Capítulo 3

### CANDIDATOS PARA A MATÉRIA ESCURA

O MACHO foi um dos primeiro modelos propostos para explicar a existência da matéria escura. Neste grupo encontramos as estrelas de nêutrons, buracos negros, estrelas anãs marrons e planetas massivos.

Através dos eventos de fusão do buraco negro detectados pelo LIGO (Observatório de Onda Gravitacional do Interferômetro Laser) propõem os modelos de ME baseados em PBH (buracos negros primordiais) e os WIMPs.

A seguir discutiremos sobre os candidatos para a ME e as consequências das descobertas do LIGO que poderão contribuir pra solucionar o problema da existência de ME no Universo.

#### 3.1 MACHO

MACHO significa objeto com halo compacto de grande massa (do inglês, *massive compact halo object*). Esse objeto é constituído de matéria comum. Objetos com que têm essas características emitem pouca ou quase nada de luz. Um meio que pode ser utilizado para observá-los é através do brilho de estrelas distantes. Para esses objetos, temos: os buracos negros, anãs brancas e estrelas de nêutrons, descritos a seguir.

Buracos negros: São áreas no espaço com imensa força gravitacional. Não são perceptíveis e estão em uma área onde a densidade de matéria é enorme, pois nem a luz é capaz de escapar do seu campo gravitacional.

Anãs brancas: São estrelas com grande densidade, quentes e com fraca luminosidade, que consome o combustível nuclear no seu estágio final. As anãs brancas moldam-se ao final da vida de uma estrela com massa da ordem da do Sol,  $1M_{\odot}$ .

Estrelas de neutros: São estrelas que tem o núcleo denso, composto essencialmente nêutrons e origina-se de estrelas em estágio final de vida que contém massas da ordem de 8 a 30 massas solares. Nesta etapa final possuem em torno de 2 massas solares e o material que sobra é arremessado pela explosão de supernovas.

Uma das técnicas utilizadas para a possível detecção dos objetos tipo MACHO é a de Micro Lentes, que equivale ao encurvamento dos raios luz, à passagem na proximidade de um MACHO como observamos na Figura 3.1. O objeto em observação amplia-se em múltiplas imagens, separadas por poucos segundos de arcos minúsculos incapazes de serem observados da Terra. A emissão do raio de luz do objeto é modificada de maneira momentânea, de acordo com a movimentação do MACHO ao longo da linha de visão no percurso da sua órbita no halo da galáxia. Para tentar verificar um fenômeno de micro lentes faz-se o monitoramento de milhões de estrelas, como por exemplo, o da Grande Nuvem de Magalhães [2].



Figura 3.1: Grande nuvem de Magalhães.[26]

### 3.2 LIGO

No cenário da descoberta das GW surge a possibilidade de se encontrar a ME que irradia de um buraco negro através de suas ondas gravitacionais. Com a detecção das ondas gravitacionais, perturbações no espaço-tempo criadas pela colisão dos buracos negros, podemos utilizar esse fato para fazer observações. E assim é possível achar uma forma de encontrar todas as novas partículas que podem formar a ME [19]. A ideia é usar os buracos negros, os objetos mais densos e compactos do universo, para buscar novos tipos de partículas em especial a partícula denominada áxion.

A detecção é realizada por um interferômetro de dois braços perpendiculares, um feixe de laser é enviado e refletido pelos espelhos no final dos braços. Se uma GW passar, a ampliação e a redução do espaço produz um efeito de aumento e diminuição nos braços do interferômetro.



O GW170608 é o mais leve dos buracos negros binários que o LIGO e o Virgo detectaram e também é um dos primeiros ocorridos detectados através de ondas gravitacionais, possuem massas parecidas com as dos buracos negros detectados indiretamente via radiação eletromagnética, como por exemplo, em raios-X [19].

Os dados obtidos permitem que sejam comparadas as propriedades dos buracos negros obtidas a partir das observações de GW com as dos buracos negros de massa semelhante que foram detectados antes com os raios-X [19].

### **3.3 Buraco Negro Primordial**

Um dos principais objetivos da cosmologia contemporânea é entender a ME do Universo e uma alternativa é que ela seja formada por buraco negro primordial (PBH) [12]. OS PBHs comportam-se como elementos não-relativísticos em grandes escalas, tornando-os candidatos a ME. Eles não deixam vestígios nas buscas de partículas, mas podem ser investigados por uma série de eco pontos em pequena escala que dependem da massa e de outras propriedades do objeto [12].

Incertezas na distribuição em pequena escala de PBH continuam sendo uma barreira para restringir a sua abundância com base em observações correntes da GW [19]. São necessários outros métodos para testar de forma confiável a hipótese do modelo PBH-ME [19].

Dada a natureza escura dos PBHs, uma técnica promissora é investigar sua gravitação na propagação de luz fazendo observações com micro lentes, com base no monitoramento de um grupo de estrelas buscando a magnitude causada por objetos compactos que se aproximam da linha de visão [13].

Os PBHs são fortes o suficiente para não deixarem a luz escapar da sua atração ao se aproximarem, possuem campos gravitacionais tão poderosos que podem produzir ondas gravitacionais quando colidem uns com os outros. A ME pode não ser feita de partículas com massa e energia, mas, se for pode-se observar através dos áxions, cuja localização é em volta dos buracos negros [13].

Os PBHs são mais do que apenas armadilhas para capturar a luz, são núcleos de uma espécie de átomo gravitacional [13]. Os áxions seriam os elétrons e os PBHs têm discos de gás de energia extremamente quentes circulando ao seu redor, produzidos pela

fricção entre as partículas aceleradas pela gravidade do buraco negro [13]. Fazendo uma analogia com o átomo, os áxions podem fugir do buraco negro, ganhando e perdendo energia da mesma forma que os elétrons. No entanto, os elétrons interagem através de ondas eletromagnéticas. Já os áxions interagem através da gravidade. Os áxions são minúsculos e diferentemente de um átomo, os buracos negros giram, sobrecarregando o espaço ao seu redor promovendo a produção de mais áxions [13]. Apesar da pequena massa dos áxions, esse processo chamado superradiação pode gerar uma quantidade muito grande de áxions.

As GW foram detectadas por grandes laboratórios e futuramente podem detectar os áxions provando sua existência.

Deve-se dizer também que existem outras formas de localizar o efeito de superradiação. Por exemplo, na medição de spins de conjuntos de buracos negros em colisão [19]. Se os buracos negros realmente produzem áxions, veremos muito poucos buracos negros em rotação rápida colidindo, já que os efeitos da superradiação diminuiriam a velocidade dos buracos negros em colisão e criariam um efeito visível nos dados [19]. Um padrão específico dos spins seria originário do buraco negro e poderiam ser identificados como dados dos detectores de ondas gravitacionais.

Porém existem alguns obstáculos, os átomos de buraco negro, apenas teorizados teriam de produzir áxions com certa massa, mas essa massa não é a ideal para um áxion ser uma partícula de matéria escura. Além disso, a segunda ideia de detecção, é a que observa a taxa de spin de buracos negros em colisão, podendo não funcionar, porque não é levada em consideração a influência potencial de outro buraco negro no par em colisão.

Com o avanço das pesquisas pode-se dizer que não estamos distantes de descobrir por que o nosso modelo atual de universo exige algo como a ME. Alguns pesquisadores veem a possibilidade da ME ser constituída de buracos negros massivos que surgiram em uma fração de segundo após o Big Bang.

Porém, a existência destes buracos negros primordiais poderiam ter distorcido a distribuição de massa no recém criado Universo. Um estudo da NASA comparou os raios X vindos do fundo cósmico (CXB) detectados pelo Observatório de raio X Chandra, com os CIB na mesma região do espaço mas devido ao tipo de emissão, as

estrelas foram descartadas como fontes de luz primordial e a explicação para isso seria que o brilho irregular dos raios-X de baixa energia no CXB casaram perfeitamente com o CIB [19]. O único objeto que poderia ter essa luminosidade naquelas circunstâncias seria um buraco negro [19]. Tal evidência corrobora para que a identidade da ME possa ser de um buraco negro.

### 3.4 WIMPs

Uma outra hipótese para explicar a matéria faltante no Universo é a de ela ser constituída por partículas de interação muito fraca [2]. O motivo para aceitar estas partículas, também chamadas de WIMP's, como candidatas fundamentam-se na estimativa da superabundância de elementos leves, apontados pela Teoria do Big Bang.

Essa partícula massiva de interação fraca seria muito diferente do tipo de matéria que identificamos e sua interação se daria pela força eletromagnética. Em torno de milhões de WIMPs, passariam por toda Terra e sua interação com a matéria seria somente através da força fraca e da gravidade [19].

Se existirem realmente essas partículas os modelos matemáticos implicariam mais desses elementos do que a matéria normal e este fato condiz com a grande quantidade de matéria faltante no Universo a ME [19].

Os áxions são partículas de pouca massa e movimentação, somente interagem fracamente com outra matéria, e esse fato faz com que seja difícil de serem detectadas [19]. Os áxions de uma massa específica seriam apropriados para explicar a natureza da ME. Áxions decaem em um par de partículas de luz, e com isso pretende-se encontrar esses pares para detectá-los.

Para a detecção de WIMP's candidatas para explicar a natureza da ME existem detectores que são construídos em profundidade no solo Terrestre. Um dos principais candidatos é o áxion. A detecção é realizada em minas de grande profundidade. Para isso as medidas desses detectores são realizadas em grandes profundidades para distanciar-se de qualquer ruído oriundos de outras fontes.

Para a hipótese não bariônica surgem duas propostas, a da matéria escura fria, CDM (*Cold Dark Matter*) e a matéria escura quente, HDM (*Hot Dark Matter*).

A Cold Dark Matter, matéria escura fria, tem como proposta de modelo que a ME pode ser considerada como fria na perspectiva de que ela se torna não relativística depois da inflação. Neste modelo as estruturas, galáxias e aglomerados, teriam se formado a partir de estruturas da ordem das galáxias anãs, que permaneceram desde a era da radiação, e conseqüentemente formaram as grandes estruturas que conhecemos hoje. Dentre os principais candidatos deste modelo de matéria encontramos os áxions, cuja descrição foi dada em um dos parágrafos anteriores [19].

Já a Hot Dark Matter, matéria escura quente, tem como proposta de modelo que a ME é composta de partículas pouco massivas, como os neutrinos, que permanecem relativísticas até a atualidade [2]. Dentre os principais candidatos deste modelo de matéria encontramos os áxions.

## Capítulo 4

### CONCLUSÕES

Neste trabalho revisamos as evidências e os modelos candidatos que podem confirmar a existência da matéria escura. No Universo parece que existe uma matéria faltante, que não pode ser vista, mas que exerce uma atração gravitacional sobre a matéria normal.

Existem muitas hipóteses diferentes sobre o que pode ser a matéria escura, no entanto nenhuma foi comprovada. Um candidato importante sugere que a matéria escura é composta de interação fraca (WIMPs de partículas massivas), que é formada, por matéria e antimatéria.

O Big Bang pode ter criado uma abundância de partículas que podem ser a composição da matéria escura, mas a maioria dessas partículas teria destruído umas as outras, e aquelas que permanecem hoje seriam apenas o excesso de um tipo de matéria escura que conseguiram evitar ser totalmente aniquilada.

Se a matéria escura é assimétrica, ela deve se comportar de forma diferente da versão padrão do WIMP. Por exemplo, os centros gravitacionalmente densos de estrelas deveriam atrair a matéria escura nas proximidades.

Se a matéria escura é feita de WIMPs-partículas massivas regulares, quando duas dessas partículas se encontram no centro de uma estrela vão destruir umas as outras devido aos seus correspondentes de antimatéria. Se partículas se encontrarem elas não irão simplesmente se aniquilar e ao longo do tempo a matéria escura poderia acumular-se dentro da estrela. Há muitos experimentos visando detectar possíveis partículas de matéria escura. As descobertas do LIGO cria um cenário de estudos onde os buracos negros fazem um papel de matéria escura.

A compatibilidade das imagens do CIB e do CXB pode ser explicada pela luz infravermelha emitida pelas primeiras estrelas criadas neste processo, e dos raios-X dos gases atraídos pela matéria escura dos buracos negros e estudos mais aprofundados podem ser feito com os dados do Observatório de Onda Gravitacional por Interferômetro Laser. Assim, terá uma resposta concreta da comprovação da existência dessa matéria faltante observada no Universo, que hoje é conhecida como Matéria Escura.

## REFERÊNCIAS

- [1] ZWICKY, F. On the masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae" *Astrophys. J.* 86, 3 (1937)[<http://adsabs.harvard.edu/abs/1937ApJ...86..217Z>].
- [2] LIDDLE, A. *An introduction to modern cosmology*. 2. ed. England: Wiley,2003
- [3] Iu. Babyk et al. "The Dark Matter Haloes of Chandra X-ray Galaxy Clusters and Baryons Effect",(2012) [arXiv:1208.2424v2].
- [4] RUBIN, V.; FORD, W.; D'ODORICO, S. Emission-line intensities and radial velocities in the interacting galaxies ngc 4038-4039. *Astrophysical Journal*, v. 160, p. 801, 1970.
- [5] RUBIN, V.; FORD, W.; RUBIN, J. A curious distribution of radial velocities of sci galaxies with  $14.0 < m < 15.0$ . *Astrophysical Journal*, v. 183, p. L111, 1973. 7.
- [6] B. P. Abbott et al. [LIGO Scientific and Virgo Collaborations],(2016) arXiv:1602.03842 [astro-ph.HE].
- [7] B. P. Abbott et al. [LIGO Scientific and Virgo Collaborations],(2016) arXiv:1602.03844 [gr-qc]
- [8] V. C. Rubin, W. K. Ford Jr., Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions, *The Astrophysical Journal* v. 159, p. 379. (1970).
- [9] K. Schwarzschild, *Sitzungsber. K. Preuß. Akad. Wiss.*1916, 189 (1916).
- [10] VIRGO, LIGO Scientific Collaboration, B. P. Abbott et al., Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO and Advanced Virgo, arXiv:1304.0670. [*Living Rev. Rel.*19,1(2016)].
- [11] Virgo, LIGO Scientific Collaboration, B. P. Abbott et al., Observation of Gravitational.
- [12] Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016), no. 6 061102, [arXiv:1602.03837].
- [13] A. Kashlinsky [LIGO gravitational wave detection, primordial black holes and the near-IR cosmic infrared background anisotropies] arXiv:1605.04023v1 [astro-ph.CO] 2016.
- [14] B.Gianfranco [Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints] arXiv:hep-ph/0404175v2 2004.
- [15] S. Calchi Novati et al. [AGAPE Collaboration], \POINT-AGAPE pixel lensing survey of M31: Evidence for a MACHO contribution to galactic halos," *Astron. Astrophys.* 443, 911 (2005), [astro-ph/0504188].

- [16] F. ZWICKY, "The redshift of extragalactic nebulae," *Helv. Phys. Acta* 6, 110 (1933). [17] V. C. Rubin and W. K. Ford, Jr., "Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions," *Astrophys. J.* 159, 379 (1970).
- [18] B. P. ABBOTT et al. [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], "Astrophysical Implications of the Binary Black-Hole Merger GW150914," *Astrophys. J.* 818, L22 (2016) [arXiv:1602.03846 [astro-ph.HE]].
- [19] BARYAKHTAR.M.; ARVANITAKI.A.;HUANG.X.Discovering the QCD Axion with Black Holes and Gravitational Waves[arXiv:1411.2263v3 [hep-ph] ] 2015.
- [20] MOREIRA, F. Gravidade Entrópica e o Problema da Matéria Escura. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro. 2014
- [21] Siqueira, C.M. Matéria Escura no Modelo Padrão Supersimétrico Mínimo. Dissertação(Mestrado em Física) Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa.2015
- [22] Disponível em: <<http://hubblesite.org/image/3051/news>>. Acesso em: 15 dez.2017
- [23] Disponível em:< [hubblesite.org/hubble\\_discoveries/dark\\_energy/de-fate\\_of\\_the\\_universe.php](http://hubblesite.org/hubble_discoveries/dark_energy/de-fate_of_the_universe.php) >. Acesso em: 7 jan.2018
- [24] Disponível em: <<https://files.wordpress.com/2011/11/matc3a9ria-escura-por-alaor-chaves-em-16-11-11.pdf>>. Acesso em: 7 jan.2018
- [25] Disponível em:< <https://hubbsite.org/gallery/album.pr2000007b/>>. Acesso em: 10 dez.2017
- [26] Disponível em:< <http://www.observatorio.ufmg.br> >. Acesso em: 10 dez. 2017