



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE HUBBLE E IDADE DO  
UNIVERSO ATRAVÉS DA OBSERVAÇÃO DE LENTES  
GRAVITACIONAIS**

Gabriela Greganyck Ortiz

Relatório de Iniciação Científica do programa  
PIBIC, orientado pelo Dr. Luiz Claudio Lima  
Botti.

INPE

São Paulo

2023

**DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE HUBBLE E IDADE DO  
UNIVERSO ATRAVÉS DA OBSERVAÇÃO DE LENTES  
GRAVITACIONAIS**

Gabriela Greganyck Ortiz

Relatório de Iniciação Científica do programa  
PIBIC, orientado pelo Dr. Luiz Claudio Lima  
Botti.

INPE

São Paulo

2023



## RESUMO

Este estudo, iniciado em fevereiro de 2023, é uma continuação de um projeto pré-existente feito por Alex Rocha. Minha parte do projeto tem o propósito, em um primeiro momento, aprofundar-se no conceito de tempo em relação as Lentes Gravitacionais e como estas lentes deformam o tecido do espaço-tempo e, posteriormente, comparar a diferença do tempo próximo ao objeto massivo e distante desse sistema de referência, comprovando que o tempo não é absoluto. Uma Lente Gravitacional é uma consequência geométrica da curvatura do tecido do espaço-tempo devido a um corpo massivo entre o objeto e o observador, existem três regimes tradicionais de Lentes Gravitacionais. A lente forte é um regime no qual são observadas várias imagens virtuais, ou imagens altamente distorcidas de uma única fonte (o quasar), por conta do desvio da luz feita pelo corpo em primeiro plano, chamado de lente ou defletor, que causa a curvatura no espaço. As configurações de múltiplas imagens de um quasar mais comuns são as chamadas “doubles” (2 imagens observadas), seguidas pelas “quads” (4 imagens observadas). Uma propriedade fenomenal e trivial de lentes fortes, é que o tempo de viagem da luz da fonte ao observador usualmente não é a mesma para as diferentes imagens, ou seja, nós não apenas vemos diversas imagens de um mesmo objeto, mas também vemos este objeto em diferentes momentos de sua história, em cada imagem. O time-delay é uma propriedade diretamente mensurável de uma Lente Gravitacional forte e depende de distâncias físicas. Além disso, ele tem uma dimensão. O time-delay medido dimensiona um determinado sistema de lente e, portanto, o universo em que estão incorporados. Refsdal, em 1964, propôs usar medições de time-delay como uma sonda para o  $H_0$  da Constante de Hubble, este método é aplicado com sucesso a quasares com lentes fortes. Com isso, ao monitorar o brilho das imagens de um quasar com lente, obtém-se curvas de luz, isto é, a representação do brilho em função do tempo. As mesmas flutuações de luminosidade do quasar podem agora ser vistas, deslocadas no tempo, nas curvas de luz de diferentes imagens deste quasar. Os gráficos, chamados curvas de luz de Lentes Gravitacionais, serão analisados para uma melhor compreensão deste fenômeno. Uma das maneiras de abordagem desse tema, será pelo projeto COSMOGRAIL, onde estes gráficos têm um papel essencial. COSMOGRAIL é uma campanha de monitoramento de quasares com

Lentes Gravitacionais, envolvendo vários telescópios ópticos de classe métrica. O objetivo principal deste projeto é aumentar a amostra de medições precisas de time-delay entre as múltiplas imagens destes quasares, ele explora o método de Rafsdal (1964) para restringir o  $H_0$ . Além disso, é estudado também neste projeto os Tensores, que são a base para a Relatividade Geral.

## ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Efeito Lente Gravitacional.....	3
Figura 1.2 - Anel de Einstein .....	3
Figura 1.3 - Distâncias de diâmetro angular.....	4
Figura 1.4 - Cruz de Einstein.....	4
Figura 1.5 - Universos de Friedmann .....	7
Figura 1.6 - Representação de Buraco de Minhoca ligando dois Buracos Negros .....	10
Figura 3.1 - HE0435-1223 .....	12
Figura 3.2 - HS 2209+1914 .....	12
Figura 3.3 - RX J1131-1231 .....	112
Figura 3.4 - SDSS J1001+5027 e SDSS J1206+4332.....	112

### LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.1: Velocidade de escape.....	1
Equação 1.2: Raio de Schwarzschild.....	2
Equação 1.3: Ângulo de deflexão.....	2
Equação 1.4: Raio angular adimensional .....	4
Equação 1.5: Constante de Hubble.....	5
Equação 1.6: Dilatação Temporal .....	6



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Lentes Gravitacionais .....	1
1.2 Tempo .....	5
1.2.1 Tempo na relatividade restrita.....	5
1.2.2 Tempo na relatividade geral .....	6
1.3 Energia Escura .....	7
1.3.1 Matéria Escura .....	8
1.4 Buracos Negros e Buracos de Minhoca.....	9
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	11
<b>3. RESULTADOS E METODOLOGIA</b> .....	11
3.1 Resultados .....	11
3.2 Metodologia .....	11
<b>4. CONCLUSÕES</b> .....	13
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	13



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Lentes Gravitacionais

Em 1704, Sir Isaac Newton elaborou a primeira questão sobre o comportamento dos raios de luz em um campo gravitacional: "Os corpos não exercem influência sobre a luz à distância e, através de sua influência, curvam os trajetos dos raios luminosos; essa influência não se intensifica na menor das distâncias?". Este problema foi levado adiante até 1783, onde o geólogo e geofísico britânico, John Michell, escreveu uma carta à Henry Cavendish propondo a ideia de um objeto de grandiosa densidade e massa que nem a luz pudesse escapar de sua atração gravitacional.

Independentemente de Michell, em 1796, Laplace também introduziu um conceito análogo em seu trabalho sobre a gravitação e os corpos celestes. A ideia central de sua análise diz que se a força gravitacional de um corpo celeste, com enorme massa e concentrada em um pequeno espaço, for intensa o suficiente, poderia haver um colapso gravitacional e como resultado desse colapso, a velocidade de escape necessária para superar a atração gravitacional será maior do que a velocidade da luz. De fato, uma partícula teste pode deixar um campo gravitacional de massa esférica  $M$  e raio  $R$ , começando pela superfície, se a sua velocidade inicial for maior que sua velocidade de escape, dada pela Equação (1.1):

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (1.1)$$

*Equação 1.1: Velocidade de escape*

Esta velocidade de escape aumenta com o aumento da compacidade do objeto atrativo, e alcança a velocidade da luz  $c$  se o raio é menor que:

$$R_S \equiv \frac{2GM}{c^2} \quad (1.2)$$

*Equação 1.2: Raio de Schwarzschild*

Posteriormente, Einstein (1915) propôs que a existência de uma grande massa, como o Sol, curvava o espaço-tempo ao seu redor resultando na deflexão da trajetória da luz que passa perto do Sol, conforme esta luz viaja por entre o espaço curvado. Esta previsão é chamada Lei de Deflexão de Einstein. A primeira manifestação observada de luz sendo “curvada” pela gravidade ocorreu durante o eclipse solar de 29 de maio de 1919, por Arthur Eddington e colaboradores, ao mostrarem por suas observações que havia pequenos deslocamentos aparentes nas posições angulares das estrelas, quando estas estrelas são vistas próximas da borda do Sol. O termo lente gravitacional é designado para todos os efeitos desta curvatura na propagação da luz!

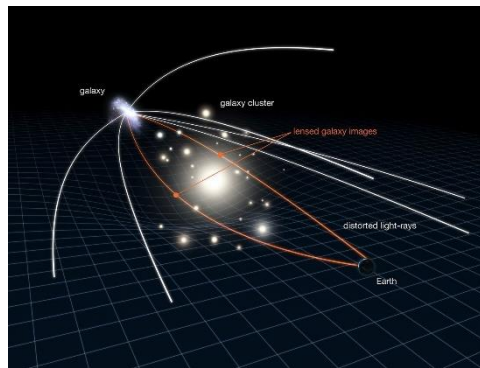
A Relatividade Geral prevê que o raio de luz que passa pelo corpo esférico de massa  $M$  em uma distância mínima  $\xi$ , é desviado pelo “ângulo de Einstein”:

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{c^2\xi} = \frac{2R_S}{\xi} \quad (1.3)$$

*Equação 1.3: Ângulo de deflexão*

A lente gravitacional é uma consequência geométrica da curvatura do espaço, ela não depende do comprimento de onda da luz. Existem três categorias de lentes gravitacionais. A lente gravitacional forte é um regime no qual os objetos em primeiro plano, chamados de lentes ou defletores, causam uma curvatura do espaço-tempo tão intensa que a luz emitida pelos objetos de fundo, chamados de fontes, é expressivamente ampliada e distorcida. Podendo levar a formação de múltiplas imagens da mesma fonte e à uma relevante amplificação de seu brilho.

*Figura 1.1 – Efeito Lente Gravitacional*



*Fonte: NASA/ESA*

As lentes fortes têm um quasar como fonte. Os quasares resultam do acúmulo de matéria em buracos negros supermassivos, localizados no centro de suas galáxias hospedeiras. Estes objetos astronômicos são extremamente brilhantes, tipicamente muito mais brilhantes do que galáxias inteiras e emitem vastas quantidades de energia, essencialmente na forma de luz visível, ultravioleta e raios-X. Quasares são uma subcategoria de Núcleos Galácticos Ativos – AGN.

Dependendo da posição da fonte e do defletor, ao olhar através da lente, as formas e quantidades de imagens do quasar podem ser diferentes para cada situação. Caso a fonte esteja precisamente alinhada atrás de uma lente cuja distribuição de massa exibe simetria circular em relação à linha de visada, a imagem obtida será vista como um anel em torno da lente, chamado de “Anel de Einstein” representado na Figura 1.2 . O raio angular adimensional do “Anel de Einstein” é o chamado “Raio de Einstein”, calculado pela equação (1.4).

*Figura 1.2 – Anel de Einstein*



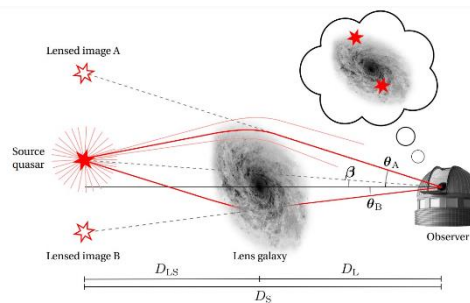
*Fonte: NASA / Telescópio Espacial James Webb*

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S}} \quad (1.4)$$

*Equação 1.4: Raio angular adimensional*

Onde  $M$  é a massa da lente anexada no cilindro descrito pelo anel e  $D_{LS}$ ,  $D_L$  e  $D_S$  são as distâncias de diâmetro angular entre a fonte, a lente e o observador, sendo estas distâncias representadas na Figura 1.3.

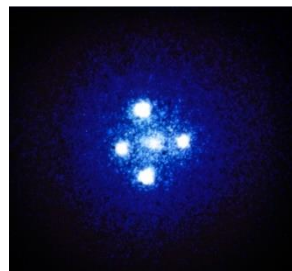
*Figura 1.3 – Distâncias de diâmetro angular*



*Fonte: Malte Tewes (2013)*

Porém, as configurações mais comuns de múltiplas imagens são os chamados “doubles” - duas imagens observadas, seguido pelos “quads” - quatro imagens observadas, (Figura 1.4).

*Figura 1.4 – Cruz de Einstein*



*Fonte: NASA/ ESA/ STScI*

Em razão da curvatura do espaço-tempo causada pela lente gravitacional, os raios de luz, que passam por caminhos diferentes, têm tempos de viagem diferentes. Em outras palavras, cada imagem que representa a fonte reproduz um momento diferente de sua história. Este atraso temporal entre as múltiplas imagens é conhecido como “time-delay”. Este fenômeno é importante, pois ele é uma propriedade diretamente mensurável de uma

lente gravitacional, fornecendo informações cruciais sobre as propriedades das lentes. Como a distribuição de matéria na lente e a distância até a fonte.

Refsdal (1964), propôs usar as medições de atrasos temporais (time-delays) para determinar a Constante de Hubble. A Constante de Hubble expressa a taxa atual de expansão do Universo e em geral é representada por  $H_0$ , dada pela equação (1.5):

$$H_0: v = H_0 \cdot D \quad (1.5)$$

*Equação 1.5: Constante de Hubble*

Onde  $v$  é a velocidade de recessão e  $D$  a distância das galáxias.

Refsdal (1964) é aplicado com sucesso a quasares com lentes fortes, dessa forma, ao acompanhar a luminosidade das imagens de um quasar com lente, é possível gerar curvas de luz, ou seja, representações do brilho conforme o decorrer do tempo.

## 1.2 Tempo

No cotidiano, o conceito de tempo se entrelaça com a sequência ordenada dos eventos e se quantifica através dos relógios. Porém, a grandeza física, tempo, é um paradigma muito maior do que esta simples interpretação. Na verdade, apesar de sua perspicácia, a ciência não detém nenhuma definição absoluta de tempo.

### 1.2.1 Tempo na relatividade restrita

Na relatividade restrita, o tempo e o espaço não se manifestam como grandezas absolutas e independentes, mas sim como grandezas estreitamente interligadas e necessariamente atreladas a um referencial em específico. A concepção de espaço e tempo se entrelaça em uma única rede de coordenadas, conhecida como espaço-tempo. De acordo com a Teoria da Relatividade, para um par específico de acontecimentos, caso haja um observador para o qual esses eventos ocorram simultaneamente, outro observador os perceberá na ordem causal e um terceiro observador os perceberá na ordem inversa. Assim a simultaneidade de dois eventos é relativa, isto é, depende do observador.

Analogamente existe o Paradoxo dos Gêmeos, um famoso experimento proposto por Einstein (1905). Para melhor análise deste paradoxo existe a seguinte história: “Existiam dois irmãos gêmeos idênticos A e B. O gêmeo A faz uma viagem espacial em uma nave extremamente rápida, que viaja próxima a velocidade da luz, enquanto o irmão B permanece na Terra. Por conta do rápido movimento de A, seu tempo passará mais

devagar em relação ao irmão B que permaneceu na Terra. Então, ao se reencontrarem, A estará mais jovem que o seu irmão gêmeo B.” O fenômeno explicado neste paradoxo é nomeado Dilatação do Tempo e ele afirma que o tempo passa mais devagar para objetos que se deslocam com altas velocidades. Ou seja, a determinação do tempo e do espaço é algo estritamente local e específico a cada referencial. Do ponto de vista matemático, essa teoria se formula na seguinte equação (1.6):

$$\Delta t_0 = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (1.6)$$

*Equação 1.6: Dilatação Temporal*

Onde  $\Delta t_0$  representa o intervalo de tempo marcado pelo observador em repouso,  $\Delta t$  o intervalo de tempo marcado pelo observador em movimento,  $v$  a velocidade do corpo em movimento e  $c$  a velocidade da luz ( $c = 3,0 \times 10^8$  m/s).

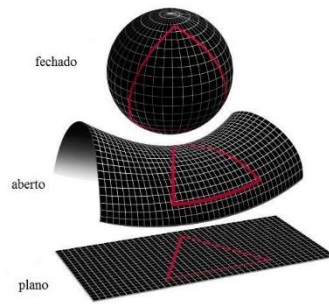
### 1.2.2 Tempo na relatividade geral

Até este ponto, está claro e tangível, que é possível agir sobre o tempo. Desta forma, a progressão da matéria no universo não se limita a mostrar a ordem cronológica, mas também exerce influência sobre ela. Isso sugere que, sob certas condições, o tempo tem um começo e pode ter um fim.

A relatividade geral é a teoria do espaço-tempo e fornece uma nova percepção sobre o que é a gravidade, refutando a grandiosa teoria Newtoniana. Segundo ela, a força gravitacional é o encurvamento da geometria do espaço-tempo devido à presença de massa e energia. É crucial enfatizar que, da mesma maneira que a gravidade provoca deformação no espaço, ela também induz uma distorção no tempo. Por outras palavras, a gravidade constitui outro elemento capaz de induzir a dilatação temporal. Quanto mais forte a gravidade em uma determinada área, mais lentamente o tempo passará em relação às regiões com menos gravidade. Sendo assim, torna-se viável empregar lentes gravitacionais para observar e monitorar a dilatação temporal, por exemplo.

Sendo o Cosmos tecido pelo espaço-tempo, onde o espaço-tempo acaba, acaba o Universo e acaba o tempo. Como não existe uma solução única das equações de Einstein para o Universo, há um catálogo de possibilidades de descrição do Universo. As três possibilidades que se aproximam mais fielmente da realidade por meio de experimentação são os universos de Friedmann aberto, chato e fechado, exemplificados na figura (1.5). Todos representam universos em expansão.

Figura 1.5 – Universos de Friedmann



Fonte: UFMG

O universo de Friedmann fechado era aquele ao qual Einstein estava mais inclinado a apoiar. Este modelo tem um espaço finito que se fecha sobre si, de forma esférica, mas é ilimitado, já que nunca se chega ao seu fim. O início deste universo está contido em um ponto singular, a partir do qual inicia uma expansão vertiginosa. Com o tempo, essa expansão diminui gradativamente, chegando a um ponto em que o universo para de se expandir e começa a se contrair. Esse processo inverso traça o primeiro estágio da evolução de volta ao seu ponto de partida singular. Assim temos o início do tempo, onde inicia-se a expansão, e o seu fim, quando é concluída a contração. As alternativas dos Universos de Friedmann aberto e chato são notavelmente similares ao fechado. No entanto, ao contrário do último, não há fim do tempo. Eles são universos caracterizados por vida infinita e espaço infinito.

### 1.3 Energia Escura

Foi descoberto que o ritmo de expansão do universo está aumentando, de modo que as galáxias estão afastando-se uma das outras mais rápido do que há um momento atrás. É conhecida como energia escura, tudo aquilo que esteja causando a força repulsiva que está puxando/separando o universo.

Existem várias hipóteses sobre o que está causando a aceleração do universo. A mais importante delas remonta à natureza do espaço vazio, que tem um conceito análogo ao da constante cosmológica (termo que Einstein adicionou em suas equações de relatividade geral, representando uma energia de densidade constante por todo espaço). Na física quântica, o vácuo é preenchido com partículas e antipartículas "virtuais" que aparecem espontaneamente e se aniquilam em uma fração de segundo. Esse mar efêmero de pares de partículas gera energia, que pode criar atração ou repulsão gravitacional, dependendo se a pressão é positiva ou negativa. De acordo com a teoria predominante, a energia do vácuo no espaço vazio deve estar em pressão negativa, e essa pressão pode ser a fonte da gravidade repulsiva que causa a expansão acelerada do universo.

Outra ideia é que a energia escura é um campo de energia cósmica chamado quintessência, que envolve cada ponto no espaço com propriedades que se opõem à gravidade. Se a energia escura é um campo, não é constante, mas muda ao longo do tempo. De acordo com esse raciocínio, a energia escura poderia ter sido mais forte ou mais fraca do que é agora e poderia ter afetado o universo de maneiras diferentes ao longo do tempo.

Uma terceira opção hipotética poderia ser a aceleração cósmica. A qual argumenta que a energia escura não existe e que os processos que aceleram o crescimento do universo decorrem da física inexplicada na teoria da gravidade de Einstein (relatividade geral), pois ela está incompleta. Nessa hipótese, em situações extremas como a amplitude de aglomerados de galáxias ou de todo o universo observável, as leis da gravidade podem se comportar de forma diferente do previsto pela teoria, fazendo com que a gravidade se comporte de forma errônea.

Nenhuma das explicações de energia escura são satisfatórias, por exemplo, a constante cosmológica prevê que a energia escura deveria ser muito mais forte do que ela realmente é, onde o mar de partículas e antipartículas virtuais no vácuo do espaço tem uma magnitude 120 vezes maior do que a realidade atual.

As propriedades da energia escura vão determinar o destino final do nosso universo. Por exemplo, se a energia escura for realmente a energia do espaço vazio (constante cosmológica), a aceleração da expansão do universo vai continuar para sempre e vai chegar um momento em que as galáxias vão se separar mais rápido que a velocidade da luz as tornando indetectáveis. Em contrapartida, se a energia escura é um campo de energia ainda não conhecido, o futuro está em aberto. Dependendo de como o campo irá se desenvolver, o universo pode eventualmente parar de se expandir e começar a entrar em colapso, se direcionando para um final “big crunch” (se “esmagar”), ou o universo vai chegar no “big rip” (grande rasgo/ grande fenda), onde todas as estruturas complexas, de aglomerados de galáxias até átomos e núcleos atômicos, podem ficar sobrecarregadas de energia escura e se “rasgarem”.

### 1.3.1 Matéria Escura

Cientistas sabem, por quase um século, que o cosmos está se expandindo. Contudo, nas décadas recentes, se tornou claro que as galáxias não estão se separando tão rápido quanto o esperado, se a expansão fosse a única força agindo sobre elas; uma outra força gravitacional de acúmulos de matérias próximas também está intervindo, uma força que consegue compensar o fluxo de uma galáxia na expansão do cosmos. “Velocidade peculiar” é o nome dado a diferença entre o movimento da expansão cósmica da galáxia e o movimento de seu ambiente local. Os astrônomos chamam de “matéria escura”, aquilo que consiste em partículas que interagem pela gravidade, (quase exclusivamente), com o



resto do universo. Esta matéria escura exerce a força gravitacional necessária para dar conta das velocidades observadas.

O grupo Tully e outros, perceberam que criar mapas de fluxos galácticos e velocidades peculiares, poderiam revelar a matéria escura escondida na distribuição cósmica, revelando suas substâncias misteriosas de concentrações grandiosas por sua influência gravitacional no movimento das galáxias. A aceleração da expansão do universo sugere que o cosmos vai vivenciar uma morte fria, mas para saber com certeza como tudo irá acabar, não exige somente determinar o que exatamente é a energia escura, mas também quanta matéria escura tem no universo.

#### 1.4 Buracos Negros e Buracos de Minhoca

No âmbito da física teórica, duas concepções distintas ganham destaque: o entrelaçamento quântico e os buracos de minhoca. O entrelaçamento quântico emerge da mecânica quântica, delineando uma forma de correlação entre objetos, frequentemente átomos e partículas subatômicas. Já os buracos de minhoca, previsto pela teoria geral da relatividade, são atalhos que conectam localidades distantes do espaço-tempo. Investigações recentes conduzidas por físicos, por meio de cálculos relacionados a buracos negros, insinuam uma possível interligação entre esses dois conceitos, sugerindo que poderiam ser equivalentes. Essa correlação tem o potencial de promover o desenvolvimento de uma teoria unificadora que entrelaça a mecânica quântica com o espaço-tempo, conhecida como teoria da gravidade quântica. Tal teoria é crucial para compreender o Big Bang e o interior dos buracos negros.

Para explicar o porquê estas ideias podem estar relacionadas, é preciso saber diversas propriedades dos buracos negros. A característica distintiva dos buracos negros é que a sua geometria pode se separar em duas regiões: o exterior, onde o espaço é curvo, mas objetos e mensagens ainda podem escapar, e o interior, o ponto onde não há retorno. Estas duas regiões são separadas por uma superfície chamada de horizonte de eventos, a relatividade geral diz que este horizonte é uma superfície imaginária. Por exemplo, um astronauta passando por ele não sentiria nada, mas se ele ultrapassasse deste ponto ele seria espremido em uma região com uma curvatura gigante e com nenhuma possibilidade de fuga, (o interior do buraco negro está no futuro comparado ao exterior).

Karl Schwarzschild propôs que por fora os buracos negros aparentam estarem separados e distantes um do outro, mas eles compartilham o interior por uma espécie de buraco de minhoca. A solução deste físico diz que o buraco de minhoca varia com o tempo, ele se alonga e torna-se mais fino à medida que o tempo passa, por enquanto, em um ponto, os horizontes destes dois buracos negros se tocam, separando-os tão rapidamente que seria impossível viajar de um exterior para outro.

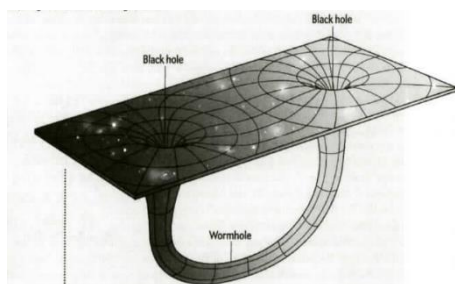
O princípio da incerteza de Heisenberg, diz que há pares de variáveis físicas impossíveis de saber com exatidão ao mesmo tempo, um exemplo é a posição e

velocidade de uma partícula, se for medida sua exata posição, sua velocidade se torna incerta e vice-versa. O entrelaçamento quântico, escrito por Einstein, Boris Podolsky e Rosen (conhecidos como EPR), pergunta o que aconteceria se medissem a posição ou a velocidade de um par de partículas individuais, separadas por uma grande distância. Por meio de cálculos de entrelaçamento quântico entre duas partículas é possível saber com exatidão o valor de sua posição e velocidade ao mesmo tempo, sem violar o princípio da incerteza de Heisenberg. Mas a correlação de medidas do entrelaçamento, por uma partícula depender da outra, não pode ser usada para mandar sinais mais rápidos que a velocidade da luz.

Stephen Hawking (1974), mostrou que efeitos quânticos farão com que buracos negros emitam radiação. O fato que buracos negros irradiam, implica que eles têm uma temperatura, (uma noção com ramificações importantes), e se eles têm temperatura pode-se esperar que tenham um tipo de constituintes microscópicos, chamados microestados. Físicos também acreditam que buracos negros vistos por fora se comportam como sistemas quânticos, ou seja, vistos pelo exterior deve se achar um sistema que tenham muitos microestados. Por este motivo, nada impede de considerar que um par de buracos negros possa ter um entrelaçamento de seus microestados, assim produzindo um espaço-tempo em que um buraco de minhoca ligue o interior deles, em outras palavras, o entrelaçamento quântico cria uma conexão geométrica entre os dois buracos negros. Estes resultados são surpreendentes, pois acreditava-se que o entrelaçamento envolvia uma correlação sem conexão física, mas neste caso, os dois buracos negros estão fisicamente ligados, através de seus interiores, pelo buraco de minhoca.

Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski e James Sully (2012) publicaram uma descoberta de um paradoxo relacionado a natureza do entrelaçamento do interior de buracos negros. É tentadora a ideia de sempre que há um entrelaçamento, existe um tipo de conexão geométrica; ainda não se sabe descrever estas geometrias microscópicas, mas o entrelaçamento destas estruturas quânticas pode dar origem ao próprio espaço-tempo. O entrelaçamento pode ser visto como um fio conectando dois sistemas, à medida que a quantidade de entrelaçamento se torna maior a de fios também, e estes fios podem se entrelaçar para formar o tecido do espaço-tempo.

*Figura 1.6 - Representação de Buraco de Minhoca ligando dois Buracos Negros*



*Fonte: Jillian Ditner*

## 2. OBJETIVOS

A intenção inicial deste projeto é estudar o conceito do tempo no tecido do espaço-tempo usando as lentes gravitacionais, comparando a diferença de tempo próximo ao objeto massivo e distante deste sistema de referência.

Além disso, serão observados e estudados os gráficos de curvas de luz presentes no trabalho COSMOGRAIL, com objetivo de medir a constante de Hubble e sondar os time-delays em sistemas de lentes gravitacionais.

A análise aprofundada da Teoria da Relatividade Geral é extremamente importante para o avanço deste projeto. Um conhecimento profundo das particularidades do universo é necessário para compreender melhor o conceito de tempo e sua dinâmica. Devido ao fato de que os tensores são a base da Relatividade, a investigação minuciosa desse assunto é extremamente importante.

## 3. RESULTADOS E METODOLOGIA

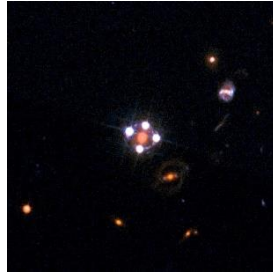
### 3.1 Resultados

Os primeiros meses do projeto foram dedicados ao entendimento inicial do tema que será abordado, em sequência o estudo busca se aprofundar no tema e desenvolver experimentos e validações acerca do projeto estudado.

### 3.2 Metodologia

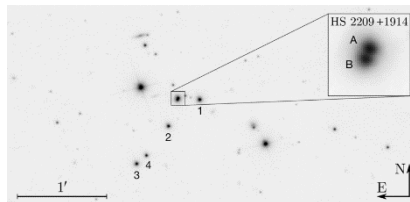
Em um estudo prévio, uma investigação foi conduzida com o intuito de identificar quasares com potencial para desempenhar o papel de Lentes Gravitacionais, resultando na descoberta de cinco sistemas promissores. O HE0435-1223, um quasar de lente quádruplo, possuindo quatro componentes dispostos harmoniosamente em uma configuração cruciforme em torno de uma galáxia brilhante em seu centro (Figura 3.1). O HS 2209+1914, um sistema quasar-lente duplo (Figura 3.2). O quasar RX J1131-1231, que vem de uma lente gravitacional quádrupla que ampliou sua luz proveniente (Figura 3.3). Um sistema de lente gravitacional duplo SDSS J1001+5027. E, por fim, o quasar SDSS J1206+4332 que também é um sistema de lente gravitacional duplo (Figura 3.4).

Figura 3.1 - HE0435-1223



Fonte: ESA/Hubble, NASA, Suyu et al.

Figura 3.2 - HS 2209+1914



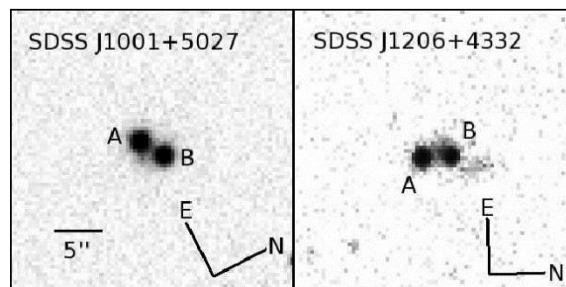
Fonte: Mercator Telescope/Cosmograil

Figura 3.3 - RX J1131-1231



Fonte: NASA

Figura 3.4 - SDSS J1001+5027 e SDSS J1206+4332



*Fonte: Mercator Telescope/Cosmograil*

Os dados necessários para realizar este estudo foram obtidos através do Strasbourg Astronomical Data Center (CDS). Com esses dados disponíveis, é possível representar graficamente o tamanho relativo de cada componente da lente gravitacional em relação ao número de dias para identificar possíveis mudanças. Se tal mudança for observada, seria uma oportunidade para investigar uma possível explosão na fonte. Por meio da análise comparativa entre os objetos de pesquisa, pode-se discernir a diferença de tempo entre as estruturas existentes em duas ou mais curvas de luz, fornecendo informações valiosas para a pesquisa.

Para análise de curvas de luz pretende-se utilizar o Software MATLAB.

#### **4. CONCLUSÕES**

Neste relatório de iniciação científica, foi possível compreender a importância da determinação da constante de Hubble e idade do universo através da observação de lentes gravitacionais. Através do estudo da Teoria da Relatividade Geral, foi possível entender como as lentes gravitacionais deformam o tecido do espaço-tempo e como isso pode ser utilizado para medir a diferença do tempo próximo ao objeto massivo e distante desse sistema de referência.

Além disso, foram apresentados os três regimes tradicionais de lentes gravitacionais e como eles podem ser utilizados para medir a constante de Hubble e a idade do universo. Foi destacado também a importância da investigação minuciosa dos tensores, que são a base da Relatividade, para o avanço deste projeto.

Por fim, conclui-se que a determinação da constante de Hubble e idade do universo através da observação de lentes gravitacionais é um tema de grande relevância para a astronomia e que este estudo pode contribuir significativamente para o avanço do conhecimento sobre o universo e suas particularidades.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

FLEMING, H. **O tempo na física**. Disponível em:

<file:///C:/Users/gabig/OneDrive/Documentos/Inicia%C3%A7%C3%A3o%20Cient%C3%ADfica/Relatividade%20Geral/O%20TEMPO%20NA%20F%C3%8DSICAhenriquefleming.pdf>.

Acesso em: 10 fev. 2023.

HANSON, R; SHALM, K. Uma estranha realidade. **Scientific American**, p. 25-37. Disponível em: [www.sciam.com.br](http://www.sciam.com.br). Acesso em: 15 dez. 2022.

MOSKOVITZ, C. Ripples in spacetime. **Scientific American**, p. 27-51. Disponível em: [scientificamerican.com/magazine/sa](http://scientificamerican.com/magazine/sa). Acesso em: 25 nov. 2022.

REFSDAL, S. **The gravitational lens effect**, MNRAS, 128, 295, 1964a.

SCHNEIDER, P., EHLERS, J., FALCO, E. E. **Gravitational Lenses**. Editora Springer, 1992.

TEWES, M. **Cosmology with Gravitational Lensing: Measuring Quasar Time Delays and Cosmic Shear**. Suíça: Escola Politécnica Federal de Lausana, 2013.