

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS REGIONAL  
JATAÍ

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE CIÊNCIAS  
EXATAS E TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM  
MATEMÁTICA EM REDE NACIONAL

BURACOS NEGROS E A CONJECTURA DA  
CENSURA CÓSMICA, PALESTRA E ESTUDO

Cristiano Rodrigues dos Santos

Jataí

2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico:     Dissertação     Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: Cristiano Rodrigues dos Santos

Título do trabalho: BURACOS NEGROS E A CONJECTURA DA CENSURA CÔSMICA, PALESTRA E ESTUDO

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

Cristiano Rodrigues dos Santos  
Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:

B. Roberto  
Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 24 / 07 / 2019

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

<sup>2</sup> A assinatura deve ser escaneada.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
REGIONAL JATAÍ



UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS



PROGRAMA DE MESTRADO  
PROFISSIONAL EM MATEMÁTICA EM  
REDE NACIONAL

# BURACOS NEGROS E A CONJECTURA DA CENSURA CÓSMICA, PALESTRA E ESTUDO

Cristiano Rodrigues dos Santos

Jataí

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rodrigues dos Santos, Cristiano  
BURACOS NEGROS E A CONJECTURA DA CENSURA  
CÓSMICA, PALESTRA E ESTUDO [manuscrito] / Cristiano Rodrigues  
dos Santos. - 2019.  
LXX, 70 f.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Leandro Neto.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade  
Acadêmica Especial de Ciências Exatas e Tecnológicas, PROFMAT -  
Programa de Pós-graduação em Matemática em Rede Nacional -  
Sociedade Brasileira de Matemática (RG), Jataí, 2019.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras.

1. Buraco negro. 2. Figura. 3. Palestra. I. Leandro Neto, Benedito,  
orient. II. Título.

CDU 51



**Universidade Federal de Goiás  
Regional Jataí  
Programa de Pós-Graduação em Matemática em Rede**

**ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

No dia cinco de Julho de 2019, às 09:00 horas, no Prédio da Pós-graduação da Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí, realizou-se a sessão pública de defesa de dissertação, do mestrando **Cristiano Rodrigues dos Santos**, sob orientação da Dr. Benedito Leandro Neto, com o projeto intitulado: **“BURACOS NEGROS E A CONJECTURA DA CENSURA CÓSMICA, PALESTRA E ESTUDO”**. A Banca Examinadora, constituída pelos com os seguintes membros: Dr. Benedito Leandro Neto (Presidente), Dra. Adriana Araújo Cintra (Membro Interno), Dr. Pablo Vandré Jacob Furlan (Membro Externo). Foi concedido ao mestrando, um prazo máximo de 30 dias a partir da data de defesa para efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora e entregar o trabalho em redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. E, para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão.

Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, os membros da banca consideraram o discente:

**Aprovada** ( ) **Reprovada**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Prof. Dr. Benedito Leandro Neto**  
Orientador/Presidente

**Prof. Dra. Adriana Araújo Cintra**  
Membro Interno

**Prof. Dr. Pablo Vandré Jacob Furlan**  
Membro Externo (IFG)

**Cristiano Rodrigues dos Santos**

**BURACOS NEGROS E A CONJECTURA DA  
CENSURA CÓSMICA, PALESTRA E ESTUDO**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado a Unidade Acadêmica Especial de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Matemática.

Área de Concentração: Matemática do Ensino Básico

Orientador: Prof. Dr. Benedito Leandro Neto

Jataí

2019

Dedico a Deus esse trabalho. Aos meus familiares e amigos pelo carinho e incentivo que me deram ao longo desses anos.

# Agradecimentos

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Benedito Leandro Neto meu orientador pela paciência e diligência para tornar possível este sonho.

Aos professores da banca: Benedito Leandro Neto, Adriana Araújo Cintra e Pablo Vandr  Jacob Furlan.

Aos colegas de curso pelo ambiente agradável que proporcionaram.

A minha esposa V nia Alves dos Santos, pela paciência, compreensão e apoio nos momentos difíceis.

Ao meu pai Ediberto Rodrigues dos Santos e a minha mãe Maria de Fátima Cat lio dos Santos, por sempre me incentivarem a estudar.

Ao Programa de Pós-Gradua o Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional - PROFMAT -, Unidade Acadêmica Especial de Ciências Exatas, Regional Jataí, Universidade Federal de Goiás.

A coordena o de Aperfei amento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

## **Resumo**

Neste trabalho, pesquisei algumas teorias sobre buracos negros com o objetivo de desenvolver material de palestra com vídeos e figuras ilustrativas que ajudem outros a vislumbrar como a teoria dos buracos negros e a conjectura da censura cósmica, realmente são uma alternativa para potencializar o estudo da matemática e da física. Usando o site da NASA como referência, encontrei tópicos, figuras e vídeos que fundamentam minha pesquisa. Hawking e Wald são os teóricos que consolidam meu trabalho. Com esse material desejo apresentar uma palestra sobre buracos negros e suas conjecturas, com a intenção de promover o interesse dos alunos pela matemática.

## **Palavras-chave**

Buraco Negro, Figura, Palestra.

## **Abstract**

In this work, I have studied some theories about black holes with the objective of developing lecture's material with videos and illustrative figures that help others to glimpse how black hole theory and the conjecture of cosmic censorship really are an alternative to enhance the study of mathematics and physics. Using the NASA's website I found topics, pictures, and videos that support my work. Hawking and Wald are the researchers who consolidate my work. With this material I wish to present a lecture on black holes and their conjectures, with the intention of promoting the student's interest in mathematics.

## **Keywords**

Black Hole, Figure, Lecture.

## Lista de Figuras

1	Imagem real de um buraco negro . . . . .	23
2	Quasar em fuga do centro de sua galáxia . . . . .	25
3	Ondas gravitacionais expõem buraco negro de sua galáxia . . . . .	26
4	Slide 1 . . . . .	36
5	Slide 2 . . . . .	36
6	Slide 3 . . . . .	37
7	Slide 4 . . . . .	37
8	Slide 5 . . . . .	38
9	Slide 6 . . . . .	38
10	Slide 7 . . . . .	39
11	Slides 8 . . . . .	39
12	Slide 9 . . . . .	40
13	Slide 10 . . . . .	40
14	Como surge um buraco negro? . . . . .	41
15	Slide 11 . . . . .	42
16	Slide 12 . . . . .	42
17	Slide 13 . . . . .	43
18	Slide 14 . . . . .	43
19	Slide 15 . . . . .	44
20	Slide 16 . . . . .	44
21	Buraco negro e seus componentes . . . . .	45
22	Linhas de campo magnético em volta do buraco negro . . . . .	46
23	Slide 17 . . . . .	47
24	Slide 18 . . . . .	47
25	Slide 19 . . . . .	48
26	Slide 20 . . . . .	48
27	Sagitário A* . . . . .	49
28	Slide 21 . . . . .	51
29	Slide 22 . . . . .	51
30	Slide 23 . . . . .	52
31	Slide 24 . . . . .	52
32	Slide 25 . . . . .	53
33	Slide 26 . . . . .	53

34	Como calcular a força gravitacional e o tamanho de um buraco negro?	54
35	Slide 27 . . . . .	55
36	Slide 28 . . . . .	55
37	Slide 29 . . . . .	56
38	Slide 30 . . . . .	56
39	Quasar, luzes intensas que brilham mais do que algumas galáxias . . .	57
40	Quasar que está bilhões de anos longe da Terra . . . . .	58
41	Slide 31 . . . . .	59
42	Slide 32 . . . . .	59
43	Slide 33 . . . . .	60
44	Slide 34 . . . . .	60
45	Slide 35 . . . . .	61
46	Slide 36 . . . . .	61
47	Buraco negro ligado a um buraco branco . . . . .	62
48	Viagem através de um buraco negro . . . . .	63
49	Slide 37 . . . . .	64
50	Slide 38 . . . . .	64
51	Slide 39 . . . . .	64
52	Será que viajar por um buraco de minhoca vai ser possível? . . . . .	65

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Preliminares</b>	<b>18</b>
2.1	Colapso estelar . . . . .	18
2.2	Singularidade . . . . .	18
2.3	O que é um buraco negro? . . . . .	19
2.4	Horizonte de eventos . . . . .	20
2.5	Buracos negros supermassivos . . . . .	21
2.6	Existência de buracos negros supermassivos . . . . .	22
2.7	Buraco negro supermassivo é empurrado do centro de sua galáxia por onda gravitacional . . . . .	24
<b>3</b>	<b>A desigualdade de Penrose e o teorema da massa positiva</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>Palestra</b>	<b>33</b>
4.1	Plano de aula para ministrar a palestra . . . . .	33
4.2	Início da palestra . . . . .	36
4.3	Como surge um buraco negro? . . . . .	39
4.4	Buraco negro e seus componentes . . . . .	42
4.5	Sagitário $A^*$ . . . . .	47
4.6	Simulação do que pode acontecer em volta de um buraco negro . . . . .	51
4.7	Quasar . . . . .	55
4.8	Viagem no tempo através de um buraco negro . . . . .	59
4.9	Buraco de minhoca, o problema por trás da teoria . . . . .	64
4.10	Vídeo: “Buraco negro fotografado pela primeira vez!” . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>69</b>

## 1 Introdução

Muitos de nós já ouvimos falar de buracos negros. Mas, será que eles têm relação com a matemática? Podemos utilizá-los para envolver os alunos de tal modo a fazer com que eles tomem gosto pela matemática e também pela física? Como surge um buraco negro? Podemos calcular a força gravitacional e o tamanho de um buraco negro?

O objetivo deste trabalho não é só responder a essas curiosas questões, mas também desenvolver material de palestra com vídeos e figuras ilustrativas tendo como meta despertar ainda mais o interesse dos alunos pela matemática e a física. Após apresentar meu trabalho final farei uma palestra sobre buracos negros e suas conjecturas.

Para mim é fundamental tentar despertar a curiosidade das pessoas. Acredito que com o material desenvolvido para fazer a palestra teremos um bom clima pedagógico, onde poderei estimular as perguntas, as reflexões e a curiosidade.

“O exercício da curiosidade convoca a imaginação, a intuição, as emoções, a capacidade de conjecturar, de comparar na busca da perfilização do objeto ou do achado de sua razão de ser. Um ruído, por exemplo, pode provocar minha curiosidade” [2].

Quando uma curiosidade é satisfeita, podemos ser estimulados a exercitá-la. Principalmente se consultarmos livros, internet, promovermos discussões ou se fizermos perguntas a outros [2].

Para consolidar nosso estudo, primeiro vamos conhecer um pouco da história de como alguns pesquisadores foram os pioneiros na descoberta e na formulação da teoria conhecida sobre os buracos negros, bem como alguns conceitos que nos ajudaram nessa pesquisa.

Segundo a teoria da relatividade, gravidade é o quanto o espaço-tempo se curva na presença de um objeto maciço. Quanto maior a massa do corpo, mais o espaço a sua volta vai se curvar. O tempo também é transformado. Quanto menor a massa desse corpo menos ele se curva [7].

De acordo com as pesquisas de Hawking, um dos físicos mais importantes da história que recebeu inúmeros prêmios e honrarias, incluindo a medalha presidencial da liberdade, a maior condecoração civil dos Estados Unidos, muito antes da teoria da relatividade ser publicada, alguns estudiosos pesquisaram sobre “buracos negros”. Iremos

destacar alguns desses pesquisadores que foram essenciais para construir toda teoria dos buracos negros.

John Mitchell, um inglês, que em 1783 argumentou que haveria estrelas muito mais massivas<sup>1</sup> que o sol. Ele escreveu um artigo no qual deixava claro que acreditava em buracos negros e os chamava de estrela negra ou estrela congelada. Ele defendia a existência de estrelas que não emitiam luz [5]. Hawking também destacou, Pierre Simon Laplace, um cientista francês que no início do século XIX, defendeu a teoria sobre buracos negros em sua época, dentre outros [5]. Eles foram os pioneiros, até chegarmos em Albert Einstein.

Einstein, Mitchell e Laplace questionaram a lei da gravitação de Newton se perguntando como corpos grandes se comportavam diante dessa lei [5]. Depois de Einstein toda teoria da relatividade foi desenvolvida e finalmente, para nossa alegria, alguns resolveram suas equações de campo, possibilitando que pudéssemos vislumbrar tudo que sabemos e ainda vamos saber sobre buracos negros.

Já em 1916, segundo Hawking, Karl Schwarzschild, físico e astrônomo alemão, encontrou uma solução para a teoria da relatividade de Einstein que representa um buraco negro esférico. Em sua pesquisa ele demonstrou que uma estrela densa se contrai até virar uma singularidade. Além disso, calculou o raio do horizonte de eventos de um buraco negro [5].

Na década de 30, surgiu Subrahmanyan Chandrasekhar, um indiano que aos 20 anos de idade calculou o limite para uma estrela virar uma supernova ou um buraco negro. Chandra foi ridicularizado por muitos devido às suas conclusões de estudo.

John Archibald Wheeler em 1968, concluiu que era necessário unir teorias para explicar os buracos negros. Durante um congresso ele propôs o termo buraco negro e esse termo foi aceito [4].

Em 1970, Roger Penrose e Stephen Hawking publicaram um modelo teórico da singularidade, no qual foi demonstrado que este é um local onde a densidade da massa é infinita, o volume é zero e o tempo é infinito (como se o relógio estivesse parado) [5].

Hawking e Penrose adotaram uma abordagem baseada não em um estudo detalhado de soluções, mas na estrutura global do espaço-tempo, concluindo que este é curvado não apenas pelos objetos maciços nele presente, mas também pela energia existente.

Os dois mostraram que a relatividade geral prevê que o universo começou em um Big

---

<sup>1</sup>Estrela massiva é aquela que tem grande volume, ou seja, sua massa está relacionada a um número elevado, excessivo.

Bang. Também argumentaram que o tempo teria fim quando as estrelas ou galáxias entrassem em colapso sob o peso da própria gravidade para formar buracos negros [5]. Vale dizer, que Penrose formulou um teste que faz valer a conjectura<sup>2</sup> da censura cósmica que admite uma formulação unicamente de dados iniciais.

Especificamente no caso do vácuo ele mostrou provas que se a formulação convencional da teoria do colapso gravitacional é satisfeita, então a massa total do sistema, que é calculada assintoticamente ao longo do dado inicial, é limitada por baixo, por uma expressão que depende da área do horizonte de eventos. Essa é a chamada desigualdade de Penrose que resistiu durante vários anos à investida de alguns cientistas, até ela ser resolvida por Huisken e Ilmanen [7].

Finalmente em 1974, Hawking mostrou que buracos negros emitem radiação térmica e perdem energia. No entanto, essas informações são causa de discussões até o dia de hoje [5].

Não podemos esquecer das contribuições de Gerhard Huisken, um grande matemático alemão, que em 1997 juntamente com Tom Ilmanen, provaram a conjectura de Penrose para buracos negros no caso de variedades riemanniana tridimensional com curvatura escalar positiva, na presença de um único buraco negro [7].

Também, Robert Wald, um físico americano que é especialista em relatividade geral e na termodinâmica de buracos negros, contribuiu muito para o desenvolvimento de toda teoria sobre os buracos negros.

Reforço que meu trabalho não envolve pessoas, ele é uma pesquisa para fazer uma palestra sobre buracos negros. Explorei metodologias de ensino que possam despertar a curiosidade dos alunos por meio de palestras, vídeos e figuras ilustrativas. Além disso, quero descobrir se tais teorias podem potencializar o ensino das referidas disciplinas. Mas por que fazer uma palestra?

Por meio de uma palestra podemos compartilhar conhecimentos. Uma das formas de despertar e amplificar a curiosidade e certas habilidades que todos nós temos, se dá por meio de uma palestra. Quando assistimos uma palestra interessante nossa atenção é dedicada ao máximo para captarmos a mensagem transmitida. Isso acontece porque quando a mensagem faz sentido para nós, conseguimos transformar essas palavras em motivação na forma de ação.

Ao fazer a palestra desejo ter o cuidado de sempre lembrar que:

---

<sup>2</sup>Conjectura é a ação ou efeito de deduzir ou de fazer inferências, baseando-se em palpites, intuições, provas inconclusas ou suposições.

“Nosso papel não é falar ao povo sobre a nossa visão do mundo, ou tentar impô-la a ele, mas dialogar com ele sobre a sua e a nossa. Temos de estar convencidos de que a sua visão do mundo, que se manifesta nas várias formas de sua ação, reflete a sua situação no mundo, em que se constitui” [3].

Além disso, a grande vantagem de uma palestra é a flexibilidade da linguagem em que transmitiremos a mensagem. Uma fala adaptada à realidade de um determinado grupo social pode fazer surgir grandes efeitos, pois podemos direcioná-la para superar a realidade dos desafios de comunicação.

No entanto, “Não posso apenas falar bonito sobre as razões ontológicas, epistemológicas e políticas da teoria. O meu discurso sobre a teoria deve ser o exemplo concreto, prático, da teoria. Sua encarnação” [2].

Existe muito no Universo que desconhecemos. O estudo sobre buracos negros e suas conjecturas despertam a curiosidade e atraem olhares tanto para a Matemática como para a Física. Desse modo, com figuras descritivas, vídeos e falas adaptadas poderemos exercer um efeito positivo em nosso público e assim despertar ainda mais o interesse por essas disciplinas.

Com essa palestra pretendo:

- Potencializar o ensino da matemática através de palestras motivadoras.
- Aplicar conhecimentos matemáticos e físicos para entender o mundo tecnológico e científico.

De nada adianta o professor ter uma fala cativante, bem fundamentada se ele não se adaptar e for aberto a mudanças. Acredito que não tem como ensinar sem pesquisar para melhorar nossos métodos e técnicas de ensino. Ao pesquisar encontramos respostas que possibilitam mudar nosso plano de ensino caso seja necessário [2].

Embora o processo de ensino aprendizagem nem sempre ocorra de forma lúdica, temos que buscar metodologias para envolver os alunos e tentar ajudá-los a gostar do que estudam.

Ao pesquisar teóricos, desenvolver material de palestra com vídeos e figuras motivei-me, assim como acredito que os ouvintes da palestra serão motivados a vislumbrar como os buracos negros e a conjectura da censura cósmica são realmente uma alternativa para potencializar o ensino da matemática e da física.

## 2 Preliminares

Nesse capítulo explicarei o que é um colapso estelar, bem como eles são fundamentais para a formação de estruturas no universo. Em seguida falarei sobre a singularidade e como ela surge diante do colapso estelar. Depois, mostrarei como nasce e como é definido um buraco negro segundo “Wald”.

Também, falarei sobre o horizonte de eventos e de como tudo que cai nele, inclusive a luz é impedida de escapar. Finalizando esse capítulo darei mais informações sobre buracos negros supermassivos.

### 2.1 Colapso estelar

Uma estrela se sustenta contra sua própria gravidade, devido a pressão térmica ideal resultante da alta temperatura de processos nucleares que convertem hidrogênio em hélio, quando isso ocorre dizemos que a estrela é quente [13]. Uma estrela massiva queima hidrogênio e forma hélio muito mais depressa que o sol. Isso sugere que elas podem esgotar seu hidrogênio com o tempo [5].

Dessa forma as estrelas perdem calor e conseqüentemente a pressão térmica que as sustenta contra a gravidade. Assim começa o colapso ou perecimento de uma estrela. Com a perda gradual da produção do combustível que as sustenta, a estrela começa a encolher[13].

Desse modo, colapso estelar ocorre quando uma estrela deixa de realizar fusão nuclear de seus elementos químicos já esgotados, contraindo-se. Se a estrela tiver cerca de duas vezes a massa do sol, o processo de contração jamais será revertido. Ela será reduzida até o tamanho zero e a uma densidade infinita, formando o que chamamos de singularidade [5].

### 2.2 Singularidade

Teoricamente, singularidade do espaço-tempo é um lugar onde a curvatura explode [13]. Singularidade é o ponto em que a curvatura do espaço-tempo se torna infinita. Em uma singularidade o tempo continua a avançar para sempre, do passado infinito ao futuro infinito [5].

## 2.3 O que é um buraco negro?

Um buraco negro surge naturalmente do colapso de uma estrela. Ele é uma região de não escape, finita do espaço dentro da qual existe uma concentração de massa suficientemente alta e densa para gerar um campo gravitacional tal que nenhuma partícula material, nem mesmo a luz, possa escapar dele [13]. Buracos negros são escuros por definição. Como se identifica a existência de um buraco negro?

De acordo com diversos estudos existem duas maneiras dos buracos negros serem detectados. A primeira é por meio de sua influência gravitacional. Em uma galáxia percebendo-se um ponto vazio pode-se ser notada a presença de estrelas circulando em volta desse ponto como se estivessem em órbita de uma massa realmente densa<sup>3</sup>.

A segunda forma de perceber um buraco negro é observar a matéria que cai dentro dele. Essa matéria se instala em um disco ao redor do buraco negro que fica muito quente. Parte da energia liberada da queda da matéria é transformada em luz, o que por exemplo se pode ver em raios-x.

Em nossa galáxia o maior buraco negro que os cientistas descobriram é o Sagitário A\*. Ele tem quatro milhões de vezes a massa do sol e está a vinte seis mil anos luz da Terra. Este buraco negro não está ativo, ou seja, não está se alimentando [8].

Buracos negros podem ser capazes de emitir radiação, a qual não vem dele em si, mas do seu disco de acreção [5]. Uma das formas de encontrarmos um buraco negro é por meio do raio-x.

Satélites como o Swift da Nasa, o Suzaku, liderado pelo Japão, também conseguem identificar reflexos de explosões de raio-x durante a destruição de uma estrela que se aproxima de um buraco negro.

A técnica chamada mapeamento de reverberação de raios-x que é a detecção de ecos, alguns minutos depois das explosões de raio-x, servem para explorar discos estáveis ao redor de buracos negros, à medida que sua luz passa sobre as estruturas do disco de acreção em desenvolvimento. Essa técnica também é importante pois os cientistas ainda não conseguem compreender o que causa erupções de explosões de raios-x perto do buraco negro.

Para os astrônomos uma grande surpresa foi descobrir que os raios-x de alta energia surgem das regiões mais internas do disco de acreção do buraco negro, pois eles acreditavam inicialmente que o raio-x surgia de um jato estreito de partículas aceleradas partindo do disco de acreção.

---

<sup>3</sup>Densa é que tem muita massa em relação ao volume.

Além de satélites, telescópios como o Chandra da Nasa, XMM-Newton da Agência Espacial Europeia podem captar o raio-x que os buracos negros geram em determinados níveis de energia. Não adianta apontarmos detector de raio-x para o Sagitário  $A^*$  pois não vamos encontrá-lo. Desse modo, como os cientista o encontraram? A detecção dele é por meio do estudo da aceleração das estrelas no centro da galáxia [8].

A gravidade crescente de um buraco negro supermassivo atrai cada vez mais objetos para seu enorme disco giratório. Com isso, em seu interior o atrito aumenta, e seu disco começa a brilhar. Quanto mais rápido o disco girar, maior será seu atrito, consequentemente mais brilhante seu disco se tornará.

Medindo a intensidade desse brilho podemos calcular a força gravitacional e o tamanho do buraco negro. Se os objetos orbitam com grande velocidade em volta do buraco negro, maior é a sua massa, pois uma gravidade maior atrai objetos com mais força, fazendo com que eles girem mais rápido.

A ergosfera se encontra próxima do horizonte de eventos. Nela o campo gravitacional gira junto com o buraco negro. Imagine um ralo, nele tudo é obrigado a girar ao redor dele no mesmo sentido. Assim também é com o buraco negro, tudo gira ao seu redor até ser consumido.

## 2.4 Horizonte de eventos

Horizonte de eventos é o limite externo, a borda do buraco negro a partir da qual não se é possível escapar para o infinito. Ele é formado pelos raios luminosos que por pouco não escapam do buraco negro, mas permanecem pairando a uma distância constante do centro, nenhuma partícula pode sair, incluindo os fótons ou seja, partículas de luz [5].

Schwarzschild nos ajuda a calcular o tamanho do horizonte de eventos de um buraco negro perfeitamente esférico. O raio ( $R$ ) do horizonte de eventos do buraco negro depende apenas de sua massa. Esse raio é dado pela fórmula:

$$R = \frac{2GM}{C^2}$$

Nessa fórmula, o símbolo ( $C$ ) representa a velocidade da luz, ( $G$ ) a constante de Newton e ( $M$ ) a massa do buraco negro. Um buraco negro com a mesma massa do sol, teria um raio de apenas três quilômetros [5]. Mostrarei isso na seção de palestra.

No horizonte de eventos, ou seja, na fronteira em volta do buraco negro a gravidade é tão forte a ponto de puxar a luz de volta e impedir que ela escape dele. Sabemos que nada viaja mais rápido que a luz, por isso, tudo que cair em volta do horizonte de eventos é puxado para dentro desse buraco.

O horizonte de eventos é chamado de ponto de não retorno. Isso significa, por exemplo, que se uma pessoa fosse sugada para dentro de um buraco negro, no momento que ela cruzasse o horizonte de eventos, a mesma não seria mais capaz de ouvir, gritar e seu corpo esticaria como um espaguete.

## 2.5 Buracos negros supermassivos

Buracos negros supermassivos são aqueles que tem volume exagerado, excessivamente grande, eles geram muita energia. Se uma grande quantidade de matéria se acumula em sua abertura, haverá muitas colisões e isso vai liberar quantidades imensas de energia. Jatos enormes e luminosos se espalham por centenas e até milhares de anos luz.

Buracos negros devoram tudo a sua volta, grande parte do que eles consomem não fica dentro deles. Eles ejetam muito do que absorvem, sendo essas coisas que saem de dentro deles aquecidas a temperaturas tão altas que ganham um brilho muito intenso.

Há uma teoria de que toda Galáxia tem um buraco negro supermassivo em seu centro. A medida que os cientista mapeiam as galáxias percebem isso. Os buracos negros são objetos invisíveis, o que é visível é a influência de seu campo gravitacional.

Seu campo gravitacional é muito forte fazendo com que as estrelas girem a sua volta. Ele prende as estrelas em sua órbita. Para termos uma ideia da sua força gravitacional, vamos pensar no maior buraco negro de nossa galáxia, o Sagitário  $A^*$  [8].

O Sagitário  $A^*$ , como já mencionamos, está a vinte seis mil anos luz da Terra. Mesmo a essa distância não escapamos de sua influência. Sua força de atração faz a terra se mover ao redor dele, de acordo com os cientistas, a uma velocidade de oitocentos mil quilômetros por hora[8].

Isso mostra que os buracos negros não só ancoram galáxias, como também sua força atrai mais e mais estrelas. A forte gravidade dos buracos negros puxa as estrelas que passam por sua órbita e lentamente formam as galáxias.

## 2.6 Existência de buracos negros supermassivos

Buracos negros são objetos cósmicos cada vez mais estudados e admirados pelos pesquisadores. Eles são compactos, mesmo possuindo imensas massas. Os buracos negros causam bastante impacto no ambiente onde existem, distorcendo o espaço-tempo e superaquecendo qualquer objeto a sua volta.

“Se imersos em uma região brilhante, como um disco de gás incandescente, esperamos que um buraco negro crie uma região escura semelhante a uma sombra, algo previsto pela relatividade geral de Einstein que nunca vimos antes”.

Explicou o presidente da EHT<sup>4</sup> Science [11] .

A figura a seguir, demonstra como os buracos negros estimulam a curiosidade das pessoas. Diversos veículos da imprensa noticiaram essa foto, referente a primeira imagem de um buraco negro, usando o telescópio de horizonte de eventos (EHT). O “EHT” é um conjunto em escala planetária de oito radiotelescópios terrestres, gerado pela colaboração internacional [11].

Esse telescópio foi projetado para conseguir imagens de buracos negros e suas sombras. Conectando e unindo telescópios ao redor de todo planeta o “EHT” forma um telescópio imenso, do tamanho da Terra, com alto grau de sensibilidade e resolução. Imagens impressionantes e nítidas, feitas por ele, proporcionam aos cientistas estudarem objetos do universo previstos pela relatividade geral de Einstein de uma forma inovadora.

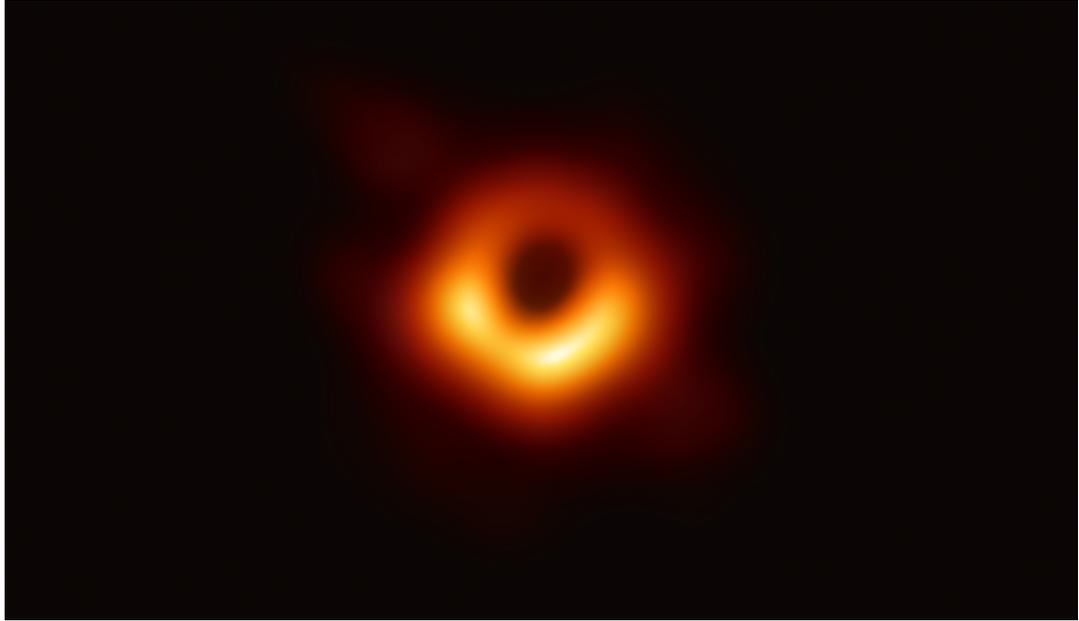
O buraco negro da foto abaixo está a cinquenta e cinco milhões de anos-luz da Terra e tem uma massa de seis bilhões e meio de vezes a massa do sol. Localizado no centro de Messier 87, uma imensa galáxia no aglomerado de galáxias vizinhas de Virgem [11]. Essa imagem festejada por muitos, deixa claro a existência de buracos negros supermassivos e abre a oportunidade para o seu estudo.

Na foto constatamos uma estrutura em forma anelar com uma região escura no centro, ou seja, a sombra do buraco negro. Muitas das características da imagem observada encaixam-se com toda a teoria conhecida, até o momento, sobre os buracos negros.

---

<sup>4</sup>EHT é um projeto chamado “Event Horizon Telescope” que é uma colaboração internacional lançada em 2009 após um longo período de desenvolvimentos teóricos e técnicos.

Figura 1: Imagem real de um buraco negro



“Uma vez que tínhamos certeza de que tínhamos imaginado a sombra, poderíamos comparar nossas observações a extensos modelos de computador que incluem a física do espaço distorcido, matéria superaquecida e campos magnéticos fortes”.

Comentou Paul TP Ho, membro do conselho do “EHT” e diretor do observatório da Ásia Oriental [11].

O projeto de criação do “EHT” foi algo realmente inovador. Foram escolhidos oito lugares de difícil acesso e grande altitude do globo terrestre e instalaram telescópios. Na lista de lugares entraram vulcões havaianos e mexicanos, áreas montanhosas no Arizona e na Sierra Nevada na Espanha, assim como, no famoso deserto do Atacama no Chile e até na Antártica. Os telescópios ficaram sempre conectados e atualizados de forma conjunta.

Os dados obtidos pelo “EHT” são extremamente precisos, através de sua técnica de interferometria de linha de base muito longa (VLBI) que sincroniza as instalações do telescópio em todo mundo, explorando a rotação do nosso planeta levando a formação de um gigantesco telescópio do tamanho da Terra, e observando um comprimento de onda de 1,3 mm.

O VLBI propicia que o “EHT” registre uma resolução angular de 20 micro-segundos

de arco. O que isso significa? Essa resolução indica que uma pessoa que está em um café em Paris poderia ler um jornal em Nova York. Tudo isso é possível pela combinação de dados brutos por supercomputadores altamente especializados instalados no Instituto Max Planck de Radioastronomia e no MIT Haystack Observatory.

Treze instituições, no total, trabalharam juntas para criar o “EHT”. Toda uma infraestrutura foi montada com o apoio de várias agências. O principal fundo para a concretização desse projeto veio da Fundação Nacional de Ciências dos EUA (NSF), o Conselho Europeu de Pesquisa (ERC) da UE e agências de financiamento no Leste Asiático [11].

## **2.7 Buraco negro supermassivo é empurrado do centro de sua galáxia por onda gravitacional**

Ondas gravitacionais são ondulações na curvatura do espaço-tempo que se propagam como ondas, deslocando-se por diversos lugares a partir de onde foram criadas. São geradas por fenômenos violentos que acontecem no cosmo, como por exemplo, quando dois objetos massivos colidem ou durante a fusão de buracos negros.

As ondas gravitacionais são excepcionalmente velozes, viajam a incrível velocidade da luz. Extremamente poderosas, elas facilmente espremem e esticam qualquer coisa que estiver no caminho por onde passam [10]. As ondulações das ondas gravitacionais são semelhantes aos círculos concêntricos quando uma rocha pesada é lançada em um lago.

Em 2016, o observatório de ondas gravitacionais “LIGO”, cujas instalações consistem em dois detectores idênticos em forma de L, um no estado de Washington e outro em Louisiana. Ambos utilizando espelhos e laser, são usados para medir ínfimas mudanças no espaço-tempo causadas por radiação gravitacional.

O “LIGO” colaborou para que os astrônomos provassem a existência de ondas gravitacionais deslocando-se da união de dois buracos negros, cuja massa é várias vezes maior que a massa do sol. Os cientistas ficaram eufóricos com essa incrível descoberta. “Quando vi pela primeira vez isso, pensei que estávamos vendo algo muito peculiar” disse o líder da equipe, Marco Chiaberge do Instituto de Ciência do Telescópio Espacial (STScI) e da Universidade Johns Hopkins, em Baltimore, Maryland [10].

Quando os astrônomos uniram informações do Hubble, do Chandra X-ray Observatory e do Sloan Digital Sky Survey, todos apontaram os mesmos acontecimentos. A

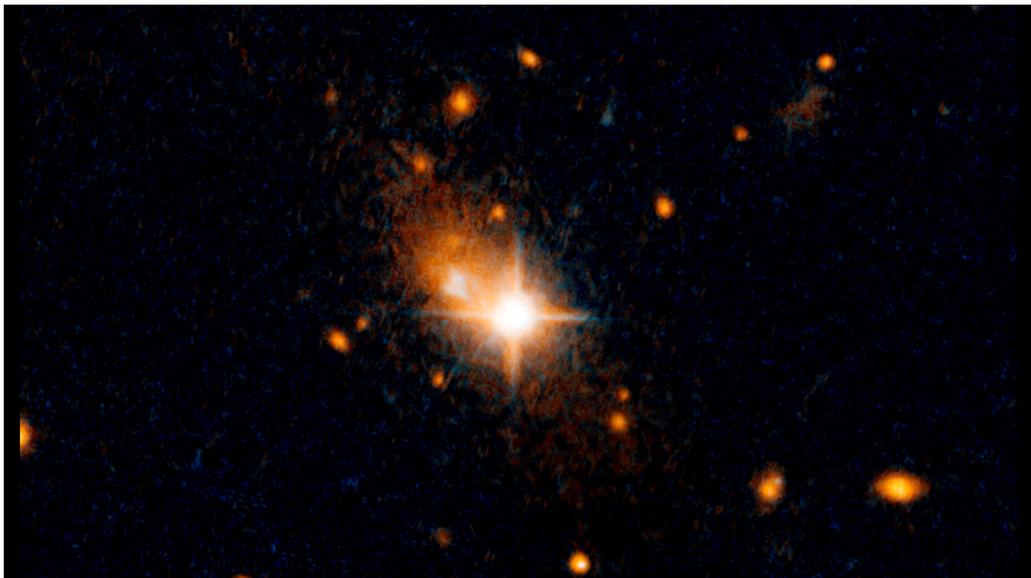
2.7 *Buraco negro supermassivo é empurrado do centro de sua galáxia por onda gravitacional* 2 PRELIMINARES

quantidade de raios-x, luz ultravioleta e infravermelho próximos a esse buraco negro era maior do que em todos os outros já encontrados [10].

Os cientistas descobriram que pela inacreditável força das ondas gravitacionais um buraco negro supermassivo foi arremessado para fora do centro de sua galáxia, de acordo com o site da Nasa, o que foi identificado pelo Telescópio Espacial Hubble.

Quando os buracos negros chocam-se, eles cessam a produção de ondas gravitacionais. O novo buraco negro que surge com a fusão recua na direção oposta às ondas gravitacionais mais fortes e dispara como um foguete. Esses cientistas tiraram a sorte grande em presenciar esse acontecimento único por meio do Telescópio Espacial Hubble da Nasa.

Figura 2: Quasar em fuga do centro de sua galáxia



A figura 2, acima, é uma imagem tirada pelo Telescópio Espacial Hubble da Nasa. Ela revela uma visão curiosa e única de um Quasar fugindo do centro de sua galáxia. Quasar é um buraco negro supermassivo cercado por grandes quantidades de gás e poeira. Eles podem ser resultado da fusão de duas galáxias e da colisão de seus buracos negros.

Pesando mais de um bilhão de sóis, esse buraco negro expulso é o buraco negro mais massivo já detectado que foi tirado de sua casa central. A estimativa dos pesquisadores é de que foi necessária a energia equivalente a 100 milhões de supernovas explodindo simultaneamente para expelir o buraco negro de sua galáxia.

Os astrônomos calculam que esse buraco negro está se deslocando com uma velocidade espantosa que viajaria da Terra para a Lua em três minutos. Algo extremamente rápido, que poderia desprender o buraco negro de sua galáxia em 20 milhões de anos e deixá-lo a deriva pelo universo para sempre.

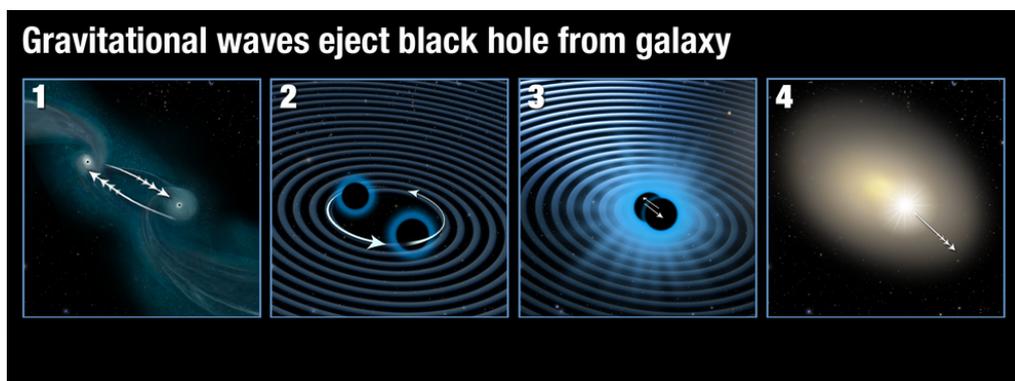
Cientistas deram o nome de “3C 186” à galáxia desse Quasar da figura 3. Ele e sua galáxia hospedeira residem a 8 bilhões de anos-luz de distância de um aglomerado de galáxias. A equipe pesquisadora descobriu características únicas enquanto conduzia a pesquisa do Hubble sobre galáxias distantes [9].

Foram detectadas, pela pesquisa, poderosas rajadas de radiação, propulsadas pelas fusões de galáxias. Os pesquisadores aguardavam ver diversas galáxias hostis e em fusão ao redor dos Quasares, mas não imaginavam observar um Quasar se deslocando do núcleo de uma galáxia de forma regular. Quasares residem no centro de galáxias por isso é espantoso vê-lo em algum lugar que não seja este.

Essa imagem do Hubble dá uma ideia interessante que ajuda a explicar a localização do buraco negro. Com a colisão de duas galáxias surge um puxão gravitacional, chamado “caudas de maré”. Essa evidência sugere uma possível união entre o sistema 3C 186 e outra galáxia, cada uma com buracos negros centrais que podem ter se fundido.

Após minuciosa análise na evidência grandiosa da união desses sistemas e o estudo constante do trabalho teórico desenvolvido, os cientistas descreveram como um buraco negro gigante poderia ser expulso do local central de sua criação. De acordo com sua teoria, duas galáxias se fundem e seus buracos negros se estabelecem no centro da galáxia elíptica recém-formada.

Figura 3: Ondas gravitacionais expõem buraco negro de sua galáxia



A figura 3 mostra como as ondas gravitacionais podem impulsionar um buraco negro do centro de uma galáxia. Na primeira cena observamos a junção de duas galáxias,

cada uma com um buraco negro central.

Na segunda cena os dois buracos negros na galáxia recém gerada se estabelecem no centro e começam a girar em torno um do outro. Este movimento da energia produz ondas gravitacionais. Como os dois grandes objetos continuam a propagar energia gravitacional, eles se aproximam um do outro ao longo do tempo, como mostrado na terceira cena.

Caso os buracos negros não tiverem a mesma massa e taxa de rotação, eles emitirão ondas gravitacionais mais forte em uma direção, como mostrado pela área brilhante no canto superior esquerdo. Os buracos negros aos poucos se fundem na quarta cena, formando um imenso buraco negro. “Por que devemos nos importar com essas coisas”?

De acordo com as observações dos cientistas, o “LIGO” tem fornecido informações inéditas, surpreendentes e inesperadas. Um grande exemplo disso são as ondas gravitacionais, que constituem em uma nova forma dos astrônomos acompanharem o que ocorre no espaço. Esses devotados estudiosos tem conseguido utilizar ondas gravitacionais como formas mais confiáveis de se ver o universo, buscando sempre entendê-lo melhor.

Com a movimentação desses buracos negros, as ondas de gravidade são ejetadas, como água de um borrifador automático. Assim, os buracos negros vão se aproximando de forma lenta e inexorável, enquanto liberam energia gravitacional. Se os buracos negros não tiverem a mesma massa e taxa de rotação, eles emitirão ondas gravitacionais mais fortemente ao longo de uma direção.

De acordo com os estudos dos astrônomos nem toda fusão de buracos negros produz ondas gravitacionais desequilibradas que impulsionam um buraco negro na direção oposta. Para o membro da equipe da STScI<sup>5</sup> e da Universidade Johns Hopkins esse acontecimento é pouco comum, pois “essa assimetria depende de propriedades como a massa e a orientação relativa dos eixos de rotação dos furos traseiros antes da fusão” [9].

Caso essas análises dos pesquisadores estiverem comprovadamente certas, elas podem fornecer inegáveis evidências de que os buracos negros supermassivos podem realmente se fundir. Os astrônomos têm comprovações desses choques mas como isso ocorre com os buracos negros supermassivos é mais complexo e ainda de certa forma, um mistério a ser desvendado .

---

<sup>5</sup>STScI é o Space Telescope Science institute, ou seja, Instituto de ciência do telescópio espacial, em Baltimore, Maryland, operado pela Associação de Universidades de Pesquisa em Astronomia.

### 3 A desigualdade de Penrose e o teorema da massa positiva

A teoria da Relatividade Geral desenvolvida por Albert Einstein há mais de um século é uma das mais bem sucedidas teorias físicas clássicas. Isso se dá não só pelo seu valor matemático, mas também pelas suas previsões, com observações experimentais variadas, baseadas em fenômenos gravitacionais que admitem uma explicação geométrica. Essa teoria desenvolveu uma forte relação com métodos matemáticos, como por exemplo a geometria Riemanniana.

É claro que no decorrer dos anos tivemos vários avanços nas conjecturas acerca da teoria elaborada por Einstein. Dentre esses avanços destacamos os teoremas demonstrados por Penrose e Hawking no final da década de 1960.

Um progresso especial nos resultados de Einstein foi que se tivermos uma porção de dados iniciais fisicamente razoáveis, a solução da equação de campo de Einstein correspondente, desenvolve singularidades em tempo finito, no sentido que o espaço em questão é geodesicamente incompleto. Isto é, você não poderia andar continuamente pelo menor caminho que liga dois pontos quaisquer do espaço.

Logo, em vizinhanças pequenas destas singularidades, a teoria perde seu poder preditivo, ou seja, sua habilidade em gerar previsões testáveis, tornando-a insatisfatória no ponto de vista físico. Como resolver esse aspecto contraditório?

Penrose em 1969 formulou a Conjectura da Censura Cósmica para solucionar esse aspecto indesejável da teoria. O que ele conjecturou garante que singularidades permanecem indetectáveis aos observadores que estão muito longe.

Em outras palavras a formação de singularidades, em decorrência do colapso gravitacional de estrelas massivas, sempre viria acompanhada da formação de um buraco negro que separaria o universo da região onde problemas de previsibilidade eventualmente aconteceriam.

Contudo, apesar de tudo isso ser compatível com soluções especiais da teoria, parece não haver argumentos físicos que convença a todos. Além disso, como a conjectura da censura cósmica segue de certa forma as soluções das equações de campo de Einstein, que são não-lineares, uma solução matemática é portanto satisfatória.

Tudo isso, levou Penrose a formular um teste que faria valer a conjectura da censura cósmica que admite uma formulação unicamente de dados iniciais. Especificamente no caso do vácuo ele mostrou provas que se a formulação convencional da teoria de colapso

gravitacional é satisfeita, então a massa total do sistema que é calculada assintoticamente ao longo do dado inicial é limitada por baixo, por uma expressão que depende da área do horizonte de eventos.

Logo, a formulação convencional da teoria de colapso gravitacional pode ser definida como sendo a superfície mínima mais externa contida no dado inicial. No caso tempo-simétrico, que corresponde a situação em que o dado inicial é totalmente geodésico esta conjectura pode ser formulada inteiramente em termos de geometria [7].

A desigualdade Riemanniana de Penrose afirma que se  $(M,g)$ , onde “M” é o espaço e “g” a gravidade, é um dado inicial assintoticamente plano que possui curvatura escalar não negativa, então vale a desigualdade:

$$m_{(M,g)} \geq \sqrt{\frac{|\Sigma_0|}{16\pi}}, \tag{1}$$

na qual  $|\Sigma_0|$  é a área do horizonte  $\Sigma_0$  e  $m_{(M,g)}$  é a massa ADM de  $(M,g)$ . Além disso a igualdade ocorre em (1) se e somente se  $(M,g)$  for isométrica à solução de Schwarzschild [13].

Observe que o invariante  $m_{(M,g)}$  é fisicamente interpretado como a massa total do sistema determinado pelo dado inicial  $(M,g)$ . Em todo caso, a existência de um dado inicial nas condições acima em que a desigualdade (1) for alterada, inviabilizaria a conjectura da censura cósmica, mas sua verificação iria adicionar evidência, mesmo que indireta, à validade da conjectura da censura cósmica.

A desigualdade de Penrose (1) embora que para alguns estudiosos seja considerada simples, resistiu as investidas de vários teóricos por cerca de vinte anos. Sendo resolvida independentemente por Huisken-Ilmanen para o caso em que  $\Sigma_0$  é conexo.

Certamente Penrose contribuiu muito para a ciência. Ele provou que uma singularidade, tal como um buraco negro, poderia ser formada a partir de um colapso gravitacional de imensas estrelas.

Ele conjecturou a hipótese da Censura Cósmica Fraca. Essa hipótese descreve que o universo nos protege das imprevisibilidades que não podem ser vistas por causa do horizonte de eventos [13].

A seguir apresentamos a equação de campo de Einstein, que é dada por:

$$Ric - \frac{R}{2}g + \lambda g = 8\pi T \tag{2}$$

onde  $Ric$  é a curvatura de Ricci e  $\lambda$  é a constante cosmológica.

O lado esquerdo da equação representa o tensor gravitacional de Einstein. Já o lado direito é o tensor de energia e estresse. Essa equação nos diz como a matéria e o espaço se relacionam e, assim, nos explica que a gravidade é a curvatura do espaço na presença de matéria.

Se considerarmos o tensor  $T = 0$  ou seja, o vácuo, a equação de Einstein (2) se reduz (com constante cosmológica nula) a:

$$Ric - \frac{R}{2}g = 0 \tag{3}$$

Isto implica que,  $Ric \equiv 0$ .

A equação acima representa um espaço-tempo no vácuo. E representa, fisicamente, um modelo para o nosso sistema solar, por exemplo.

Uma interpretação ainda mais interessante para a equação de Einstein no vácuo é como um modelo para o buraco negro. Matematicamente, este modelo é uma solução para (3).

Onde,

$$(M^3, g) = (\mathbb{R}^3, \delta),$$

(i)

é o espaço Euclidiano. E o espaço-tempo é o espaço de Minkowski denotado por  $\mathbb{R}^{1,3}$ .

Sejam

$$\left( \mathbb{R}^3 \setminus \{0\}, g_m = \delta \left( 1 + \frac{m}{2r} \right)^4 \right),$$

(ii)

onde  $m$  é a massa de um objeto e  $r$  seu raio. Desse modo, (i) e (ii) são um modelo para um Buraco negro no vácuo e foi batizado em homenagem a Karl Schwarzschild.

Não podemos ver o interior de um buraco negro, então a melhor forma de se ter informações sobre ele é estudando sua fronteira ou horizonte de eventos. Podemos ver pelas equações matemáticas que o Buraco negro de Schwarzschild é uma esfera perfeita, cuja área é dada por:

$$\text{Área}\left(B_{\frac{m}{2}}(0)\right) = 16\pi m^2. \quad (4)$$

Portanto a massa é dada por:

$$m = \sqrt{\frac{\text{Área}\left(B_{\frac{m}{2}}(0)\right)}{16\pi}}. \quad (5)$$

Em termos gerais, a massa  $M_{ADM}$  determinada por um sistema gravitacional é assumidamente positiva na teoria da relatividade geral. Este fato foi provado em 1979 por Richard Schoen e Shing-Tung Yau [7].

Se  $(M^3, g)$  tem curvatura escalar  $R(g) \geq 0$  e  $M^3$  for assintoticamente plano, então  $M_{ADM} \geq 0$ . Se  $M_{ADM} = 0$ , então  $M = \mathbb{R}^3$  sendo “g” igual a métrica Euclidiana.

Inspirado pelo cálculo da massa (5) de um buraco negro, Roger Penrose por meio de uma investigação física e teórica, postulou que:

$$M_{ADM} \geq \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \text{Máx} \text{Área}(B_{r_i}(x_i)), i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

em que  $\text{Máx}[\text{Área}(B_{r_i}(x_i))], i = 1, 2, \dots, n$  é a área do horizonte de eventos do maior buraco negro que existir no espaço ambiente.

Finalmente, este postulado afirma que a massa total ADM possui uma cota inferior maior que zero. Isso afirma que a massa total de um sistema gravitacional é, de fato, sempre positiva [7].

**Definição 2.1** A massa ADM de uma variedade completa assintoticamente plana  $(M^n, g)$  é definida por

$$M_{ADM} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{2(n-1)w_{n-1}} \int_{S_k} \sum_{ij} (g_{ij,i} - g_{ii,j}) v_j dS_k, \quad (7)$$

### 3 A DESIGUALDADE DE PENROSE E O TEOREMA DA MASSA POSITIVA

---

onde  $w_{n-1}$  é o volume da esfera unitária de dimensão  $n - 1$ ,  $S_k$  é a esfera de raio  $r$ ,  $v$  é o vetor normal exterior a  $S_k$  e  $dS_k$  é o elemento de área de  $S_r$  na carta coordenada.

Usando a definição podemos calcular a massa ADM da variedade exterior de Schwarzschild  $(M^3, g) = \left(\mathbb{R}^3 \setminus B_{m/2}, \delta\left(1 + \frac{m}{2r}\right)^4\right)$ :

Desse modo, observe que

$$\begin{aligned}
 m_{ADM} &= \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{16\pi} \int_{S_k} (g_{ij,i} - g_{ii,j}) v_j dS_k \\
 &= \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{16\pi} \int_{S_k} 4 \left(1 + \frac{m}{2k}\right)^3 \left(-\frac{m}{2k^2}\right) \left(\frac{x_i}{k} \delta_{ij} - \frac{x_j}{k}\right) \frac{x^j}{k} dS_k \\
 &= \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{4\pi} \int_{S_k} \left(1 + \frac{m}{2k}\right)^3 \left(-\frac{m}{2k^2}\right) (-2) dS_k \\
 &= \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{4\pi} \left(1 + \frac{m}{2k}\right)^3 \left(\frac{m}{k^2}\right) 4\pi k^2 \\
 &= m.
 \end{aligned}$$

Desse modo, concluímos que a massa ADM da variedade exterior de Schwarzschild é a constante positiva  $m$  [12]. Mais ainda,

$$M_{ADM} = \sqrt{\frac{\text{Área}(B_{\frac{m}{2}}(0))}{16\pi}}.$$

Isto nos diz que a desigualdade de Penrose atinge sua cota inferior para o buraco negro de Schwarzschild.

Assim, caso a desigualdade (1) não se verifique para algum espaço-tempo a conjectura da censura cósmica seria violada.

## 4 Palestra

Após pesquisar sobre buracos negros, descrevo meu plano de aula para ministrar uma palestra sobre eles. Apresento também os slides que exibirei durante à palestra. Inicialmente apresentarei alguns pioneiros que contribuíram para o desenvolvimento de toda teoria sobre os buracos negros que conhecemos. Em seguida veremos o vídeo “A Nasa capturou a primeira imagem de uma explosão causada por um buraco negro”.

Após o vídeo vou relatar como surge um buraco negro e qual é a sua definição de acordo com os teóricos. Discorrerei sobre seus componentes e o que pode acontecer em sua volta. Junto com os expectadores calcularei, como exemplo, o raio de um buraco negro que tem a mesma massa do sol.

Em seguida descreverei o que são Quasares e se é possível viajarmos por meio de um buraco de minhoca. Para finalizar a palestra veremos o vídeo “Buraco negro fotografado pela primeira vez”. Depois do vídeo teremos uma seção de perguntas e respostas.

### 4.1 Plano de aula para ministrar a palestra

Abaixo descrevo meu plano de palestra.

**Data:** 03 de Setembro de 2019

**Duração da Palestra:**

Trinta a quarenta minutos.

**Disciplina/Área:**

Matemática e Física.

**1 - Conteúdo (Assunto):**

Buracos negros e a conjectura da censura cósmica

**2 - Objetivos Instrucionais:**

- Potencializar o ensino da matemática através de palestras motivadoras.
- Motivar o aluno a compreender os conceitos, procedimentos e estratégias matemáticas que exijam iniciativa e criatividade.

**3 - Desenvolvimento do Conteúdo**

**A - Introdução:**

Muitos de nós já ouvimos falar de buracos negros. Mas será que eles têm relação com a matemática? Podemos utilizá-los para envolver os alunos de tal modo que eles

tomem gosto pela matemática e também pela física? Como surge um buraco negro? Podemos calcular a força gravitacional e o tamanho de um buraco negro?

**B - Desenvolvimento:**

- Falar como alguns estudiosos começaram a questionar a lei da gravitação de Newton e a se perguntar como corpos grandes se comportavam diante dessa lei.
- Apresentar esses pesquisadores.
- Definir buraco negro segundo WALD (1984) e mencionar que segundo HAWKING (2016) o disco de acreção dele emite radiação.
- Ver o vídeo “A Nasa capturou a primeira imagem de uma explosão causada por um buraco negro!” Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=eQhV0St2qRc>.
- Usando figuras mostrar os componentes de um buraco negro.
- Com figuras simular o que pode acontecer em volta dos buracos negros.
- Discorrer sobre os Quasares.
- Discutir se é possível viajarmos por um buraco negro, através de um buraco de minhoca.
- Passar o vídeo “Buraco negro fotografado pela primeira vez!” Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=pgRxIJm1wCg>.
- Apresentar as considerações finais

**C - Metodologia:**

- Exposição e explicação do conteúdo proposto.
- Apresentação de parte da história de como alguns pesquisadores conseguiram desenvolver toda teoria que conhecemos até o momento sobre os buracos negros.
- Motivação dos ouvintes da palestra através de figuras e vídeos que auxiliem a visualização de como o estudo dos buracos negros potencializa a aprendizagem da matemática e da física.

**E - Recursos Didáticos:**

- Data show e o notebook para ministrar o conteúdo selecionado.
- Perguntas e respostas orais dos espectadores no final da palestra a cerca de suas dúvidas e curiosidades.

## 4.2 Início da palestra

Figura 4: Slide 1

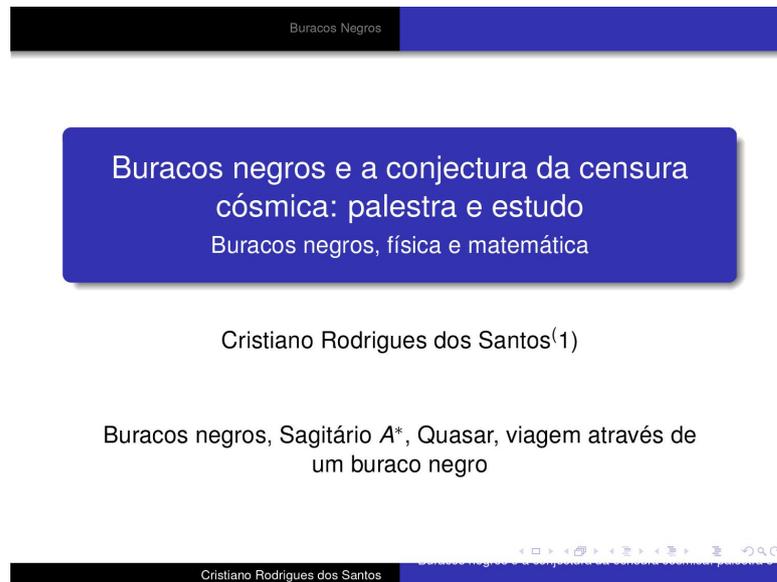


Figura 5: Slide 2

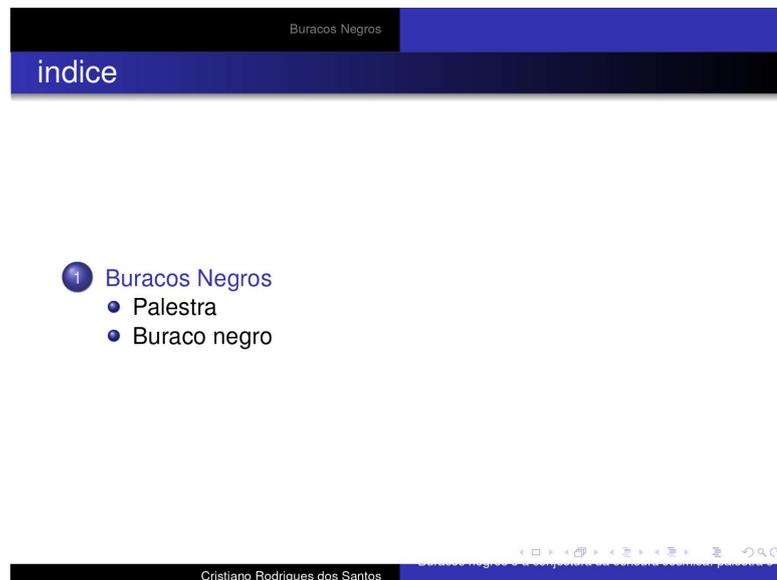
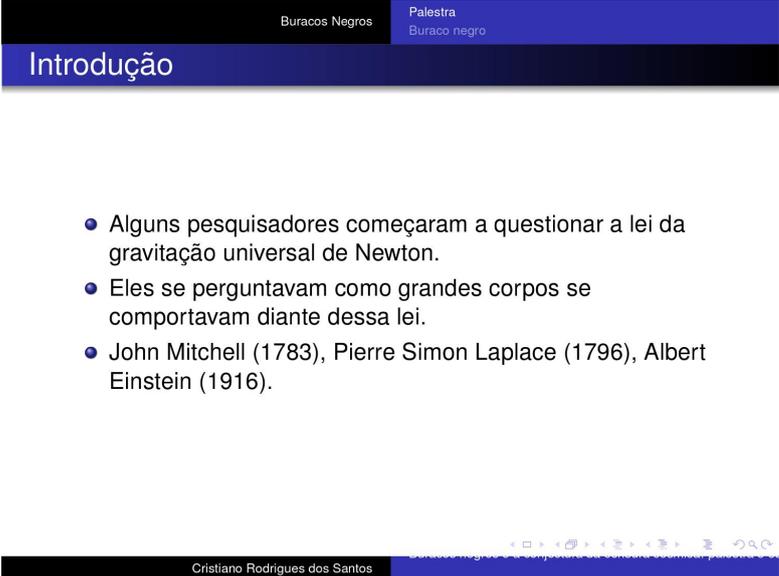


Figura 6: Slide 3



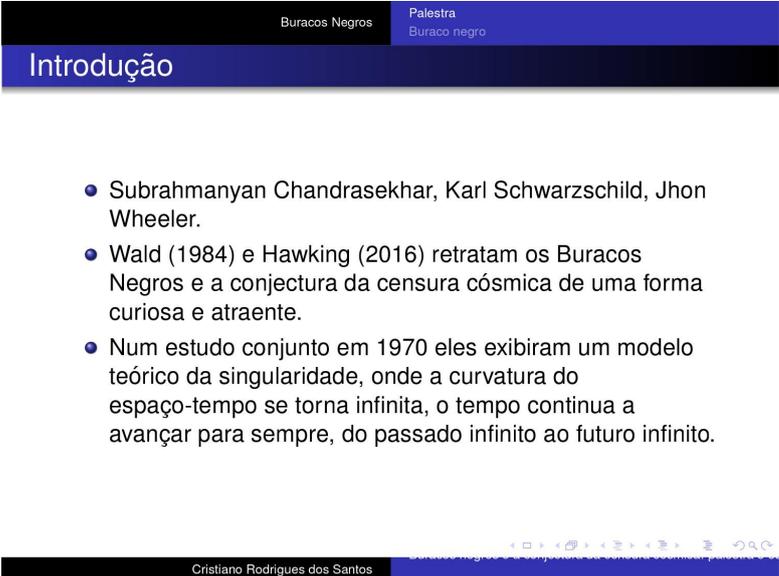
Slide 3: Introdução

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

- Alguns pesquisadores começaram a questionar a lei da gravitação universal de Newton.
- Eles se perguntavam como grandes corpos se comportavam diante dessa lei.
- John Mitchell (1783), Pierre Simon Laplace (1796), Albert Einstein (1916).

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 7: Slide 4



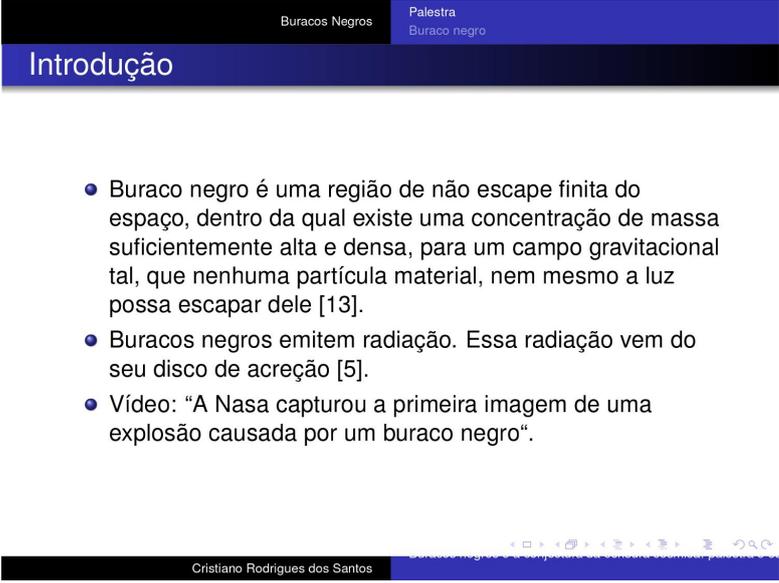
Slide 4: Introdução

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

- Subrahmanyan Chandrasekhar, Karl Schwarzschild, Jhon Wheeler.
- Wald (1984) e Hawking (2016) retratam os Buracos Negros e a conjectura da censura cósmica de uma forma curiosa e atraente.
- Num estudo conjunto em 1970 eles exibiram um modelo teórico da singularidade, onde a curvatura do espaço-tempo se torna infinita, o tempo continua a avançar para sempre, do passado infinito ao futuro infinito.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 8: Slide 5



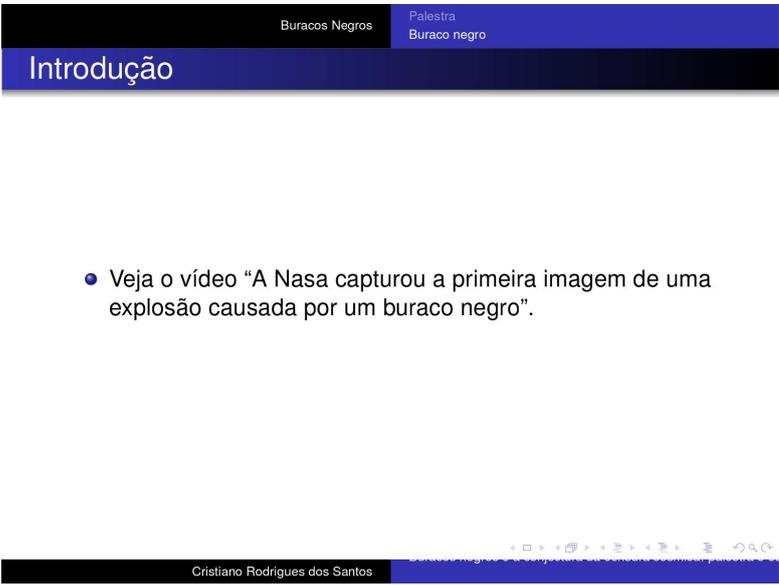
Slide 5: Introdução

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

- Buraco negro é uma região de não escape finita do espaço, dentro da qual existe uma concentração de massa suficientemente alta e densa, para um campo gravitacional tal, que nenhuma partícula material, nem mesmo a luz possa escapar dele [13].
- Buracos negros emitem radiação. Essa radiação vem do seu disco de acreção [5].
- Vídeo: “A Nasa capturou a primeira imagem de uma explosão causada por um buraco negro”.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 9: Slide 6



Slide 6: Introdução

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

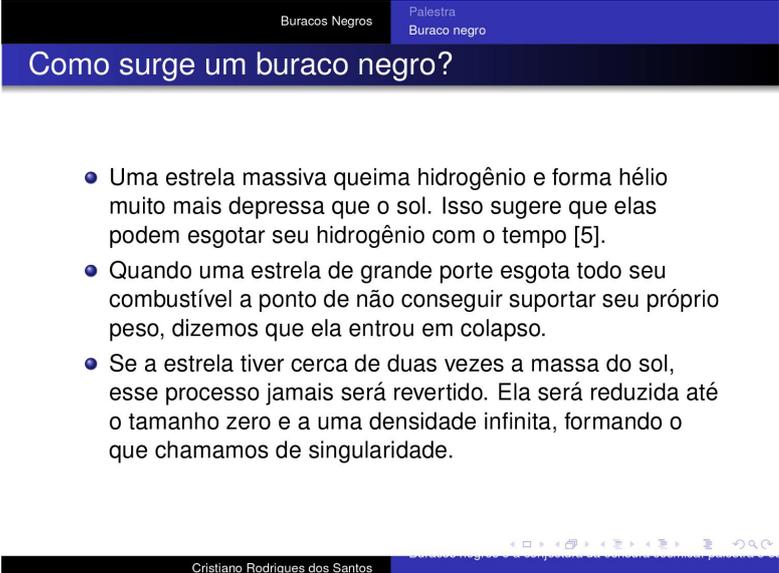
- Veja o vídeo “A Nasa capturou a primeira imagem de uma explosão causada por um buraco negro”.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Esclarecidos por Wald e Hawking vejamos o vídeo “A Nasa capturou a primeira imagem de uma explosão causada por um buraco negro”. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=eQhV0St2qRc>, que possibilita vislumbrar o poder dos Buracos Negros.

### 4.3 Como surge um buraco negro?

Figura 10: Slide 7



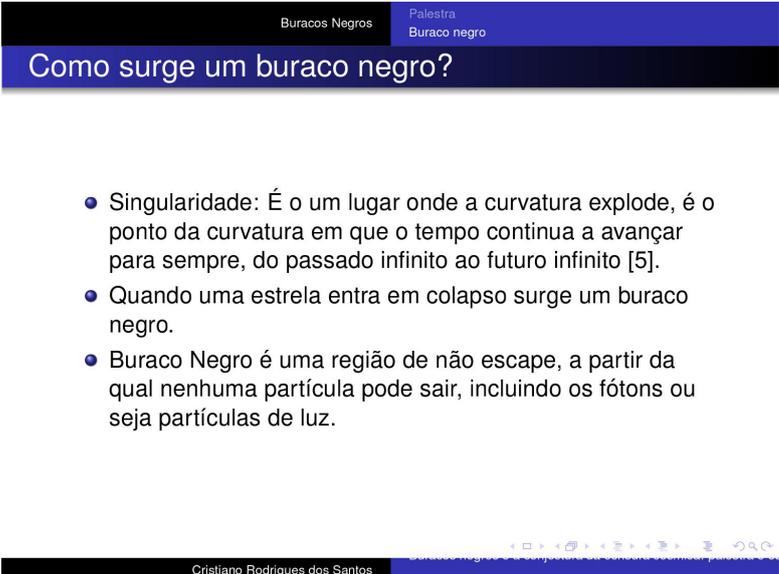
Slide 7: Como surge um buraco negro?

Buracos Negros Palestra Buraco negro

- Uma estrela massiva queima hidrogênio e forma hélio muito mais depressa que o sol. Isso sugere que elas podem esgotar seu hidrogênio com o tempo [5].
- Quando uma estrela de grande porte esgota todo seu combustível a ponto de não conseguir suportar seu próprio peso, dizemos que ela entrou em colapso.
- Se a estrela tiver cerca de duas vezes a massa do sol, esse processo jamais será revertido. Ela será reduzida até o tamanho zero e a uma densidade infinita, formando o que chamamos de singularidade.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 11: Slides 8



Slide 8: Como surge um buraco negro?

Buracos Negros Palestra Buraco negro

- Singularidade: É o um lugar onde a curvatura explode, é o ponto da curvatura em que o tempo continua a avançar para sempre, do passado infinito ao futuro infinito [5].
- Quando uma estrela entra em colapso surge um buraco negro.
- Buraco Negro é uma região de não escape, a partir da qual nenhuma partícula pode sair, incluindo os fótons ou seja partículas de luz.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 12: Slide 9



Figura 13: Slide 10



Figura 14: Como surge um buraco negro?



A figura 14 representa um buraco negro. Como os buracos se formam? Inúmeras pesquisas realizadas por estudiosos fizeram os cientistas acreditarem que os buracos negros menores se formaram com o surgimento do universo.

Buracos negros estelares são gerados quando uma estrela de grande porte esgota todo seu combustível a ponto de não conseguir suportar seu próprio peso. Quando isso ocorre, dizemos que a estrela entrou em colapso, ela pode se transformar em um buraco negro sem explodir. Também, quando uma estrela explode em uma supernova, um buraco negro pode ser deixado para trás.

## 4.4 Buraco negro e seus componentes

Figura 15: Slide 11



Figura 16: Slide 12

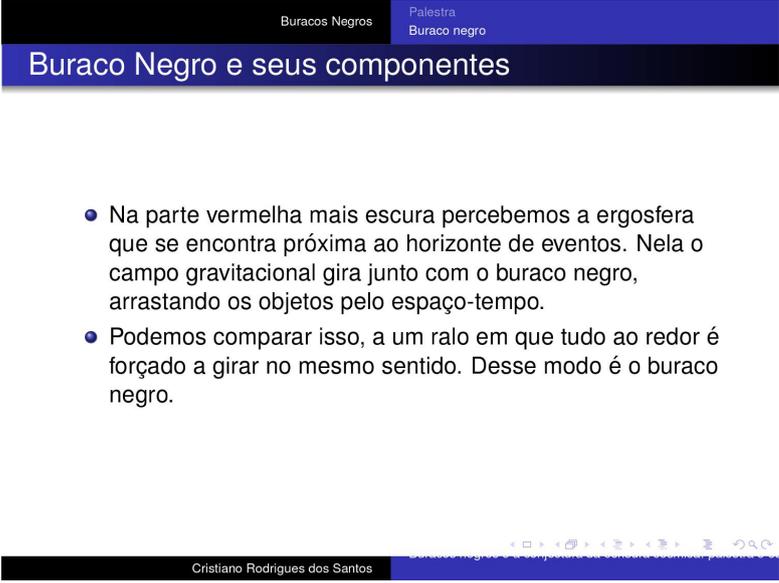
Buracos Negros Palestra  
Buraco negro

### Buraco Negro e seus componentes

- Jatos de partículas saem dos buracos negros com uma velocidade próxima a da luz e podem percorrer galáxias inteiras.
- Esses jatos são formados por partículas do disco de acreção que ganha velocidade para fugir da gravidade.
- A parte vermelha representa o disco de acreção, repleto de matéria na forma de gás.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 17: Slide 13



Slide 13: Buraco Negro e seus componentes

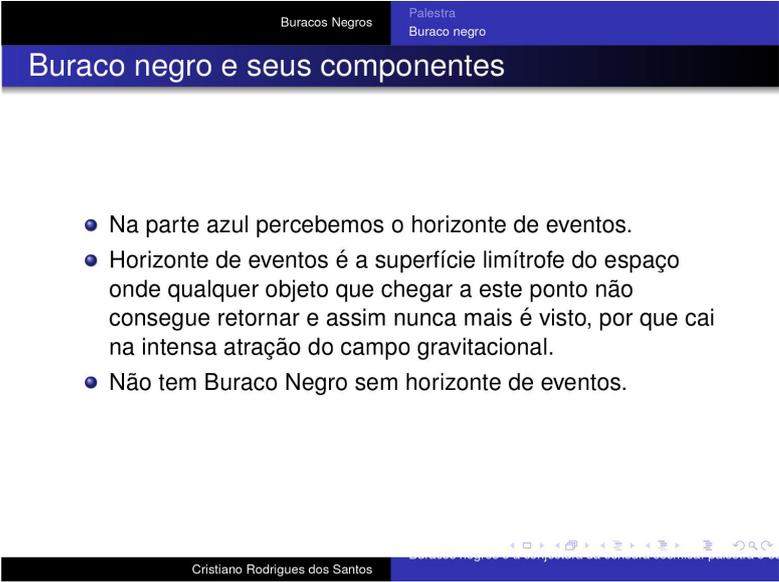
Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

### Buraco Negro e seus componentes

- Na parte vermelha mais escura percebemos a ergosfera que se encontra próxima ao horizonte de eventos. Nela o campo gravitacional gira junto com o buraco negro, arrastando os objetos pelo espaço-tempo.
- Podemos comparar isso, a um ralo em que tudo ao redor é forçado a girar no mesmo sentido. Desse modo é o buraco negro.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 18: Slide 14



Slide 14: Buraco negro e seus componentes

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

### Buraco negro e seus componentes

- Na parte azul percebemos o horizonte de eventos.
- Horizonte de eventos é a superfície limítrofe do espaço onde qualquer objeto que chegar a este ponto não consegue retornar e assim nunca mais é visto, por que cai na intensa atração do campo gravitacional.
- Não tem Buraco Negro sem horizonte de eventos.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 19: Slide 15

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

## Buraco negro e seus componentes

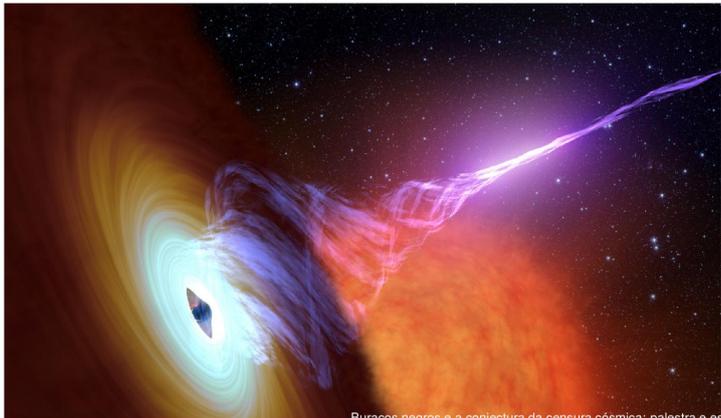
- A parte negra é onde se encontra a singularidade, ela está dentro dessa área.
- Uma singularidade é como se fosse o coração do buraco negro.
- Sua força gravitacional atrai tudo ao redor, inclusive a luz que recai sobre ela.
- Como essa luz não é refletida e sim absorvida, não conseguimos enxergá-la.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 20: Slide 16

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

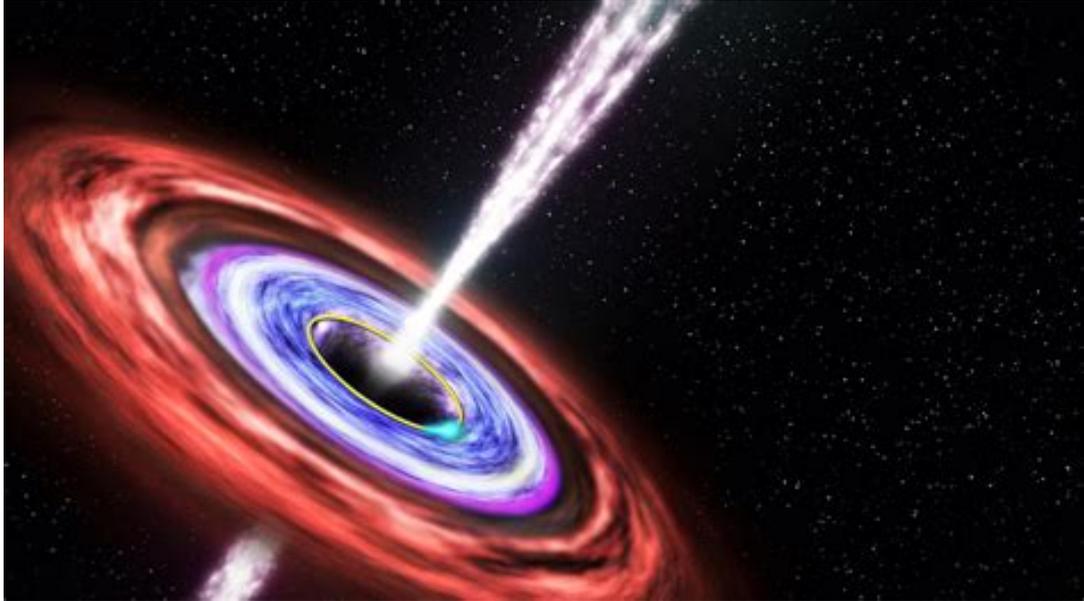
## Linhas de campo magnético em volta do buraco negro



The image shows a black hole at the center, surrounded by a glowing accretion disk. Magnetic field lines are depicted as colorful, swirling structures extending from the poles of the black hole, illustrating the complex magnetic environment around the event horizon.

Cristiano Rodrigues dos Santos Buracos negros e a conjectura da censura cósmica: palestra e es

Figura 21: Buraco negro e seus componentes



Na Figura 21 percebemos os jatos de partículas que saem dos buracos negros com uma velocidade próxima a da luz e podem percorrer galáxias inteiras. Os pesquisadores consideram que esses jatos são formados por partículas do disco de acreção que ganha velocidade para fugir da gravidade.

A parte vermelha representa o disco de acreção, repleto de matéria na forma de gás. De acordo com o movimento dessa matéria e sua aproximação do centro do buraco negro ele esquentava e libera raio-x, infravermelho e ultravioleta.

Na parte vermelha mais escura percebemos a ergosfera que se encontra próxima do horizonte de eventos. Nela o campo gravitacional gira junto com o buraco negro, arrastando as matérias pelo espaço-tempo. Podemos comparar a um ralo em que tudo ao redor é forçado a girar no mesmo sentido. Assim também é com o buraco negro.

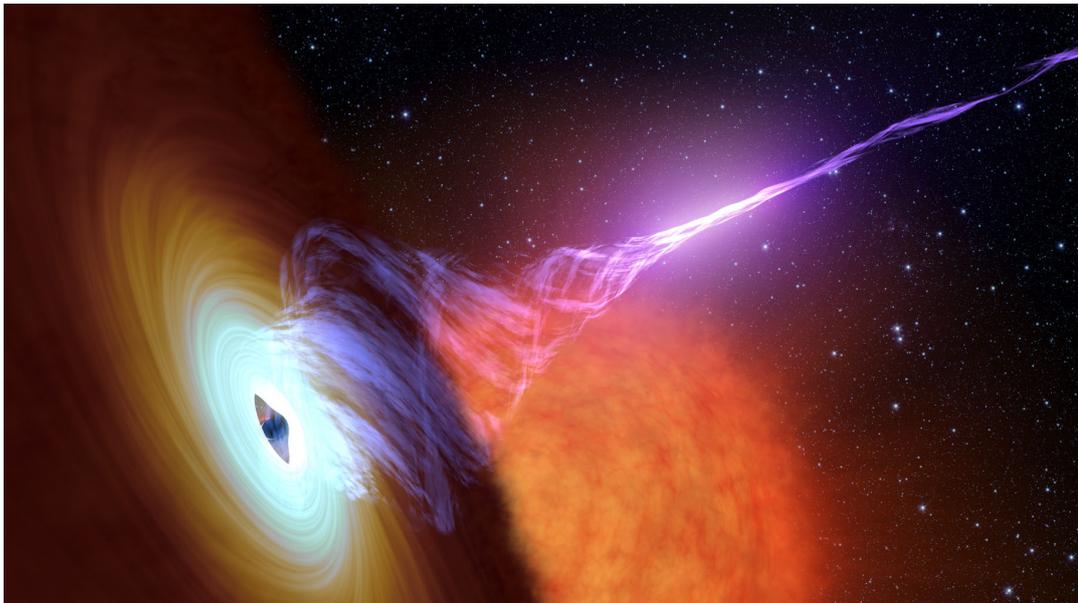
Na parte azul percebemos o Horizonte de Eventos. Qualquer objeto que chega a este ponto não consegue retornar e assim nunca mais é visto, porque cai na intensa atração do campo gravitacional.

E por fim temos a parte negra, dentro dela fica a singularidade. Matematicamente, singularidade é um ponto no espaço onde a densidade é infinita, onde o tempo para e as leis da Física são irrelevantes e inúteis. Uma singularidade é como se fosse o coração de um Buraco Negro.

A singularidade distorce o espaço-tempo, ou seja, nela o tempo fica parado e o

espaço desaparece. Sua força gravitacional atrai tudo ao redor, inclusive a luz que recai sobre ela. Como está luz não é refletida e sim absorvida, não conseguimos enxergá-la.

Figura 22: Linhas de campo magnético em volta do buraco negro



Na Figura 22 podemos observar em destaque os jatos de partícula, as linhas de campo magnético, o disco de acreção e no centro o buraco negro.

A gravidade de um buraco negro, ou curvatura do espaço-tempo, causa uma singularidade envolvida por uma superfície fechada que quando examinada percebemos fibras isoladas que se firmam entre si, constituindo um alto fator de cobertura, devido a alta densidade de fios por centímetro, chamada de horizonte de eventos. É a superfície limítrofe do espaço a partir da qual nenhuma partícula pode sair.

## 4.5 Sagitário A\*

Figura 23: Slide 17

Slide 17: Sagitário A\*

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

### Sagitário A\*

- Milhões de estrelas colapsaram sobre a sua própria gravidade para formar o Sagitário A\* ou ele pode ter sido formado pela evolução de imensas nuvens de gás.
- Para se ter ideia do seu volume, Sagitário A\* tem quatro milhões de vezes a massa do sol e está a vinte seis mil anos luz da Terra.
- Este incrível buraco negro não está ativo.
- Por que podemos afirmar isso?

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 24: Slide 18

Slide 18: Sagitário A\*

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

### Sagitário A\*

- Os buracos negros podem ser encontrados por meio do raio-x que eles geram.
- Telescópios como o Chandra da Nasa, XMM-Newton da Agência Espacial da Nasa captam esses raios que geram determinados níveis de energia.
- Porém não adianta apontar detector de raio-x para o Sagitário A\* pois na maioria das vezes ele não será encontrado.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 25: Slide 19

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

## Sagitário A\*

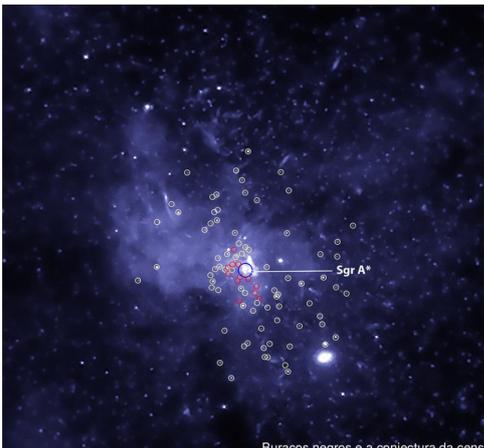
- A emissão de raios-x do Sagitário A\* é espantosamente fraca, ocorre cerca de uma vez por dia segundo os pesquisadores da Nasa.
- A detecção dele só ocorre pelo estudo da aceleração das estrelas no centro da galáxia.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 26: Slide 20

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

## Sagitário A\*



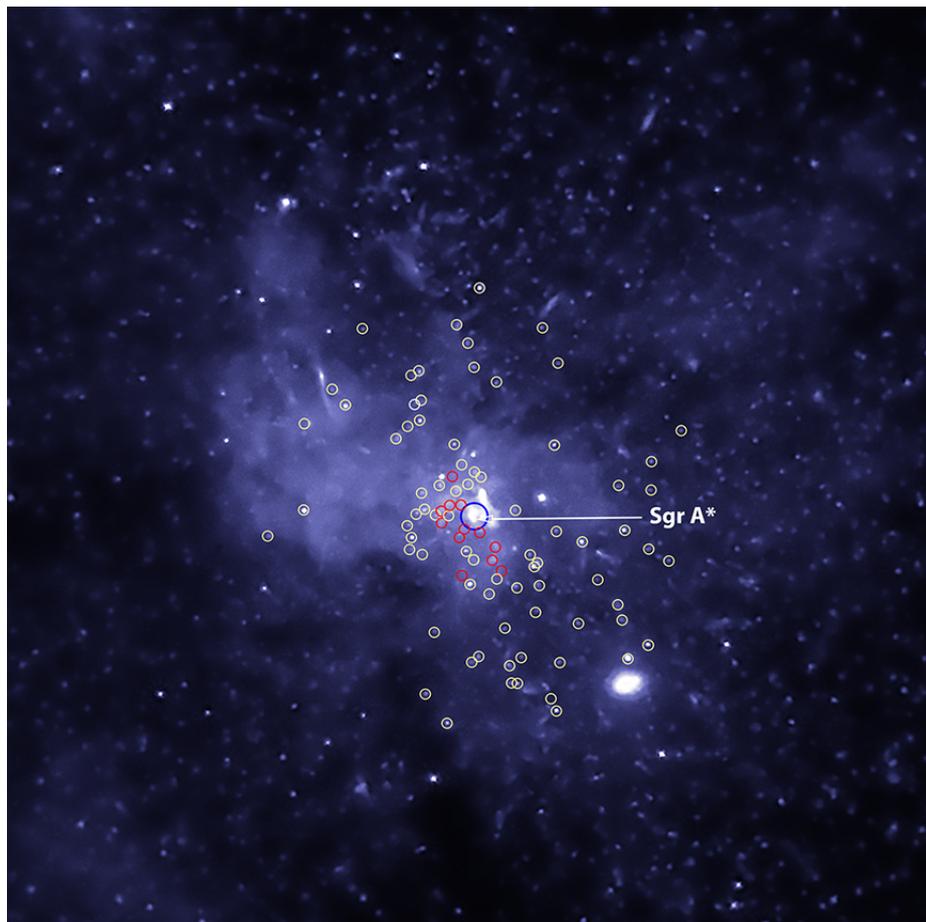
Cristiano Rodrigues dos Santos Buracos negros e a conjectura da censura

Em nossa galáxia o maior buraco negro que os cientistas descobriram é o Sagitário A\* que foi formado pela evolução de imensas nuvens de gás ou por aglomerados de milhões de estrelas que colapsaram sobre a sua própria gravidade.

Para se ter ideia do volume, o Sagitário A\* tem quatro milhões de vezes a massa do sol e está a vinte seis mil anos luz da Terra. Este buraco negro supermassivo não está ativo ou seja não está se alimentando como a maioria dos buracos negros vorazes. De que forma afirmamos isso?

Os buracos negros podem ser encontrados por meio do raio-x que eles geram. Telescópios como o Chandra da Nasa, XMM-Newton da Agência Espacial da Nasa podem captar o raio-x que eles geram em determinados níveis de energia.

Figura 27: Sagitário A\*



Porém, não adianta apontarmos detector de raio-x para o Sagitário A\* (Sgr A\*) pois na maioria das vezes ele não será localizado. A emissão de raios-x perto do Sagitário

*A\** é espantosamente fraca, de acordo com os vários estudos da Nasa as explosões de raio-x ocorrem cerca de uma vez por dia, assim como na maioria dos buracos negros gigantes em galáxias no universo próximo.

A detecção dele só ocorre por meio do estudo da aceleração das estrelas no centro da galáxia. No centro da figura 27, destacada acima, observamos o Sagitário *A\**. Ele é um dos poucos buracos negros do universo em que se pode observar o fluxo de matéria em sua proximidade.

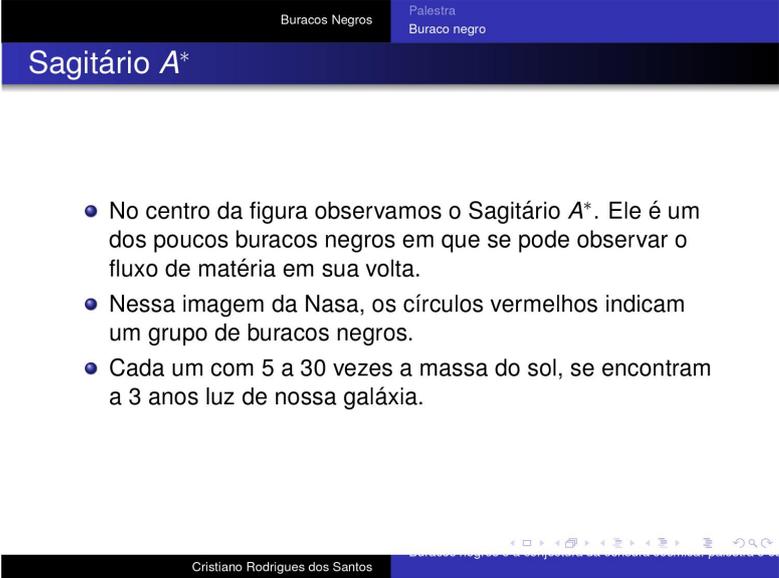
Nessa imagem de raio-x do observatório Chandra da Nasa, um grupo de buracos negros são indicados por círculos vermelhos. Cada um com 5 a 30 vezes a massa do sol, se encontrando a 3 anos-luz do centro da nossa galáxia, onde está localizado o Sagitário *A\**.

As fontes de raio-x aparecem destacadas por círculos amarelos que provavelmente são estrelas de nêutrons menos massivas ou estrelas anãs brancas. Se os buracos negros estivessem sozinhos seria impossível detectá-los pois eles seriam invisíveis. Mas como parte de um sistema estelar eles acumulam material das estrelas e geram raio-x.

O Chandra é capaz de registrar a presença apenas do mais brilhante desses sistemas de buracos negros como fontes pontuais de raio-x. Isso demonstra que devem existir muitos outros grupos de buracos negros naquele espaço, mas que ainda não foram detectados.

## 4.6 Simulação do que pode acontecer em volta de um buraco negro

Figura 28: Slide 21

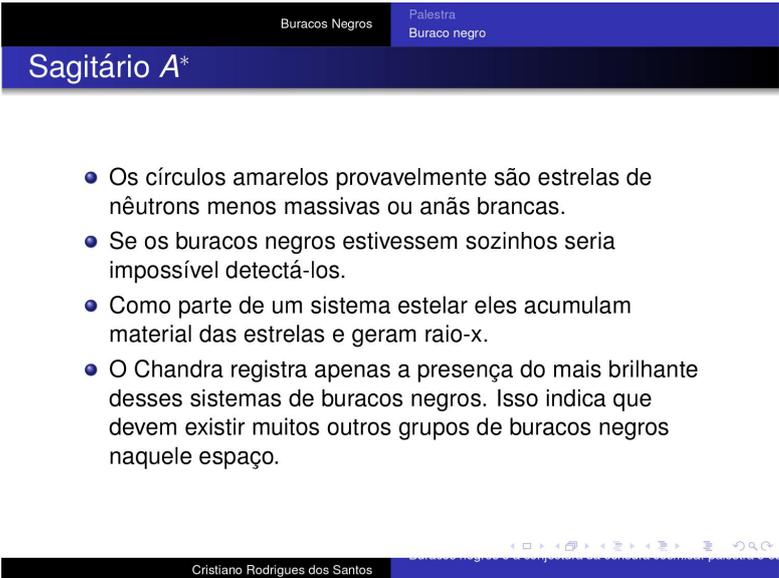


Slide 21: Sagitário A\* Buracos Negros. Palestra Buraco negro.

- No centro da figura observamos o Sagitário A\*. Ele é um dos poucos buracos negros em que se pode observar o fluxo de matéria em sua volta.
- Nessa imagem da Nasa, os círculos vermelhos indicam um grupo de buracos negros.
- Cada um com 5 a 30 vezes a massa do sol, se encontram a 3 anos luz de nossa galáxia.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 29: Slide 22



Slide 22: Sagitário A\* Buracos Negros. Palestra Buraco negro.

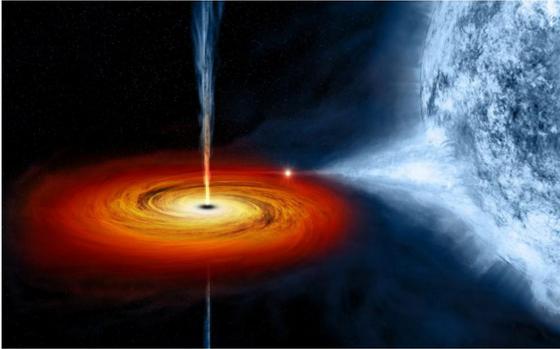
- Os círculos amarelos provavelmente são estrelas de nêutrons menos massivas ou anãs brancas.
- Se os buracos negros estivessem sozinhos seria impossível detectá-los.
- Como parte de um sistema estelar eles acumulam material das estrelas e geram raio-x.
- O Chandra registra apenas a presença do mais brilhante desses sistemas de buracos negros. Isso indica que devem existir muitos outros grupos de buracos negros naquele espaço.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 30: Slide 23

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro

Como calcular a força gravitacional e o tamanho de um buraco negro?



Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 31: Slide 24

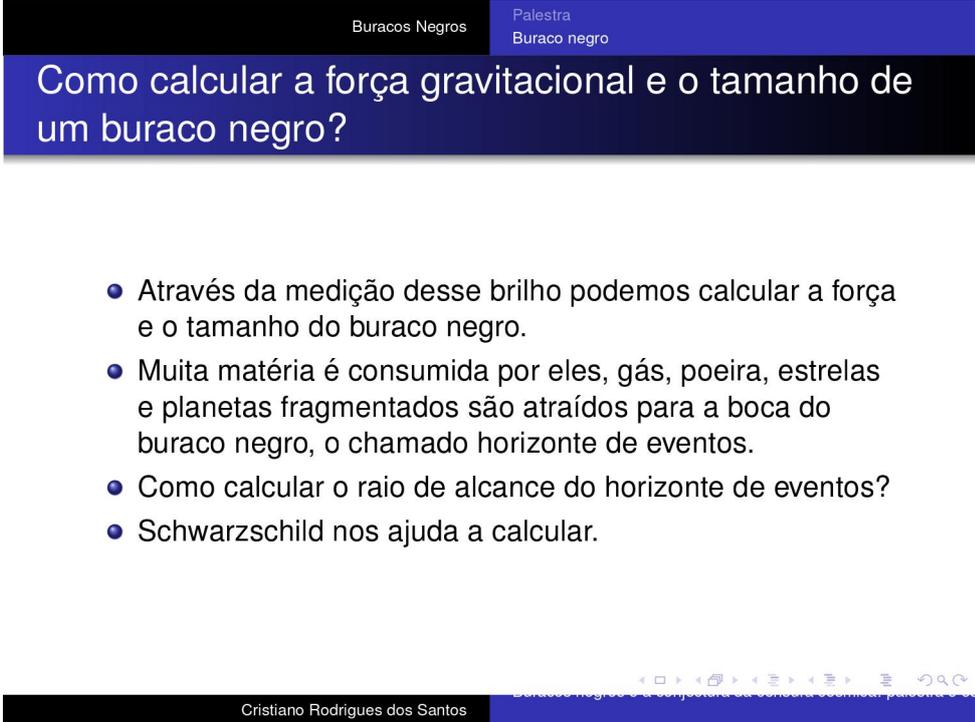
Buracos Negros Palestra  
Buraco negro

Como calcular a força gravitacional e o tamanho de um buraco negro?

- A medida que o buraco negro se alimenta, simultaneamente aumenta seu volume.
- Sua gravidade crescente atrai cada vez mais objetos para seu enorme disco giratório.
- Com isso em seu interior o atrito aumenta e seu disco começa a brilhar.
- Quanto mais rápido o disco girar, maior será o atrito, tornando-o cada vez mais brilhante.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 32: Slide 25



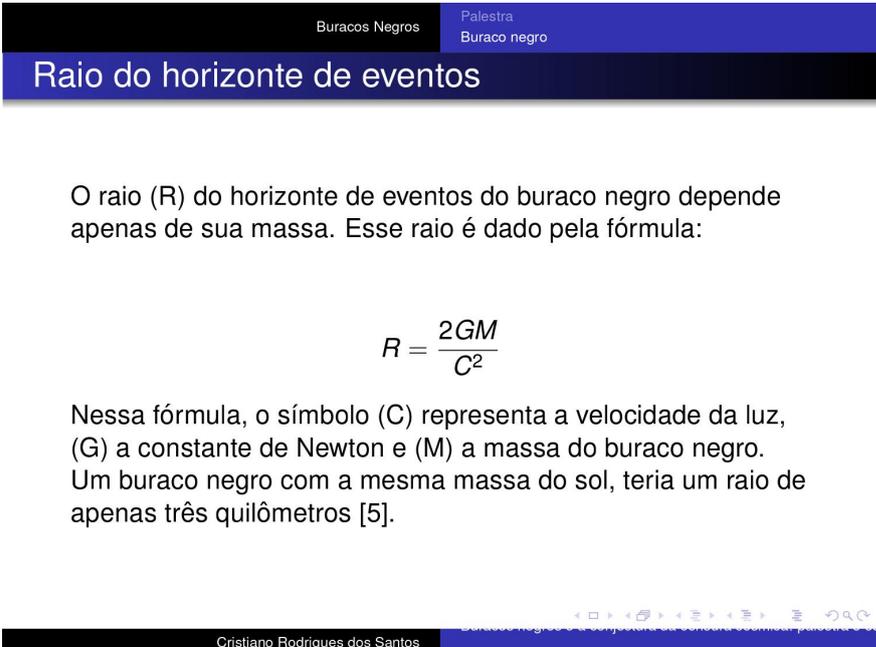
Slide 25: Como calcular a força gravitacional e o tamanho de um buraco negro?

Buracos Negros Palestra Buraco negro

- Através da medição desse brilho podemos calcular a força e o tamanho do buraco negro.
- Muita matéria é consumida por eles, gás, poeira, estrelas e planetas fragmentados são atraídos para a boca do buraco negro, o chamado horizonte de eventos.
- Como calcular o raio de alcance do horizonte de eventos?
- Schwarzschild nos ajuda a calcular.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 33: Slide 26



Slide 26: Raio do horizonte de eventos

Buracos Negros Palestra Buraco negro

O raio (R) do horizonte de eventos do buraco negro depende apenas de sua massa. Esse raio é dado pela fórmula:

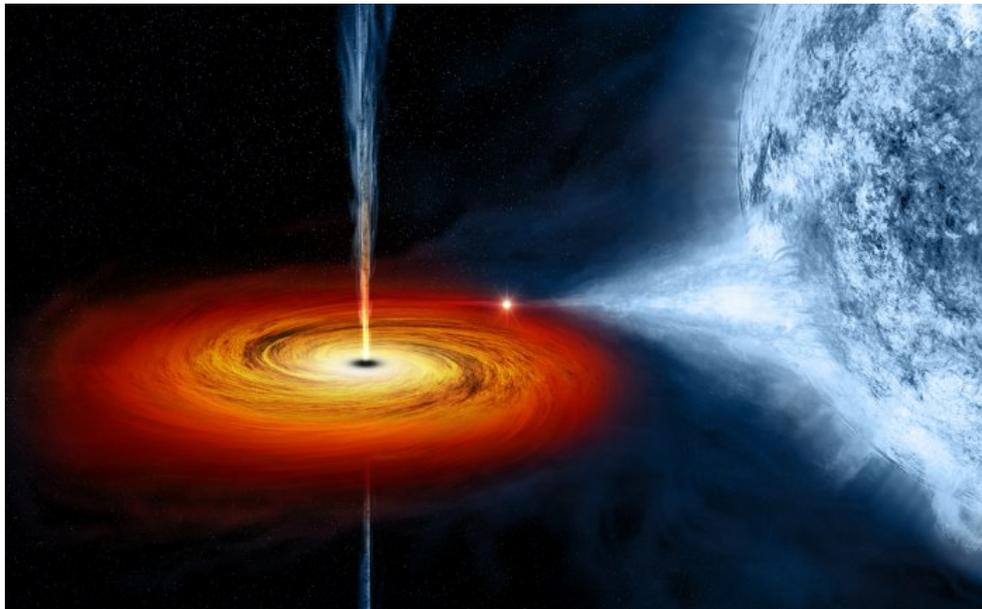
$$R = \frac{2GM}{C^2}$$

Nessa fórmula, o símbolo (C) representa a velocidade da luz, (G) a constante de Newton e (M) a massa do buraco negro. Um buraco negro com a mesma massa do sol, teria um raio de apenas três quilômetros [5].

Cristiano Rodrigues dos Santos

Uma pergunta que muitos fizeram e que já se encontra respondida é o modo com o qual podemos calcular a força gravitacional e o tamanho de um buraco negro.

Figura 34: Como calcular a força gravitacional e o tamanho de um buraco negro?



Na Figura 34 percebemos a ilustração de um buraco negro supermassivo se alimentando. A medida que ele se alimenta, ele simultaneamente aumenta seu volume. Desse modo, sua gravidade crescente atrai cada vez mais objetos para seu enorme disco giratório. Com isso, em seu interior o atrito aumenta, e seu disco começa a brilhar.

Quanto mais rápido o disco girar, maior será o atrito, tornando-o cada vez mais brilhante. Através da medição desse brilho podemos calcular a força e o tamanho do buraco negro.

Os buracos negros são as grandes potências do universo e são capazes de destruir mundos inteiros. Muita matéria é consumida por eles, gás, poeira, estrelas e planetas fragmentados são atraídos para a boca do Buraco Negro, o chamado horizonte de eventos. E essa ação constante de destruir e consumir qualquer matéria que cruze o seu caminho, deixa-o cada vez maior e extremamente potente.

## 4.7 Quasar

Figura 35: Slide 27

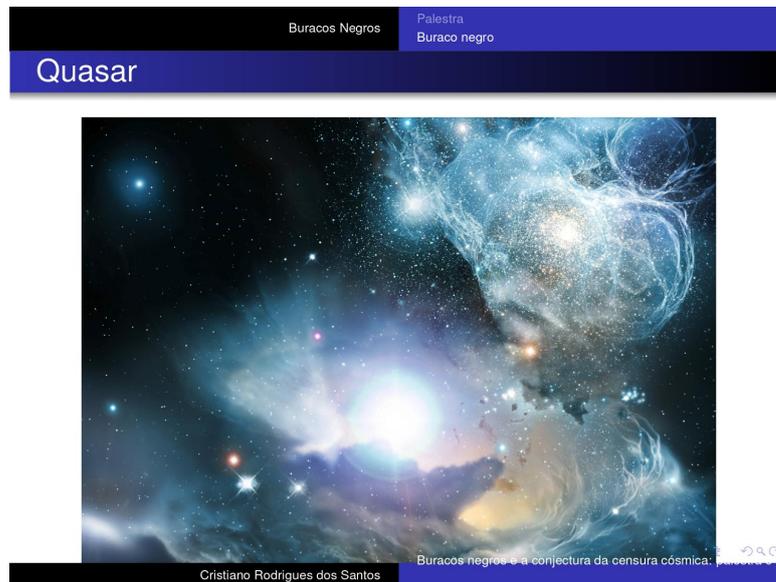


Figura 36: Slide 28

Buracos Negros Palestra Buraco negro

Quasar

- Quasar é um objeto muito brilhante, ele é semelhante a uma estrela, e está tão longe da Terra que sua luz leva bilhões de anos para chegar até aqui.
- Os Quasares brilham mais que algumas galáxias.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 37: Slide 29

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro

## Quasar

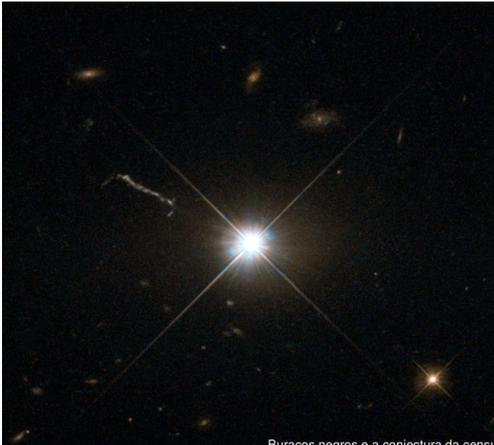
- Um Quasar é tão brilhante que inibe a luz de todas as estrelas numa mesma galáxia, segundo os estudos dos astrónomos da Nasa. Apesar desse brilho não podemos ver os Quasares, a olho nu, devido a sua enorme distância da Terra. Os pesquisadores da Nasa afirmam que a maioria dos Quasares são maiores que o nosso sistema solar. Um Quasar tem aproximadamente um kiloparsec de largura, ou seja mil parsecs, sendo um parsec igual a 3,26 anos-luz, algo espantosamente grande.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 38: Slide 30

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro

## Quasar que está bilhões de anos longe da Terra



Cristiano Rodrigues dos Santos Buracos negros e a conjectura da censura

Os buracos negros supermassivos são associados a energias intensas. A energia fornecida pelos buracos negros podem fornecer Quasares. Quasar é um objeto muito brilhante, ele é semelhante a uma estrela, e está tão longe da Terra que sua luz leva bilhões de anos para chegar até aqui.

Ele emite grandes quantidades de radiação, incluindo ondas de rádio e raios-x. De acordo com a equipe de pesquisa da Nasa, os Quasares emitem mais energia do que 100 galáxias normais combinadas. O que gera toda essa energia?

A Figura 39 elucidada, e muito, está intrigante questão. Nela vemos que um buraco negro supermassivo gerar sozinho toda essa energia. Se uma grande quantidade de matéria acumula em sua abertura, haverá muitas colisões e isso vai liberar quantidades inacreditáveis de energia.

Figura 39: Quasar, luzes intensas que brilham mais do que algumas galáxias

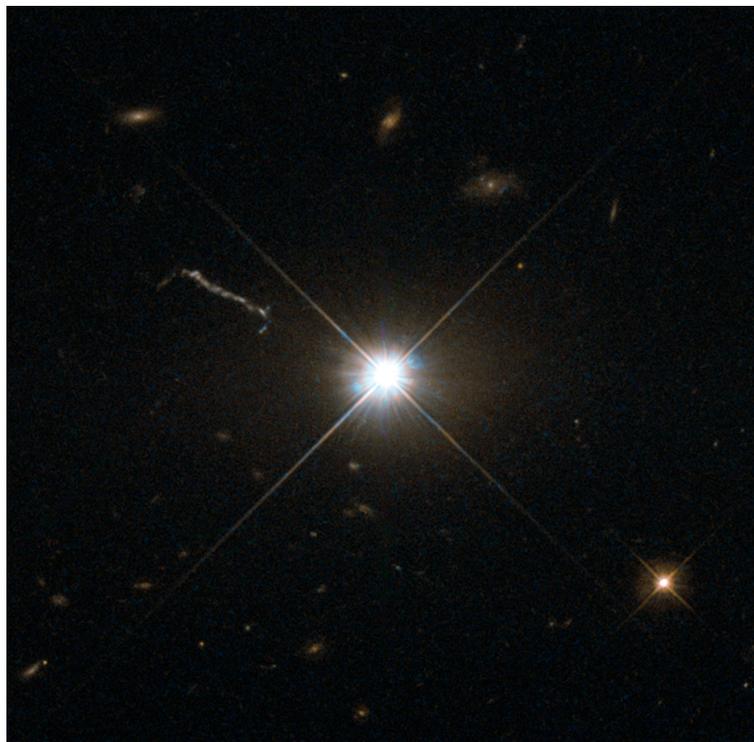


Jatos enormes e luminosos se espalham por centenas e até milhares de anos luz, formando um Quasar, a luz mais brilhante do cosmo. Eles podem ser um trilhão de vezes mais brilhantes que o sol. Buracos negros devoram tudo a sua volta, mas grande parte do que eles consomem não fica dentro deles. Eles ejetam muito do que absorvem,

sendo essas coisas que saem de dentro deles aquecidas a temperaturas tão intensas que espalham o maravilhoso brilho ao seu redor.

Um Quasar é tão brilhante que inibe a luz de todas as estrelas numa mesma galáxia, segundo os estudos dos astrônomos da Nasa. Apesar desse brilho não podemos ver os Quasares, a olho nu, devido a sua enorme distância da Terra. Os pesquisadores da Nasa afirmam que a maioria dos Quasares são maiores que o nosso sistema solar. Um Quasar tem aproximadamente um kiloparsec de largura, ou seja mil parsecs, sendo um parsec igual a 3,26 anos-luz, algo espantosamente grande.

Figura 40: Quasar que está bilhões de anos longe da Terra



## 4.8 Viagem no tempo através de um buraco negro

Figura 41: Slide 31

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

### Buraco de minhoca

- Uma suposta teoria sobre os Buracos Negros é que se eles estiverem ligados a um Buraco Branco, podemos viajar grandes distâncias por eles. Como já mencionamos um buraco negro é uma região que surge naturalmente da morte de uma estrela. Sendo que após sua formação ele suga objetos a sua volta. Supostamente o Buraco Branco cospe o que é sugado.

Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 42: Slide 32

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

### Buraco de minhoca

- Se ele existir e se estiver junto de um buraco negro poderíamos viajar no tempo longas distâncias, pois assim teríamos o chamado buraco de minhoca, bastante famoso ultimamente por aparecer em filmes atuais de super heróis. Na figura abaixo, a parte amarela representa um buraco negro, na parte azul observamos um buraco branco.

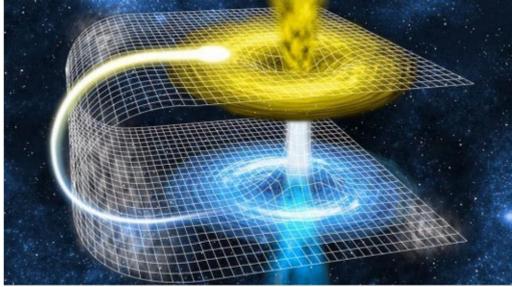
Cristiano Rodrigues dos Santos

Figura 43: Slide 33

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

## Buraco de minhoca

Figura: Buraco negro ligado a um buraco branco



Cristiano Rodrigues dos Santos

Este slide apresenta um diagrama que ilustra a conexão entre um buraco negro e um buraco branco através de um buraco de minhoca. O buraco negro é representado por um ponto central onde o espaço e o tempo se curvam drasticamente, enquanto o buraco branco é o ponto oposto. Uma ponte de espaço-tempo, o buraco de minhoca, conecta os dois pontos, permitindo viagens instantâneas entre eles. O diagrama utiliza uma grade de espaço-tempo para visualizar a curvatura da gravidade.

Figura 44: Slide 34

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro Buraco negro

## Buraco de minhoca

- Na teoria poderíamos viajar por um buraco de minhoca, em dias e talvez em horas, distâncias que levariam bilhões de anos, para serem percorridas. Isso se daria porque a singularidade é onde espaço e o tempo se convergem num único ponto. O tempo chega a parar.

Cristiano Rodrigues dos Santos

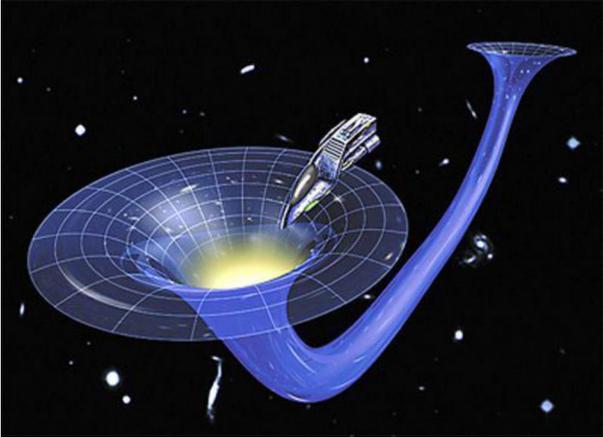
Este slide contém um texto explicativo sobre a possibilidade de viajar através de um buraco de minhoca. Segundo a teoria, essa viagem poderia ocorrer em dias ou horas, apesar de as distâncias envolvidas serem de bilhões de anos-luz. Isso é possível porque, na singularidade do buraco negro, o espaço e o tempo se convergem em um único ponto, fazendo com que o tempo pare de passar.

Figura 45: Slide 35

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro

## Buraco de minhoca

Figura: Viagem através de um buraco negro



Cristiano Rodrigues dos Santos

Buracos Negros & Computação da Ciência: Cosmologia, Partículas e...

Figura 46: Slide 36

Buracos Negros Palestra  
Buraco negro

## Buraco de minhoca

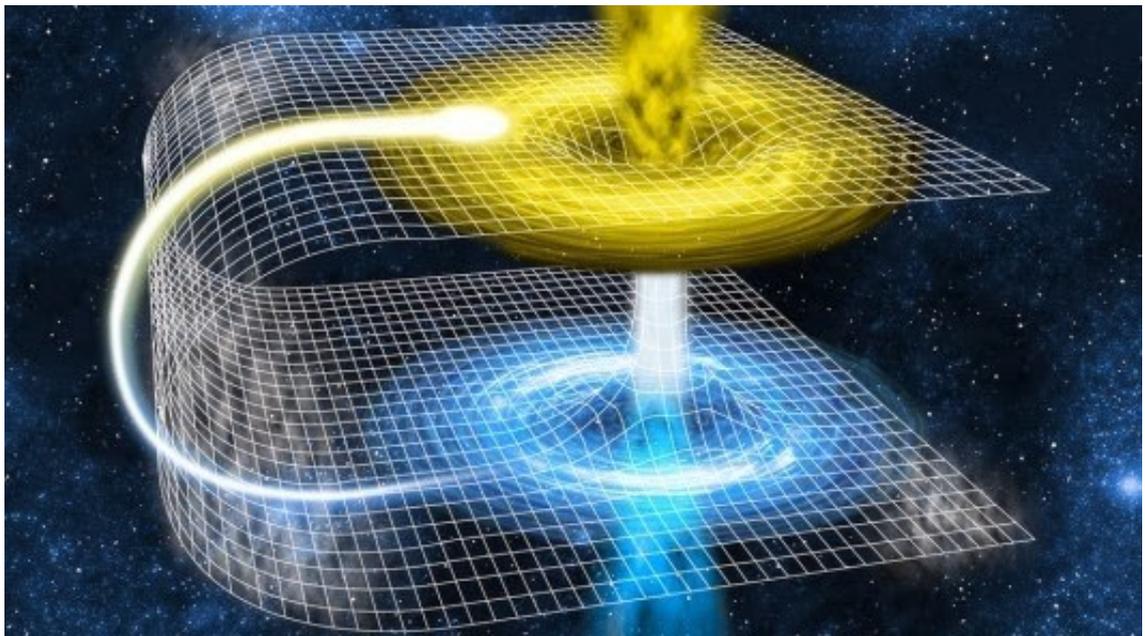
- Filmes tem retratado a possibilidade de viajar no tempo.
- Por meio de um buraco de minhoca os personagens percorrem enormes distâncias.
- Mas será que isso realmente é possível?

Cristiano Rodrigues dos Santos

Buracos Negros & Computação da Ciência: Cosmologia, Partículas e...

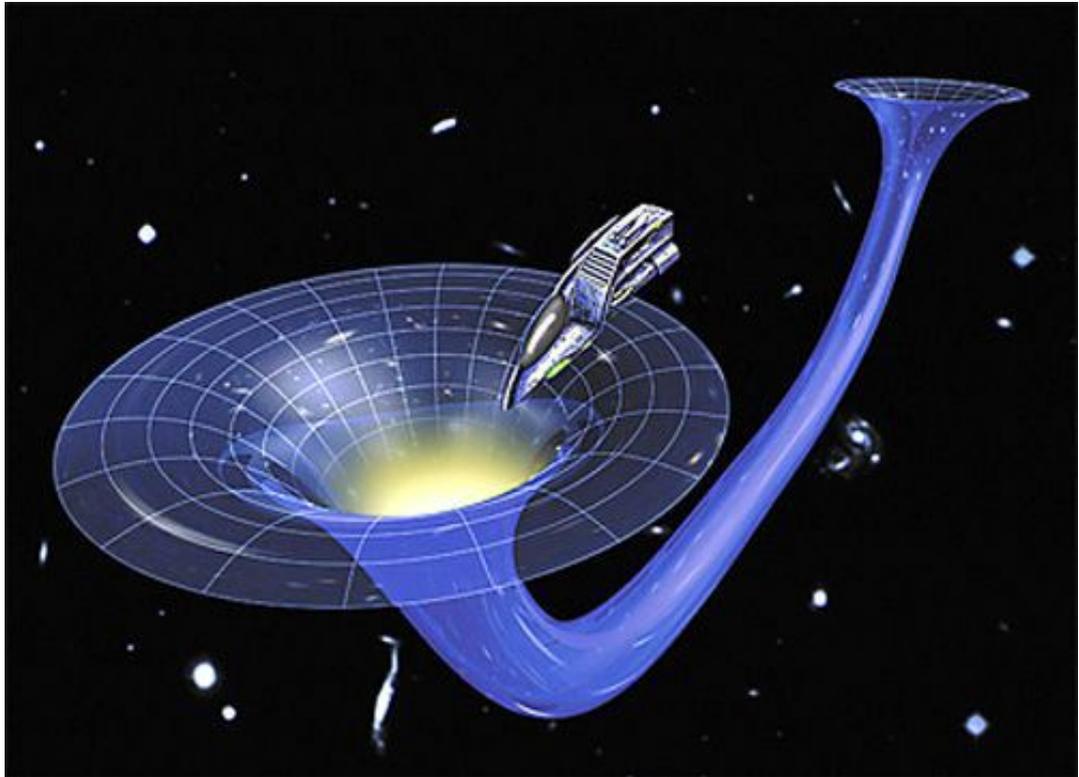
Uma suposta teoria sobre os buracos negros é que se eles estiverem ligados a um buraco branco, podemos viajar grandes distâncias por eles. Como já mencionamos um buraco negro é uma região que surge naturalmente da morte de uma estrela. Sendo que após sua formação ele suga objetos a sua volta. Supostamente o buraco branco cospe o que é sugado.

Figura 47: Buraco negro ligado a um buraco branco



Se o buraco branco existir e se estiver junto de um buraco negro, poderíamos viajar no tempo longas distâncias, pois assim teríamos o chamado buraco de minhoca, bastante famoso ultimamente por aparecer em filmes atuais de super heróis. Na figura acima, a parte amarela representa um buraco negro, na parte azul observamos um buraco branco.

Figura 48: Viagem através de um buraco negro



Na teoria poderíamos viajar por um buraco de minhoca, em dias e talvez em horas, distâncias que levariam bilhões de anos, para serem percorridas. Isso se daria porque a singularidade é onde espaço e o tempo se convergem num único ponto. O tempo chega a parar.

## 4.9 Buraco de minhoca, o problema por trás da teoria

Figura 49: Slide 37



Figura 50: Slide 38

- Um buraco de minhoca surge das equações de Einstein, ou seja, ele tem que ser criado.
- Quando se entra dentro de um buraco negro, ele desaba.
- O que acontece quando furamos uma bolha de sabão? Ela deixa de existir.
- Não existe evidência na teoria de Einstein que isso seja possível. Não sabemos o que acontece com os objetos que entram no buraco negro.

Figura 51: Slide 39

- Vídeo: "Buraco negro fotografado pela primeira vez".
- Os buracos negros são os objetos mais potentes do universo. Eles são capazes de destruir mundos inteiros.
- Os buracos negros brilham na imensidão do cosmo. São capazes de produzir a energia que o sol produz em um ano inteiro em apenas alguns segundos.
- E um dia poderão nos transportar até os cantos mais distantes do universo. Será?

Figura 52: Será que viajar por um buraco de minhoca vai ser possível?



Como já foi apresentado um buraco negro surge naturalmente, quando o combustível que uma estrela queima para continuar a brilhar acaba e ela entra em colapso. Já um buraco de minhoca surge das equações da relatividade de Einstein, ou seja, ele tem que ser criado.

Outro problema é que quando se entra dentro de um buraco negro ele desaba. Peguemos como exemplo uma bolha de sabão. O que acontece quando ela é furada? Ela deixar de existir. Não sabemos o que acontece com os objetos dentro do buraco negro.

Segundo o artigo da Nasa de 20 de Julho de 2016, intitulado “A ciência de Star Trek” no tópico “Viagem interestelar e viagem no tempo” essas são consequências questionáveis de alguns modelos matemáticos para arranjos artificiais extremamente bizarros não testados [9].

Esses modelos imaginários indicam que a teoria da relatividade de Einstein é esticada até seus limites finais. Não existe nenhuma evidência de que a teoria de Einstein seja válida nesses casos teóricos e os arranjos dessas gigantes massas giratórias não ocorrem na natureza.

Portanto, hoje em dia, não podemos falar o que existe dentro de um buraco negro. Podem ser sugados os mais diferentes objetos com as mais diversificadas formas que o que restará delas será somente, a massa total, o estado de rotação e a carga elétrica desses corpos que desaparecem dentro de um buraco negro.

### 4.10 Vídeo: “Buraco negro fotografado pela primeira vez!”

Para fechar a palestra vamos ver o vídeo, “Buraco negro fotografado pela primeira vez!” Após o vídeo faremos algumas observações dele e em seguida vamos recapitular os pontos altos da palestra.

Concluiremos a palestra mencionando que:

- Os buracos negros são os objetos mais potentes do universo. Eles são capazes de destruir mundos inteiros.
- Os buracos negros brilham na imensidão do cosmo. São capazes de produzir a energia que o sol produz em um ano inteiro em apenas alguns segundos.
- E um dia poderão nos transportar até os cantos mais distantes do universo. Será?

## 5 Considerações finais

O problema abordado nesse trabalho referente aos buracos negros desperta a curiosidade de muitos. Perceber como surge um buraco negro e ter a ideia de como calcular a força gravitacional e o tamanho dele nos permite imaginar as descobertas que podemos fazer com a Matemática e a Física.

Analisar como pesquisadores questionaram a lei da gravitação universal de Newton e como grandes corpos se comportavam diante dessa lei, os conduziram a construir várias hipóteses até chegar à formulação da teoria da relatividade exposta por Einstein.

Quando estudiosos conseguiram resolver as equações de campo de Einstein nos possibilitaram conhecer um pouco das possibilidades do universo. Alguns deles incompreendidos no seu tempo, mas que tiveram seu reconhecimento anos mais tarde.

Chandrasekhar ao calcular o limite para uma estrela virar uma super nova ou um buraco negro, juntamente com Schwarzschild que forneceu a primeira solução exata para as equações de campo que contribuíram muito para a pesquisa sobre buracos negros.

Penrose e Hawking que publicaram um modelo teórico da singularidade, provaram o modelo matemático da relatividade geral e argumentaram que se estrelas ou galáxias entrassem em colapso sob o peso da própria gravidade formariam buracos negros.

Penrose formulou uma desigualdade que fez valer a conjectura da censura Cósmica que admite uma formulação unicamente de dados iniciais. Essa desigualdade, embora para alguns simples, resistiu a investida de teóricos por cerca de 20 anos.

A desigualdade de Penrose foi resolvida independentemente por Huisken-Ilmanen no caso de variedade riemanniana tridimensional com curvatura escalar positiva, na presença de um único buraco negro.

O objetivo desse trabalho foi reunir material de pesquisa como vídeos, figuras e teóricos para por fim fazer uma palestra. Para mim a palestra é importante pois, por meio dela compartilhamos conhecimentos. E desse modo despertamos a curiosidade e habilidades que todos temos.

Podemos transformar o que ouvimos numa palestra em motivação na forma de ação. Assim, uma fala adaptada sempre é de grande ajuda para os ouvintes, ao direcionarmos ela para contemplar os anseios e desafios dos ouvintes. Ao reunir essas informações me senti muito motivado a continuar a pesquisar, pois muitas foram as minhas descobertas.

De nada adianta termos conhecimento e habilidade se não formos adeptos a mudanças e nos adaptarmos a realidade dos nossos alunos. Para fazer a diferença em uma comunidade é essencial replanejar, analisar a fundo nossas metas e alvos como

professores.

Acredito que a escola deve ser reestruturada e o professor deve aprender a lidar com as diferenças dos alunos como simples diferenças para que eles não sejam excluídos. Embora o processo de ensino aprendizagem nem sempre ocorra de forma divertida, temos que buscar metodologias para envolver os alunos e tentar ajudá-los a gostarem do que estudam.

Reunir material para essa palestra sobre buracos negros e suas conjecturas me ajudou a ver que a Matemática não se baseia apenas nos cálculos que fazemos no dia a dia escolar. Tão pouco a Física se resume as leis de Newton que estudamos no ensino fundamental e médio.

Ao analisar as figuras desse trabalho, percebi a necessidade de estudar cada vez mais. Tenho certeza que o desejo de conhecer e questionar as coisas a nossa volta, também será a vontade dos meus ouvintes após a palestra.

O caso mais geral de como os cientistas questionaram as leis de Newton, que foi discutido neste trabalho tem como fundamento mostrar tudo o que ganhamos com as questões abordadas, sendo muito delas resolvidas por alguns pesquisadores em épocas futuras.

É claro que esse trabalho quase não entrou no exito dos cálculos matemáticos, pois conforme já mencionei o meu objetivo é criar material de palestra que motive os ouvintes a ação de estudar ainda mais a matemática.

Com esse material de palestra estou convencido que ajudarei meus ouvintes a estudar e ansiar conhecer o desconhecido. Compartilhando informações com outros a sua volta vão se esforçar em obter respostas a importantes questões.

Com essa pesquisa percebi descobri metodologias que possibilitam que muitos vejam como o estudo dos buracos negros e a conjectura da censura cósmica traz benefícios para o estudo da matemática e da física.

Ao fazer palestra usando figuras, vídeos e a história de teóricos que ajudaram a desvendar um pouco dos mistérios acerca dos buracos negros, creio que irei encorajar meus ouvintes a pesquisar e aprender mais.

## 6 Referências bibliográficas

### Referências

- [1] [APS NEWS] ,[2009], [*APS News*], [2009 novembro de 2009 (volume 18, número 10)]/Disponível em <https://www.aps.org/publications/apsnews/200911/physicshistory.cfm>. Acesso em: 28 de Maio 2019.
- [2] FREIRE, P., *Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa / Paulo Freire*, 48ª ed. - Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2014.
- [3] FREIRE, P., *Pedagogia do oprimido / Paulo Freire*, 54. ed. rev. e atual. - Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2013.
- [4] HAWKING, S. W., *Buracos Negros: palestras da BBC Reith Lectures / Stephen Hawking; tradução Cássio de Arantes Leite*. 1. ed. - Rio de Janeiro: Intrínseca, 2017.
- [5] HAWKING, S. W., *O universo numa casca de noz / Stephen Hawking; tradução Cássio de Arantes Leite*. 1. ed. - Rio de Janeiro: Intrínseca, 2016.  
<http://www.narit.or.th/en/files/2009JAHHvol12/2009JAHH...12...90M.pdf>
- [6] [JOURNAL OF ASTRONOMICAL HISTORY AND HERITAGE, 12(2), 90 - 96], [2009], *Michell, Laplace and the origem of the Black Hole concept*/Disponível em <http://www.narit.or.th/en/files/2009JAHHvol12/2009JAHH...12...90M.pdf>. Acesso em 28 de Maio de 2019.
- [7] LOZÓRIO, W. M., *Desigualdades de Penrose e um teorema da massa positiva para buracos negros carregados*, Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências. Fortaleza, 2014. Disponível em <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/8069>. Acesso em: 29 de Maio 2019.
- [8] [NASA], [2013], [*Nasa*], [2013]/Disponível em [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/chandra/multimedia/black-hole-SagittariusA.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/black-hole-SagittariusA.html). Acesso em: 16 Abril 2019.
- [9] [NASA], [2016], [*Nasa*], [2016]/Disponível em [https://www.nasa.gov/topics/technology/features/star\\_trek.html](https://www.nasa.gov/topics/technology/features/star_trek.html). Acesso em: 23 Abril 2019.

- [10] [NASA], [2016], [Nasa], [2016]/Disponível em <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/gravitational-wave-kicks-monster-black-hole-out-of-galactic-core>. Acesso em: 23 Abril 2019.
- [11] [NASA], [2019], [Nasa, [2019]/Disponível em [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/chandra/news/black-hole-image-makes-history](https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/news/black-hole-image-makes-history). Acesso em: 16 Abril 2019.
- [12] SILVA, M. R., *O Teorema da Massa Positiva e a Desigualdade de Penrose para gráficos*, Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Matemática. Maceió, 2013. Disponível em [http://www.ufal.edu.br/unidadeacademica/im/pt-br/pos-graduacao/matematica/defesas/mestrado/2013/53a-defesa-de-dissertacao-de-mestrado-marcos-ranieri/dissertacao/at\\_download/file](http://www.ufal.edu.br/unidadeacademica/im/pt-br/pos-graduacao/matematica/defesas/mestrado/2013/53a-defesa-de-dissertacao-de-mestrado-marcos-ranieri/dissertacao/at_download/file). Acesso em: 23 de Abril 2019.
- [13] WALD, R. M., *General Relativity*, The University of Chicago Press, 1984.