

UNICAMP

Buracos negros: dos primeiros estudos à imagem de M87

Laura Penedos
Mestra em Física - UNICAMP

Faculdade de Tecnologia - UNICAMP
3/10/2019

SUMÁRIO

- ⊙ Introdução ou Pré-Requisitos
- ⊙ Relatividade Geral
- ⊙ O que é um Buraco Negro?
- ⊙ Termodinâmica de Buracos Negros
- ⊙ Temos um problema!?!?
- ⊙ Pesquisas atuais

SUMÁRIO

- ⊙ Introdução ou Pré-Requisitos
- ⊙ Relatividade Geral
- ⊙ O que é um Buraco Negro?
- ⊙ Termodinâmica de Buracos Negros
- ⊙ Temos um problema!?!?
- ⊙ Pesquisas atuais

PRÉ-REQUISITOS

- ⦿ O que é Relatividade?

PRÉ-REQUISITOS

⦿ O que é Relatividade?

Teoria Galileana – Mecânica Clássica

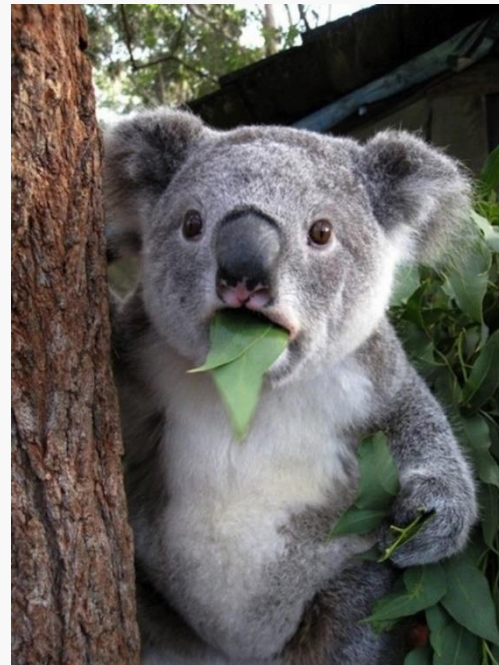
- Composição de velocidades – Soma ou subtração.
- Tempo absoluto.
- Velocidades acima da luz???

PRÉ-REQUISITOS

⦿ O que é Relatividade?

Teoria Galileana – Mecânica Clássica

- Composição de velocidades – Soma ou subtração.
- Tempo absoluto.
- Velocidades acima da luz???



PRÉ-REQUISITOS

- ⦿ O que é Relatividade?

Teoria da Relatividade Restrita

PRÉ-REQUISITOS

⦿ O que é Relatividade?

Teoria da Relatividade Restrita

Postulados:

- Princípio da Relatividade: Referenciais Inerciais;
- Princípio da constância da velocidade da luz (em referenciais inerciais) -> A luz independe da fonte de emissão.

PRÉ-REQUISITOS

- ⦿ O que é Relatividade?

Teoria da Relatividade Restrita

- O tempo deixa de ser absoluto



Espaço-Tempo

$$t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$
$$x' = \gamma (x - vt)$$

PRÉ-REQUISITOS

⦿ O que é Relatividade?

Teoria da Relatividade Restrita

- E a geometria deste novo espaço deixa de ser euclidiana, indo para uma geometria hiperbólica.
- Isso muda as características (“fórmulas”) de calcular distâncias e como descrevemos o espaço.

PRÉ-REQUISITOS

- ⦿ O que é Métrica?

- Representação formal do quadrado da norma da diferencial do vetor posição. Basicamente é a fórmula para se calcular distância entre dois pontos.

$$ds^2 = |d\vec{r}|^2 = d\vec{r} \cdot d\vec{r}$$

- Tendo a métrica, eu sei as características geométricas daquele espaço.

PRÉ-REQUISITOS

- O que é Métrica?

- Exemplo:

Geometria Plana – Coordenadas Cartesianas – Espaço Euclidiano.

$$\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$$

$$d\vec{r} = dx\hat{x} + dy\hat{y} + dz\hat{z} \rightarrow ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

PRÉ-REQUISITOS

- O que é Métrica?

- Exemplo:

Geometria Plana – Coordenadas Cartesianas – Espaço Euclidiano.

$$\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$$

$$d\vec{r} = dx\hat{x} + dy\hat{y} + dz\hat{z} \rightarrow ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

Em representação matricial (tensorial):

$$ds^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx^2 \\ dy^2 \\ dz^2 \end{bmatrix}$$

PRÉ-REQUISITOS

- O que é Métrica?

- Exemplo:

Tensor métrico na geometria plana euclidiana:

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

As coordenadas em si não tem mais importância – O tensor métrico tem toda a descrição do espaço.

PRÉ-REQUISITOS

- O que é Métrica?

- Exemplo:

Tensor métrico na geometria plana euclidiana:

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

As coordenadas em si não tem mais importância – O tensor métrico tem toda a descrição do espaço.

- Exercício: Encontrar $g_{\mu\nu}$ para coordenadas cilíndricas e esféricas.

PRÉ-REQUISITOS

- ⦿ O que é Métrica?

- Exemplo:

Agora, considerando o tempo na relatividade galileana, com vetor posição é $\vec{r} = (t, x, y, z)$, a métrica passa ser 4x4 e fica:

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

PRÉ-REQUISITOS

- ⦿ O que é Métrica?
 - Métrica no Espaço-tempo da Relatividade de Einstein – Geometria não euclidiana.


PRÉ-REQUISITOS

○ O que é Métrica?

- Métrica no Espaço-tempo da Relatividade de Einstein – Geometria não euclidiana.

As transformações $\vec{X}' \rightarrow \vec{X}$ na teoria da Relatividade de Einstein fazem com que a regra de produto interno para gerar a métrica precise ser alterada. Tem-se uma nova álgebra.

Seja $\vec{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$. O produto interno

$$\vec{X} \cdot \vec{X} \equiv -x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$$


PRÉ-REQUISITOS

- O que é Métrica?

- Métrica no Espaço-tempo da Relatividade de Einstein – Geometria não euclidiana.

As transformações $\vec{X}' \rightarrow \vec{X}$ na teoria da Relatividade de Einstein fazem com que a regra de produto interno para gerar a métrica precise ser alterada. Tem-se uma nova álgebra.

Seja $\vec{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$. O produto interno

$$\vec{X} \cdot \vec{X} \equiv -x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$$



PRÉ-REQUISITOS

- O que é Métrica?

- Métrica no Espaço-tempo da Relatividade de Einstein – Geometria não euclidiana.

Assim, no espaço-tempo plano da Relatividade Restrita – Espaço-tempo de Minkowski: ($c=1$)

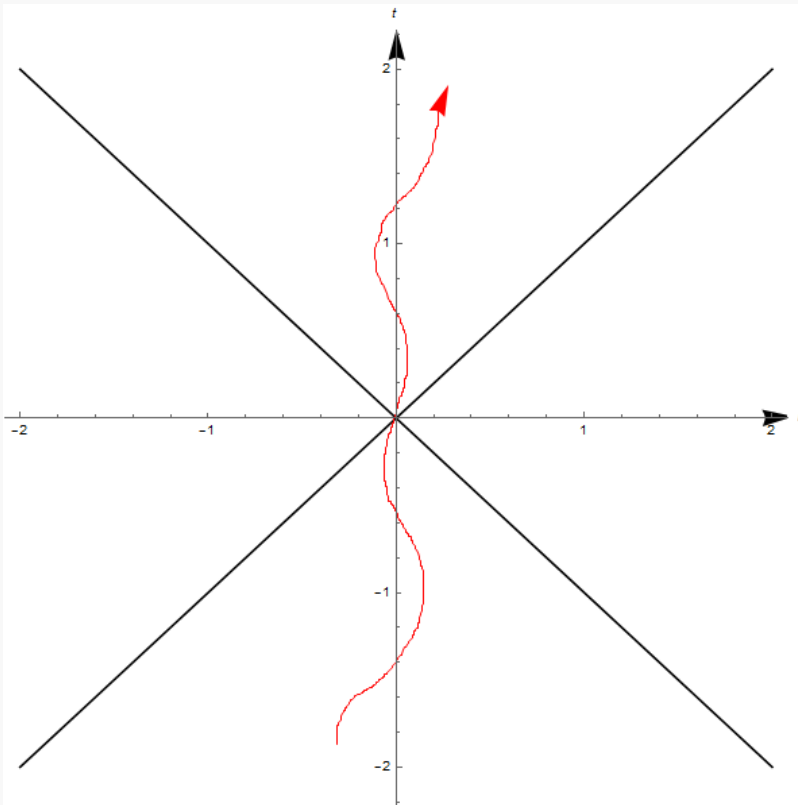
$$\vec{r} = t\hat{t} + x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$$

$$ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \rightarrow g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

PRÉ-REQUISITOS

⦿ O que é cone de luz? $ds^2 = 0$

■ No espaço-tempo plano de Minkowski



- Vai definir as trajetórias possíveis de qualquer corpo naquele espaço – Relação Causal. Já que nenhum corpo pode percorrer velocidades acima da luz.

SUMÁRIO

- ⊙ Introdução ou Pré-Requisitos
- ⊙ Relatividade Geral
- ⊙ O que é um Buraco Negro?
- ⊙ Termodinâmica de Buracos Negros
- ⊙ Temos um problema!?!?
- ⊙ Pesquisas atuais

RELATIVIDADE GERAL

- Conceitos da Relatividade Restrita expandidos para aceleração e gravidade.
 - Princípio da Equivalência: Massa inercial = Massa gravitacional – Aceleração independe do material!
- A gravidade não é mais enxergada como força (Ex: Força Peso) e sim uma consequência da curvatura do espaço-tempo. Se existe um movimento acelerado, então, o espaço-tempo é curvo!
- A geometria do espaço-tempo (métrica) se relaciona com o conteúdo de matéria e energia através das Equações de Campo da Relatividade Geral.

RELATIVIDADE GERAL

- ◉ Equações de Campo da Relatividade Geral:

$$G_{\mu\nu} = T_{\mu\nu},$$

Em que $G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}$. Estão expressas para $c = G = 1$.

RELATIVIDADE GERAL

- ◉ Equações de Campo da Relatividade Geral:

$$G_{\mu\nu} = T_{\mu\nu},$$

Em que $G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}$. Estão expressas para $c = G = 1$.

Uma dada geometria é “sustentada” por determinado conteúdo de matéria.

- Interpretação: As condições de conservação de energia limitam, por exemplo, as geometrias passíveis de existir na natureza. Por isso que não existe buraco de minhoca!!!
- Lembre-se que geometrias curvas -> Existência de “força”

SUMÁRIO

- ⊙ Introdução ou Pré-Requisitos
- ⊙ Relatividade Geral
- ⊙ O que é um Buraco Negro?
- ⊙ Termodinâmica de Buracos Negros
- ⊙ Temos um problema!?!?
- ⊙ Pesquisas atuais

O QUE É BURACO NEGRO?

Buraco negro é a solução mais simples possível das Equações de Campo da Relatividade Geral!!!

O QUE É BURACO NEGRO?

Buraco negro é a solução mais simples possível das Equações de Campo da Relatividade Geral!!!



O QUE É BURACO NEGRO?

- ◉ Buraco negro é gerado para o vácuo, ou seja, $T_{\mu\nu} = 0$ e com uma massa pontual.
 - Schwarzschild: Massa no repouso – Solução análoga ao Potencial gravitacional Newtoniano: $\Phi = \frac{-GM}{r}$.
 - Solução Estática.
 - Kerr: Massa com momento angular.
 - Solução Estacionária
 - Kerr-Newmann: Massa com momento angular e carregada.

A. Saa. "Cem anos de buracos negros: o centenário da Solução de Schwarzschild". *Rev. Bras. Ens. Física*. 2016.

O QUE É BURACO NEGRO?

- ◉ Métrica encontrada por K. Schwarzschild:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

Em que $r_s = 2M = \frac{2GM}{c^2}$ é o raio de Schwarzschild. Essa métrica foi a primeira solução das Equações de Einstein um ano após serem publicadas

- Recomendo pesquisar sobre a história de vida de Karl Schwarzschild e como se deu essa descoberta.

A. Saa. "Cem anos de buracos negros: o centenário da Solução de Schwarzschild". *Rev. Bras. Ens. Física*. 2016.

O QUE É BURACO NEGRO?

- ⦿ Por que a solução de Schwarzschild é um buraco negro?
 - A Singularidade e o Horizonte de Eventos.

A métrica nas coordenadas de Schwarzschild possui duas singularidades: $r = 0$ e $r = r_s$.

Como as interpretamos?

O QUE É BURACO NEGRO?

- ◉ Por que a solução de Schwarzschild é um buraco negro?
 - A Singularidade e o Horizonte de Eventos.

A métrica nas coordenadas de Schwarzschild possui duas singularidades: $r = 0$ e $r = r_s$.

Como as interpretamos?

- ◉ Transformação de Coordenadas de Eddington-Finkelstein $(t, r) \rightarrow (v, r)$.

$$v = t + r + 2M \log \left(\left| \frac{r}{2M} - 1 \right| \right)$$

O QUE É BURACO NEGRO?

- ◉ Por que a solução de Schwarzschild é um buraco negro?
 - A Singularidade e o Horizonte de Eventos.

Assim, a métrica assume uma nova forma:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dv^2 + 2drdv + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

Perceba que eliminou-se a singularidade $r = r_s$, restando apenas $r = 0$ como ponto singular.

- ◉ Roger Penrose define $r = 0$ como “a verdadeira singularidade do espaço tempo”.

R. Penrose. “Gravitational Collapse. The role of General Relativity”. *Rev. del Nuovo Cim. Esp.* I, 257. 1969.

O QUE É BURACO NEGRO?

- ◉ Por que a solução de Schwarzschild é um buraco negro?
 - A Singularidade e o Horizonte de Eventos.

Como enxergar graficamente? Cones de Luz: $ds^2 = 0$.

Voltando à métrica de Schwarzschild:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

- ◉ $r > r_s$. Para $r \gg r_s$, tem-se o cone do espaço de Minkowski.
- ◉ $r < r_s$.

O QUE É BURACO NEGRO?

- Por que a solução de Schwarzschild é um buraco negro?
 - A Singularidade e o Horizonte de Eventos.

Como enxergar graficamente? Cones de Luz: $ds^2 = 0$.

Voltando à métrica de Schwarzschild:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

- $r > r_s$. Para $r \gg r_s$, tem-se o cone do espaço de Minkowski.

- $r < r_s$. \Rightarrow Muda a assinatura da métrica! \Rightarrow O cone vira. A direção de movimento passa a ser para decrescimento de r .

O QUE É BURACO NEGRO?

- ◉ Por que a solução de Schwarzschild é um buraco negro?
 - A Singularidade e o Horizonte de Eventos.

Como enxergar graficamente? Cones de Luz: $ds^2 = 0$.

Na métrica de Eddington-Finkelstein (θ cte e ϕ cte).

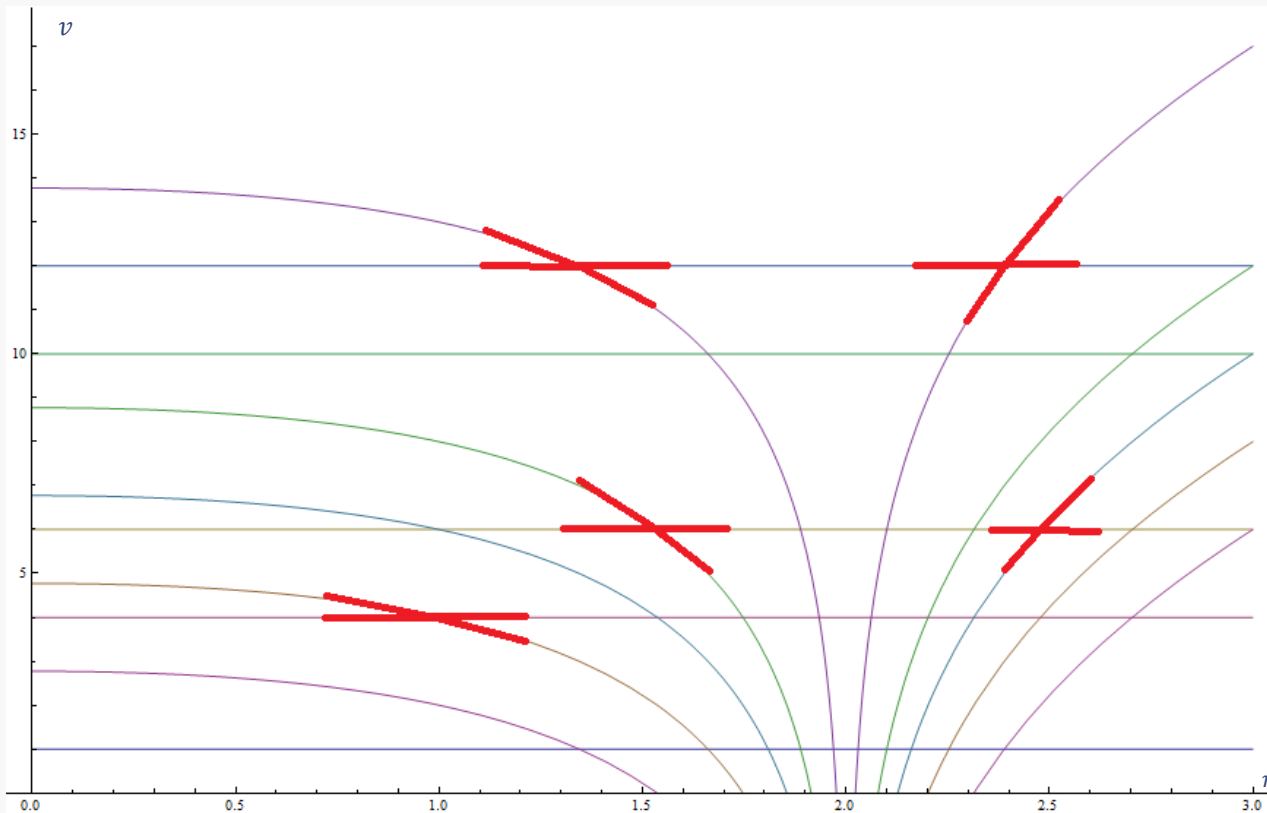
$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dv^2 + 2drdv = 0$$

$$v(r) = 2r_s \log|r - r_s| + 2r + D \text{ e } v = \text{cte.}$$

Onde D é a constante de integração.

O QUE É BURACO NEGRO?

- Por que a solução de Schwarzschild é um buraco negro?
 - A Singularidade e o Horizonte de Eventos.



Esboço das curvas $v = \text{constante}$ e $v(r) = 4M \log |r - 2M| + 2r + D$ para $r < 2M$. No esboço, escolhemos $M = 1$ por questões de simplificação.

O QUE É BURACO NEGRO?

- ◉ Por que a solução de Schwarzschild é um buraco negro?
 - A Singularidade e o Horizonte de Eventos.
 - $r = r_s$: Horizonte de eventos;
 - $r < r_s$: O cone de luz gira -> Sem exceção, todas as trajetórias possíveis de qualquer corpo são em direção à singularidade $r = 0$. Não existe modo causal de sair dessa situação, nem mesmo a própria luz.
 - De modo que um observador externo verá “literalmente um “buraco negro””.

R. Penrose. “Gravitational Collapse. The role of General Relativity”. *Rev. del Nuovo Cim. Esp. I*, 257. 1969.

SUMÁRIO

- ⦿ Introdução ou Pré-Requisitos
- ⦿ Relatividade Geral
- ⦿ O que é um Buraco Negro?
- ⦿ Termodinâmica de Buracos Negros
- ⦿ Temos um problema!?!?
- ⦿ Pesquisas atuais

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma analogia!

- Características dos Buracos Negros:

- ◉ Conjectura de Carter-Israel: Qualquer buraco negro formado via colapso decai assintoticamente no tempo para um estado de equilíbrio estacionário. Quaisquer variações dinâmicas desaparecem por radiação gravitacional.

Lembremos que a solução estacionária é a do buraco negro de Kerr e Kerr-Newman – Que justamente são os buracos negros medidos pelas ondas gravitacionais!

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma analogia!

- Características dos Buracos Negros:

- ◉ Conjectura de Carter-Israel: Qualquer buraco negro formado via colapso decai assintoticamente no tempo para um estado de equilíbrio estacionário e as suas dinâmicas desaparecem por completo.

Lembremos que a solução estática é a de Kerr e Kerr-Newman – Que já foram testados e medidos pelas ondas gravitacionais.



B Carter. "Rep. of Black Hole Equilibrium States Part II". *Gen. Rel. and Grav.* V. 2, 3. 2010.

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma analogia!

- Características dos Buracos Negros:

- ◉ Teorema da Área (Hawking Area Theorem): A área do horizonte de eventos nunca decresce com o tempo. Se existe uma colisão de dois buracos negros, então, o gerado terá sempre uma área maior que a soma dos dois primeiros.

$$\delta A \geq 0$$

S. Hawking. "Gravitational Radiation from colliding black holes". *Phys. Rev. Lett.* V. 26, pp. 1344. 1971.

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma analogia!

- Características dos Buracos Negros:

- ◉ Massa Irredutível (M_{ir}): Não existe nenhum processo, seja reversível ou irreversível, que decresça a quantidade chamada Massa Irredutível. Essa quantidade é proporcional à raiz quadrada da área do buraco negro de Kerr.

$$M^2 = M_{ir}^2 + \frac{L^2}{4M_{ir}^2}$$

J. Bekenstein. "Black Holes and entropy". *Phys. Rev. D*. V. 7, pp. 2333-2346. 1973.

D. Chistodoulou. "Reversible and irreversible transformations in Black hole physics". *Phys. Rev. Lett.* V. 25, pp. 1596-1597. 1970.

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

◉ Uma analogia!

- J. Bekenstein (1973): Se existe uma termodinâmica de buracos negros, a área do buraco negro deve estar intimamente ligada com entropia!!

J. Bekenstein. "Black Holes and entropy". *Phys. Rev. D*. V. 7, pp. 2333-2346. 1973.

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma analogia!

- Bardeen, Carter e Hawking (1973): as 4 Leis da Mecânica (Termodinâmica) de Buracos Negros.

- ◉ 1ª Lei: Equação de Estado: Lei Generalizada de Smarr

$$\delta M = \frac{\kappa}{8\pi} \delta A + \Omega_{BH} \delta J_{BH} + \text{termos de matéria}$$

Relembre da Termodinâmica Clássica:

$$dE = TdS - pdV + \mu dN$$

J. M. Bardeen, B. Carter, S. Hawking. "The Four Laws of black hole mechanics". *Commun. Math. Phys.* V. 31, pp. 1596-1597. 1973.

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma analogia!

- Bardeen, Carter e Hawking (1973): as 4 Leis da Mecânica (Termodinâmica) de Buracos Negros.

- ◉ 2ª Lei: Lei da Área de Hawking: A área do horizonte de eventos do buraco negro não decresce com o tempo.

$$\delta A \geq 0$$

J. M. Bardeen, B. Carter, S. Hawking. "The Four Laws of black hole mechanics". *Commun. Math. Phys.* V. 31, pp. 1596-1597. 1973.

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma analogia!

- Bardeen, Carter e Hawking (1973): as 4 Leis da Mecânica (Termodinâmica) de Buracos Negros.
 - ◉ Lei Zero: A curvatura κ de um buraco negro estacionário (Kerr) é constante ao longo do horizonte de eventos.
 - ◉ 3ª Lei: É impossível reduzir a curvatura a zero por uma sequência adiabática (infinita de passos).

J. M. Bardeen, B. Carter, S. Hawking. "The Four Laws of black hole mechanics". *Commun. Math. Phys.* V. 31, pp. 1596-1597. 1973.

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

◉ Uma análise formal: Modelo Semiclássico

- Hawking (1975): Teoria Quântica de Campos no Espaço-tempo dos buracos negros.

- ◉ Buracos negros criam partículas devido às características de seus campos gravitacionais. É possível demonstrar isso com uma análise detalhada utilizando os operadores de criação e aniquilação da Mecânica Quântica neste espaço-tempo.

- ◉ Partículas emitidas:
$$N_{\omega lm} = \frac{1}{e^{8\pi M\omega} - 1} \propto \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_B T}} - 1}$$

S. Hawking. "Particle Creation by Black Holes". *Commun. Math. Phys.* V. 43, pp. 199-220. 1975.

L. H. Ford. "Quantum field theory in curved space-time". In: *Proceedings 9th Particles and Fields Jorge Andre Swieca Summer School, Brazil.* 1997. <<https://alice.cern.ch/format/showfull?sysnb=0254646>>

S. Hawking. "Breakdown of predictability in gravitational collapse". *Phys. Rev. D.* V. 14, 10. 1976.

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma análise formal: Modelo Semiclássico
 - Hawking (1975): Teoria Quântica de Campos no Espaço-tempo dos buracos negros.

- ◉ Nas unidades naturais $\hbar = k_B = 1 \Rightarrow T_H = \frac{1}{8\pi M}$.
- ◉ Ou seja, buraco negro é um objeto quente que cria partículas das quais as emitidas seguem um espectro de radiação de corpo negro – Radiação Hawking!!!
- ◉ Portanto, buraco negro de fato tem uma entropia intrínseca!!

S. Hawking. “Particle Creation by Black Holes”. *Commun. Math. Phys.* V. 43, pp. 199-220. 1975.

L. H. Ford. “Quantum field theory in curved space-time”. In: *Proceedings 9th Particles and Fields Jorge Andre Swieca Summer School, Brazil*. 1997. <<https://alice.cern.ch/format/showfull?sysnb=0254646>>

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma análise formal: Modelo Semiclássico
 - Hawking (1975): Teoria Quântica de Campos no Espaço-tempo dos buracos negros.
 - ◉ As partículas que não são emitidas, ou seja, são criadas e vão para o interior do buraco negro, deixam o estado do buraco negro para estados cada vez mais baixos de energia. Ou seja, ele tem um tempo de vida!!



S. Hawking. "Particle Creation by Black Holes". *Commun. Math. Phys.* V. 43, pp. 199-220. 1975.

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma análise formal: Modelo Semiclássico
 - Hawking (1975): Teoria Quântica de Campos no Espaço-tempo dos buracos negros.

Consideração:

- ◉ Temos um problema resolvido com essa descoberta!! \o/

O fato do buraco negro engolir matéria a todo momento NÃO diminui classicamente a entropia total do universo! Não viola a 2ª Lei da Termodinâmica Clássica.

Pois ele tem uma entropia intrínseca proporcional à área.

$$S = S_{ord} + S_{BH} \geq 0$$

S. Hawking. "Particle Creation by Black Holes". *Commun. Math. Phys.* V. 43, pp. 199-220. 1975.

TERMODINÂMICA DE BURACOS NEGROS

- ◉ Uma análise formal: Modelo Semiclássico
 - Hawking (1975): Teoria Quântica de Campos no Espaço-tempo dos buracos negros.

Consideração:

- ◉ Temos um problema resolvido

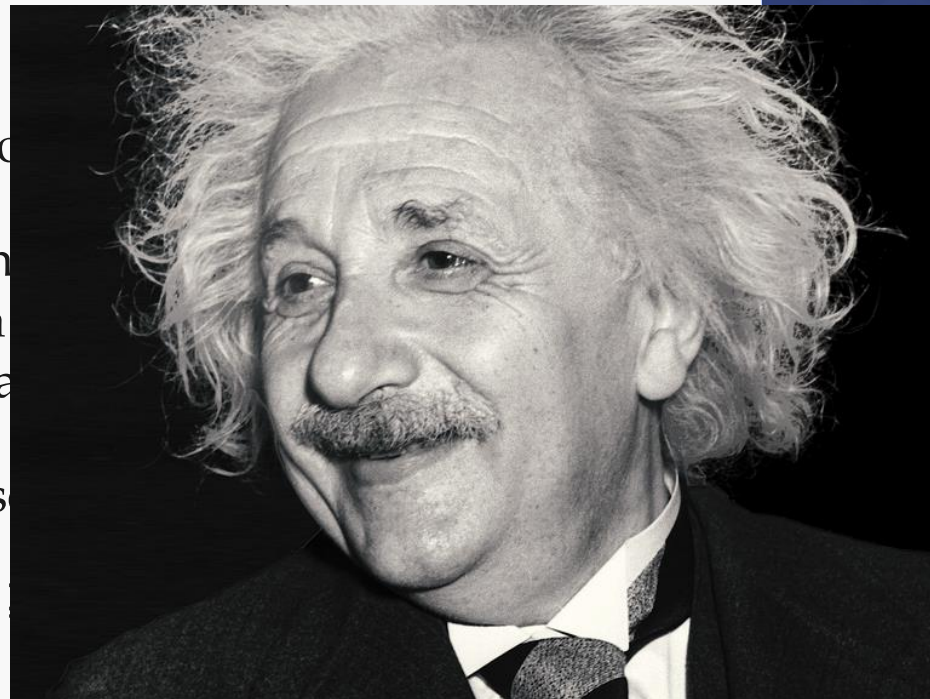
O fato de que a mecânica clássica não consegue explicar a entropia

titio Einstein agradece!!

da mecânica Clássica

pois ele tem uma entropia intrínseca

$$S = S_{ord} + S_{BH}$$



S. Hawking. "Particle Creation by Black Holes". *Commun. Math. Phys.* V. 43, pp. 199-220. 1975.

SUMÁRIO

- ⊙ Introdução ou Pré-Requisitos
- ⊙ Relatividade Geral
- ⊙ O que é um Buraco Negro?
- ⊙ Termodinâmica de Buracos Negros
- ⊙ Temos um problema!?!?
- ⊙ Pesquisas atuais

TEMOS UM PROBLEMA!?!?

- ◉ Sim! Temos um problemão!!
 - O fato da emissão de partículas ser de espectro térmico implica que ao longo de toda sua existência, o buraco negro gerará estados finais para o exterior de máxima entropia – Quantidade de informação infinitesimalmente pequena.
 - Entretanto, o que gerou um buraco negro via colapso foi um objeto com “informação completa”.

S. Hawking. “Breakdown of predictability in gravitational collapse”. *Phys. Rev. D*. V. 14, 10. 1975.

TEMOS UM PROBLEMA!?!?

- ◉ Sim! Temos um problemão!!
 - Ou seja, precisaria de um tempo infinito para o buraco negro emitir toda a quantidade de informação que o gerou (A informação completa).

S. Hawking. "Breakdown of predictability in gravitational collapse". *Phys. Rev. D*. V. 14, 10. 1975.

TEMOS UM PROBLEMA!?!?

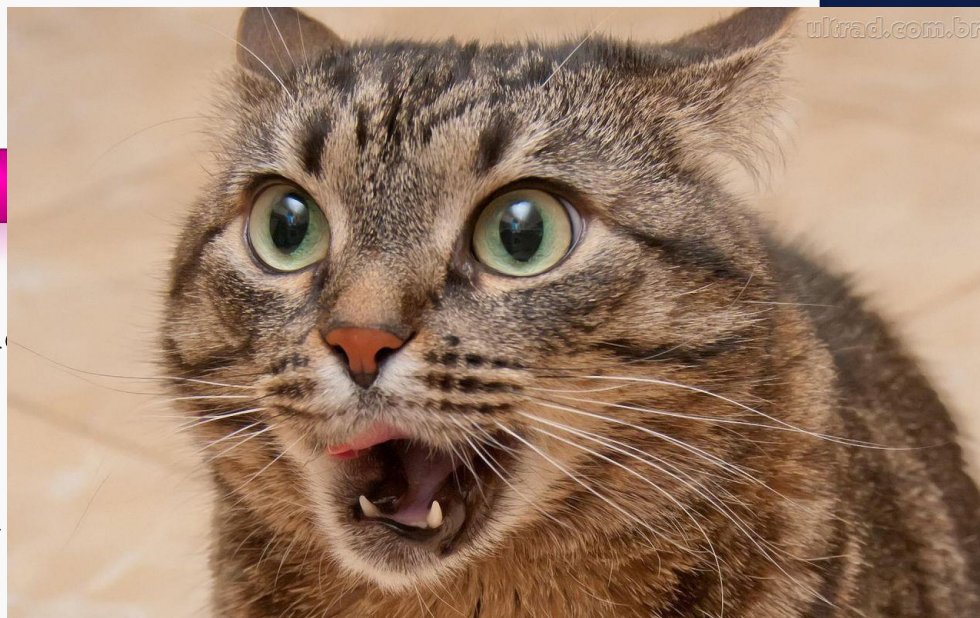
- ◉ Sim! Temos um problemão!!
 - Ou seja, precisaria de um tempo infinito para o buraco negro emitir toda a quantidade de informação que o gerou (A informação completa).
 - Porém, o buraco negro, conforme comentamos, não tem tempo finito de existência?!?!

S. Hawking. "Breakdown of predictability in gravitational collapse". *Phys. Rev. D*. V. 14, 10. 1975.

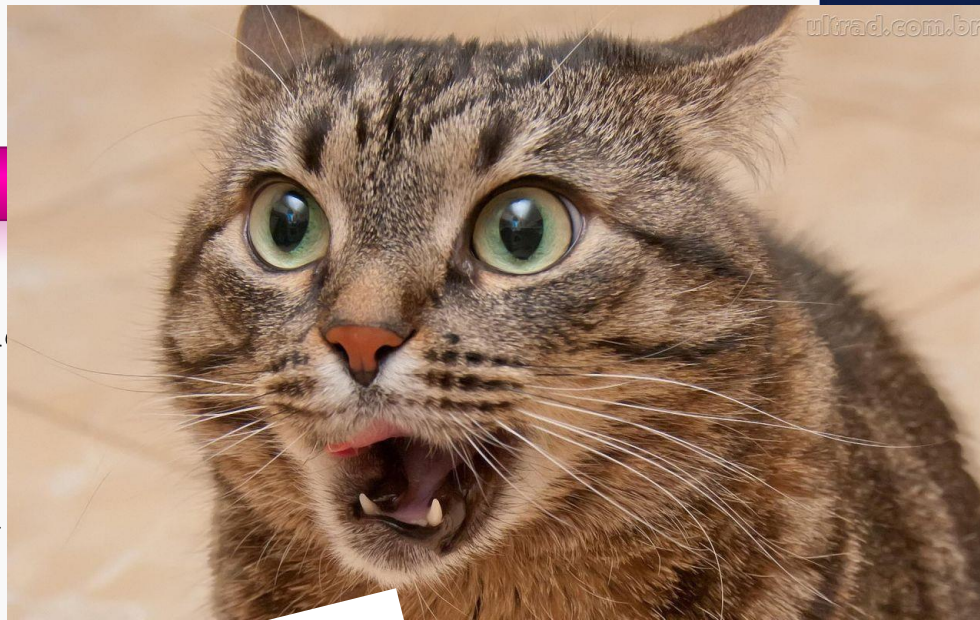
TEMOS UM PROBLEMA

◉ Sim! Temos um problema.

- Ou seja, precisaria de um buraco negro emitir toda a informação que o gerou (A informação completa).
- Porém, o buraco negro, conforme comentamos, não tem tempo finito de existência?!?!



gravitational collapse". *Phys. Rev. D*. V. 14, 10. 1975.



TEMOS UM PROBLEMA

◉ Sim! Temos um problema

- Ou seja, precisaria de um buraco negro emitir toda a informação que o gerou (A informação contém

Paradoxo de Informação do Buraco Negro

- Porém, como comentamos, não teríamos a existência?!?!



gravitational collapse". *Phys. Rev. D. V. 14, 10. 1975.*

SUMÁRIO

- ⊙ Introdução ou Pré-Requisitos
- ⊙ Relatividade Geral
- ⊙ O que é um Buraco Negro?
- ⊙ Termodinâmica de Buracos Negros
- ⊙ Temos um problema!?!?
- ⊙ Pesquisas atuais

REINTERPRETAÇÃO DO PARADOXO E SOLUÇÕES

- ◉ Os estudos dos irmãos Erik e Herman Verlinde
 - Uma nova descrição utilizando apenas espectro discreto e ainda com apenas dois valores -> Qubit.
 - Visualizar o problema apenas do ponto de vista de Teoria da Informação. Propicia melhor interpretação sem os cálculos enormes da Teoria Quântica de Campos.
 - Passa-se a questionar e tentar descrever como é esse estado interno do buraco negro.

E. Verlinde, H. Verlinde. "Black Hole Entanglement and Quantum Error Correction". 1211.6913. 2012.

E. Verlinde, H. Verlinde. "Black Hole Information as Topological Qubits". 1306.0516. 2013.

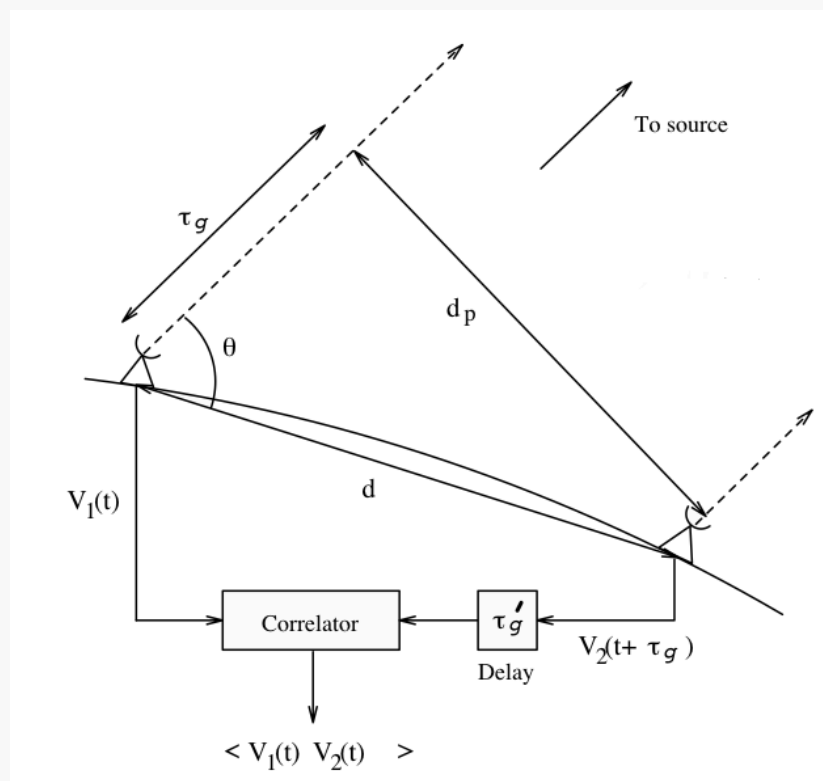
M87 E EHT

- ⦿ Acho que depois de todos esses slides até agora, não temos dúvidas que existem buracos negros. São objetos simples e interessantes ao mesmo tempo. E que gerou um problema em aberto na Física! Como, então, detectá-los? Como poder mostrar às pessoas uma imagem deles?
- ⦿ E ainda, a Relatividade Geral está correta?

M87 E EHT

◉ Aspectos técnicos:

- Very Large Interferometry e Correlação

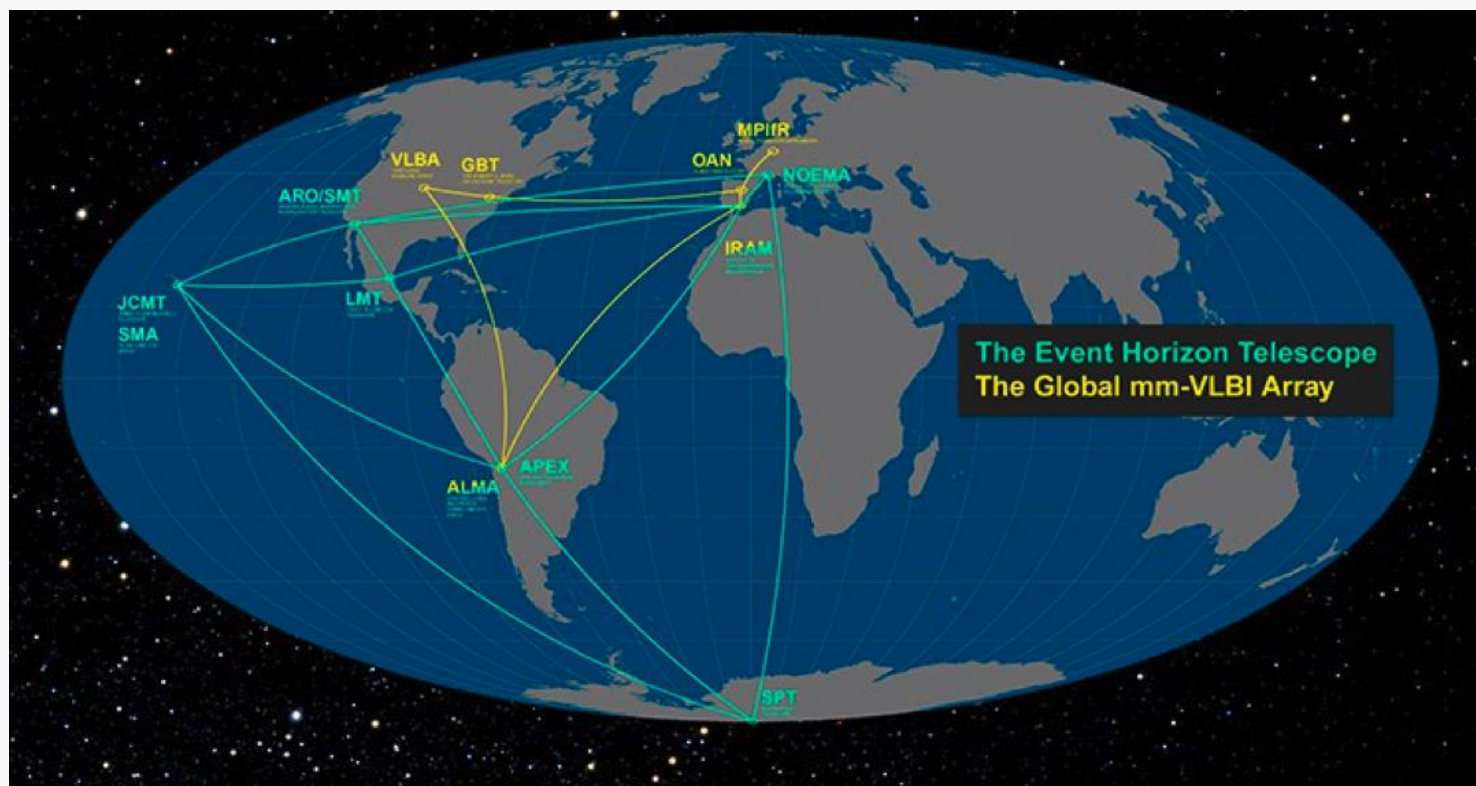


Event Horizon Telescope. <<https://eventhorizontelescope.org/science>>.

M87 E EHT

◉ Aspectos técnicos:

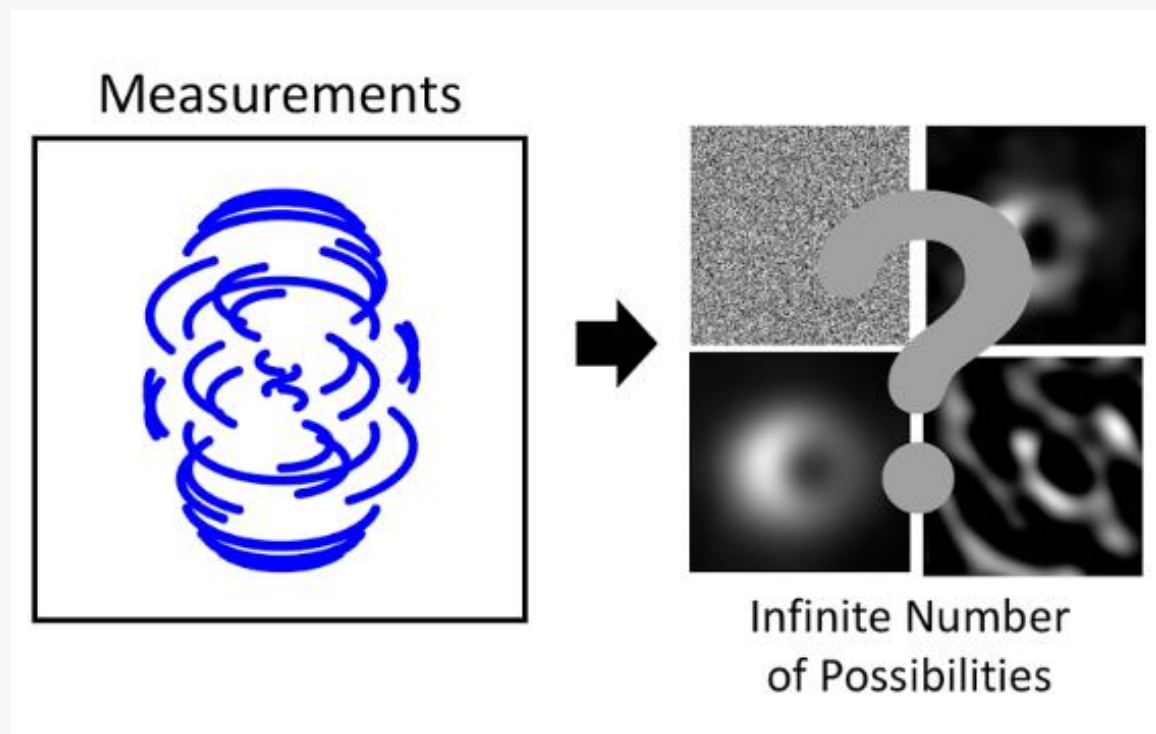
- Very Large Interferometry e Correlação



Event Horizon Telescope. <<https://eventhorizontelescope.org/science>>.

M87 E EHT

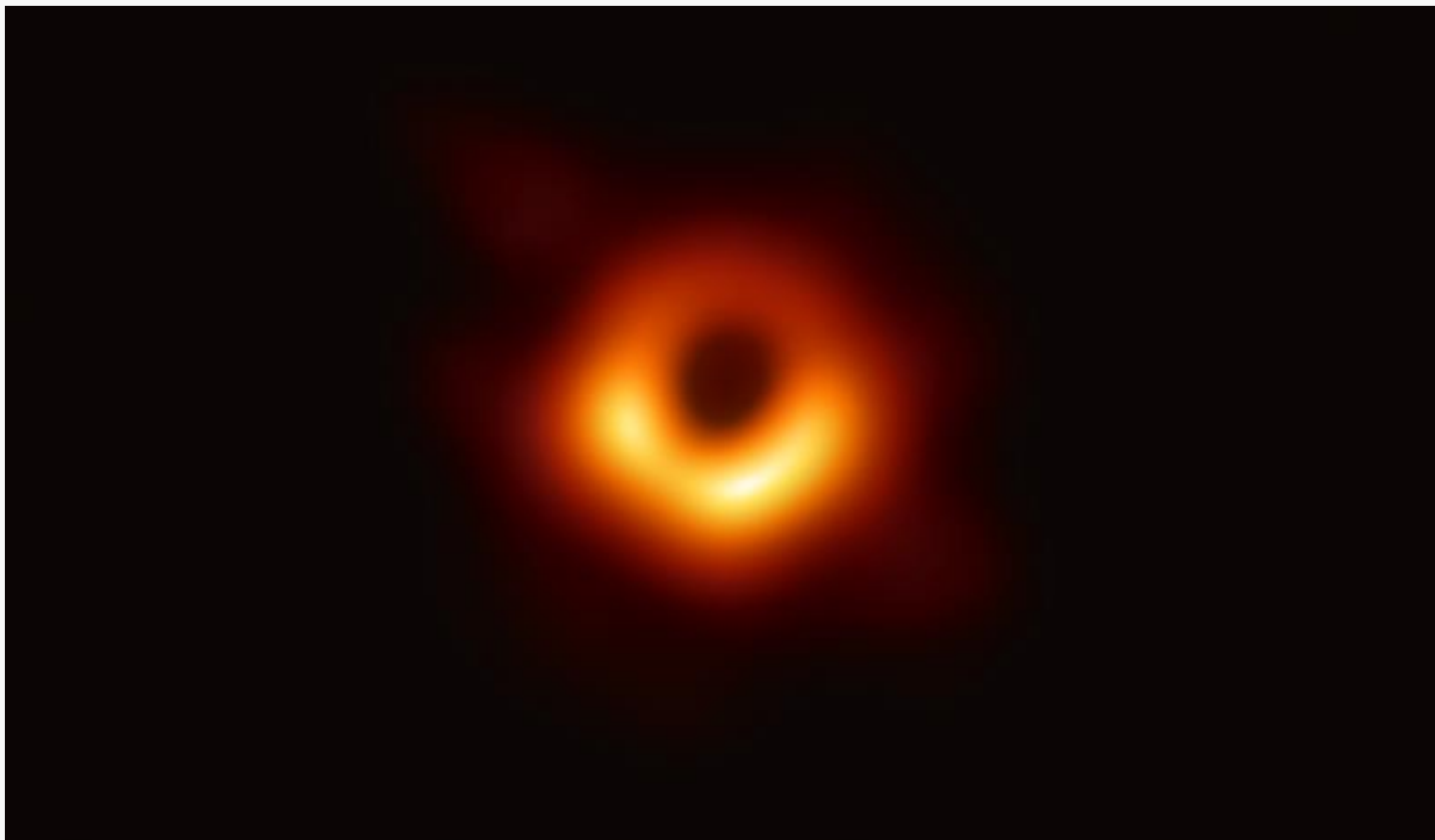
- ◉ Aspectos de análise
 - Não é uma foto e sim uma reconstrução - Não é única.



Event Horizon Telescope. <<https://eventhorizontelescope.org/science>>.

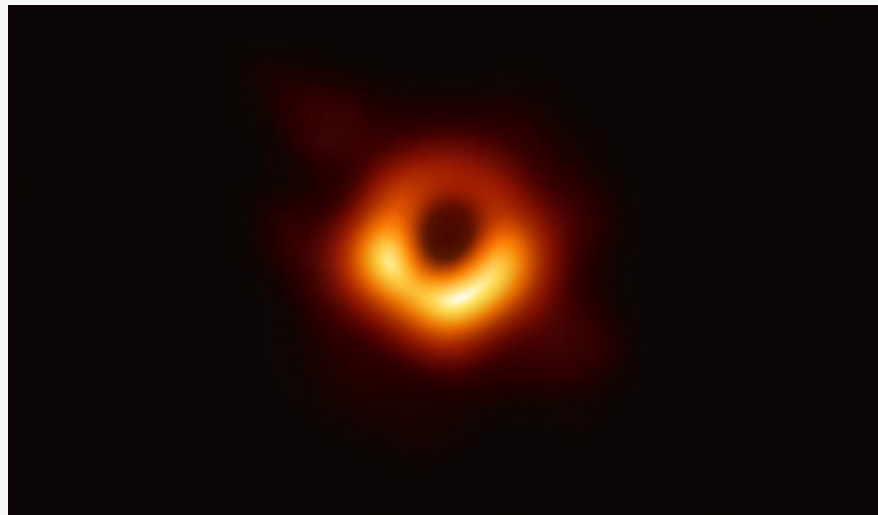
EHT Collab. "First M87 Event Horizon Telescope results: Part IV". *Astrophys. J. Lett.* 875:L4. pp. 52. 2019.

M87 E EHT



Event Horizon Telescope. <<https://eventhorizontelescope.org/science>>.

EHT Collab. "First M87 Event Horizon Telescope results: Part IV". *Astrophys. J. Lett.* 875:L4, pp. 52. 2019.



MUITO OBRIGADA!!

lpenedos@ifi.unicamp.br

