

O Prêmio Nobel de Física de 2020:
iluminando o que é impossível de iluminar

COLMEA - 2020

Nelson Pinto Neto

*Coordenação de Cosmologia, Astrofísica,
e Interações Fundamentais*

do

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

The Nobel Prize in Physics 2020



© Nobel Media. Ill. Niklas
Elmehed.
Roger Penrose
Prize share: 1/2



© Nobel Media. Ill. Niklas
Elmehed.
Reinhard Genzel
Prize share: 1/4



© Nobel Media. Ill. Niklas
Elmehed.
Andrea Ghez
Prize share: 1/4



The Nobel Prize in Physics 2020 was divided, one half awarded to Roger Penrose "for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity", the other half jointly to Reinhard Genzel and Andrea Ghez "for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy."

De forma menos cautelosa:

“Pela descoberta teórica que buracos negros são objetos astrofísicos comuns no Universo, e que tem um no centro da nossa galáxia”.

OBJETOS ESCUROS

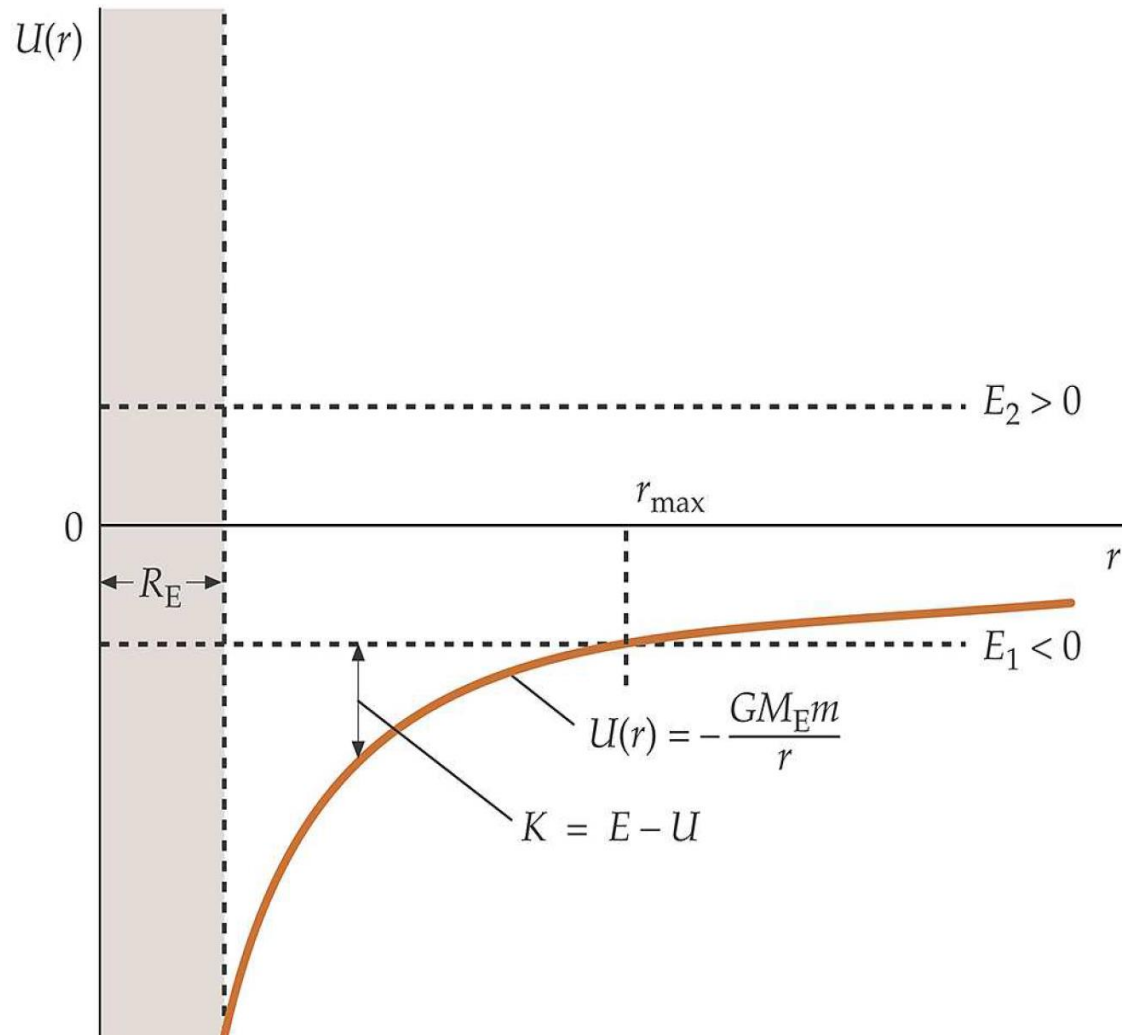
John Michell e Pierre-Simon Laplace conjecturaram sobre sua existência já no século XVIII, usando a Gravitação de Newton!

Velocidade de escape: qual a velocidade com a qual eu devo jogar uma pedra para cima aqui na Terra para que ela não volte nunca mais?

(desprezando o atrito com o ar)

Podemos calcular essa velocidade usando conservação de energia:

Velocidade de escape: quando a energia total é maior que zero (E_2 na figura), o objeto pode escapar da Terra



ENERGIA TOTAL

É a soma da energia de movimento com a energia gravitacional.

$$E = E_c + E_G = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r}$$

$E < 0$, gravidade domina, volta pra Terra,

$E > 0$, energia de movimento domina, escapa da Terra.

$E = 0$: o mínimo para escapar da terra.

Assim:

$$\frac{1}{2}mv_e^2 = \frac{GmM_T}{R_T} \rightarrow v_e^2 = \frac{2GM_T}{R_T}$$
$$v_e = 40.320 \text{ km/h} = 11,2 \text{ km/s}$$

$$v_e^2 = \frac{2GM_T}{R_T}$$

**Michell e Laplace se perguntaram:
qual deveria ser o raio da Terra para
que a luz não pudesse escapar,
formando um objeto escuro?**

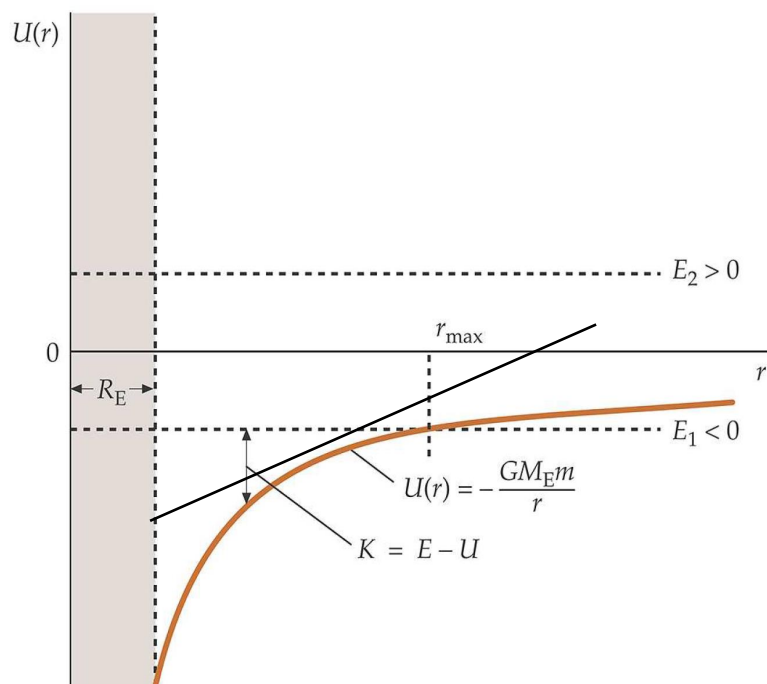
$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

Para a Terra, $R_S \sim 1$ cm!! ($a = 4 \times 10^{15}$ g !)

Para o Sol, $R_S \sim 3$ km.

Na gravitação Newtoniana isto não significa que tenhamos um verdadeiro buraco negro: outros objetos poderiam sair deste imenso campo gravitacional, seja com velocidades maiores que a da luz, ou estando sempre acelerado.

Velocidade de escape: quando a energia total é maior que zero (E_2 na figura), o objeto pode escapar da Terra



Apolo 8

38.938 km/h

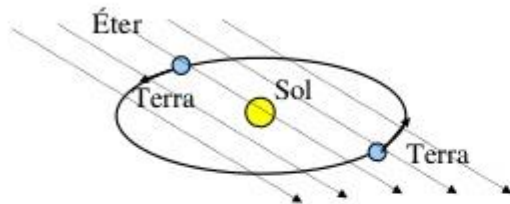
E na Relatividade Geral? Sim, regiões de onde é impossível escapar.

Luz e a Relatividade Restrita: 1905

Velocidade da luz é a mesma em qualquer referencial!!

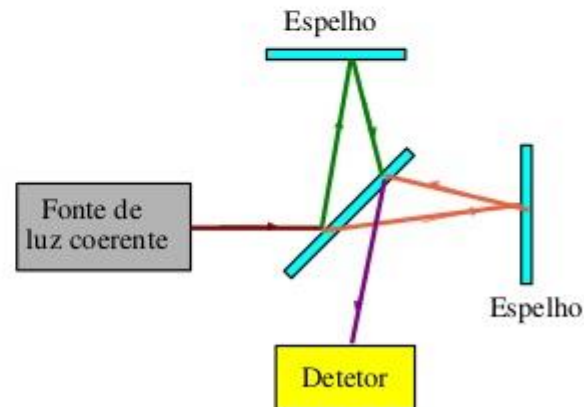
$$c = 300.000 \text{ km/s}$$

A experiência de Michelson-Morley



O propósito das experiências de Michelson (1881) e de Michelson e Morley (1887) foi de medir a variação da velocidade de luz devido a movimento relativo ao éter.

As experiências procuraram medir a interferência entre duas partes de um feixe de luz coerente que tinham propagadas ao longo de caminhos de comprimentos iguais mas em direções diferentes com respeito ao éter. O resultado foi nulo.



Se a velocidade da luz é independente do observador, o tempo é relativo!



Δt_2 – tempo medido pela nave

Δt_1 – tempo medido na terra

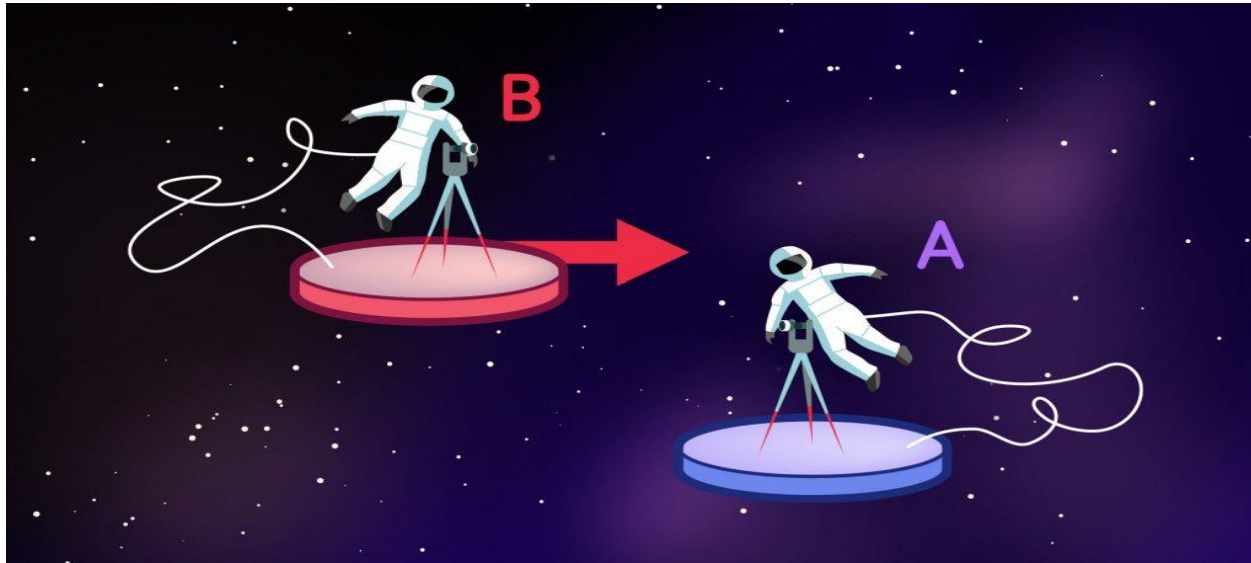
$$\Delta t_2 = \Delta t_1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Joseph Hafele, Richard Keating (1971):
atraso de 0.1 microsegundos



Surge a Relatividade Restrita: Einstein

Mudanças entre referenciais (observadores) inerciais



Tempo relativo (dt), Espaço relativo (dl)

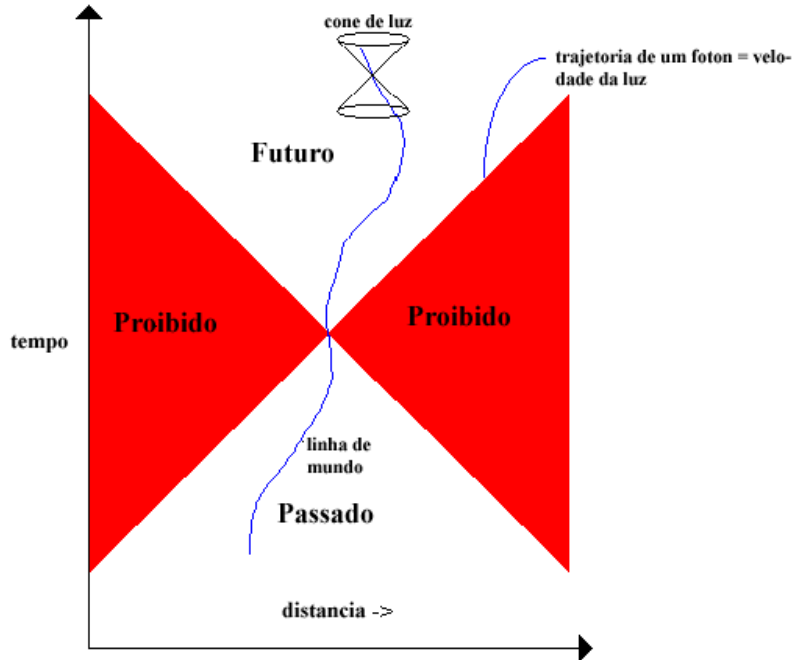
Espaço-Tempo absoluto (ds)

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

$ds^2 = -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)$
(nenhum corpo material pode ter
velocidade maior que a da luz).

É preciso energia infinita para acelerar um
corpo massivo até atingir a velocidade da luz!

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



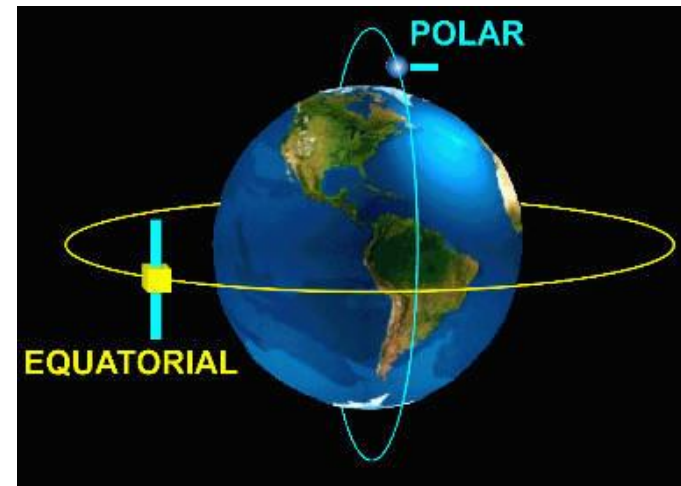
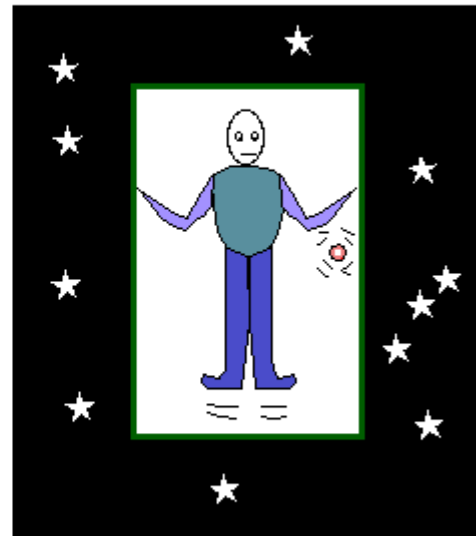
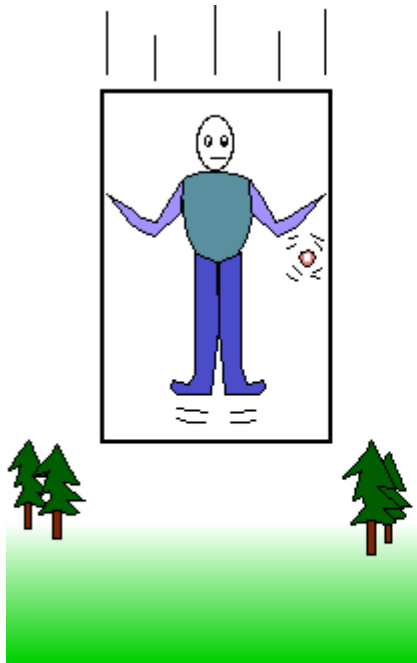
O cone de luz é o que
define a estrutura causal
do espaço-tempo em
relatividade restrita.

Cone de luz absoluto !

Einstein: Como incorporar a gravitação à Relatividade Restrita?

Princípio da Equivalência:

a Relatividade Restrita vale localmente (cones de luz locais)



Num referencial “inercial” a trajetória da partícula livre é curva!!

A RELATIVIDADE GERAL DE EINSTEIN

Comemorou 100 anos em 2015!

A gravidade atua em tudo!

Todas as partículas caem da mesma forma!

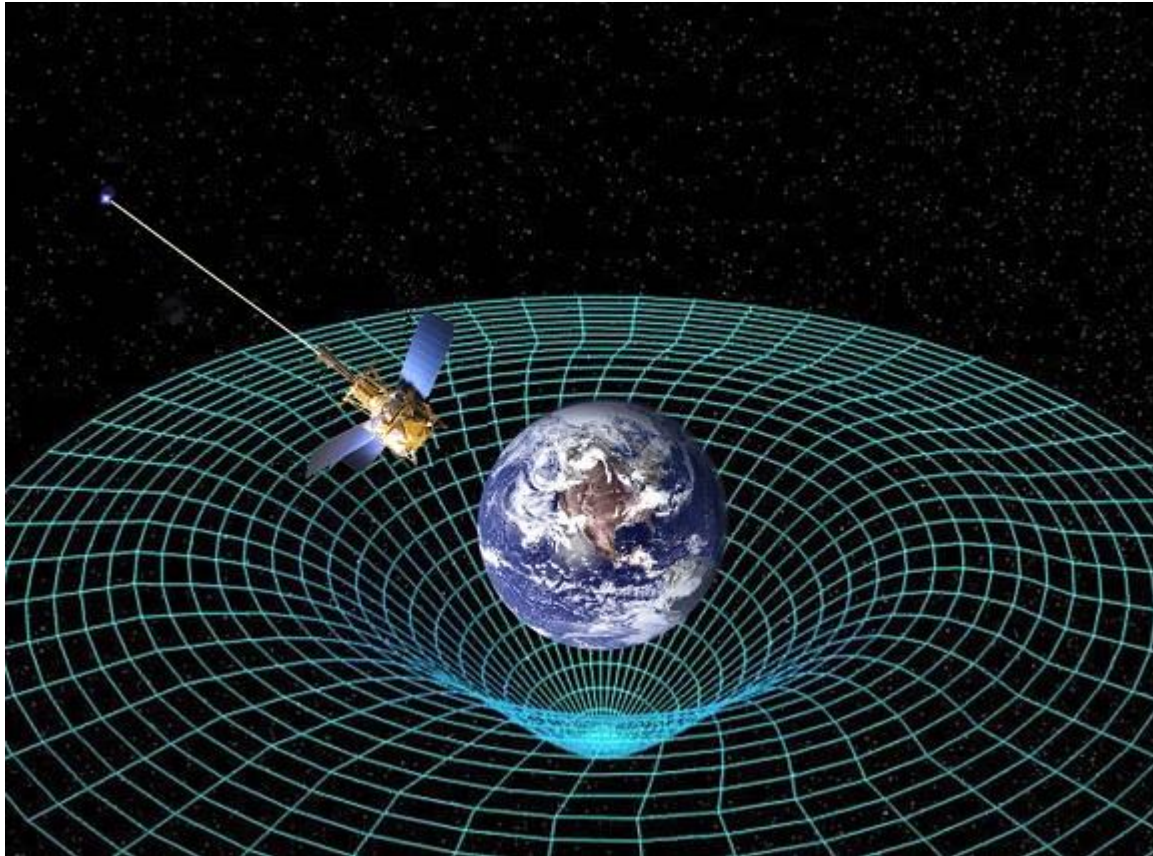
Os corpos livres também seguem todos a mesma trajetória: lei da inércia.

Gravitação não é uma força!

Uma grande massa curva o espaço-tempo!

Os corpos seguem livres mas o espaço-tempo ao seu redor é curvo.

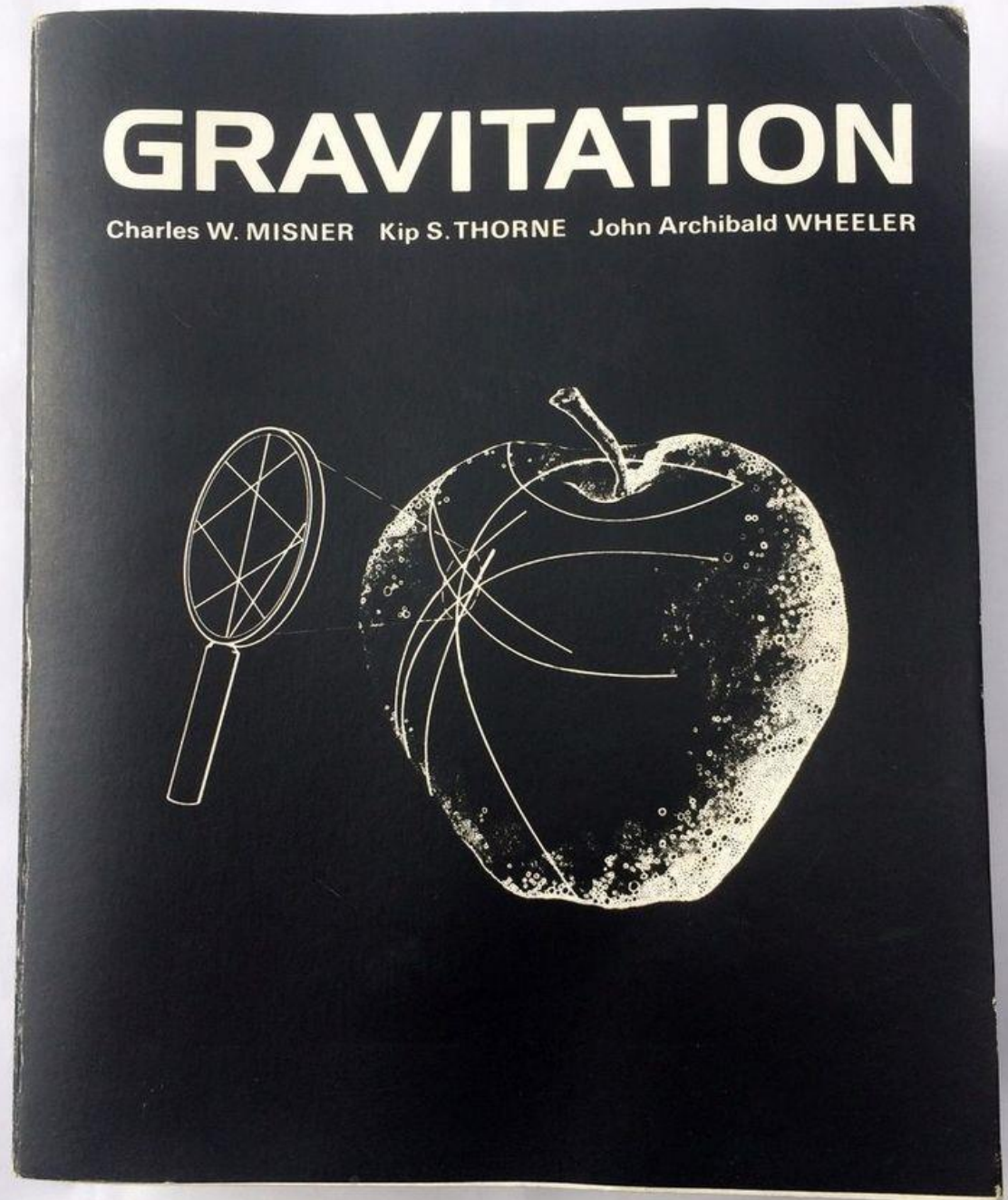
ESPAÇO CURVO EM TORNO DA TERRA



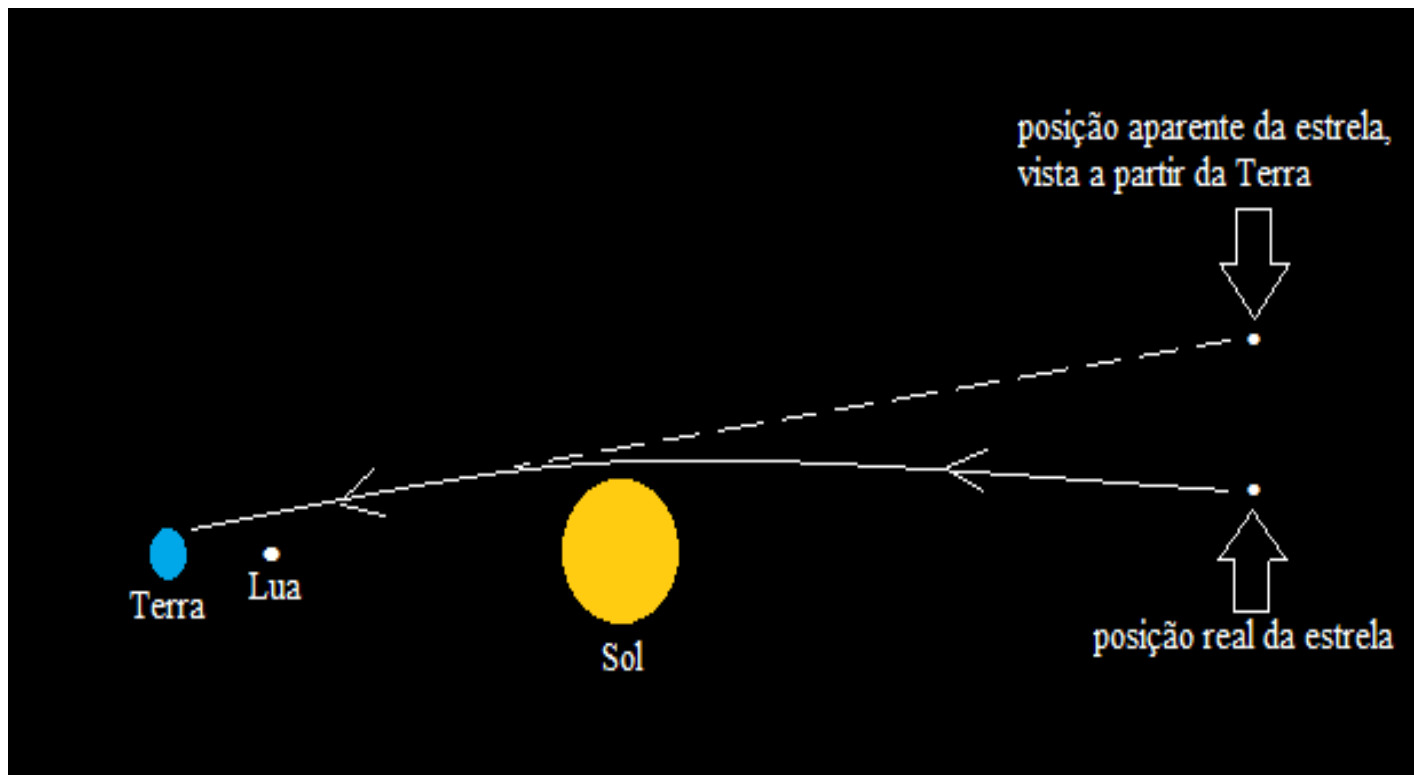
Os relógios e réguas não dependem só do movimento de um corpo, mas também da sua posição em relação a uma grande massa: **GPS**.

Pelo Princípio da Equivalência, numa pequena região (elevador de Einstein) o espaço-tempo parece plano, e vale a Relatividade Restrita.

Cones de luz continuam valendo.



Desvio da luz ao passar pelo Sol



Eclipse em Sobral, Ceará, 1919



Manchete do New York Times!

Einstein ficou famoso!

O problema concebido pelo meu cérebro foi resolvido pelo luminoso céu do Brasil.

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Special Cable to THE NEW YORK TIMES.
New York Times 1857; Nov 10, 1919; ProQuest Historical Newspapers The New York Times (1851 - 2004)
pg. 17

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.



A primeira solução exata das equações exatas, 1915-1916: Karl Schwarzschild (1873-1916)



Schwarzschild's Solution to Einstein's Equations

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

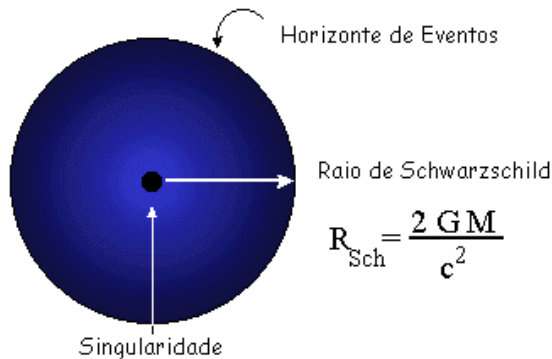
Time Dilation

Radial Length Contraction

Invariant Line Element

Schwarzschild Radius

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$



Duas singularidades: $r=0$ e $r=R_s$

O que acontece nesses pontos?

Em $r=R_s$

Arthur Eddington (1882-1944) David Finkelstein (1884-1929):
1924, removeu singularidade em $r=R_s$ com transformação de coordenadas,

George Lemaître (1894-1966): 1932, não física

Howard Robertson (1903-1961): 1939, observador caindo passa,

Martin Kruskal (1925-2006), George Szekeres (1911-05):
1960, coordenadas de Kruskal-Szekeres, completas.

Subramanian Chandrasekhar (1910-1995):
1931, acima de 1,4 massas solares, estrela de nêutrons

Richard Tolman (1888-1941)

Julian Oppenheimer (1904-1967)-George Volkoff (1914-2000):

Physical Review 55 1939,

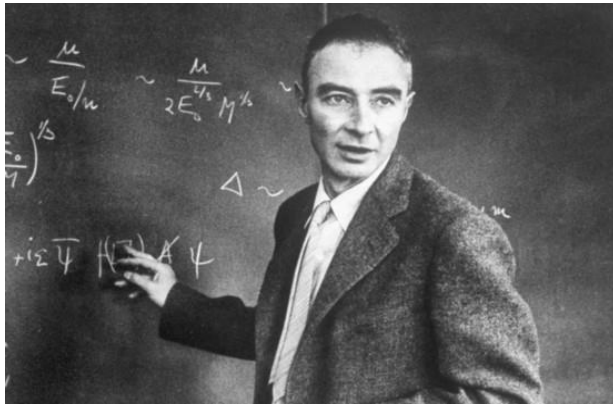
Acima de 0,75 massas solares instável.

Hoje: acima de 2,5 massas solares (contração de objeto com 20 massas solares)

On Continued Gravitational Contraction

J. R. OPPENHEIMER AND H. SNYDER
University of California, Berkeley, California

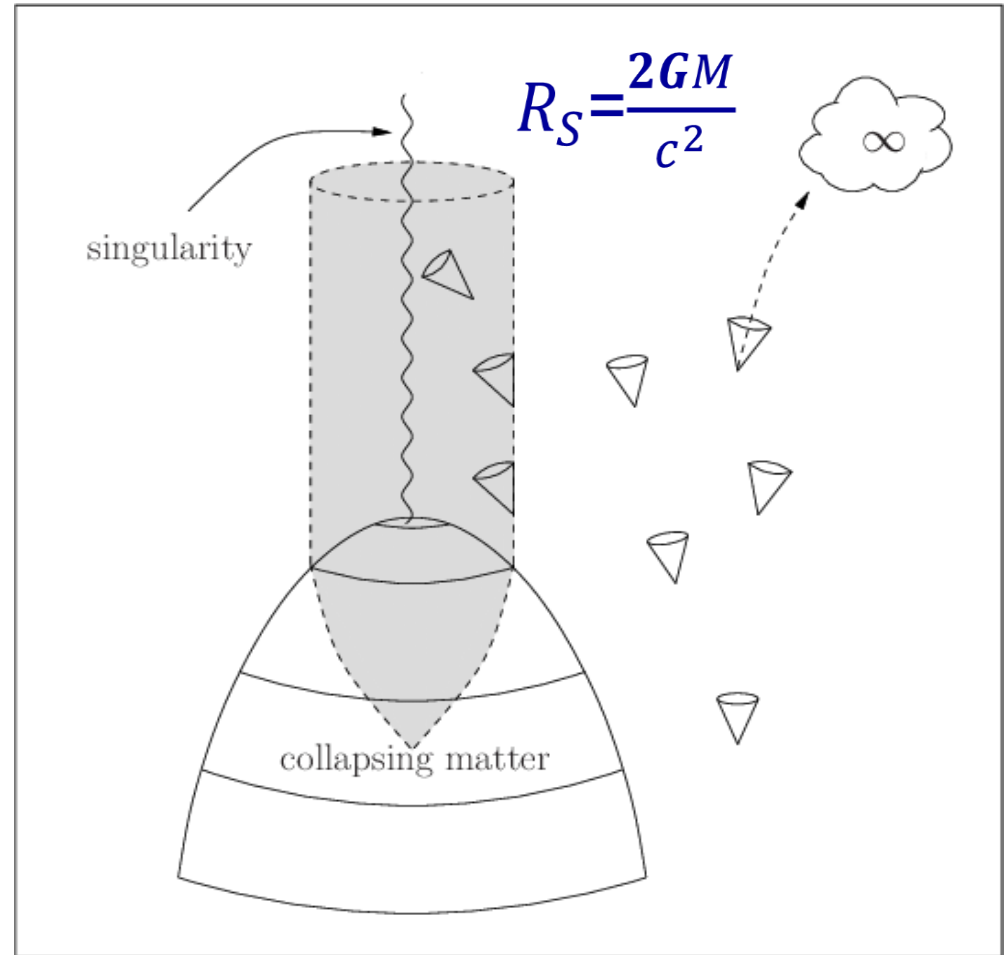
(Received July 10, 1939)



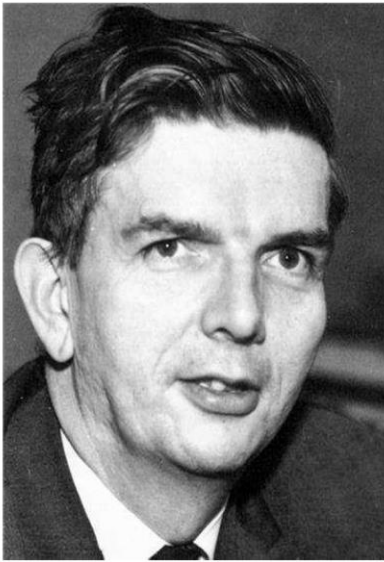
Julius Robert Oppenheimer
 (1904-1967)



Hartland Snyder
 (1913-1962)



Caso muito particular, esfera de matéria sem pressão contraindo.



Robert Dicke (1916-1997): primeiro a usar o termo “black hole”, 1961-1962.

SCIENCE NEWS LETTER for January 18, 1964

ASTRONOMY

“Black Holes” in Space

The heavy densely packed dying stars that speckle space may help determine how matter behaves when enclosed in its own gravitational field—By Ann Ewing

FIG. 3: The physicist Robert Dicke (1916-1997).

John Archibald Wheeler (1911-2008)
grandes contribuições ao entendimento de objetos compactos, principalmente nos aspectos físicos.

Popularizou o nome buraco negro, vindo de Robert Dicke, 1968

(<https://arxiv.org/pdf/1811.06587.pdf>)

Carlos Herdero e José Lemos)

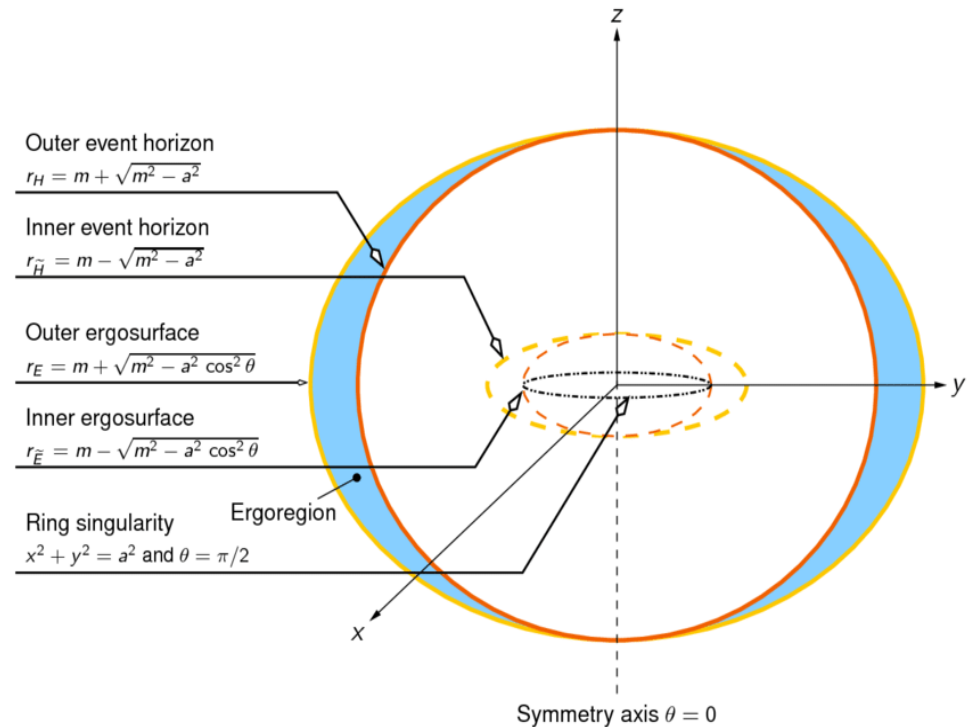


J. A. Wheeler, Our Universe: The known and the unknown, American Scientist **56**, 1 (1968);

The American Scholar **37**, 248 (1968).

Roy Kerr (1934-): 1963, buraco negro girante.

$$ds^2 = -dt^2 + (r^2 + a^2) \sin^2 \theta d\varphi^2 + \frac{2Mr(dt - a \sin^2 \theta d\varphi)^2}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta} + (r^2 + a^2 \cos^2 \theta) \left(d\theta^2 + \frac{dr^2}{r^2 - 2Mr + a^2} \right). \quad (11.1)$$



Penrose: possibilidade de extração de energia na ergo-esfera (1969).

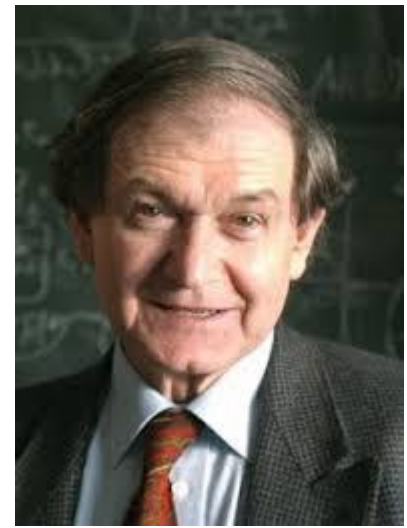
Fenômenos astrofísicos.

ROGER PENROSE (1931-)

Universidade de Oxford

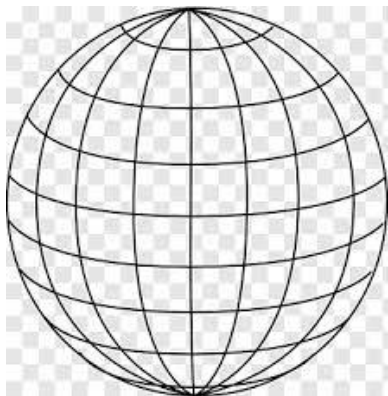
Equações da Relatividade Geral altamente não lineares, muito complexas. Poucas soluções, com simetrias impostas. Liberdade de escolha de coordenadas obscurece a Física.

Será que buracos negros são genéricos?

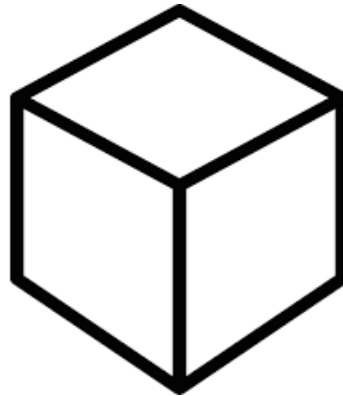


Penrose: matemático que trouxe para a área, a partir de 1960, ferramentas poderosas da matemática.

1) Para estudar as propriedades globais das equações de Einstein, trouxe elementos do campo da matemática chamado Topologia: estuda propriedades globais dos objetos geométricos.



=



≠



2) Como a Relatividade Geral satisfaz o Princípio da Equivalência (localmente está de acordo com a Relatividade Restrita), então sua causalidade está ligada aos cones de luz.

Com essas idéias, chegou ao conceito de superficies aprisionadas: superficies de topologia fechada no espaço vazio circundando a matéria, cujos raios de luz emanando perpendicularmente aos seus pontos são convergentes. Uma vez que as condições de colapso são atingidas (massa limite de objetos compactos, instabilidade), e essas superficies se formam, singularidades envoltas por um horizonte dentro do qual nada escapa são inevitáveis, independentemente de qualquer simetria do colapso, para fluidos com energia positiva.

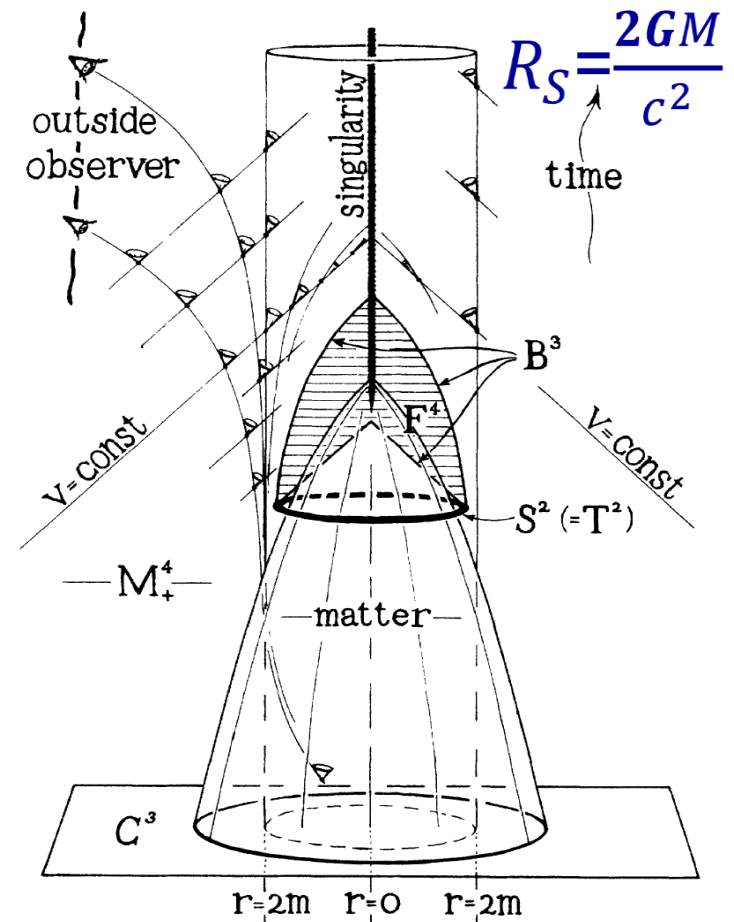


FIG. 1. Spherically symmetrical collapse (one space dimension suppressed). The diagram essentially also serves for the discussion of the asymmetrical case.

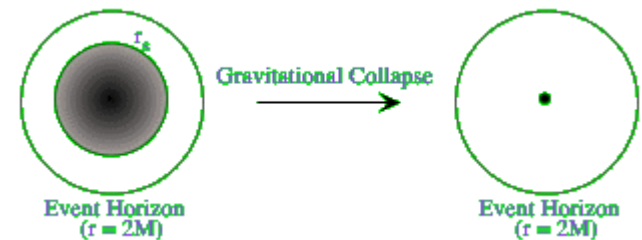
GRAVITATIONAL COLLAPSE AND SPACE-TIME SINGULARITIES

Roger Penrose

Department of Mathematics, Birkbeck College, London, England

(Received 18 December 1964)

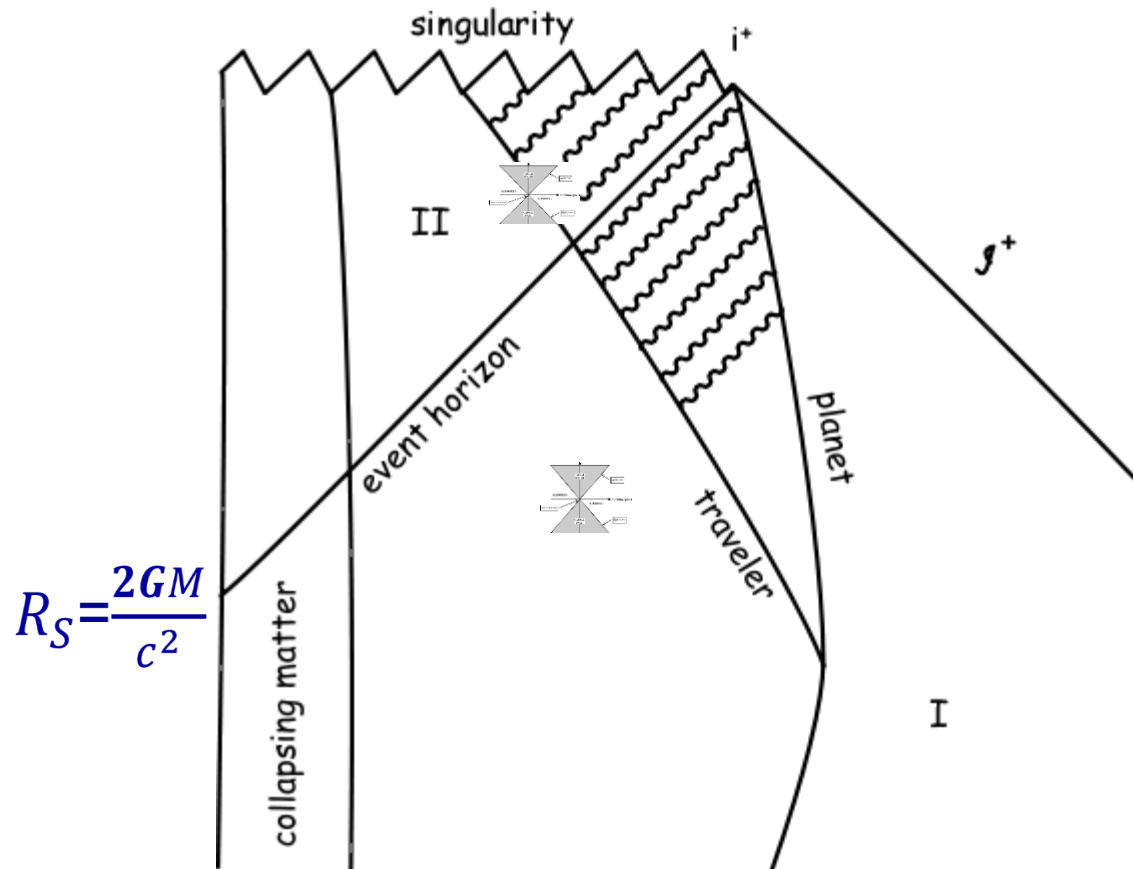
PHYSICAL REVIEW LETTERS



Mesmo o corpo constantemente acelerado não consegue sair depois de passar pela superfície esférica envolvendo a singularidade, chamada horizonte de eventos, cujo raio é R_S .

Diagramas de Carter-Penrose: construções representando soluções das equações de Einstein onde os cones de luz não se curvam e os infinitos são compactados: $g \rightarrow \Omega g$

Brandon Carter (1942-)



Forças de maré: diferença entre a força gravitacional em dois pontos diferentes do seu corpo: $F_m \sim 2GMmh/r^3$

Na superfície da Terra: $F_m \sim 6 \times 10^{-4} \text{ N}$

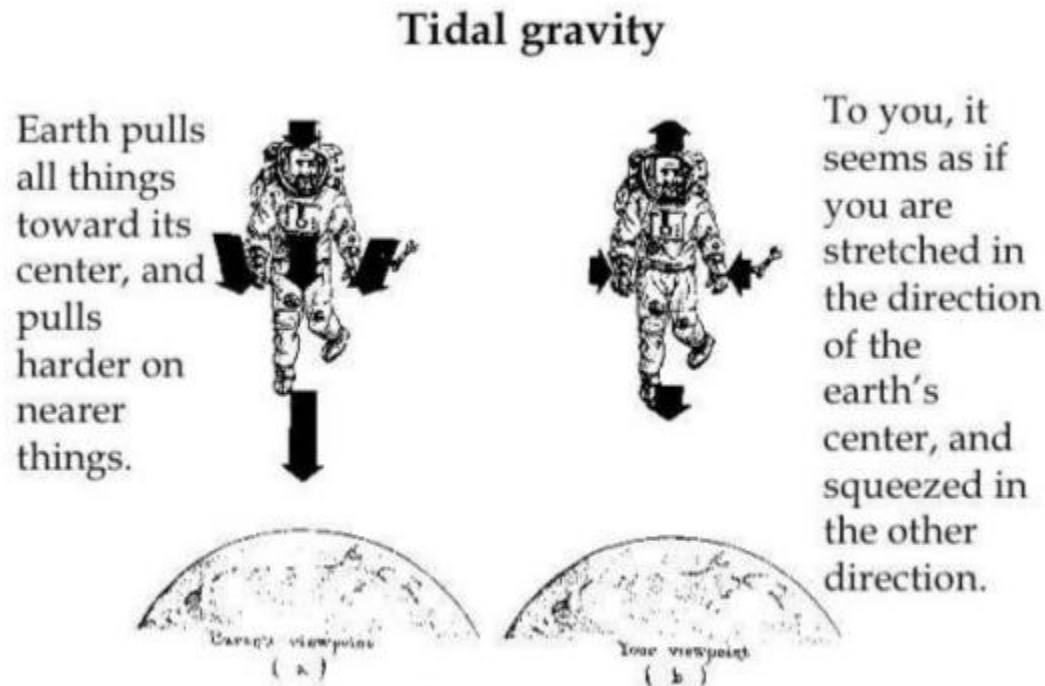


Figure from Thorne, *Black holes and time warps*

Tidal forces are a characteristic of gravity but not of accelerating frames.

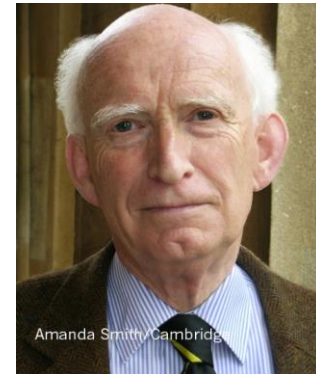
Observações

Quasars: objetos muito distantes com brilho de uma galáxia inteira!

Provavelmente buracos negros gigantes no centro de galáxias distantes com discos de acreção muito intensos.



Quasar registrado pelo telescópio Hubble a 12 bilhões de anos-luz de nós, com brilho de 600 trilhões de sóis!!

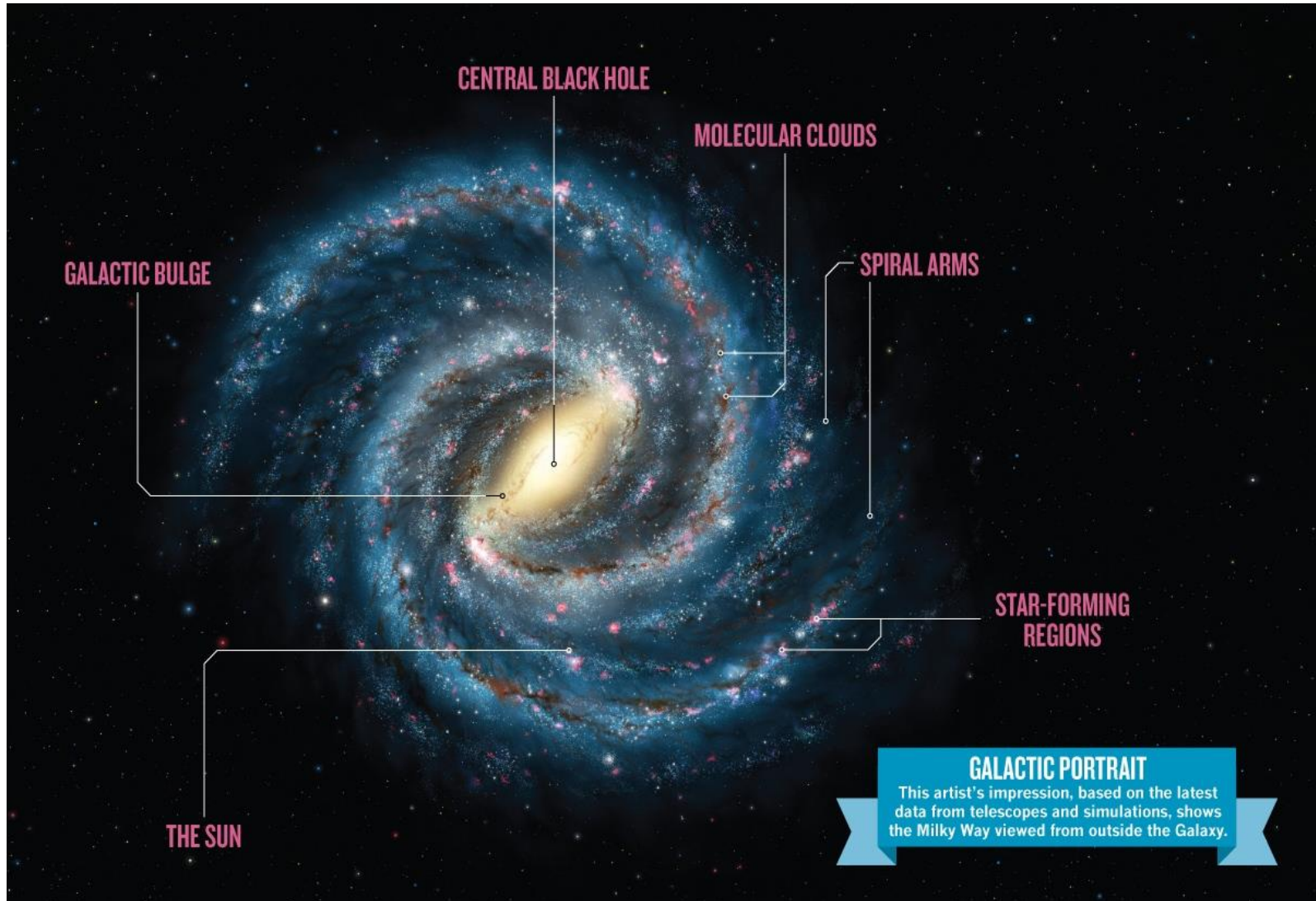


Donald Lynden-Bell
1935 - 2018

Provavelmente todas as as galáxias têm um buraco negro no centro, incluindo a nossa (Nature 223, 690 1969)

Centro da nossa galáxia:

se há um buraco negro, é quieto, sem disco de acreção importante. Talvez seja possível observá-lo por outros efeitos a sua volta ($d=25$ mil anos-luz de nós).





ANDREA GHEZ (1965-),
University of California,
Los Angeles



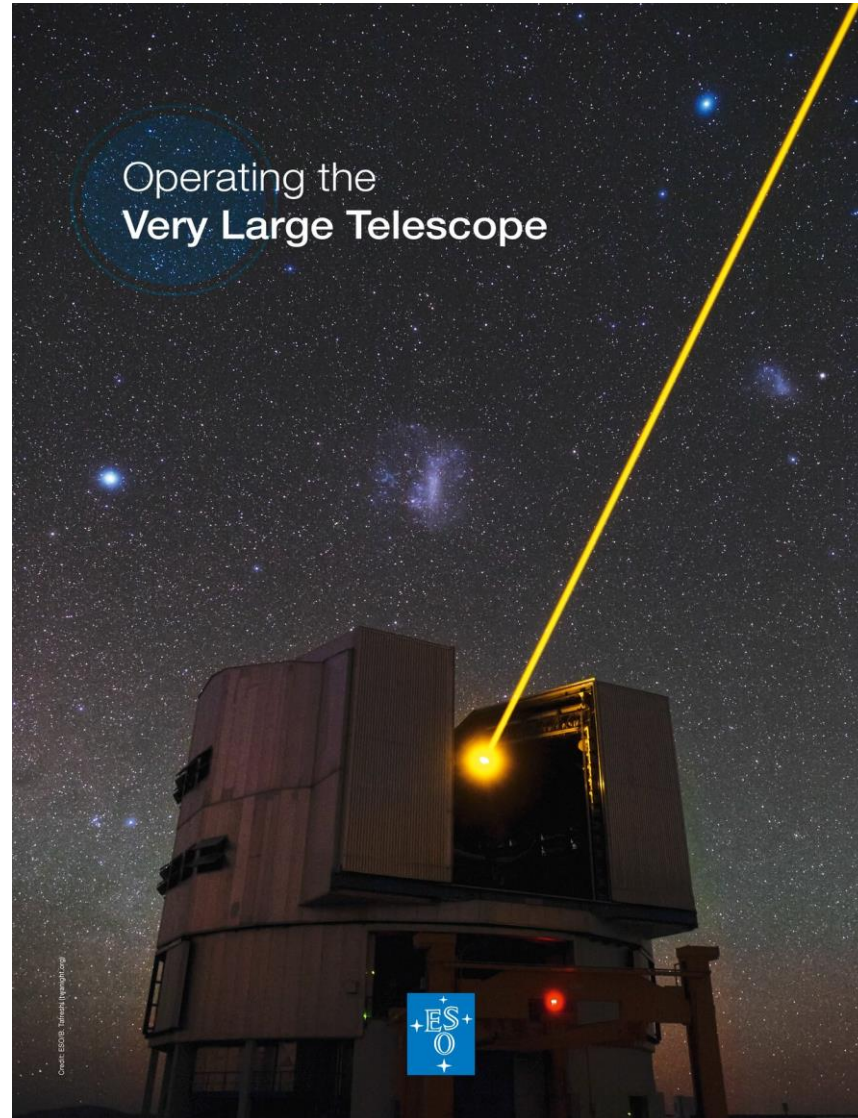
REINHARD GENZEL (1952-),
Max Planck Institute for
Extraterrestrial Physics
University of California,
Berkeley

Mais de 2 décadas de observação do centro da nossa galáxia!

Poucos acreditavam ser possível medir órbitas de estrelas com tamanha precisão da Terra (galáxia atrapalhando, muito tempo de observação para poder usar telescópios espaciais).

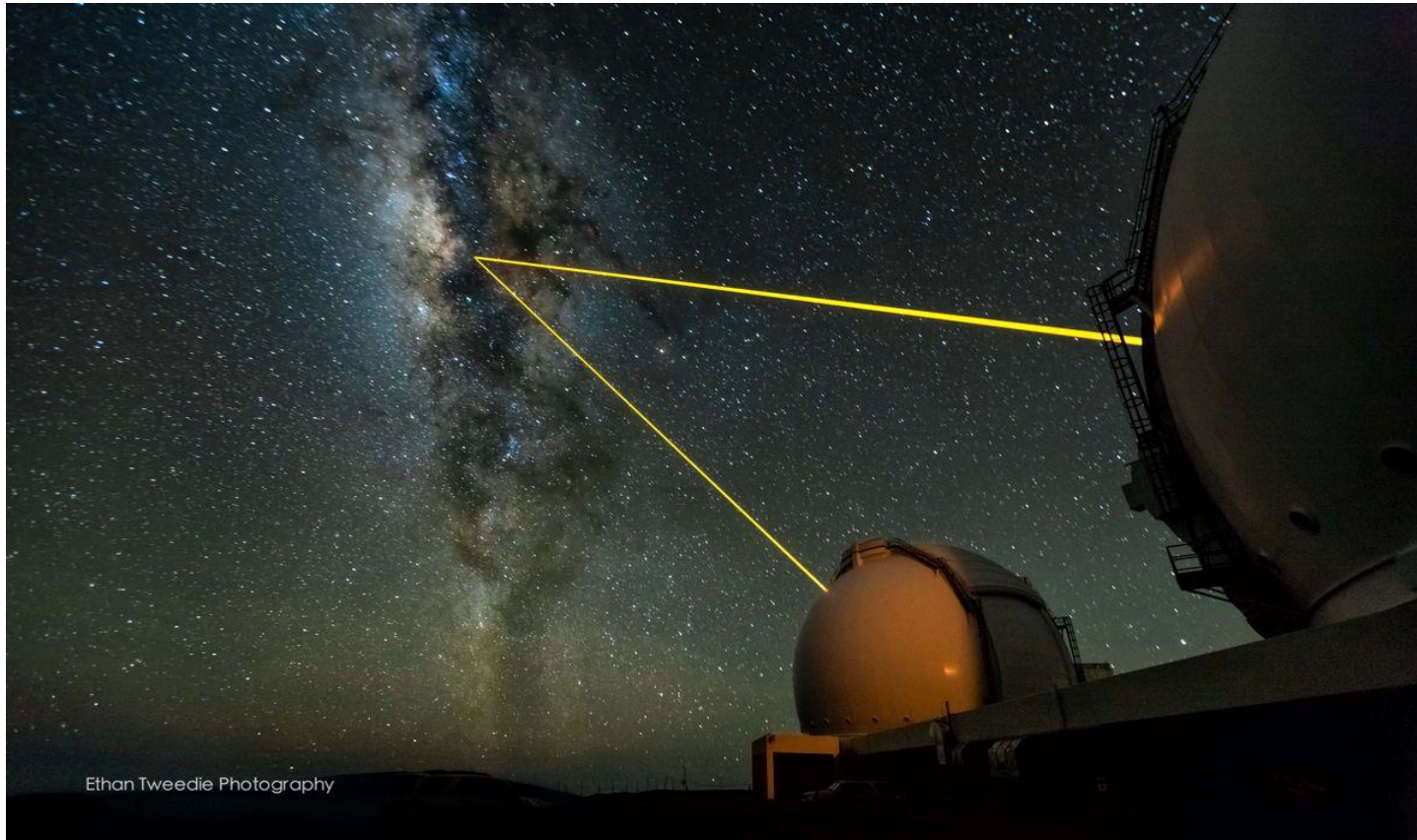
REINHARD GENZEL

European Southern Observatory, Chile



ANDREA GHEZ

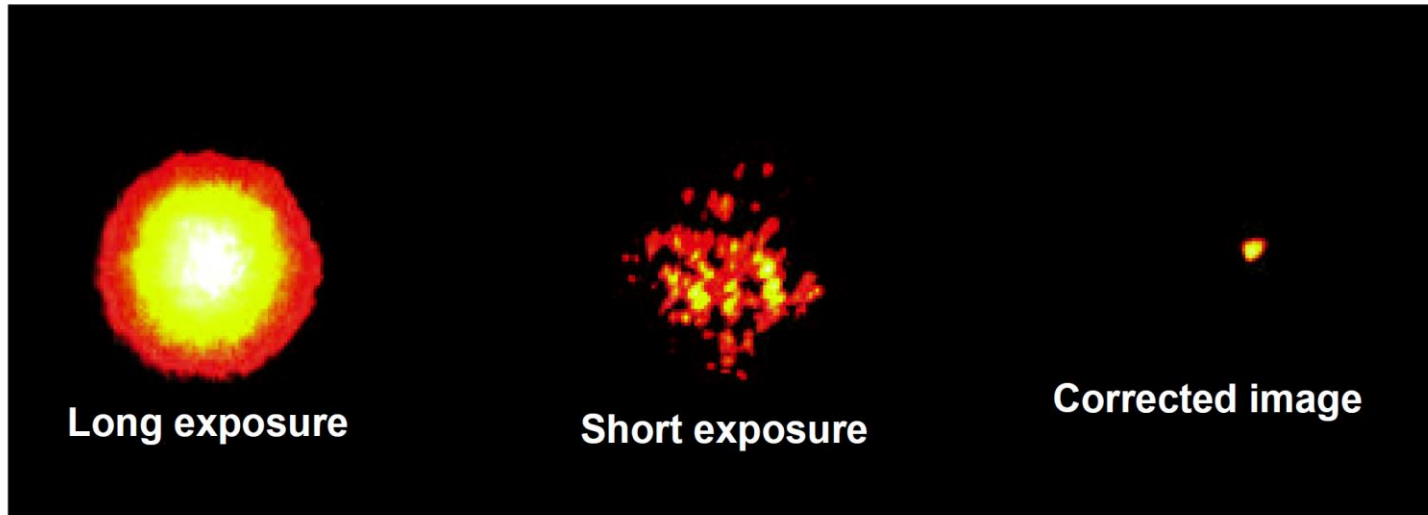
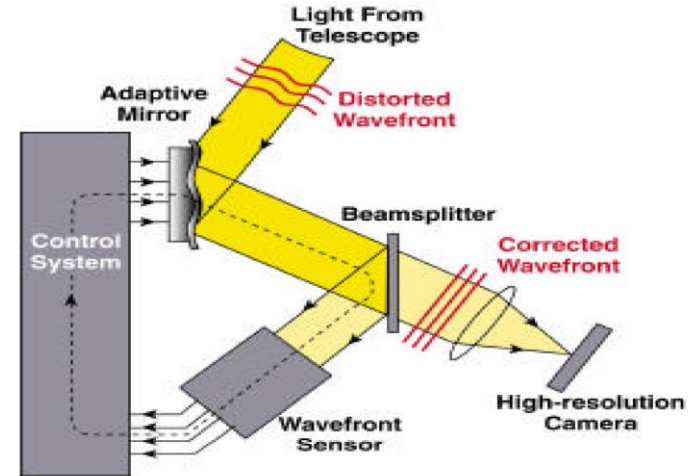
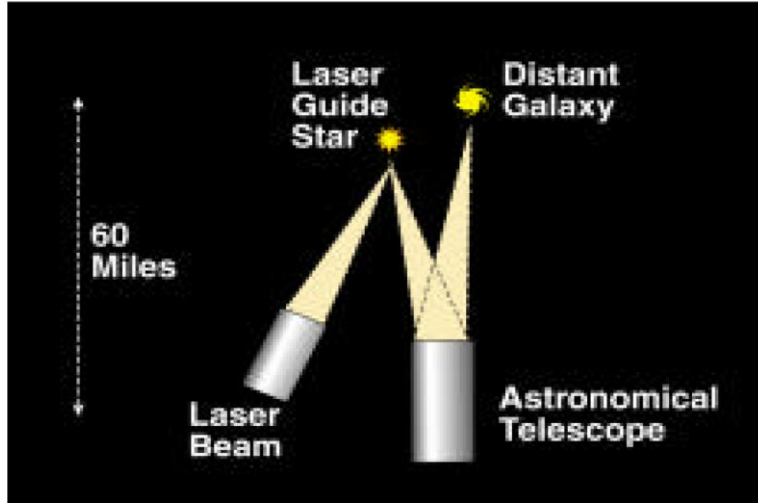
Observatório W. M. KECK, no Havai



Muita poeira no caminho: observação no infra-vermelho

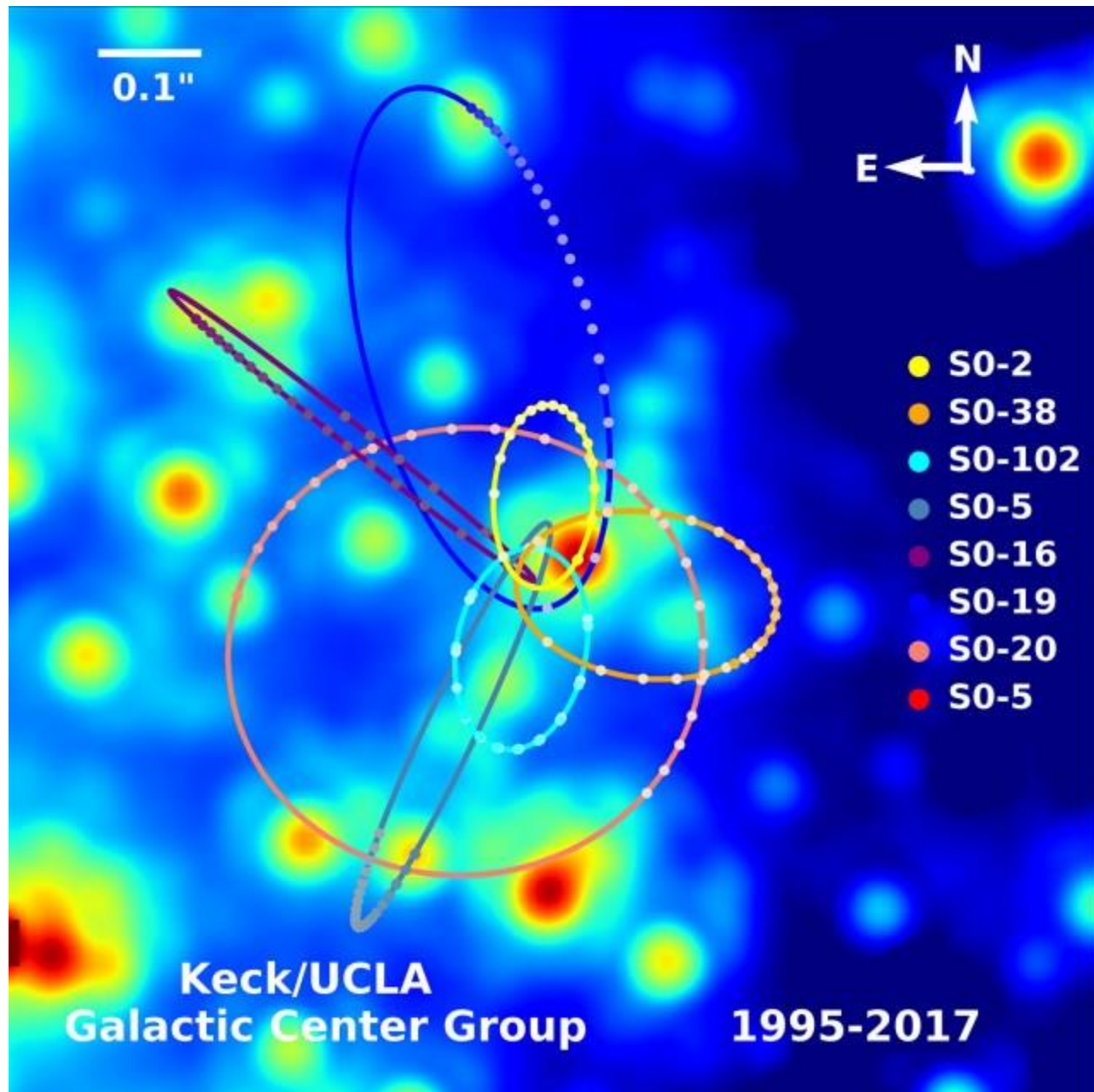
Técnica Laser Guide Star Adaptive Optics (LGS AO) para retirar distúrbios devido à atmosfera.

Laser Adaptive Optics: um feixe de laser excita átomos de sódio a uma altitude de 100 km, que se agrupam e formam uma estrela artificial. Sabendo a posição, as distorções atmosféricas são corrigidas por um espelho maleável.



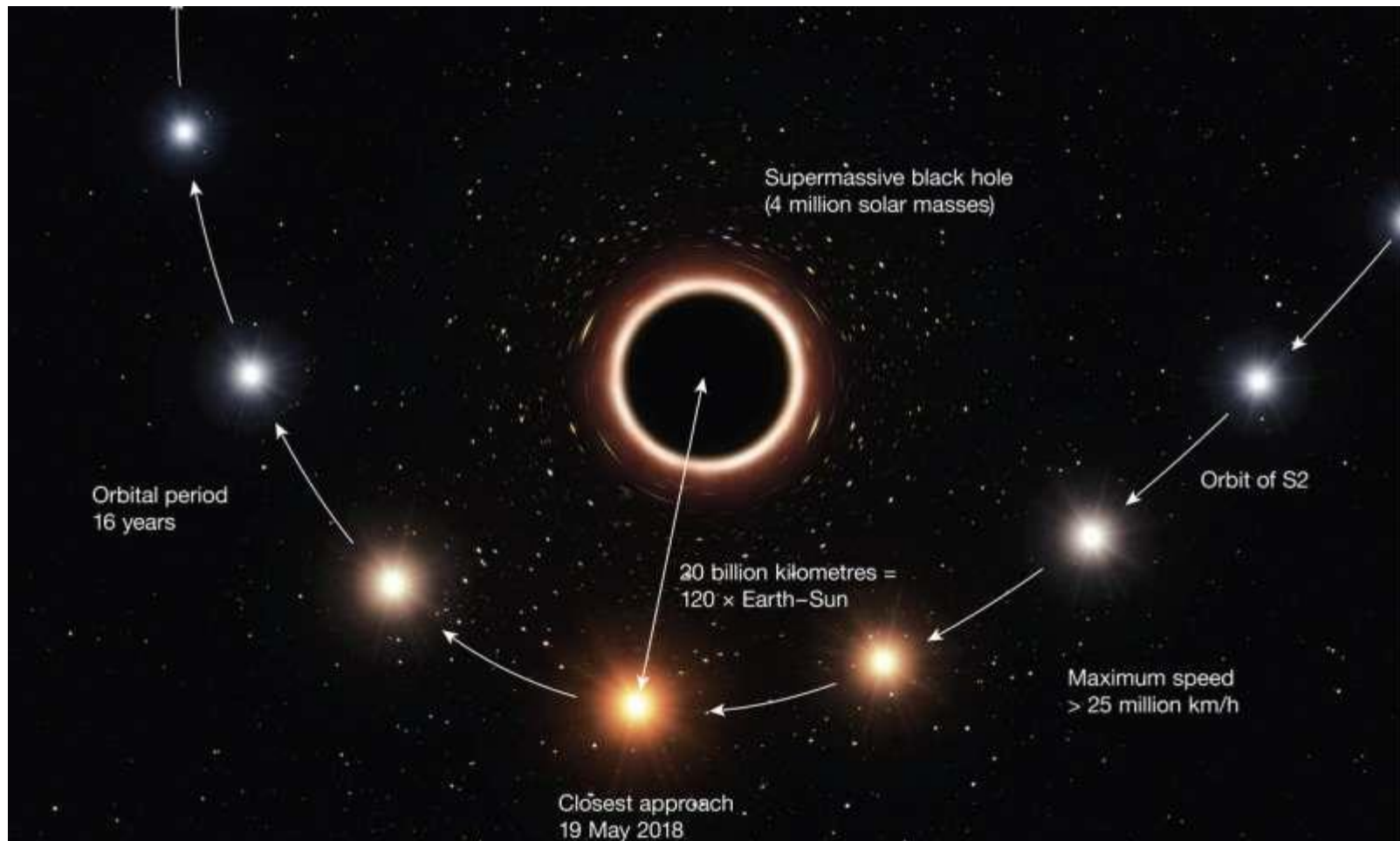
**Resolução:
de 1 arcsec a
1/20 arcsec!**

**Melhor que
Hubble no
ótico!**

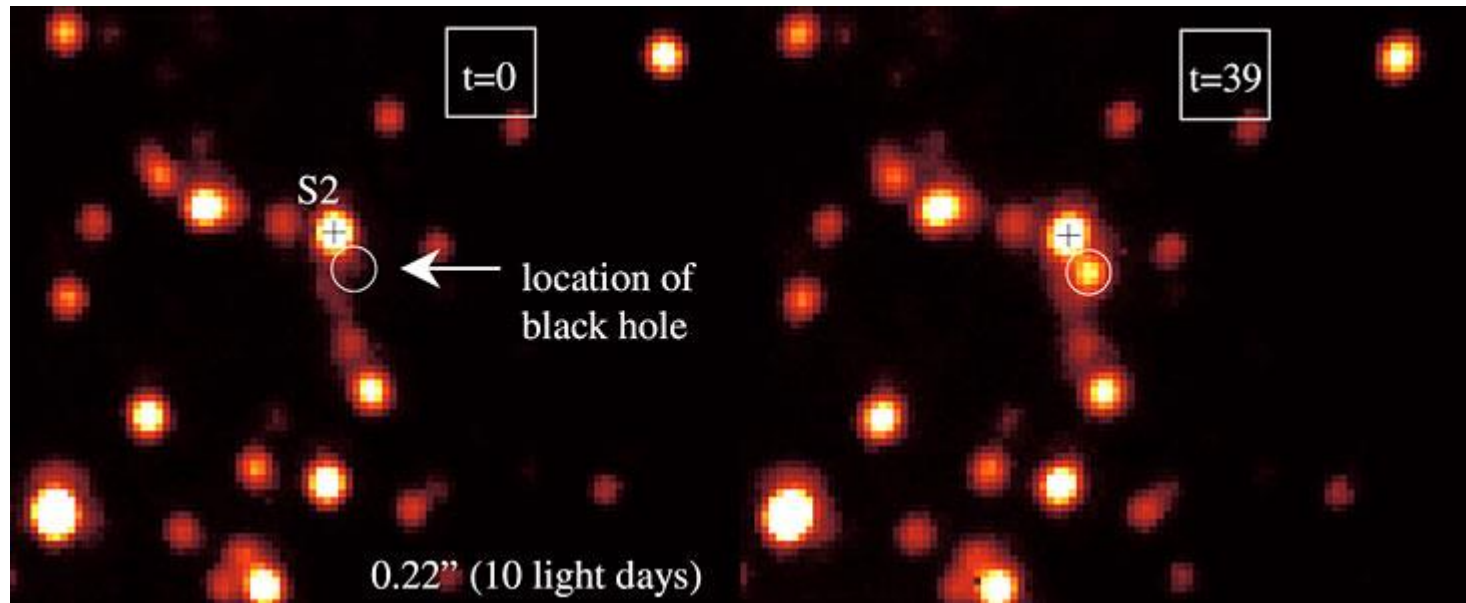


- 4 milhões de massas solares. $R_S \sim 10^7 \text{ km}$. $a = 10^6 \text{ g}$. $F_m \sim 1 \text{ kg}$.
- Sua massa é estimada pelos efeitos nas estrelas em volta.
- Serviu para testar a Relatividade Geral.

Estrela S02 no seu momento mais próximo: desvio para o vermelho gravitacional: $v = 0,03 c$



2018 - Passagem de S2 parece ter causado grande distúrbio no buraco negro.



Com todos os melhoramentos ao longo dos anos, esses telescópios terrestres conseguiram mais precisão que o Hubble tem no ótico!

Candidatos a buracos negros:

1) Estelares - Cygnus X-1

- 14,8 massas solares. $R_S \sim 50$ km. $a = 10^{10}$ g. $F_m \sim$ mil toneladas.
- 6 mil anos –luz de distância, na nossa galáxia.
- (1 ano-luz $\sim 10^{13}$ km, $d_{Terra-Sol} \sim 10^6$ km, $d_{Netuno-Sol} \sim 10^{10}$ km)
- Uma gigante azul o acompanha.
- Descoberto em 1964.
- Sua massa é estimada pelos efeitos na matéria em volta.
- É observado em radio, no visível e por raios X.

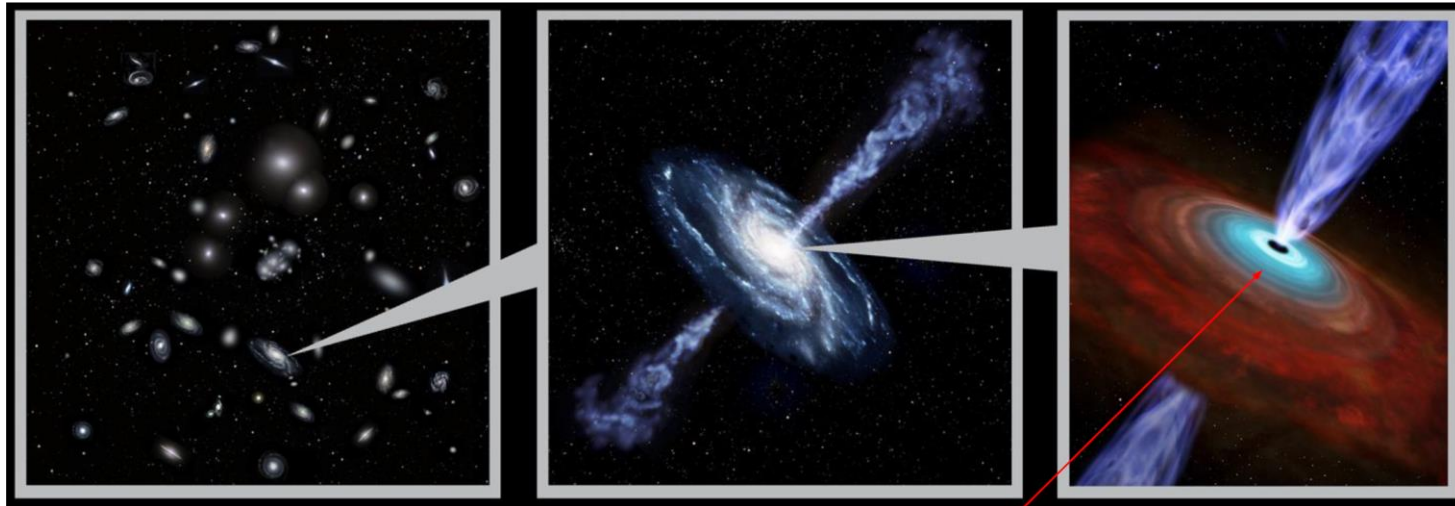


b) Em Messier 87.

No centro desta galáxia, no aglomerado de Virgo, acredita-se ter um buraco negro com massa 6.5 bilhões de vezes a do Sol, e situado a $D=55$ milhões de anos luz de nós.

Temos então $a = 10^3 g$ $R_S \sim 2 \cdot 10^{10} km$ $F_m \sim 0$.

Buraco negro do tamanho do sistema solar!!



Hipótese: no centro da M87 há um BN supermassivo + um disco de acreção, que causam a aparição dos jets.

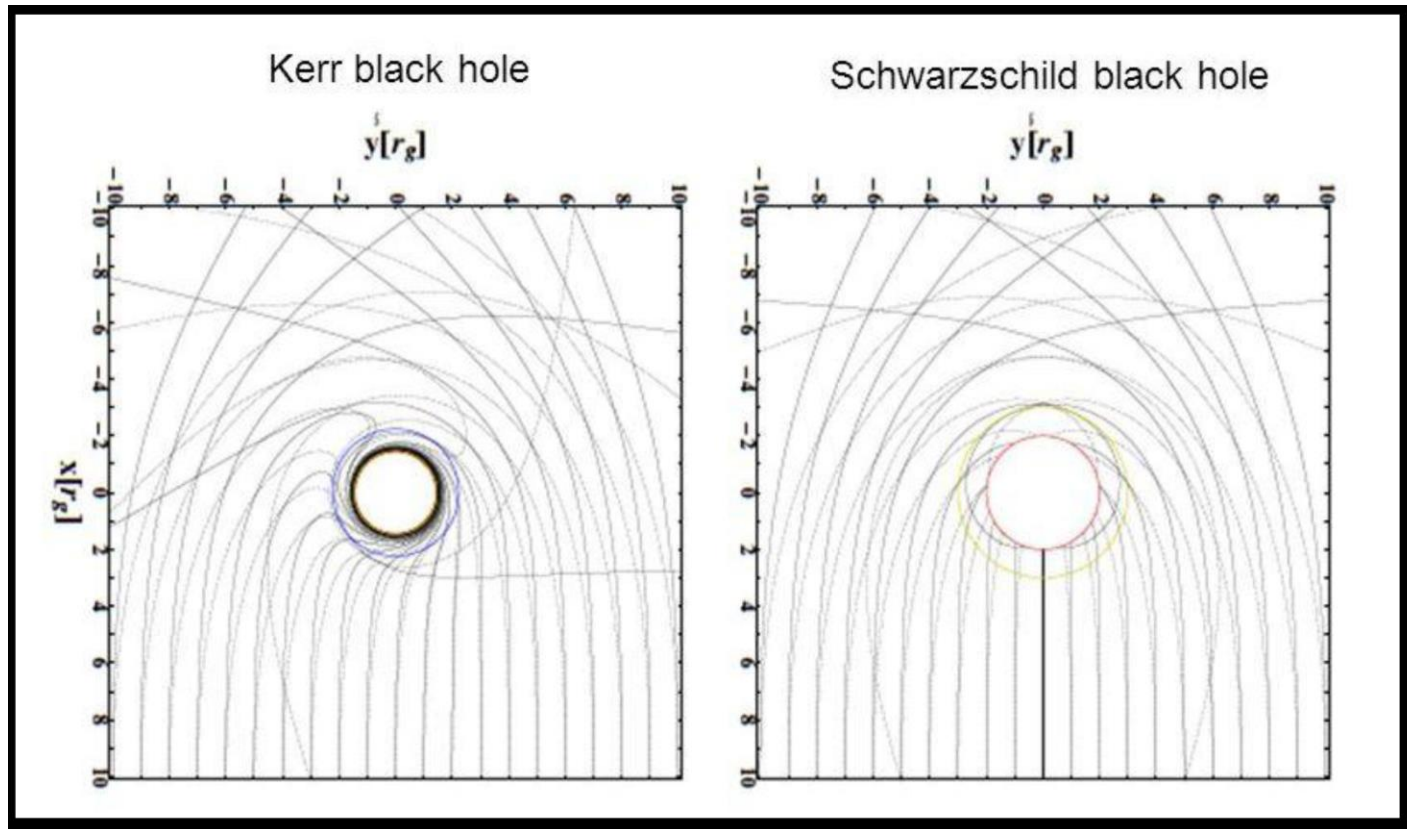
Jato de 5 mil anos luz!



Gravidade do buraco negro é tão forte que luz pode realizar órbitas circulares ao redor dele!

Última órbita circular $\sim 3R_S$

Distorções óticas ao redor do buraco negro.



Expectativa teórica:

As muitas possibilidades:

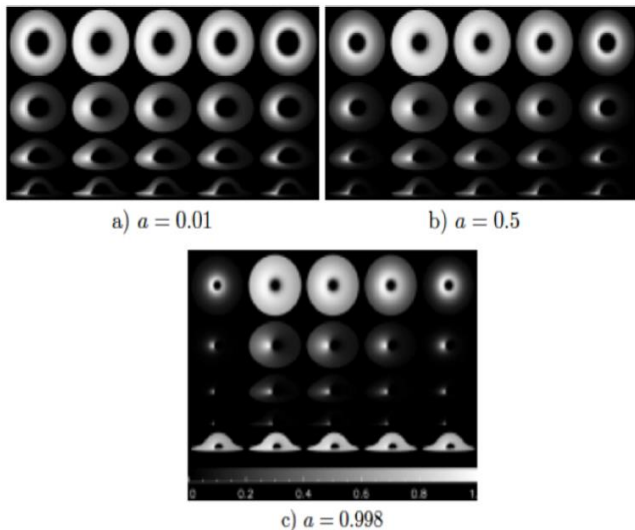


Figure 20. Disk images of accretion disks extending up to 20 Schwarzschild radii for different spins of Kerr black holes, viewed in different energy ranges and inclination angles (from Zhang et al. 2002).

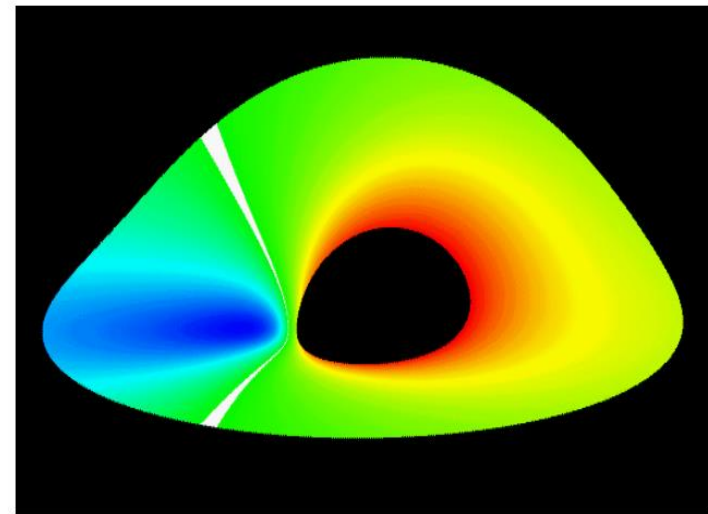


Figure 21. Image of a geometrically thin disk around an extreme Kerr (maximally rotating) black hole seen at an inclination of 75° . The inner and outer radii of the Keplerian (circularly rotating) disk are at $1.24 M$ and $6 M$. The colors encode the apparent light frequency, the white strip divides redshifted and blueshifted regions. The asymmetric appearance of the inner disk edge results from the frame-dragging effect of black hole rotation (from Bromley et al. 1997).

Última órbita circular $\sim 3R_S$

Abertura angular: $3R_S / D \sim 20 \mu \text{ arcsec}$ **MUITO PEQUENA!!**

Resolução angular: para um telescópio é $R = \lambda / D$.

Um par de telescópios: $R = \lambda / B$, onde B é a separação entre os telescópios.

O telescópio “Event Horizon”: um arranjo de radiotelescópios.
 $160 \text{ m} < B < 10.700 \text{ km}$ $R \sim 25 \mu \text{ arcsec}$ (para $\lambda \sim 1.3 \text{ mm}$).

ALMA - CHILE



SMA - HAWAII



SPT - SOUTH POLE



SMT - ARIZONA



PV - SPAIN



JCMT - HAWAII



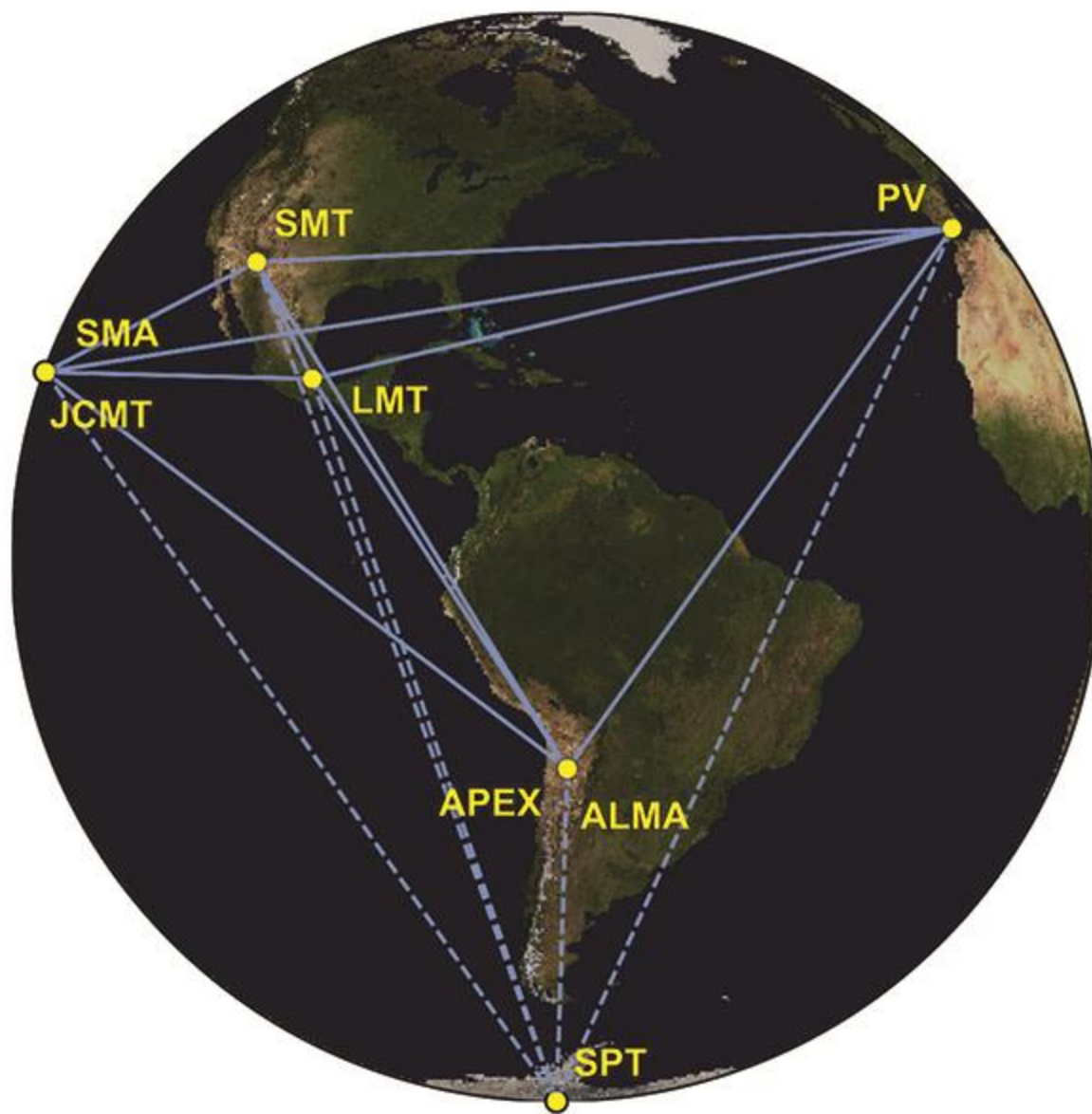
LMT - MEXICO



APEX - CHILE



Um telescópio do tamanho da Terra!!



Foram 4 dias de observação em 2017.

2 anos para análise de dados.

Número de HD's enchem um avião de carga.

Quantidade de dados ($5 \cdot 10^{15}$ bytes) suficiente para playlist de mp3 de alta qualidade com música para ouvir por 4.700 anos.

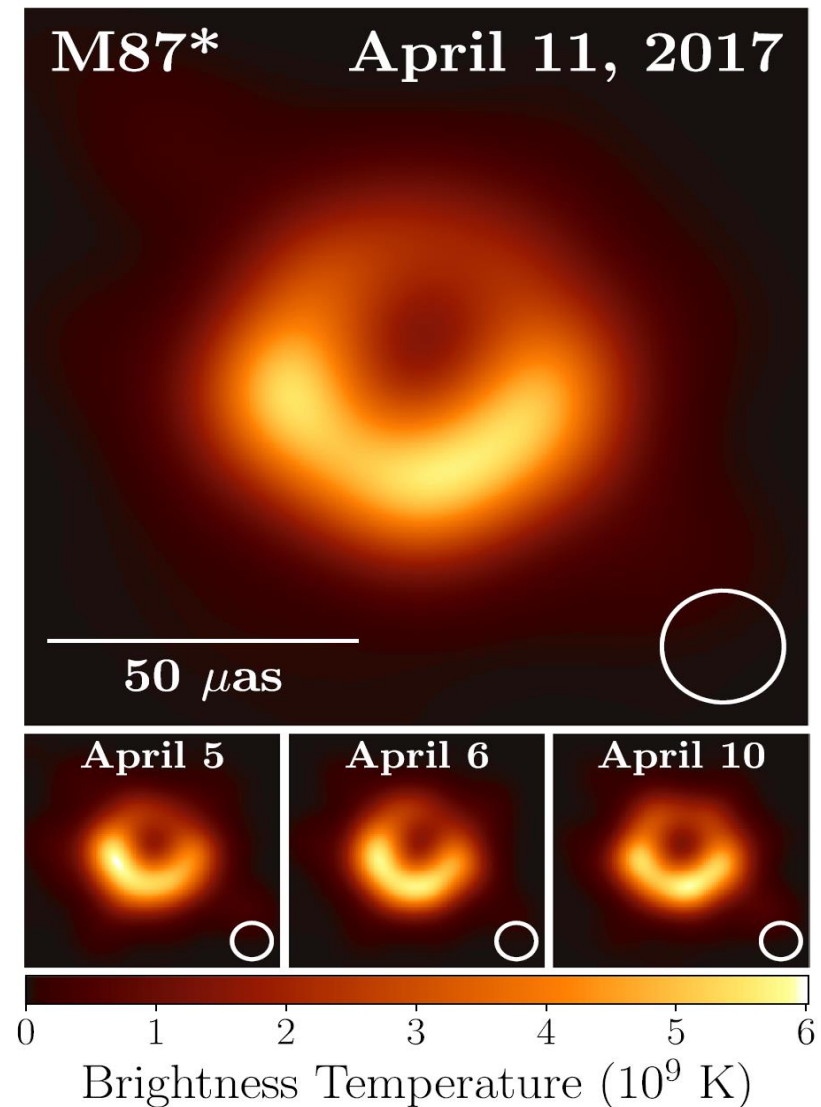
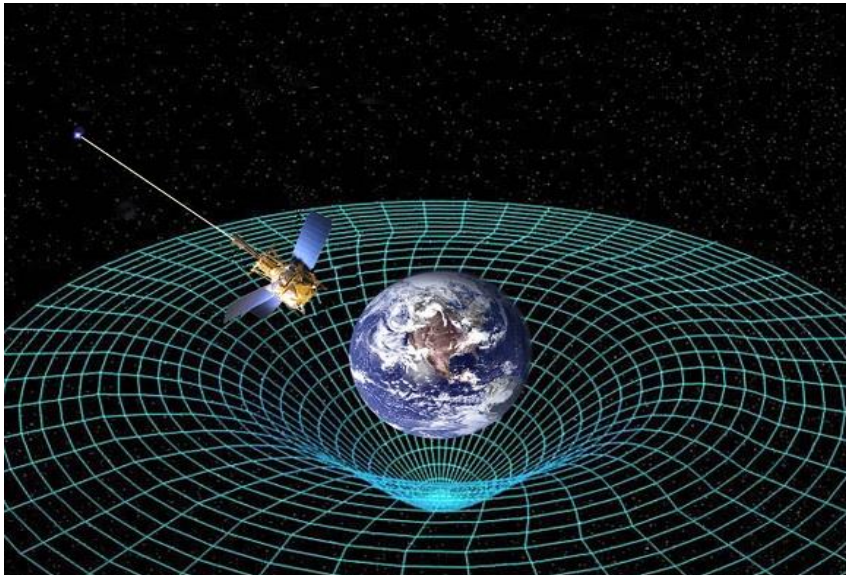


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the three kernels ($20 \mu\text{as}$ FWHM) is shown in the lower right. The image is shown in units of brightness temperature, $T_b = S\lambda^2/2k_B\Omega$, where S is the flux density, λ is the observing wavelength, k_B is the Boltzmann constant, and Ω is the solid angle of the resolution element. Bottom: similar images taken over different days showing the stability of the basic image structure and the equivalence among different days. North is up and east is to the left.

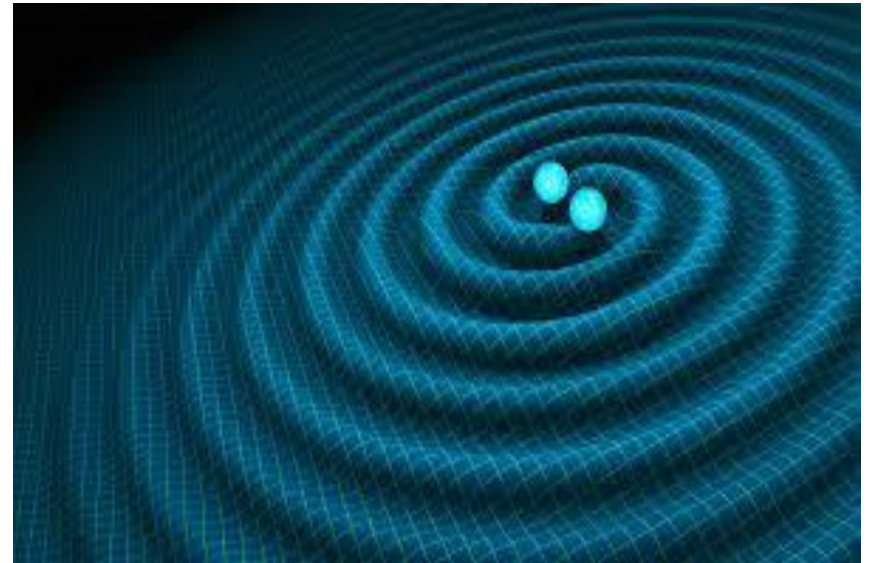
ONDAS GRAVITACIONAIS

-- Ondas gravitacionais emergem primeiramente dos trabalhos de Albert Einstein estabelecendo a Teoria da Relatividade Geral - 1915

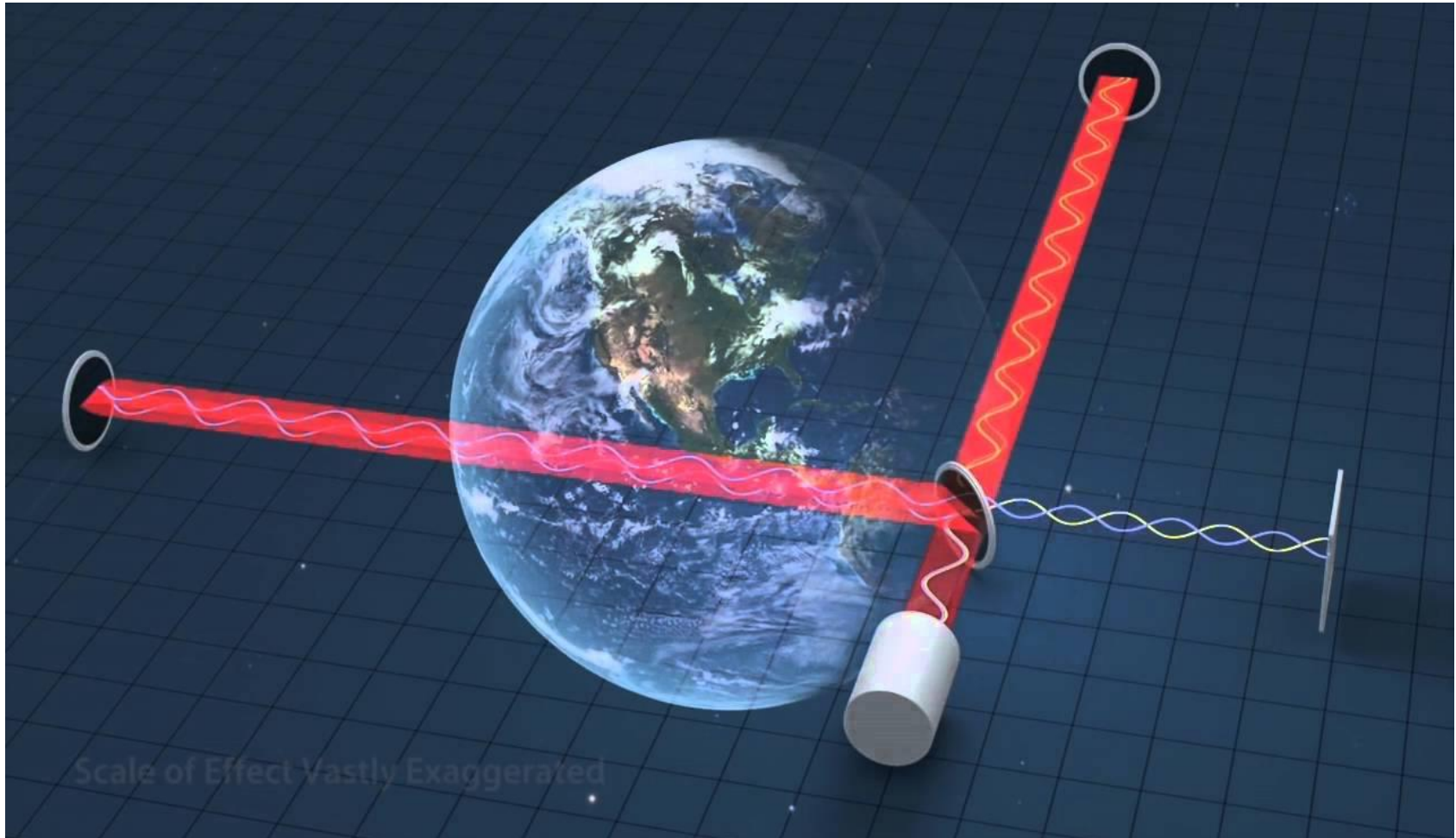
Grande massa curva espaço-tempo ao seu redor

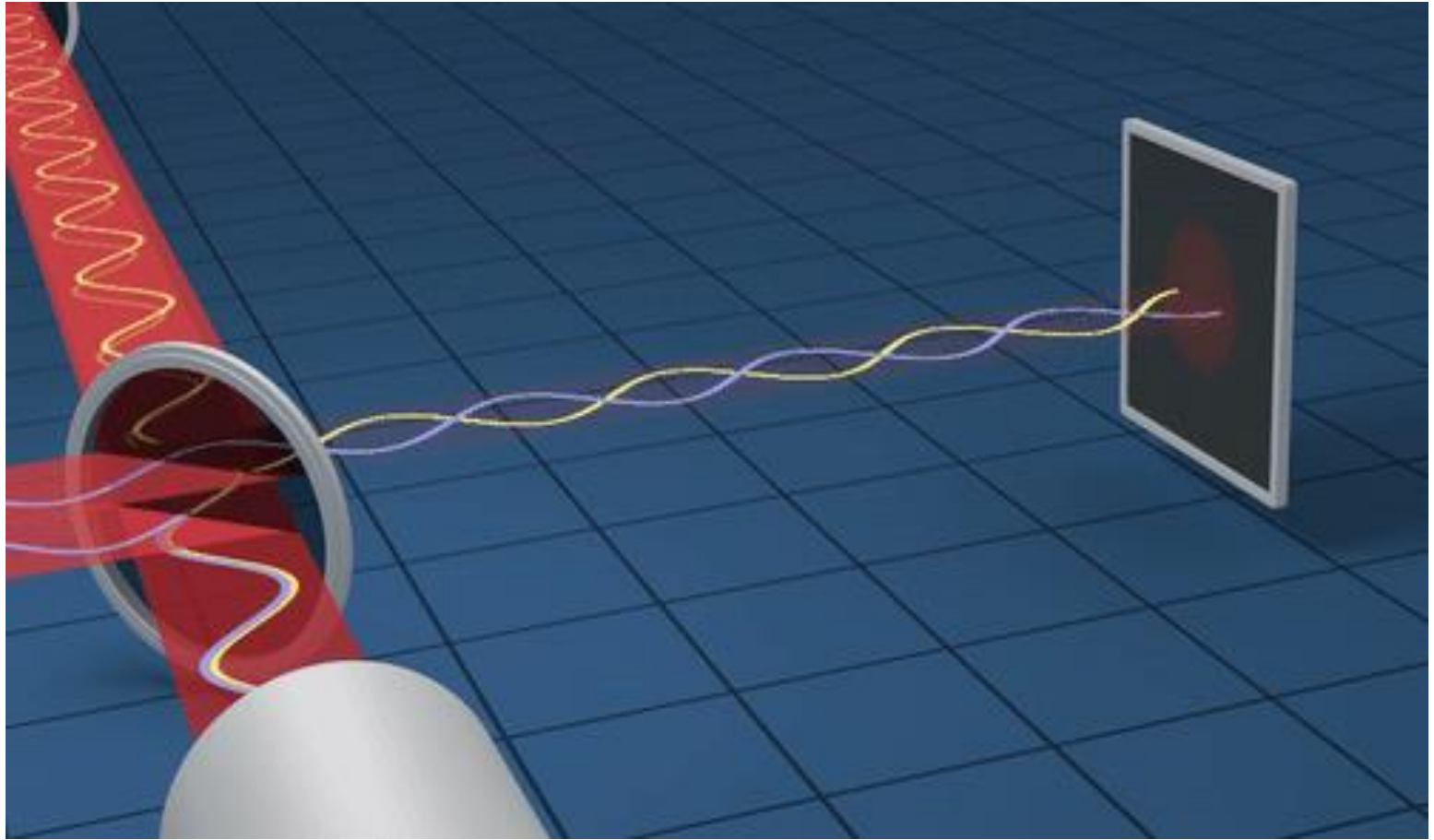


Massas em movimento acelerado alteram o espaço-tempo dinamicamente. Estas alterações são transmitidas por ondas que se propagam.

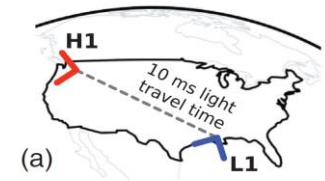


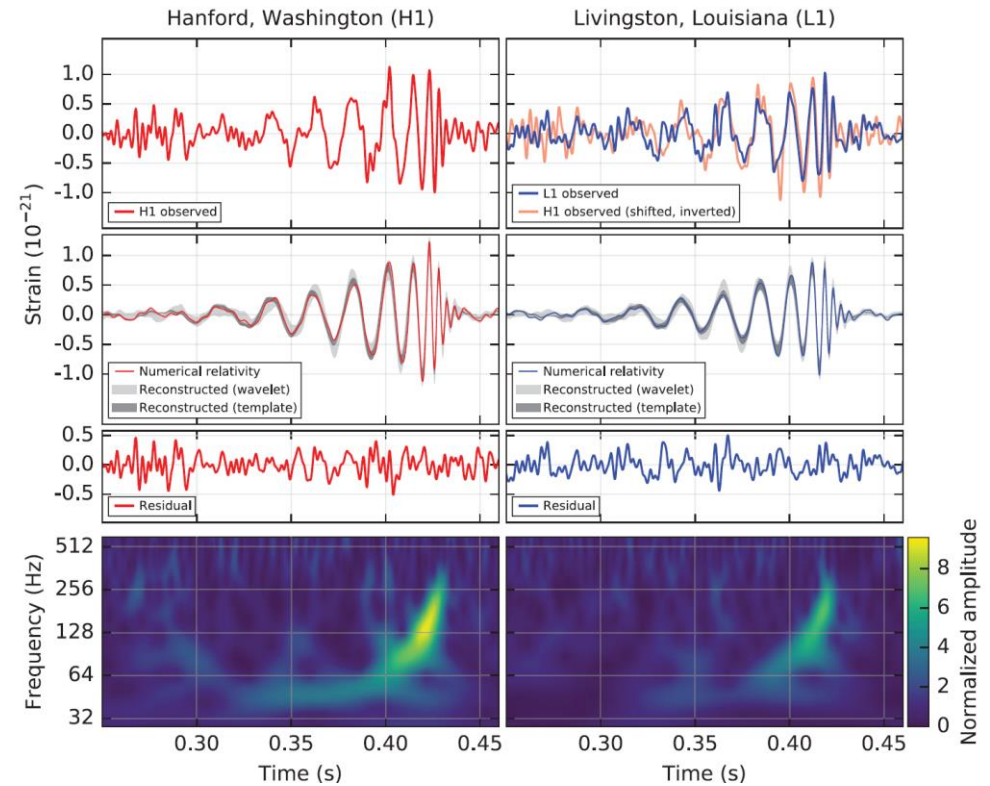
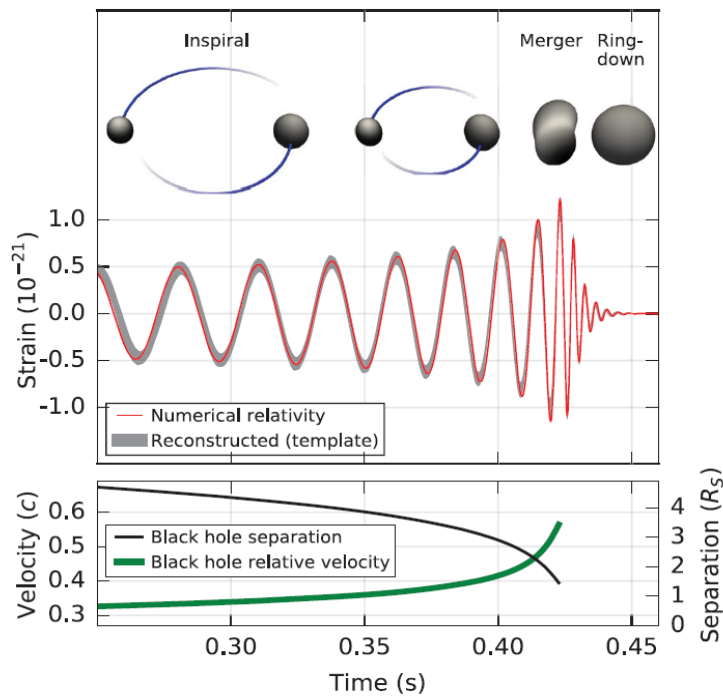
Cientistas soviéticos M. Gertsenshtein e V. Pustovoit propoem usar interferômetro em 1962.



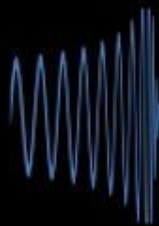


Em 1994: LIGO, dois detectors, Livingston (Louisiana) e Hanford (Washington).





- **Onda extremamente poderosa.**
- **Usando a Relatividade Geral, estima-se que tenha ocorrido a colisão de 2 buracos negros com massas de 29 e 36 vezes a massa do Sol. O buraco negro final teria massa de 62 vezes a massa do Sol, tendo-se portanto emitido 3 massas solares em forma de energia gravitacional. A potência emitida é maior que a potência de emissão eletromagnética de todas as fontes luminosas do Universo observado.**
- **A distância do evento seria de 1 bilhão de anos-luz.**



GW150914



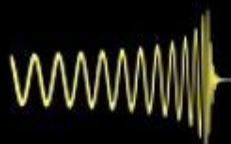
LVT151012



GW151226



GW170104



GW170814

0 sec.

1 sec.

2 sec.

time observable by LIGO-Virgo

Prêmio Nobel - 2017



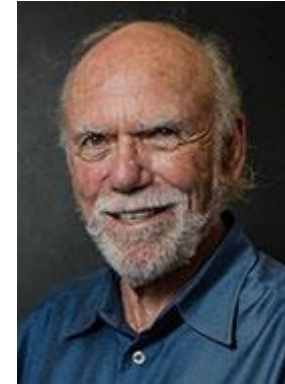
Rainer Weiss
Berlim, Alemanha
29/09/1932
Massachusetts
California Institute
of Technology

1/2



Kip S. Thorn
Logan, EUA
01/06/1940
California
Institute of
Technology

1/4



Barry Barish
Omaha, EUA
27/01/1936
California
Institute of
Technology

1/4

Agora tem também o VIRGO na Itália: pode-se determinar a direção!



Conclusão

Buracos negros parecem ser comuns no Universo: várias evidências e uma teoria consistente que indica a sua existência.

Horizontes são bem entendidos (classicamente), mas a singularidade é um mistério: o que existe no centro de um buraco negro?

É possível alguém entrar num buraco negro (o do centro da nossa galáxia por exemplo), mas o que ele descobrir ninguém saberá.

Prêmio Nobel 2020: 50% para teoria, 50% observação.

Mensagem do comitê: ambas são igualmente importantes para o progresso da ciência.

Sem experimento ou observação, não se entra em contato com a Natureza, não há do que falar.

Sem teoria não se sabe o que observar, como observar e como interpretar a observação.

Quarta mulher a ganhar um Prêmio Nobel: Andrea Ghez!

A comprovação da existência das ondas gravitacionais em consonância com a Relatividade Geral é, por si só, um marco na história da Ciência, mas,

Abrimos um outro sentido para observar o Universo → um marco na história da humanidade!

Consequências para a física de buraco negros, estrelas de neutrons, cosmologia, polarização das ondas gravitacionais, para a Relatividade Geral, teorias da Gravitação, ...

Outros observatórios: INDIGO (em estado avançado), AIGO, LISA

Investimento total de 1,1 bilhão de dólares da NSF! O maior da história da NSF, e em pesquisa básica!!

