

# Gravitação Relativística

Um esboço da teoria geral da relatividade e sua aplicação aos buracos negros

A C Tort<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física Teórica  
Instituto Física – Universidade Federal do Rio de Janeiro

9 de Março de 2010

- 1 Cronologia
  - Genesis (1887-1919)
  - Hibernação (1920-1960)
  - Era de ouro (1960-1980)
- 2 Uma vista d'olhos sobre o nascimento, evolução e morte das estrelas
  - Nascimento, evolução e morte das estrelas
  - Anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros
- 3 Lentes e ondas gravitacionais

# Genesis (1887-1919): as origens da Relatividade Restrita e da Relatividade Geral

A Relatividade Restrita ou Especial surge para resolver problemas teóricos suscitados pela teoria eletromagnética de Maxwell:

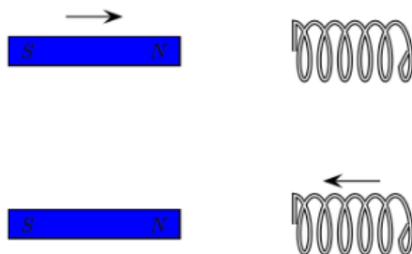


Figura 2: A corrente induzida no condutor é experimentalmente a mesma.

Em um caso a f.e.m. relaciona-se com o campo elétrico e no outro com o campo magnético.

Mas a R.R. cria outros problemas: todas as teorias da física devem ter uma versão relativística!!

Para satisfazer os postulados da relatividade restrita devemos ser capazes de criar uma:

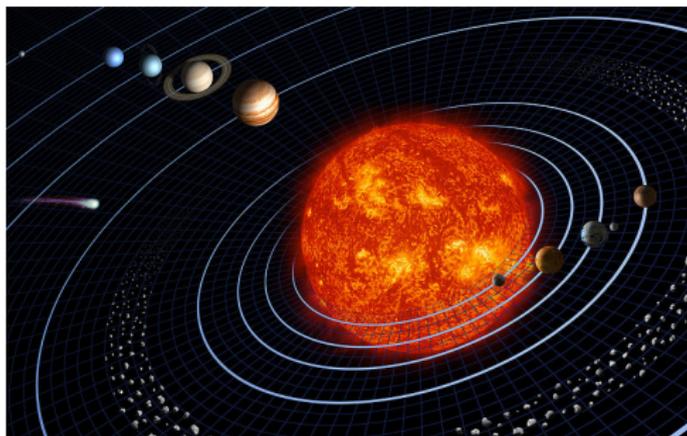
- (i) mecânica relativística;
- (ii) termodinâmica relativística;
- (iii) teoria dos corpos sólidos relativística;
- (iv) teoria dos corpos elásticos relativística;
- (v) etc. ...

E por fim, mas não por último:

- (vi) **uma teoria da gravitação relativística!!!!**

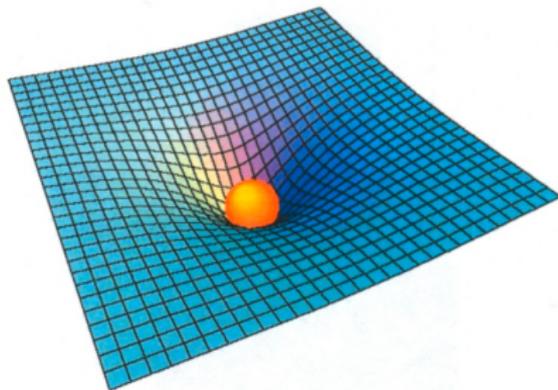
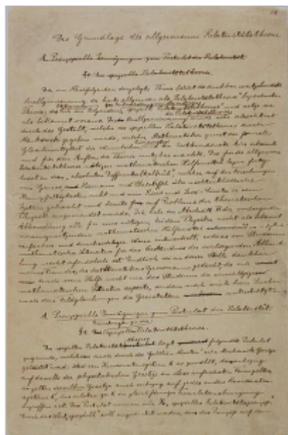
# A gravitação newtoniana

Quando Einstein começa a enfrentar o problema não havia uma discrepância marcante entre a gravitação newtoniana e os dados experimentais. A teoria da gravitação universal é capaz de explicar muito bem a mecânica do Sistema Solar, incluindo os efeitos perturbativos que levam, por exemplo, à precessão das órbitas de alguns planetas.



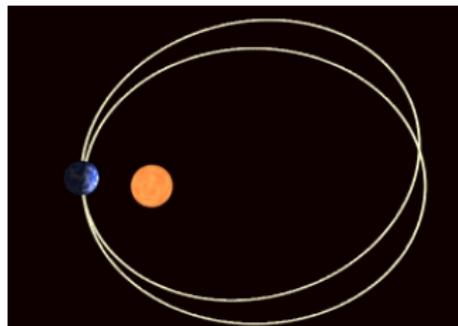
# A gravitação relativística

A teoria da relatividade geral ou gravitação relativística nasce de uma contradição teórica fundamental entre a gravitação newtoniana e a teoria da relatividade restrita. A busca de uma teoria relativística da gravitação leva a uma ruptura radical com a gravitação newtoniana. Na solução de Einstein, a lei da gravitação universal será ao final substituída por uma geometrização completa dessa interação.



# Os três testes clássicos da R.G. (I)

(i) A precessão do perihélio de Mercúrio (sucesso instantâneo!):



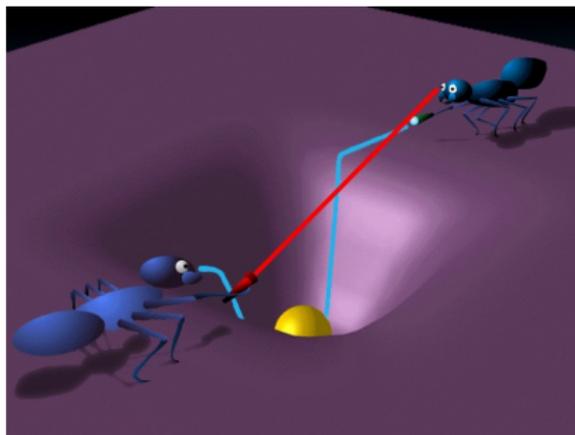
Sources of the precession of perihelion for Mercury

Amount (arcsec/century)	Cause
5025.6	Coordinate (due to the <a href="#">precession of the equinoxes</a> )
531.4	Gravitational tugs of the other planets
0.0254	Oblateness of the Sun ( <a href="#">quadrupole moment</a> )
$42.98 \pm 0.04$	General relativity
5600.0	Total
5599.7	Observed

N.B.: a precessão dos equinócios é a precessão do eixo de rotação de um planeta em relação a um referencial inercial. Para Mercúrio, a inclinação vale  $0.027^\circ$ .

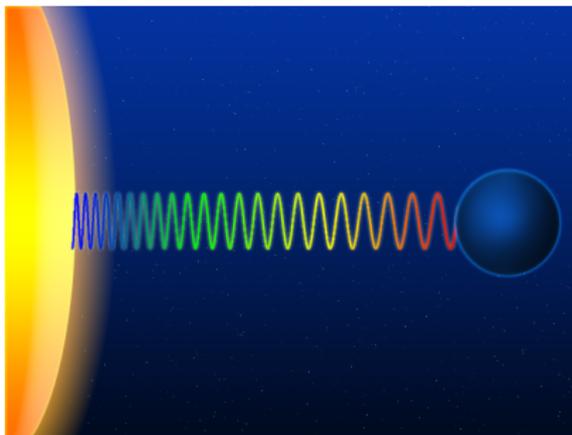
# Os três testes clássicos da R.G. (II)

- (ii) A deflexão da luz (medida em 1919 por duas expedições britânicas, Sobral no Brasil e Ilha de Príncipe, na costa da África):



# Os três testes clássicos da R.G. (III)

- (iii) O desvio gravitacional para o vermelho (medido somente em 1960 por Pound e Rebka):



# Hibernação (1920-1960)

Entre 1920 e 1960 o trabalho teórico em Relatividade Geral divorcia-se das possibilidades tecnológicas e experimentais. A consequência é a estagnação. O relatividade geral fica fora da corrente principal da física. Jovens recém-formados são orientados para outras áreas, por exemplo: física de partículas ou matéria condensada, A Relatividade Geral apoiava-se nos três testes clássicos.

# Era de ouro (1960-1980)

A partir de 1960 uma série de observações e descobertas físicas e astronômicas colocam a Relatividade Geral em evidência:

- Retraso do eco de radar refletido pelo planeta Vênus, medidas feitas em 14 de setembro de 1959, análise em 1961.
- O experimento de Pound-Rebka sobre o desvio gravitacional para o vermelho, 1960.
- A teoria alternativa de Brans-Dicke (o que exige testes de alta precisão).
- O primeiro quasar (buraco negro supermassivo): fonte de rádio 3C48, descoberto em 26 de setembro de 1960.
- A descoberta de radiação cósmica de fundo (CBR) por Arno Penzias e Robert Wilson (1964).
- Pulsares (estrelas de nêutrons em rotação) que emitem radiação eletromagnética.
- Sistemas que **podem** conter buracos negros (estrelas, galáxias, AGNs).

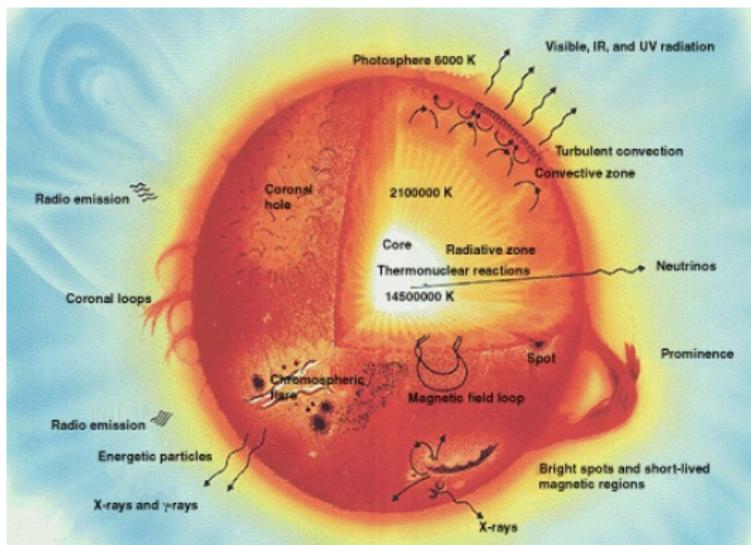
# Nascimento, evolução e morte das estrelas

O que é uma estrela? Uma estrela é uma bola de plasma (gás de íons) que mantém-se 'coesa' por ação gravitacional e ações internas.

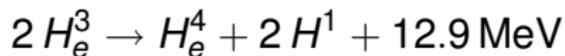
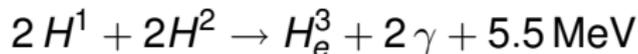
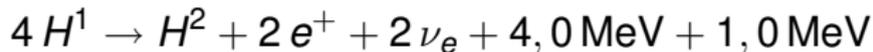
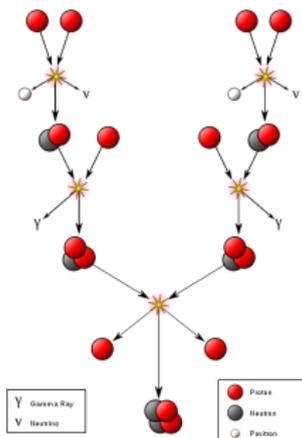


# Uma estrela típica: o Sol

## Anatomia do Sol:



# A fornalha nuclear que mantém o Sol aceso



Um total de 23.4 MeV por reação.

# Evolução estelar

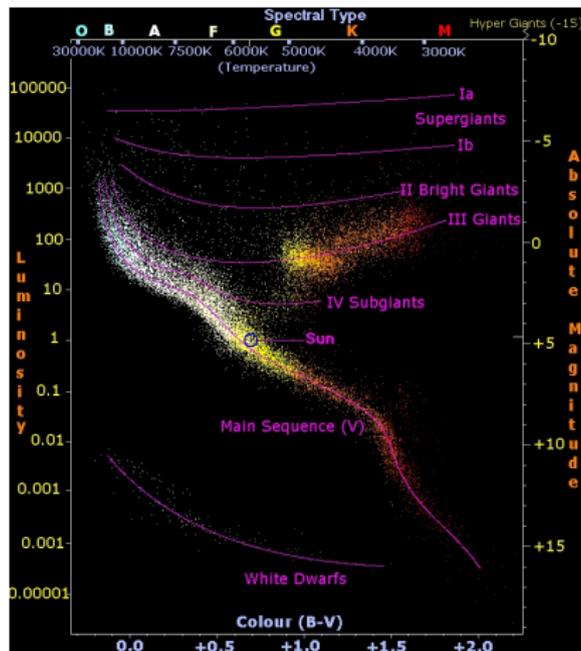
As estrelas nascem em certas regiões do meio interestelar, os berçários estelares:



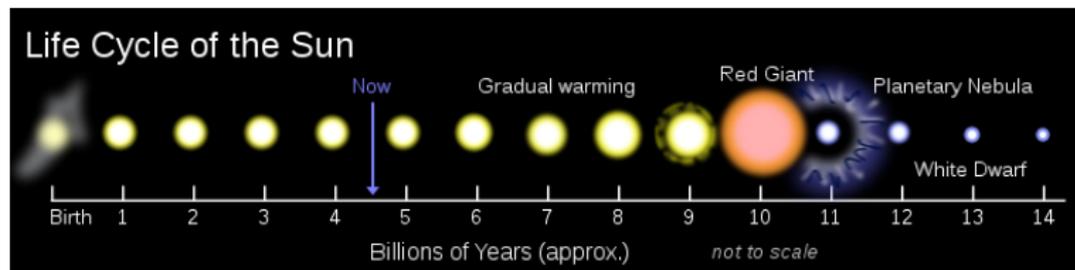
Nessas regiões a densidade é relativamente grande, mas inferior ao de uma câmara de vácuo terrestre. Estas regiões são chamadas de **nuvens moleculares** e consistem principalmente de hidrogênio, mas com 23 – 28% de hélio e traços de elementos mais pesados.

# Como as estrelas evoluem

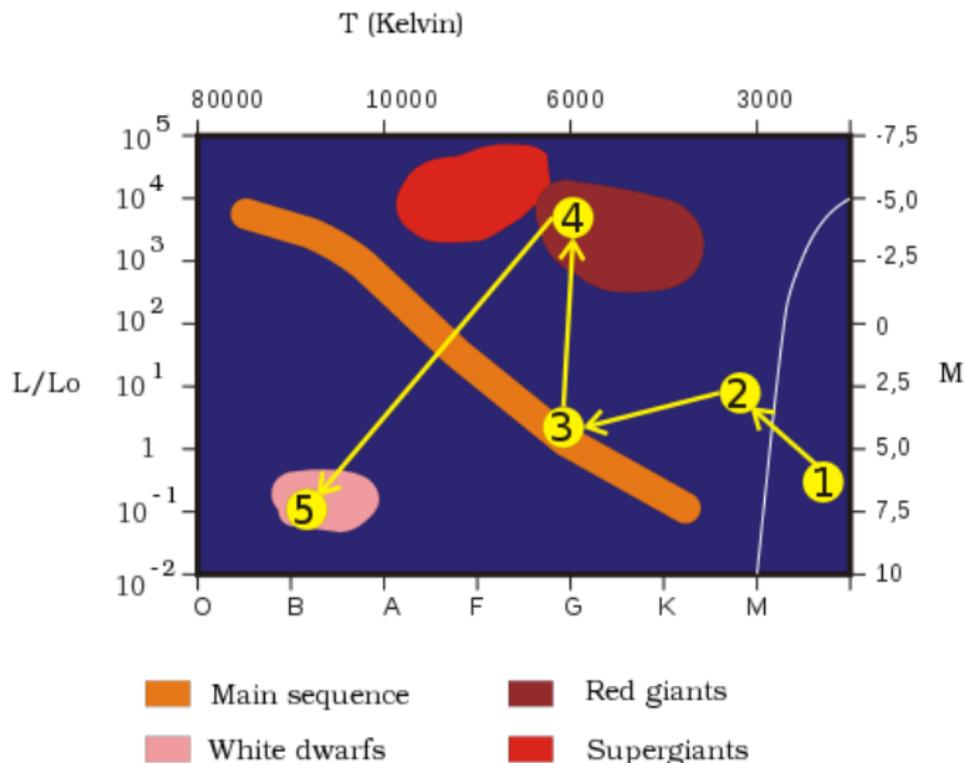
O diagrama de Hertzsprung-Russel:



# Evolução do Sol



# A evolução do Sol no diagrama HR



# Anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros

O limite de Chandrasekhar para anãs brancas vale, aproximadamente, 1.4 massas solares. O limite de Tolman-Oppenheimer-Volkof para as estrelas de nêutrons vale, aproximadamente, entre 1.5 – 3.0 massas solares. O principal obstáculo é o desconhecimento da equação de estado da estrela.

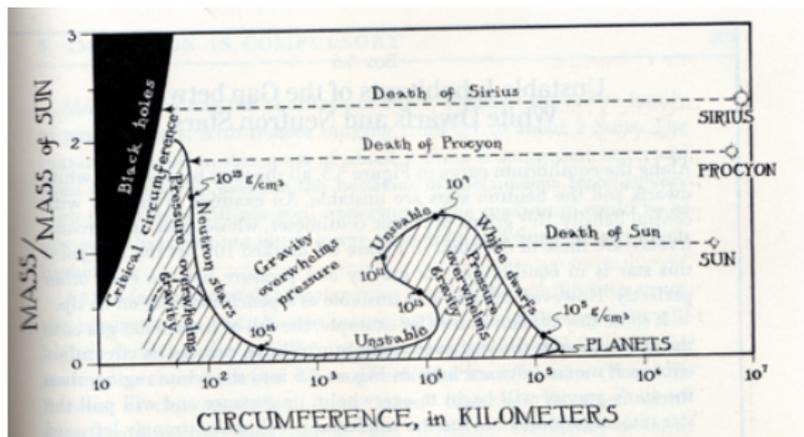


Figura: O diagrama de Wheeler-Wakano.

# Anãs brancas

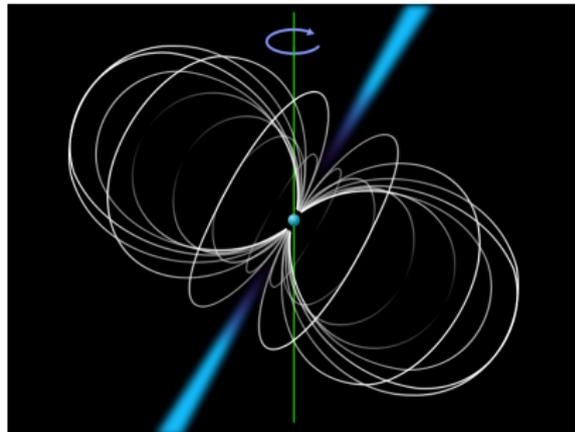
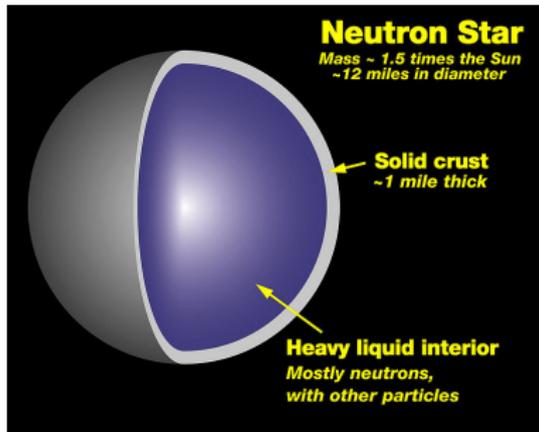
Nas anãs brancas, a pressão de Fermi do gás de elétrons contrabalança a pressão gravitacional.



**Figura:** Sirius A e a sua companheira Sirius B, uma anã branca.

# Estrelas de nêutrons; pulsares

Nas estrelas de nêutrons, a pressão de Fermi do gás de nêutrons contrabalança a pressão gravitacional.



**Figura:** Anatomia de uma estrela de nêutrons. À direita, um pulsar, uma estrela de nêutrons girante. Período de rotação de um pulsar varia desde 1.4 ms até 8.5 s.

# Buracos negros estelares I

Estrelas com massas superiores a três massas solares imediatamente antes do colapso podem terminar como buracos negros estelares:

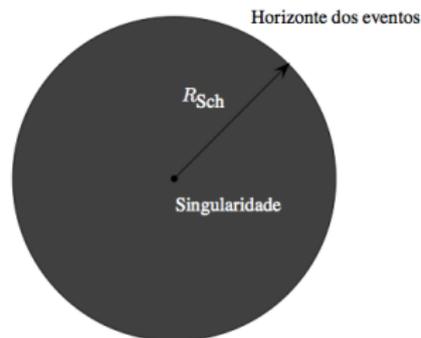


Figura: Buraco negro de Schwarzschild.

O buraco negro é o objeto mais simples do universo!!! Só precisamos saber sua massa  $M$ , seu momento angular,  $L$ , e sua carga  $Q$ .

- 1 Buraco negro de Schwarzschild ( $M$ ). Não giram e não têm carga.
- 2 Buraco negro de Reissner-Nordström ( $M, Q$ ). Buracos negros com massa e carga.
- 3 Buraco negro de Kerr ( $M, L$ ). Buracos negros girantes.
- 4 Buraco negro de Kerr-Newmann ( $M, L, Q$ ). Buracos negros que giram e têm carga.

# Buracos negros estelares III

Cygnus X-1 foi a primeira fonte de raios X a ser aceita como candidata a buraco negro estelar. Sua massa vale aproximadamente 8.7 vezes a massa do Sol. As observações indicam que esta estrela é muito compacta para ser estrela normal. se for um buraco negro, o raio do horizonte do eventos vale aproximadamente 26 km.



Figura: Cygnus X-1..

# Buracos negros estelares IV

- 1 4U 1543-475/IL Lupi
- 2 A0620-00/V616 Mon
- 3 Cyg X-1 (o mais próximo da Terra, 6,000 anos-luz)
- 4 Cygnus X-3
- 5 GRO J1655-40/V1033 Sco
- 6 GRS 1124-683/GU Mus
- 7 GRS 1915+105/V1487 Aql
- 8 GS 2000+25/QZ Vul
- 9 GX 339-4/V821 Ara
- 10 M33 X-7 (o mais massivo)
- 11 SS 433
- 12 V404 Cyg
- 13 XTE J1118+480/KV UMa
- 14 XTE J1550-564/V381 Nor
- 15 XTE J1650-500 (o menor descoberto até agora).
- 16 XTE J1819-254/V4641 Sgr

- 1 GCIRS 13E
- 2 M-15 NGC 7078
- 3 M-33 Triangulum NGC 598
- 4 M-110 NGC 205
- 5 M-31 G1 NGC 224
- 6 M82 X-1
- 7 NGC 253
- 8 NGC 1313 X-1
- 9 NGC 1313 X-2

# Supermassivos: candidatos a buraco negro

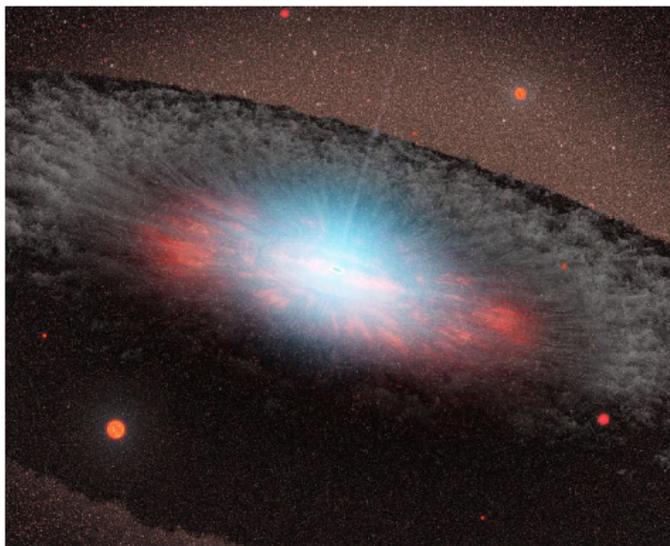
## Buracos negros supermassivos:

- 1 OJ 287. Pode conter um híper-super buraco negro !!! O maior de todos!
- 2 4C +37.11. Rádio galáxia. Pode conter um sistema binário de B.N. supermassivos.
- 3 3C 75. B.N. supermassivo normal.
- 4 HE0450-2958. Sistema estelar hípercompacto organizado em torno de um B.N. supermassivo.
- 5 Q0906+6930. Idem.
- 6 Sagittarius A\*. B.N. supermassivo normal.



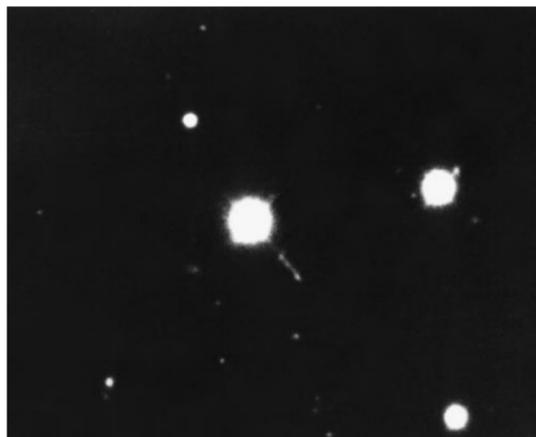
# A gravitação relativística hoje: a busca por fontes de gravitação forte

Hoje há evidências de que no centro da maioria das galáxias existe um buraco negro com milhões de massas solares. São os **buracos negros galácticos!**



# Quasares (quasar=quasi-estelar radio source)

São regiões com um raio de 10 a 10 000 vezes o raio de Schwarzschild do buraco negro supermassivo que se supõe encontrar-se no seu centro



**Figura:** Visão artística de um quasar. A direita, um quasar de verdade!

# AGNs (AGN=active galactic nucleus)

Região ativa no centro de uma galáxia com luminosidade muito maior do que o normal e que emite ondas de rádio, infravermelhas, óticas, ultravioletas, raios X e/ou raios gama. Acredita-se que a radiação se deve ao disco de acreção de massa em torno um buraco negro supermassivo. São os faróis mais brilhantes do universo!!

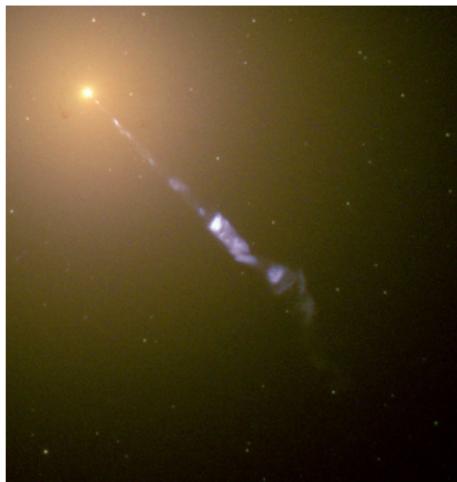
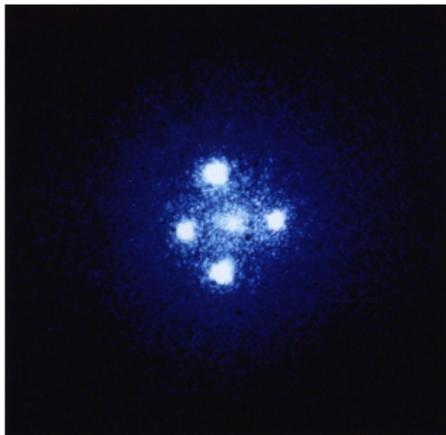
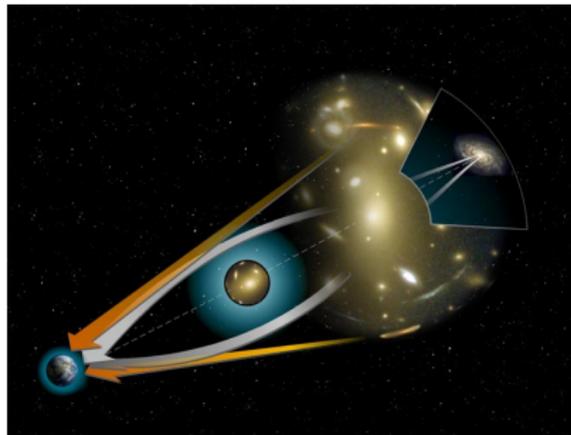


Figura: Imagem do AGN M87 captada pelo Hubble.

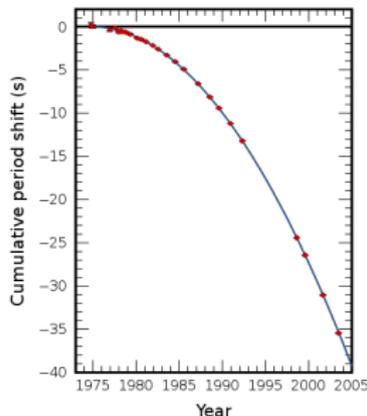
# Lentes gravitacionais



**Figura:** Lentes gravitacionais podem ajudar na localização de objetos muito massivos. À direita, a cruz de Einstein.

# Radiação gravitacional

Em 1974, Russel Hulse e Joseph Taylor descobriram um pulsar, o PSR1913+16. Este pulsar forma um sistema binário com uma companheira ainda desconhecida (estrela de nêutrons, buraco negro, anã branca?). Os dados experimentais indicam perda de energia por parte do sistema.



**Figura:** Alteração do período orbital de PSR1913+16. Curva em azul: predição teórica, pontos vermelhos: dados experimentais.

# The End

*This is the end, beautiful friend*

....

*The end*

The Doors – Jim Morrison