

Sobral: onde a luz faz a curva

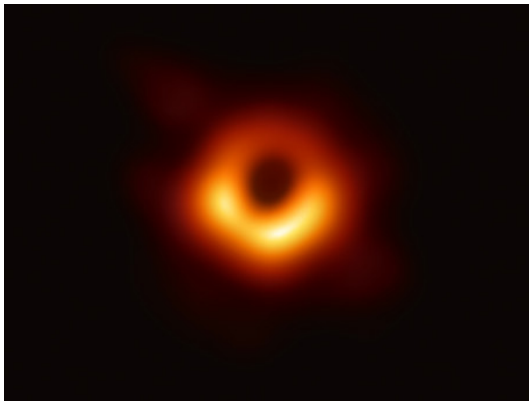
Júlio C. Fabris

PPGCosmo/Núcleo Cosmo-ufes - Universidade Federal do Espírito Santo

Astrofísica, Cosmologia e Gravitação. Novembro/Dezembro
2020

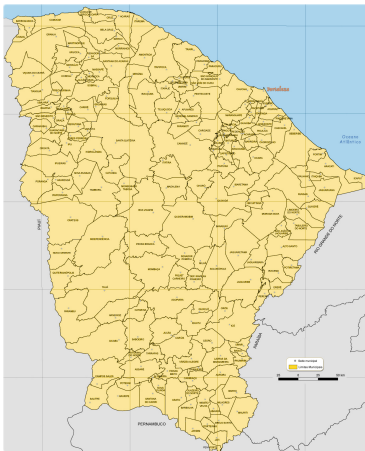
Buraco negro

A imagem



Ceará

Onde tudo começou



As Interações Físicas

As Interações Físicas

- ▶ Existem quatro interações fundamentais na natureza:
 1. A interação gravitacional;
 2. A interação eletromagnética;
 3. A interação fraca;
 4. A interação forte.

As Interações Físicas

Quatro Interações

- ▶ Todos os fenômenos naturais podem ser explicados, em princípio, por estas quatro interações fundamentais

As Interações físicas

O modelo padrão

fermions (3 générations de la matière)				bosons (forces)
	I	II	III	
masse →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nom →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino electronique	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino tauique	91.2 GeV 0 1 Z^0 boson Z^0
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e électron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ± 1 1 $W^\pm$ boson W
Leptons				

électromagnétisme

interaction forte

interaction faible

interaction faible

A Gravidade

As interações físicas

- ▶ Destas quatro interações apenas a gravidade é universal:

Todos os corpos sentem a gravidade

.

A Gravidade

As interações físicas

- ▶ Um filósofo alemão do século XIX chegou a dizer:

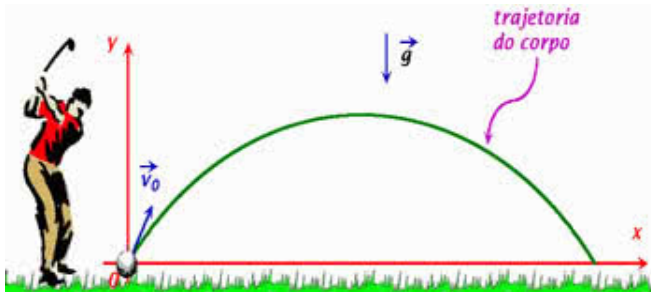
A gravitação é a expressão da Vontade Universal

.

Schopenhauer, *O mundo como vontade e representação*, 1819.

Gravidade

Trajétórias

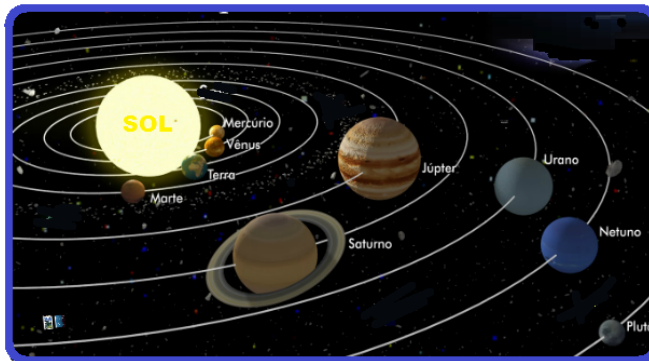


A Gravidade

A gravidade

- ▶ É a gravidade a responsável pela órbita dos planetas em torno do Sol, pela órbita da Lua em torno da Terra, etc.

Gravidade



A Gravidade

A gravidade e a luz

Mas, a gravidade, ela age sobre algo como a LUZ

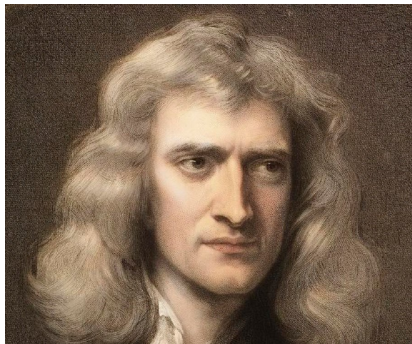
A Gravidade

A teoria de Newton

- ▶ A primeira teoria moderna sobre a atração gravitacional foi feita pelo inglês Isaac Newton.

A Gravidade

Newton



Isaac Newton, 1643-1727

A Gravidade

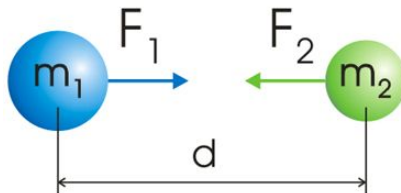
A teoria de Newton

- ▶ A teoria newtoniana da gravitação é baseada no princípio que,

**Matéria atrai matéria pela razão do produto das massas
e pelo inverso do quadrado da distância**

A Gravidade

Newton



$$F_1 = F_2 = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

A Gravidade

A teoria de Newton

- ▶ A gravitação newtoniana é um sucesso:
 1. Explica a queda dos corpos sobre a superfície terrestre;
 2. Explica a órbita dos planetas em torno do Sol
 3. Permitiu até descobrir teoricamente um Planeta (Netuno).

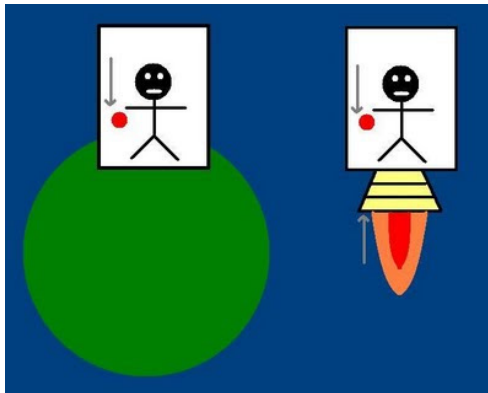
A Gravidade

A teoria da Relatividade Geral

- ▶ A **Teoria da Relatividade Geral** é a moderna teoria da gravitação.
- ▶ Ela foi formulada no início do século XX.
- ▶ Ela é baseada em um fato, do ponto de vista newtoniano, empírico: **todos os corpos reagem da mesma forma à gravitação.**
- ▶ Este fato é conhecido como *Princípio da Equivalência*.

A Gravidade

Teoria da Relatividade Geral



A Gravidade

A teoria da Relatividade Geral

- ▶ O Princípio da Equivalência é consequência do fato que todos os corpos caem com a mesma aceleração quando sob ação do campo gravitacional.

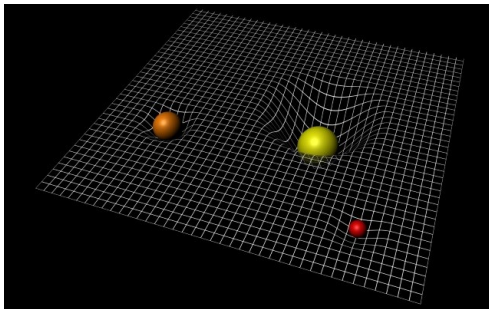
A Gravidade

A teoria da Relatividade Geral

- ▶ Na Teoria da Relatividade Geral não existe mais a noção de força gravitacional.
- ▶ Nesta teoria, o fenômeno gravitacional é explicado pela distorção que os corpos massivos provocam no espaço (na verdade, no espaço-tempo).

A Gravidade

Teoria da Relatividade Geral



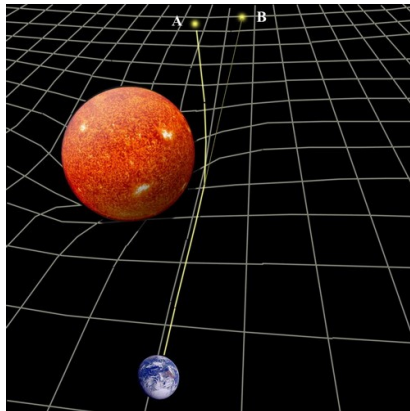
A Gravidade

A teoria da Relatividade Geral

- ▶ O que se chama na teoria newtoniana de força gravitacional é interpretado na teoria da Relatividade Geral como um corpo se movendo em um espaço curvo.

A Gravidade

Teoria da Relatividade Geral



A Luz

E o que é a luz?

A Luz

Newton de novo

- ▶ Newton propôs uma teoria onde a luz seria formada por pequenas partículas dotadas de massa.

A Luz

Huygens

- ▶ Quase ao mesmo tempo, Huygens, um holandês, propôs que a luz seria vibração, oscilações, de um tênue meio, que depois se chamaria de *éter*.

A Luz

Dualidade



- ▶ Uma evidência importante em favor da teoria corpuscular da luz: um raio de luz se propaga em linha reta!
- ▶ Uma evidência importante em favor da teoria ondulatória: a luz se difrata!

Luz e gravitação

- ▶ Aproximadamente um século depois da publicação dos *Principia* de Newton, alguns outros cientistas começaram a pensar mais precisamente sobre o efeito da Gravitação sobre a luz - algo natural de se questionar visto que a luz é formada por corpúsculos.
- ▶ Papel importante seria desempenhado pelo inglês John Michell (1724-1793)

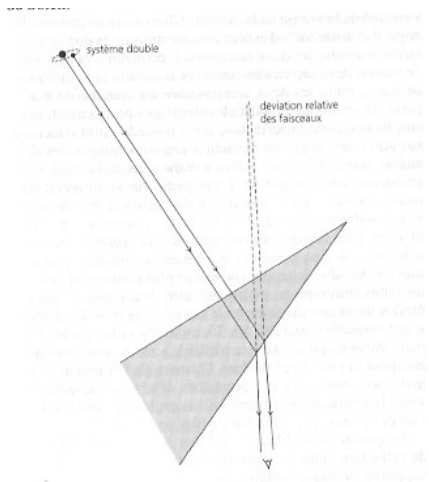
John Mitchell



luz e gravitação

- ▶ John Michell se dedicou durante um tempo a tentar realizar estas medidas, usando prismas: o desvio da luz em um prisma teria relação com a sua velocidade.
- ▶ No entanto, o método de prismas revelou-se incapaz de detectar os efeitos previsto: eram baseados na ideia que a velocidade da luz varia com o movimento da fonte (além do óbvio problema da precisão).

Binárias



luz e gravitação

- ▶ Pouco depois, o astrônomo alemão Johann Soldner se dedicou ao estudo da deflexão dos raios luminosos por estrelas, em particular pelo Sol.
- ▶ Ele falou em uma deflexão da ordem de $0,85''$ para a luz passando na borda do Sol.
- ▶ Mas, não conseguiu realizar a medida: a fotografia estava nos seus primórdios!

Soldner



luz e gravitação

- ▶ Os resultados negativos das experiências de Michell e Soldner obviamente diminuíram o entusiasmo por esta linha de pesquisa.

luz e gravitação

- ▶ Logo depois, a teoria ondulatória da luz triunfa graças as experiências de difração e interferência.
- ▶ A luz deixa de ser um corpúsculo, e os efeitos da gravitação sobre ela se tornam mais obscuros.

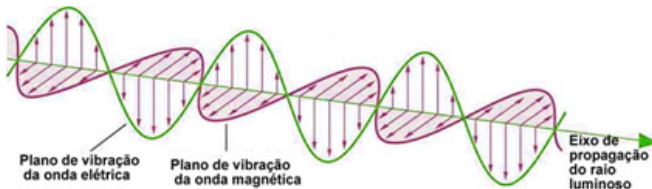
A Luz

Onda ou partícula

- ▶ No eletromagnetismo moderno a luz é vibração dos campos elétrico e magnético.

A Luz

Dualidade



A Luz

Onda ou partícula

- ▶ Se a luz for formada por partículas, ela sofreria a ação da gravitação tanto na teoria de Newton quanto na teoria da Relatividade Geral.
- ▶ Mas, se a luz for onda, ela não teria como ser afetada pela gravitação na teoria newtoniana, pois não teria uma massa, **a menos que se evoque a fórmula $E = mc^2$.**
- ▶ Mas, seria ainda assim mesmo afetada na teoria da Relatividade Geral, pois ela teria que se deslocar em um espaço curvo.

A Luz

As duas previsões

- ▶ Em ambas as teorias, as da Teoria da Relatividade Geral e as de Newton (com a teoria corpuscular), a luz deve ser defletida pelo campo gravitacional.
- ▶ Mas, a teoria da Relatividade Geral prevê um resultado que é o dobro do predito pela teoria newtoniana.

A Luz

As duas previsões

- ▶ No caso de um feixe de luz passando na borda do Sol temos:
 1. Na teoria newtoniana, a deflexão da luz seria de $0,85''$;
 2. Na teoria da Relatividade Geral, seria $1,70''$.

Medindo a Deflexão da Luz

Como medir?

- ▶ Mas, como medir a deflexão da luz das estrelas na vizinhança do Sol?
- ▶ Quando tem o Sol, não se vê as estrelas!

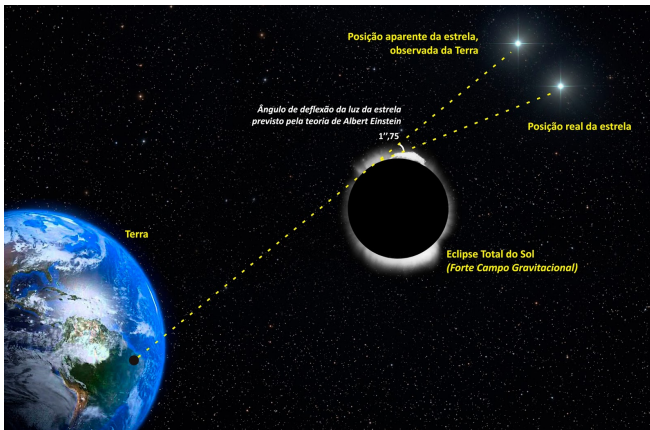
Medindo a Deflexão da Luz

Como medir?

- ▶ Este problema pode ser resolvido quando houver um eclipse do Sol pela Lua, como proposto por Soldner.
- ▶ Com a invenção da fotografia, tal medida se torna possível.

Medindo a Deflexão da Luz

Eclipse



Medindo a Deflexão da Luz

Passaquatro

- ▶ Em 1912 ocorreria um eclipse total que seria muito marcante no sudeste do Brasil, mais precisamente em Passaquatro.
- ▶ Alguns dos melhores astrônomos da época (inclusive o lendário Eddington) vieram ao Brasil para medir o efeito da deflexão.
- ▶ Contaram com a ajuda do diretor do Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Henrique Morize.

Medindo a Deflexão da Luz

Passaquatro



MEMBROS DAS EXPEDIÇÕES A PASSA QUATRO (MG) EM 1912.

Medindo a Deflexão da Luz

Passaquatro

► Mas...no dia do eclipse...choveu!

Medindo a Deflexão da Luz

Passaquatro



Medindo a Deflexão da Luz

Rússia

- ▶ Em 1914 novo eclipse ocorreria, podendo ser visto em condições adequadas na Rússia, Criméia.
- ▶ Uma expedição alemã-americana se organizou.
- ▶ Mas, no meio da expedição, antes do eclipse, inicia-se a primeira guerra mundial.
- ▶ Os astrônomos alemães foram presos (a Alemanha estava em guerra com a Rússia), mas os americanos puderam fazer as observações.
- ▶ As nuvens no entanto impediram qualquer observação.

Medindo a Deflexão da Luz

Rússia



Medindo a Deflexão da Luz

1919

- ▶ Em 1919, a oportunidade se apresentou de novo: haveria um eclipse total que seria muito bem observado no nordeste brasileiro e na costa oeste da África.

Medindo a Deflexão da Luz

Sobral



Medindo a Deflexão da Luz

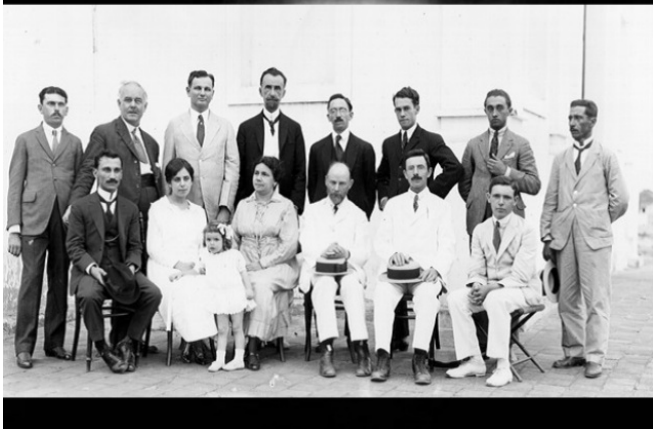
1919

- ▶ Os ingleses organizaram duas expedições para evitar a decepção de 1912: uma para a Ilha de Príncipe, na costa da África, e outra para Sobral, Ceará, no Nordeste Brasileiro.
- ▶ Eddington foi na expedição para a África.

Medindo a Deflexão da Luz

Sobral

Equipe da expedição a Sobral



Medindo a Deflexão da Luz

Sobral



Medindo a Deflexão da Luz

Sobral



Medindo a Deflexão da Luz

1919

- ▶ Veio o dia do eclipse...e choveu em Príncipe (onde estava o Eddington), mas não em Sobral.

Medindo a Deflexão da Luz

Sobral

- ▶ Resultado obtido em Sobral:

$$\Delta\phi = 1,98 \pm 0,16. \quad (1)$$

- ▶ Resultado próximo ao valor predito pela Relatividade Geral!
- ▶ A teoria recebia sua comprovação!

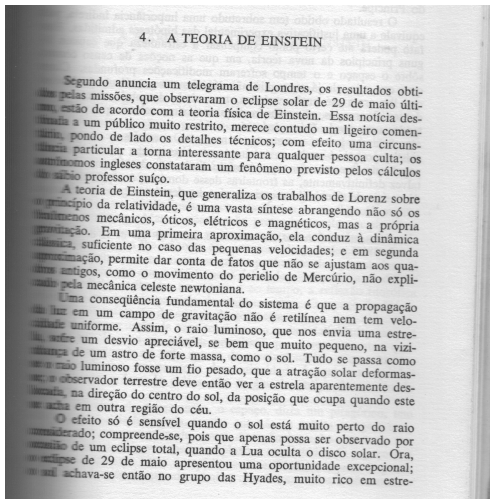
Medindo a Deflexão da Luz

Amoroso Costa



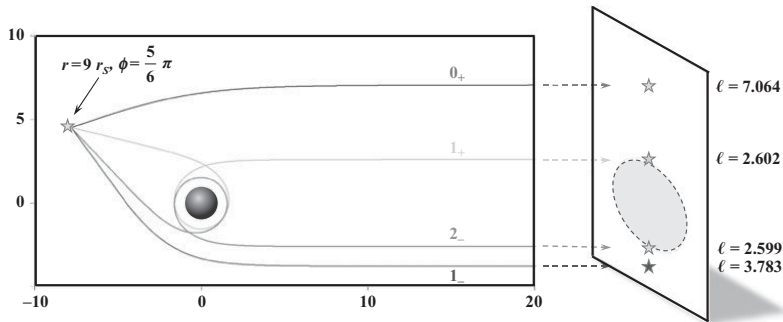
Medindo a Deflexão da Luz

Amoroso Costa



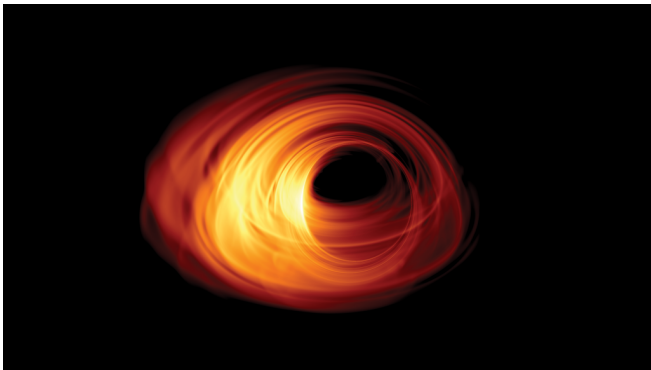
O Buraco Negro de M87

A sombra do buraco negro



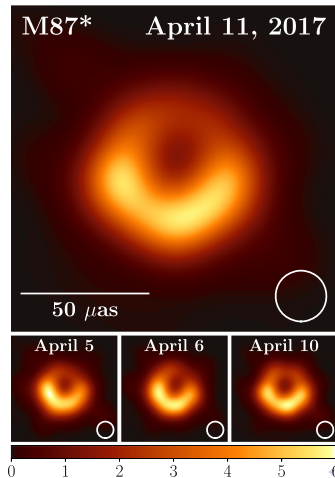
O Buraco Negro de M87

A sombra do buraco negro



O Buraco Negro de M87

Imagem reconstituída







Kitty, §22/12/2005 †28/11/2018