

99 ANOS DE RELATIVIDADE GERAL

Victor O. Rivelles

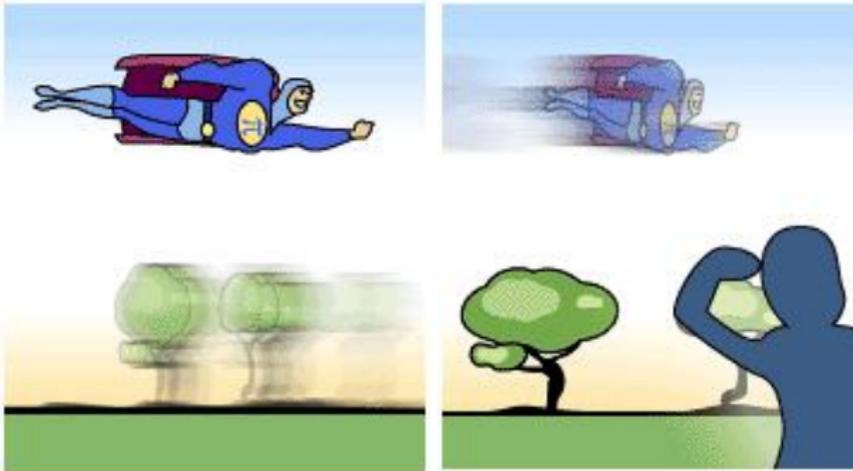
<http://itec.if.usp.br/~rivelles>
Instituto de Física
Universidade de São Paulo

Convite à Física – IFUSP – 26/03/2014

RELATIVIDADE ESPECIAL

- Formulada por Einstein em 1905.
- A **velocidade da luz** é a mesma em qualquer referencial inercial.
- **Contração de Lorentz**: comprimentos dependem do observador

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$



- **Dilatação temporal**: intervalos de tempo dependem do observador

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

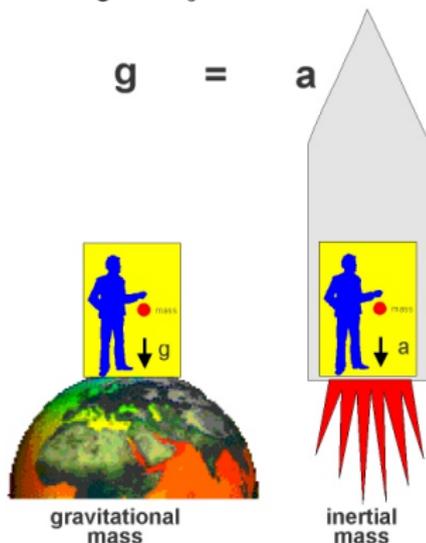
GRAVITAÇÃO NA RELATIVIDADE RESTRITA

- A força gravitacional Newtoniana propaga-se **instantaneamente**.
- É necessário **conciliar** a relatividade restrita com a gravitação.
- Einstein demorou 10 anos para compatibilizar a relatividade restrita com a gravitação.



GRAVITAÇÃO NA RELATIVIDADE RESTRITA

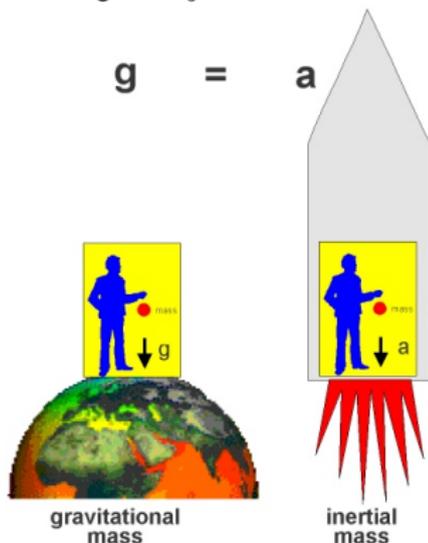
- A força gravitacional Newtoniana propaga-se **instantaneamente**.
- É necessário **conciliar** a relatividade restrita com a gravitação.
- Einstein demorou 10 anos para compatibilizar a relatividade restrita com a gravitação.



- Para isso foi necessário descobrir o **Princípio da Equivalência**:
Não é possível distinguir os efeitos de um campo gravitacional dos efeitos da aceleração com respeito a um observador inercial.

GRAVITAÇÃO NA RELATIVIDADE RESTRITA

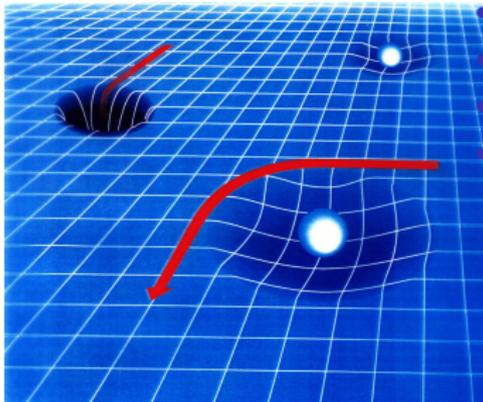
- A força gravitacional Newtoniana propaga-se **instantaneamente**.
- É necessário **conciliar** a relatividade restrita com a gravitação.
- Einstein demorou 10 anos para compatibilizar a relatividade restrita com a gravitação.



- Para isso foi necessário descobrir o **Princípio da Equivalência**:
Não é possível distinguir os efeitos de um campo gravitacional dos efeitos da aceleração com respeito a um observador inercial.
- Explica porque a **massa inercial** é igual à **massa gravitacional**!

RELATIVIDADE GERAL

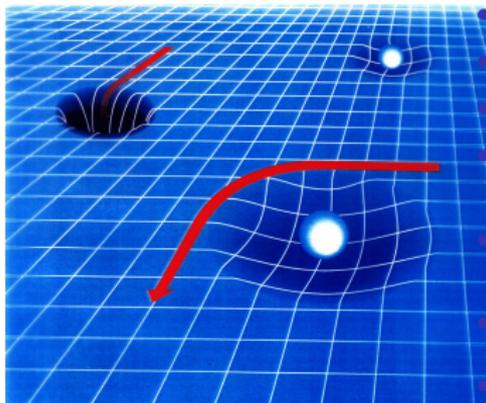
Relatividade geral = teoria da gravitação relativística



- Não há força gravitacional.
- A gravitação devido à curvatura do espaço.
- Matéria causa a curvatura do espaço.
- A curvatura determina o movimento da matéria.

RELATIVIDADE GERAL

Relatividade geral = teoria da gravitação relativística

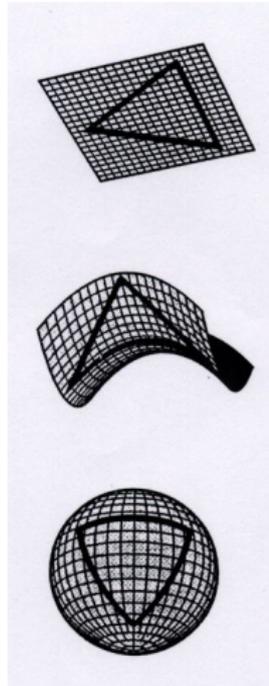


- Não há força gravitacional.
- A gravitação devido à curvatura do espaço.
- Matéria causa a curvatura do espaço.
- A curvatura determina o movimento da matéria.
- Equações a Relatividade Geral (Novembro de 1915)
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi T_{\mu\nu}$ Eq. de Einstein
- $\frac{d^2 X^\mu}{d\tau^2} + \Gamma^\mu_{\nu\rho} \frac{dX^\nu}{d\tau} \frac{dX^\rho}{d\tau} = 0$ Eq. da geodésica

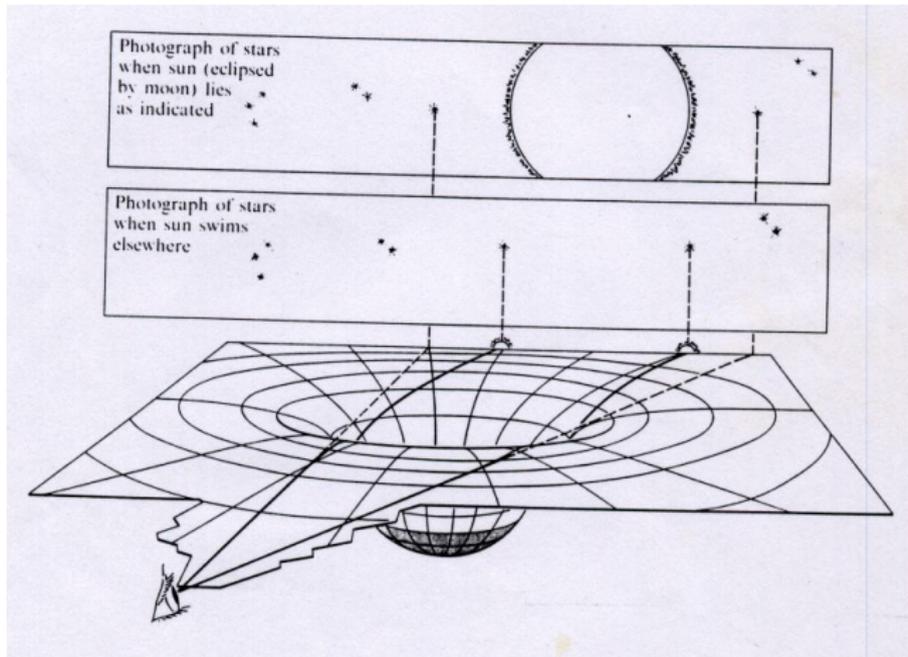
VÍDEO: Einstein - History Channel, 2008 (1:29)

ESPAÇOS CURVOS

- O que é um espaço curvo?
- Geometria Euclidiana: soma dos ângulos internos de um triângulo é 180 graus.
- Geometria Riemanniana: a soma pode ser diferente!
- Sem curvatura: igual à 180 graus.
- Curvatura positiva: maior que 180 graus.
- Curvatura negativa: menor que 180 graus.



DEFLEXÃO DOS RAIOS DE LUZ PELA GRAVITAÇÃO



A curvatura do espaço-tempo distorce o caminho dos raios de luz
Confirmado por Eddington em 1919.

VÍDEO: Einstein and Eddington, BBC, 2008 (1:28)

REDSHIFTSHIFT GRAVITACIONAL E O GPS



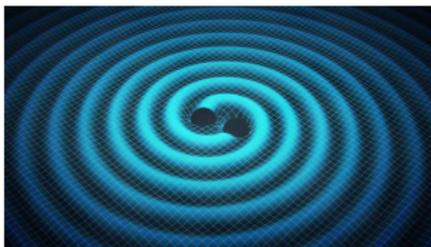
- A frequência da luz **aumenta** quando "cai" num campo gravitacional (**blueshift**) ou **diminui** quando se "afasta" (**redshift**) devido ao princípio da equivalência.
- Relatividade geral: Relógio no espaço **adianta** com relação a um relógio Terra.
- Relatividade restrita (dilatação temporal): relógio no espaço **atrasa** . Efeitos opostos mas que não se cancelam.

REDSHIFTSHIFT GRAVITACIONAL E O GPS



- A frequência da luz **aumenta** quando "cai" num campo gravitacional (**blueshift**) ou **diminui** quando se "afasta" (**redshift**) devido ao princípio da equivalência.
 - Relatividade geral: Relógio no espaço **adianta** com relação a um relógio Terra.
 - Relatividade restrita (dilatação temporal): relógio no espaço **atrasa** . Efeitos opostos mas que não se cancelam.
- A relatividade restrita faz com que o relógio atrase **7 μ s por dia** .
 - A relatividade faz com que o relógio adiante **45 μ s por dia** .
 - Portanto, o relógio no satélite adiante **38 μ s por dia** .
 - Para um GPS com acuracidade de 50 ns, a imprecisão é de 15 m.
 - Desprezando os efeitos da relatividade a imprecisão passa para **11,4 Km por dia!**

ONDAS GRAVITACIONAIS



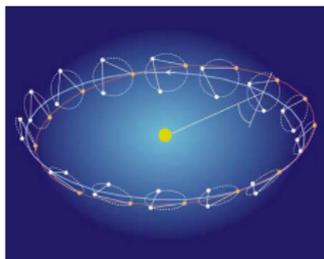
Estrelas de nêutrons PSR B1913+16
Prêmio Nobel 1993



LIGO: interferometria com laser,
braços 4 Km



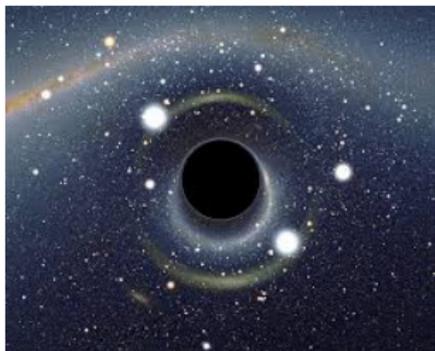
Detector Mário Schenberg na USP:
65 cm diâmetro, 1.2 ton



LISA: Três satélites, interferometria la-
ser, distância de 5 milhões Km

Um novo tipo de onda gravitacional foi descoberto na semana passada!!!!

BURACOS NEGROS

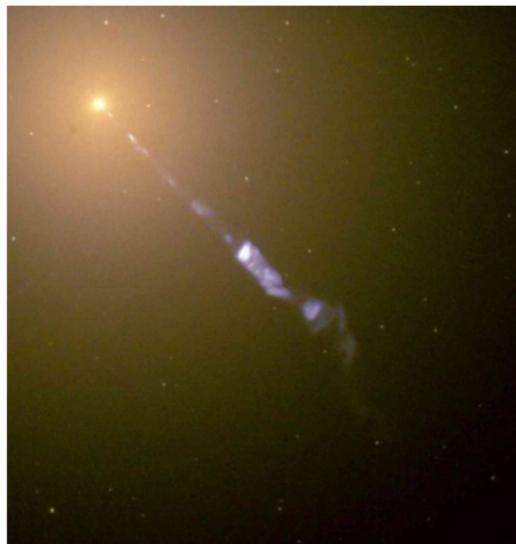


- Estrela cuja força gravitacional é tão forte que impede a emissão de luz.
- **Horizonte de eventos**: superfície que delimita o buraco negro.
- A massa estrela deve estar dentro do horizonte de eventos
- Uma vez dentro do buraco negro não há como sair. **Nem a luz sai do buraco negro!**
- Próximo de seu centro a força gravitacional é tão intensa que é necessário levar em conta **efeitos quânticos**. Ninguém sabe como fazer isso.
- Os buracos negros existem?

EXISTEM BURACOS NEGROS?



Sistema binário na galáxia M33
Massa do BN: 15.7 massas solares



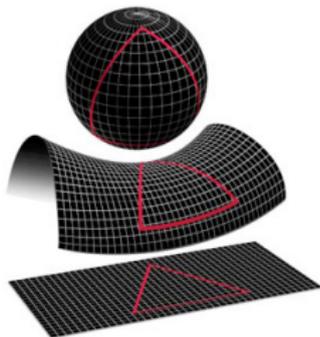
Jato emitido pela galáxia M87
Buraco negro supermassivo no centro da galáxia

- O buraco negro no centro de nossa galaxia! 4 milhões de massas solares
- **VÍDEO:** Monster of the Milk Way, PBS-Nova, 2006 (51:06)

COSMOLOGIA

- Cosmologia é o estudo da origem, estrutura e evolução do Universo.
- **Cosmologia Newtoniana**: universo infinito e estático. Porém instável.
- **A relatividade geral permite traçar a história do Universo!**
- Em **1922** Friedmann mostra que relatividade geral admite:

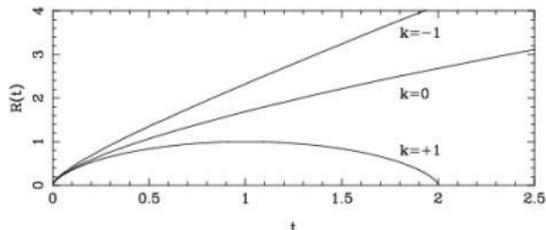
- Universo **fechado**



- Universo **aberto**

- Universo **plano**

- Além disso o Universo deveria estar em **expansão ou contração!**



UNIVERSO EM EXPANSÃO

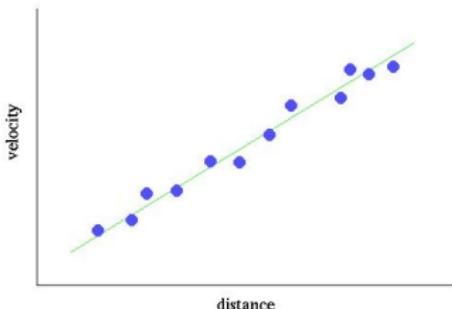
- Na época acreditava-se que o Universo era **estático**!
- Em Einstein modifica suas equações para obter um universo estático.
- Introduz a **constante cosmológica Λ** nas equações da relatividade geral

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

- Em seguida Hubble descobriu que as galáxias estão se afastando de nós e portanto o **Universo está em expansão!**

Lei de Hubble: A velocidade de recessão é proporcional à distância da galáxia.

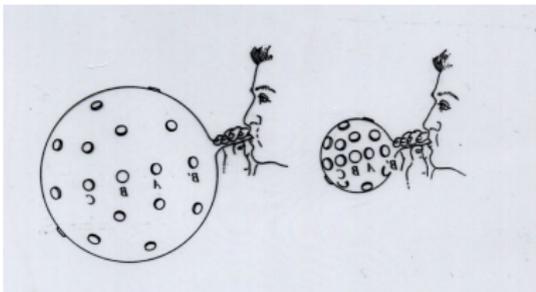
Hubble's law



- Einstein afirma que cometeu o maior erro de sua vida!

UNIVERSO EM EXPANSÃO

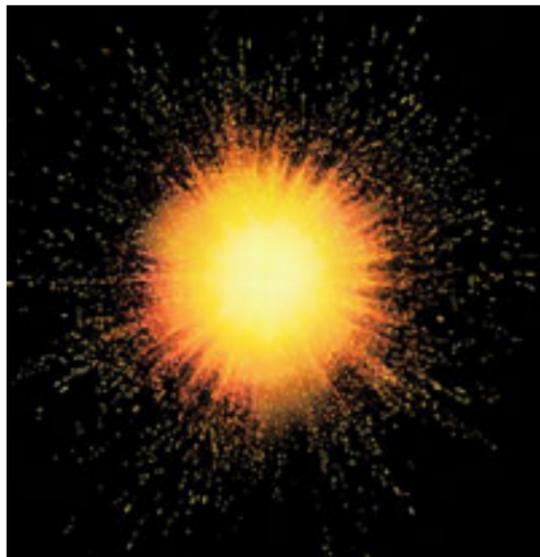
- Expansão e afastamento das galáxias:



- Como as galáxias estão se afastando uma das outras elas deveriam estar **mais próximas no passado**.
- Portanto, no passado, aconteceu o ...

BIG BANG

- A explosão inicial, há cerca de 13.8 bilhões de anos atrás.



- Cosmologia do Big Bang.
- Em 1949 George Gamow prevê a existência da **radiação cósmica de fundo** deixada pelo Big Bang quando o Universo tinha **380.000 anos!**

RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO

- Em 1965 a radiação cósmica de fundo é **descoberta** por Penzias e Wilson.
- Prêmio Nobel em 1978

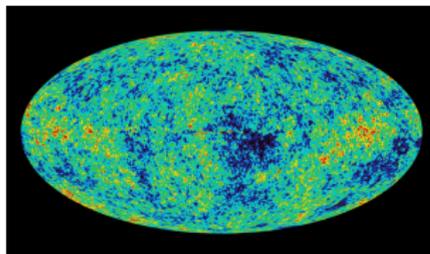
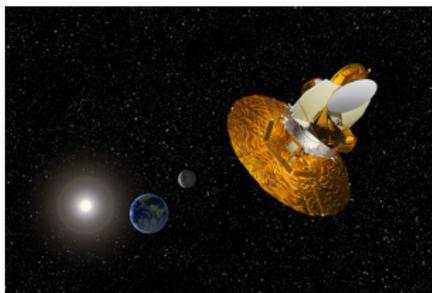


RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO

- Em 1965 a radiação cósmica de fundo é **descoberta** por Penzias e Wilson.
- Prêmio Nobel em 1978

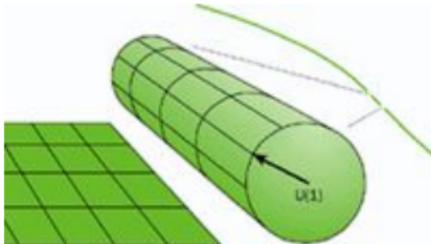


- Hoje em dia utilizam-se satélites: **COBE, WMAP, PLANCK, ...**
- Detecta a radiação de fundo à 2.7K e diferenças de temperatura de **micro-Kelvin**.
- COBE: prêmio Nobel de 2006



DE VOLTA A EINSTEIN...

- Einstein tinha outras ideias em mente.
- Em 1926 **Theodor Kaluza e Oscar Klein** mostram como estender a relatividade geral para **5 dimensões** e como obter a relatividade geral e o eletromagnetismo em **4 dimensões** depois enrolar uma das dimensões espaciais num círculo muito pequeno.

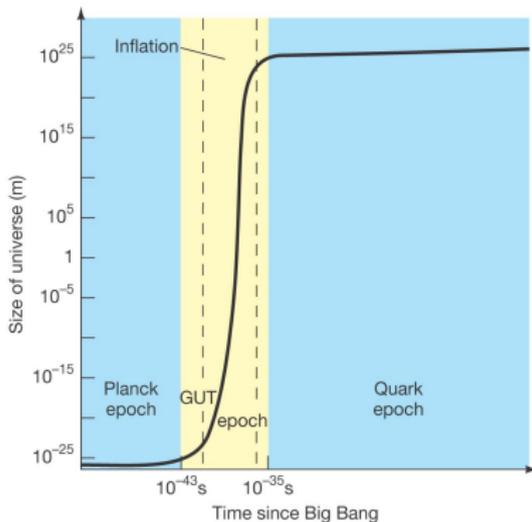


- **Teoria unificada da gravitação e eletromagnetismo.** Usado nas teorias de cordas!
- Einstein tentou obter uma teoria unificada da gravitação com a mecânica quântica mas falhou.
- Passou seus últimos anos tentando obter uma teoria unificada da gravitação e eletromagnetismo modificando a relatividade geral.
- **VÍDEO:** Einstein's Unfinished Symphony, BBC, 2005 (48:59)

Porém, nem tudo está resolvido e compreendido ...

UNIVERSO INFLACIONÁRIO

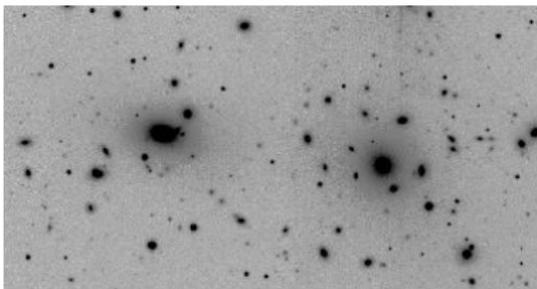
- A **radiação cósmica de fundo** medida hoje é extremamente **homogênea e isotrópica**.
Porquê?
- Em 1980 **Alan Guth** propôs o **modelo inflacionário**.
- O Universo passou por uma **fase de expansão exponencial**.
- Dobrava de tamanho a cada 10^{-34} s.!!!
- Isso explica porque a temperatura da radiação cósmica de fundo hoje é a mesma em qualquer direção.



- Na época da inflação havia **ondas gravitacionais primordiais** produzidas no Big Bang.
- Essas ondas gravitacionais deixaram marcas na **polarização da radiação eletromagnética** que sobreviveram na radiação cósmica de fundo.
- Em **17 de março** foi anunciada a descoberta das **ondas gravitacionais primordiais** pela colaboração BICEP2.
- Evidência forte a favor do modelo inflacionário!!!!

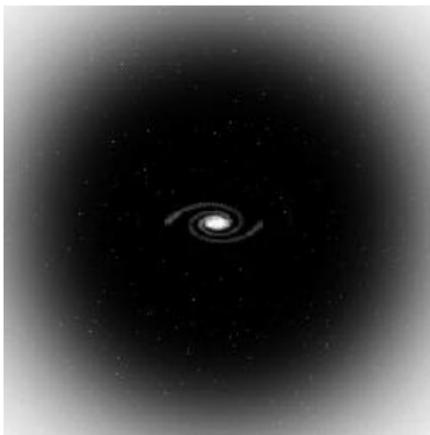
MATÉRIA ESCURA

- Em 1933 o aglomerado de galáxias de Coma é estudado.
- O movimento das galáxias **não pode ser explicado** pela atração gravitacional.
- O mesmo acontece com **estrelas na borda das galáxias**.
- Parece que há **mais massa** no aglomerado do aquela vista pelos telescópicos.
- É então postulado a existência da **MATÉRIA ESCURA**.



MATÉRIA ESCURA

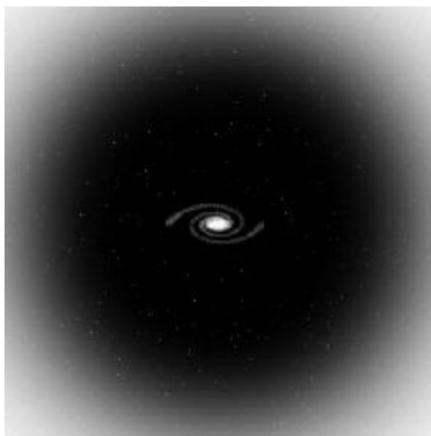
- É um **novo tipo de matéria** que praticamente não emite nem reflete luz.
- Sua **natureza é desconhecida**.
- Propostas que provém do modelo de partículas elementares: axions, WIMPs, neutralino, outras partículas supersimétricas.
- Há vários experimentos tentando detectar tais partículas.
- **VÍDEO:** Most of Our Universe is Missing, BBC, 2006 (48:09)



MATÉRIA ESCURA

- É um **novo tipo de matéria** que praticamente não emite nem reflete luz.
- Sua **natureza é desconhecida**.
- Propostas que provém do modelo de partículas elementares: axions, WIMPs, neutralino, outras partículas supersimétricas.
- Há vários experimentos tentando detectar tais partículas.
- **VÍDEO:** Most of Our Universe is Missing, BBC, 2006 (48:09)

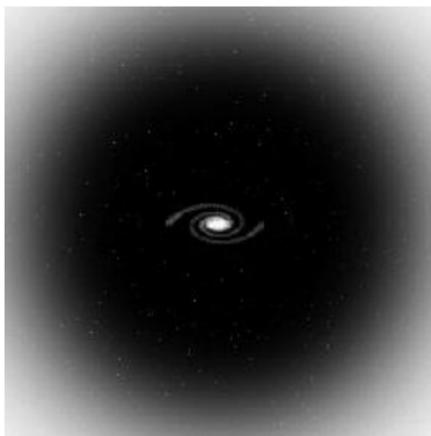
- Sabemos que:
- Matéria comum constitui apenas 4% do Universo.
- Matéria escura constitui 23% do conteúdo do Universo.



MATÉRIA ESCURA

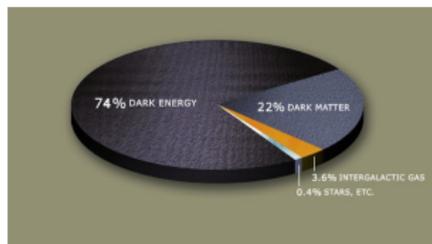
- É um **novo tipo de matéria** que praticamente não emite nem reflete luz.
- Sua **natureza é desconhecida**.
- Propostas que provém do modelo de partículas elementares: axions, WIMPs, neutralino, outras partículas supersimétricas.
- Há vários experimentos tentando detectar tais partículas.
- **VÍDEO:** Most of Our Universe is Missing, BBC, 2006 (48:09)

- Sabemos que:
- Matéria comum constitui apenas 4% do Universo.
- Matéria escura constitui 23% do conteúdo do Universo.
- Ainda faltam 73% !!!



EXPANSÃO ACELERADA DO UNIVERSO

- Em 1998 é descoberta através da observação de supernovas do tipo IA que a **expansão do Universo é acelerada**. Premio Nobel de 2011!
- Para explica-la é necessário postular a existência de uma energia que produza pressão negativa: **a energia escura**.
- Na relatividade geral o efeito de uma pressão negativa é gerar uma força que se opõem à força gravitacional.
- A energia escura pode estar na forma da **constante cosmológica**.
- Outras alternativas mais exóticas existem: quintessência, cosmologia de branas...
- A energia escura constitui 73% do conteúdo do Universo.



VÍDEO: Is Everything we Know About the Universe Wrong?, BBC, 2010 (58:57)

GRAVITAÇÃO QUÂNTICA

- Não é possível quantizar a relatividade geral
- O modelo padrão das partículas elementares precisa ser ampliado
- A relatividade geral também
- A proposta mais viável é a teoria de cordas
- Fornece uma teoria quântica para a gravitação perturbativamente
- Explica a entropia de certos buracos negros
- Requer dimensões extras e objetos extensos: branas
- Branas dão origem à outros modelos cosmológicos
- Mas a teoria de cordas ainda não está completa!!!

PARA SABER MAIS

LIVROS

- M. Gleiser, A Dança do Universo (Cia. das Letras, 1997)
- S. Hawking, O Universo Numa Casca de Noz (Mandarim, 2001)
- S. Weinberg, Os Três Primeiros Minutos (Guanabara Dois, 1980)
- A. Guth, O Universo Inflacionário (Campus, 1997)
- W. Isaacson, Einstein, Sua Vida, Seu Universo (Cia. das Letras, 2007)
- A. Pais, Sutil é o Senhor (Ed. Nova Fronteira, 1995)

VÍDEOS

- Einstein, History Channel, 2008 (1:29)
- Einstein and Eddington, BBC, 2008 (1:28)
- Monster of the Milk Way, PBS (51:06)
- Hawking, PBS, 2013 (1:33)
- Einstein's Unfinished Symphony, BBC, 2005 (48:59)
- Most of Our Universe is Missing, BBC, 2006 (48:09)
- Is Everything we Know About the Universe Wrong?, BBC, 2010 (58:57)

HOME PAGE: <http://itec.if.usp.br/~rivelles>