

Expansão do Universo

**Ricardo Moreno, Susana Destua,
Rosa M. Ros, Beatriz García**

União Astronómica Internacional

Colégio Retamar de Madrid, Espanha

Space Telescope Science Institute, Estado Unidos da América

Technical University of Catalonia, Espanha

ITeDA and Technological National University, Argentina



Objetivos

- Demonstrar a validade de um modelo.
- Compreender a expansão do Universo.
- Compreender que não existe um centro do Universo.
- Compreender a Lei de Hubble.
- Analisar a forma de deteção da matéria escura.



Apresentação

Este *workshop* é sobre:

- Origem do Universo: o *Big Bang*.
- Galáxias: não se “movem” através do espaço, é o espaço que se expande.
- Constante de Hubble: $v = H \cdot d$.
- Centro do Universo: não existe um centro do Universo, como não há nenhum país central.
- Radiação cósmica de fundo em micro-ondas.
- Lentes gravitacionais.



Modelos, previsões, verificação: Experiência da toalha de mesa



Previsão: se puxarmos de rompante uma toalha de uma mesa composta, nada do que está sobre ela cairá.

Se verificarmos, a previsão cumpre-se.

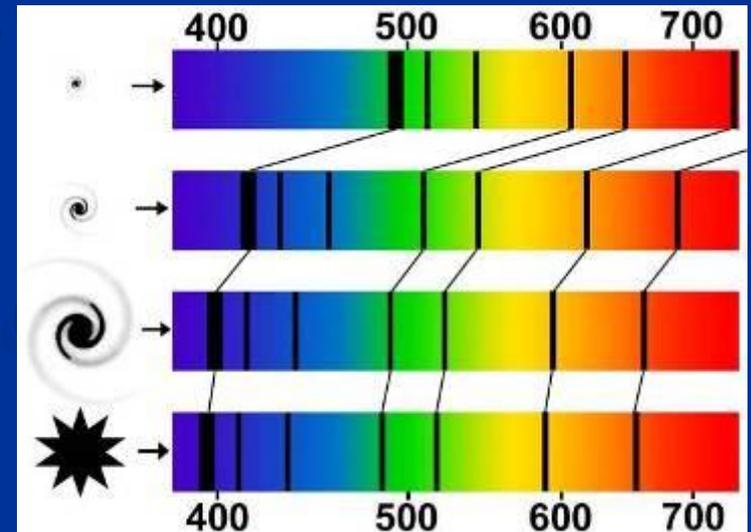
A experiência resulta porque a física é uma ciência que permite prever o que vai acontecer: se se retira de forma rápida a toalha, as forças de atrito não atuam sobre os objetos e por isso estes não caem.

A física experienciada e desenvolvida na Terra é a mesma que os astrónomos aplicam no restante universo.



Desvio para o vermelho 1/3

- A luz emitida por cada elemento apresenta riscas: é o espectro, próprio de cada um.
- Ao observar a luz das galáxias, observa-se que as riscas apresentam um deslocamento espectral para o vermelho e que, quanto mais longe está a galáxia, maior é o desvio.
- Interpreta-se como sendo consequência do seu afastamento de nós.



Desvio para o vermelho 2/3

- As galáxias mais próximas possuem movimentos relativamente pequenos e irregulares: a Grande Nuvem de Magalhães +13 km/s, a Pequena -30 km/s, Andrómeda -60 km/s, M32 +21 km/s.
- No enxame de Virgem, (50 milhões de a.l.), todas se afastam de nós a velocidades entre 1 000 e 2 000 km/s.
- No superenxame *Coma Berenice*, (300 milhões de a.l.) as velocidades variam entre 7 000 e 8 500 km/s.



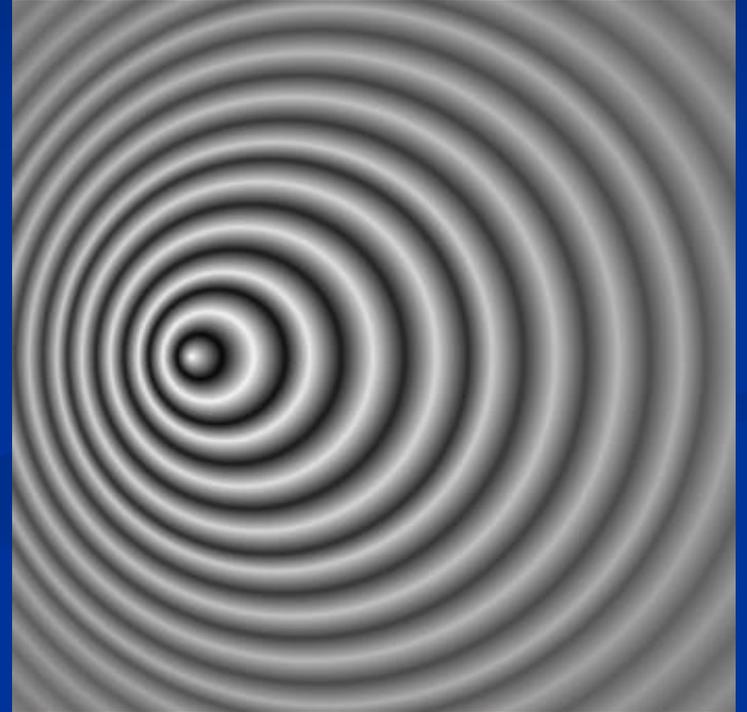
Desvio para o vermelho 3/3

- Porém, na direção oposta, M74 afasta-se a 800 km/s e M77 a 1 130 km/s.
- Se consideramos as galáxias mais distantes e ténues, a velocidade de recessão é ainda maior: NGC 375 afasta-se a 6 200 km/s, NGC 562 a 10 500 km/s e NGC 326 a 14 500 km/s.
- Independentemente do local de observação, todas as galáxias, exceto as mais próximas, se afastam de nós.



Efeito de Doppler

- Quando uma ambulância, uma moto, ou um comboio se aproximam, ouvimos o som mais agudo do que quando se afastam.
- Agudo → as cristas das ondas ficam mais próximas.
- Grave → as cristas das ondas ficam mais afastadas.



Atividade 1: Efeito de Doppler



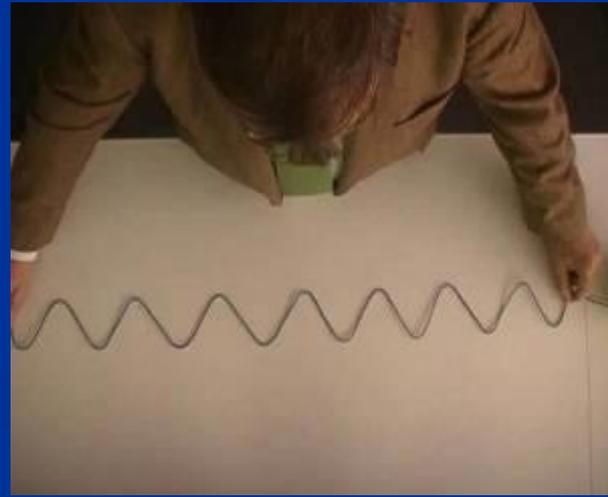
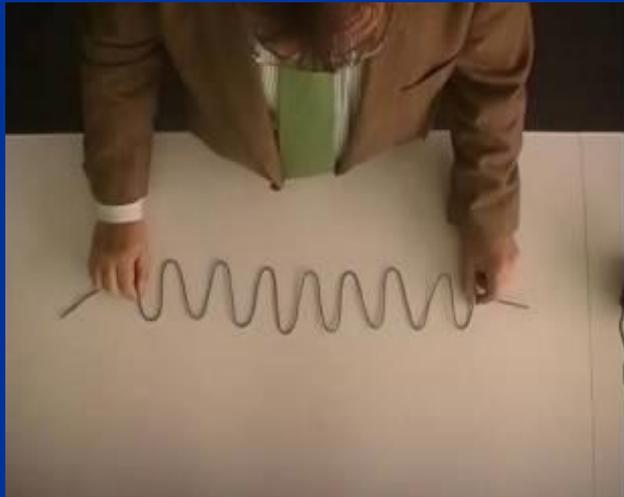
- O Efeito Doppler pode ouvir-se fazendo girar um relógio despertador num plano horizontal.
- Quando se aproxima do observador, o λ diminui e o som é mais agudo.
- Quando se afasta, o λ aumenta e o som é mais grave.
- Passa-se de uma forma semelhante com o som de uma corrida de motos, de uma ambulância ou de um comboio...

- Este é o efeito Doppler devido ao deslocamento. Porém, não é o que ocorre com a expansão das galáxias.



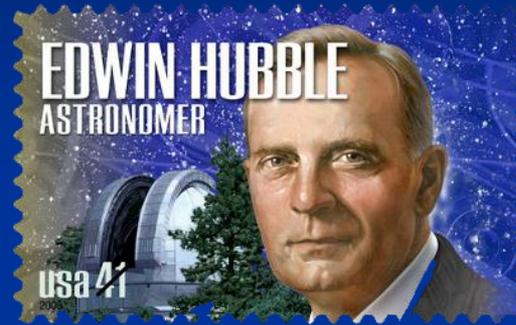
Atividade 2: Alongamento dos fótons

- O Universo, ao expandir-se, “estica” os fótons que nele existem.
- Pode fazer-se um modelo desse alongamento com um cabo elétrico semirrígido.
- Quanto mais tempo dura a viagem do fóton, mais alongamento sofre.



Lei de Hubble - Lemaître

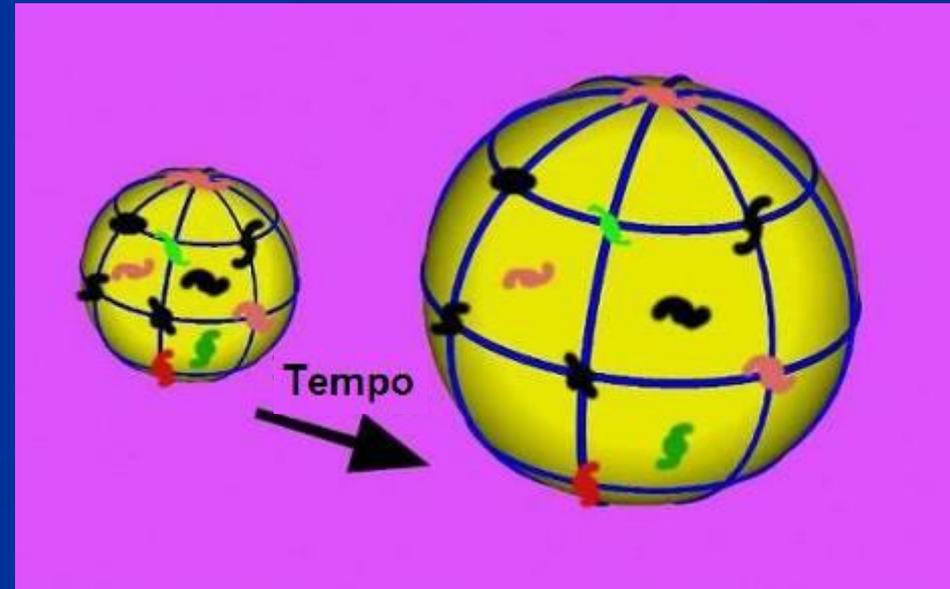
- Entre 1920 e 1930, George Lemaître e Edwin Hubble perceberam que as galáxias mais distantes se afastavam mais depressa.



- Lei de Hubble - Lemaître:

$$v = H_0 \cdot d$$

- Não se movem através de espaço: é o espaço que se expande, arrastando-as.



Atividade 3:

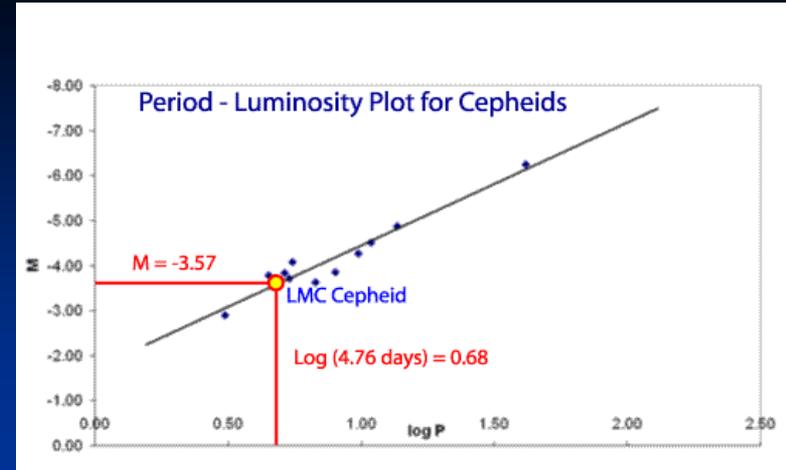
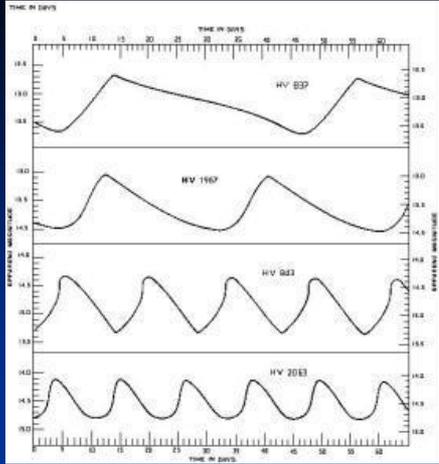
O Universo numa fita elástica



Atividade 4: O Universo num balão



- A distância entre as “galáxias” aumenta com a expansão.
- As galáxias não se movimentam na superfície do balão.

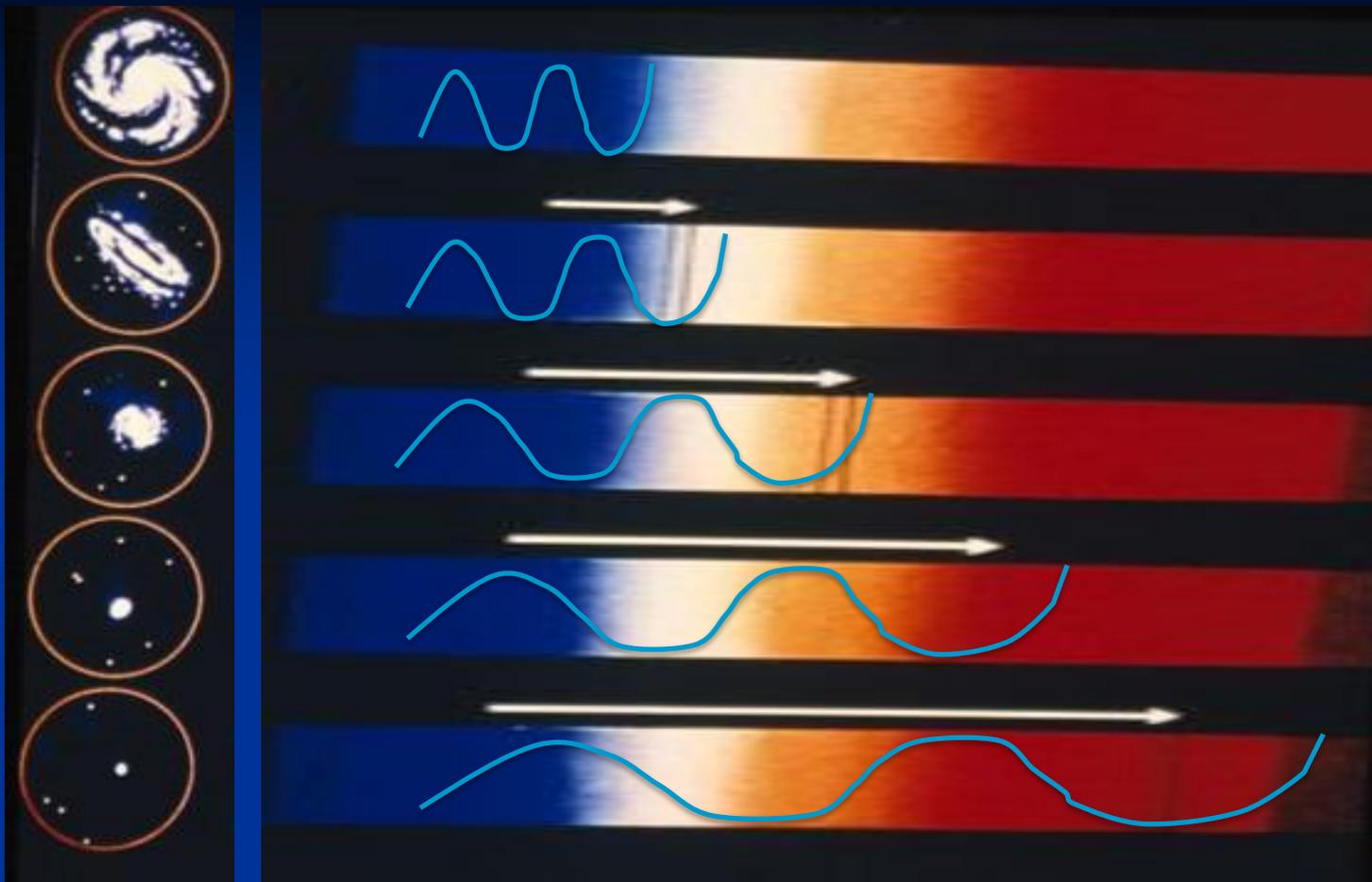


1) A distância a galáxias mais próximas determina-se utilizando a relação período-luminosidade das variáveis Cefeidas:

- A partir da curva da luz calcula-se o período, P ;
- A partir da relação período-luminosidade obtém-se a magnitude absoluta, M ;
- Calcula-se a distância $d = 10^{(m - M + 5)/5}$ pc.

Para determinar a distância a galáxias mais afastadas utiliza-se um tipo de supernova, todas de brilho semelhante.

Expansão do Universo



2) A velocidade de recessão mede-se no espectro

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c$$

Expansão do Universo

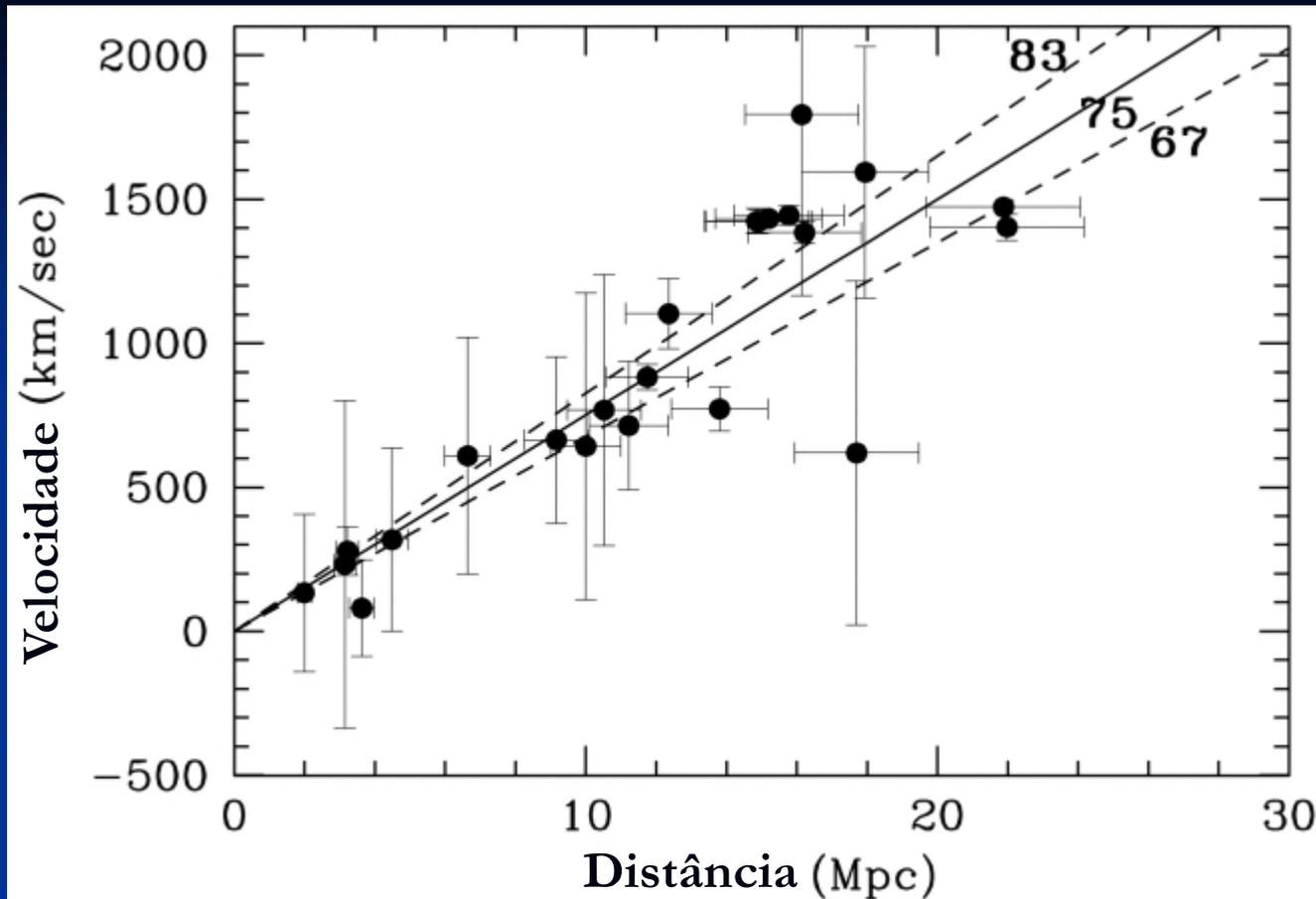
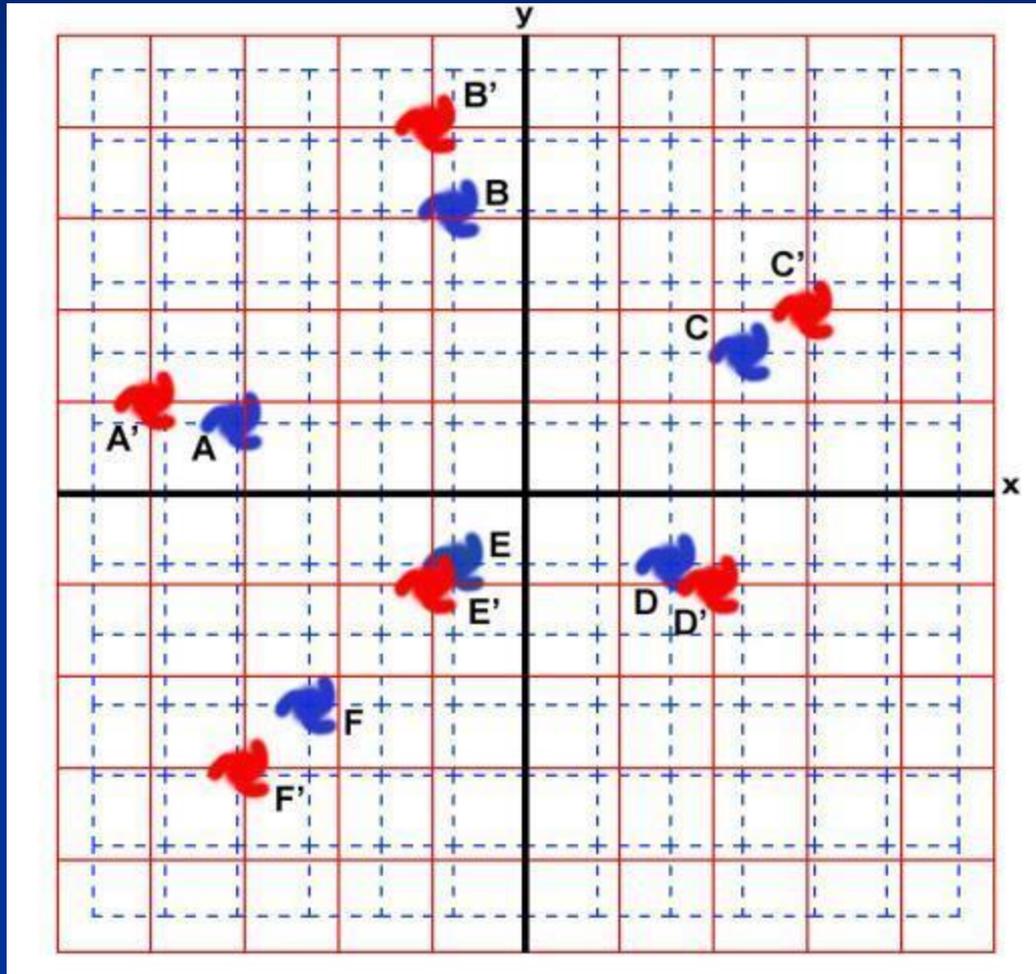


Fig. 1 - Adaptado de Freedman et al, 2001, ApJ, vol 553, p47.

3) A constante de Hubble é o declive da reta:

$v = H_0 \cdot d$, sendo H_0 a taxa de expansão do Universo: $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$

Atividade 5: Cálculo da constante de Hubble-Lemaître

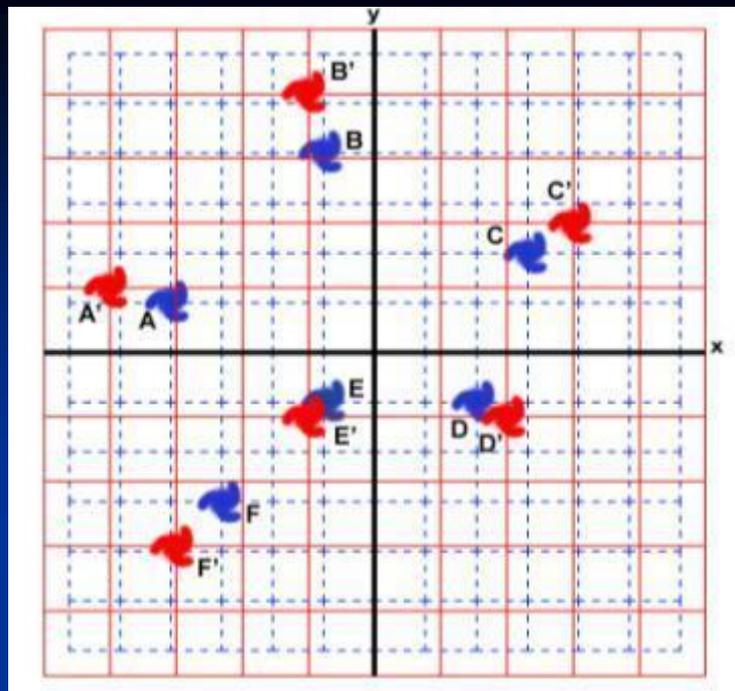


Azul = Universo
antes da expansão

Vermelho =
Universo depois da
expansão

Atividade 5: Cálculo da constante de Hubble-Lemaître

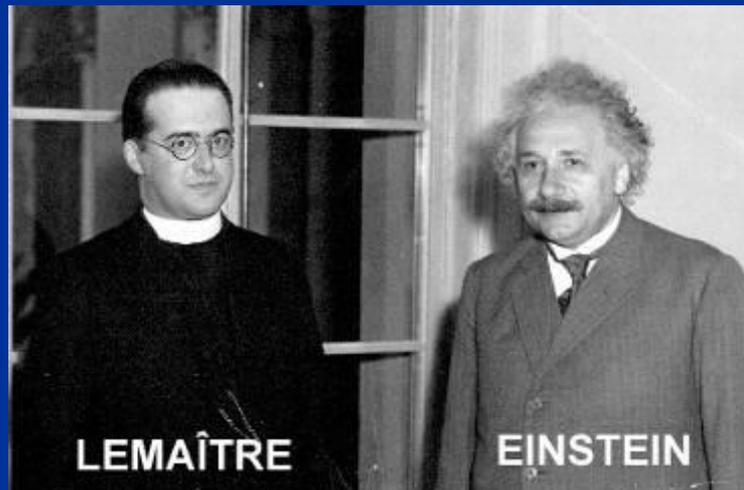
<i>Galáxia</i>	<i>Coordenadas x,y</i>	<i>d=distância à origem</i>	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
<i>A</i>					
<i>A'</i>					
<i>B</i>					
<i>B'</i>					
<i>C</i>					
<i>C'</i>					
<i>D</i>					
<i>D'</i>					
<i>E</i>					
<i>E'</i>					
<i>F</i>					
<i>F'</i>					



Galáxia	Coordenadas x, y	$d = \text{distância}$ à origem	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A	(-4, 1)				
A'	(-4, 1)				
B	(-1, 4)				
B'	(-1, 4)				
C	(3, 2)				
C'	(3, 2)				
D	(2, -1)				
D'	(2, -1)				
E	(-1, -1)				
E'	(-1, -1)				
F	(-3, -3)				
F'	(-3, -3)				

Big Bang

- Se voltássemos atrás, encontraríamos um momento em que tudo estava agregado: Universo em expansão.
- Georges Lemaître, resolvendo as equações da relatividade, chegou a um Universo em expansão que começou como um “ovo cósmico”.



Big Bang

- Nome de *Big Bang*: Grande Explosão.
- Atribuído por Fred Hoyle, depreciativamente, devido aos seus preconceitos antirreligiosos: soava-lhe demasiado à ideia de um Criador.
- S&T fez um concurso para alterar o nome. 12 000 propostas. Nenhuma foi melhor.



Big Bang

- Antes do *Big Bang*? Não sabemos nada.
- O que é que o provocou? Porque é que ocorreu? Porque é que possui estas leis físicas?
- A Física estuda como funcionam as coisas que existem, não porque é que existem.
- A Física estuda a matéria desde que existe (desde o *Big Bang*), não antes, nem estuda a razão ou a finalidade do porquê da sua existência. Estas são questões filosóficas, religiosas, não científicas.
- 2 erros: fazer religião a partir da ciência, e fazer ciência a partir da religião. Cada uma tem o seu campo, seu método, sua forma de ver a complexa realidade.



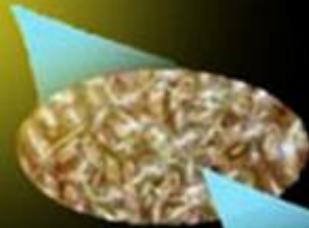
Big Bang

- Flutuação do vácuo quântico?
- Vácuo não é o nada, existe.
- Múltiplos Universos? Não demonstrável, por definição. Teoria não científica.

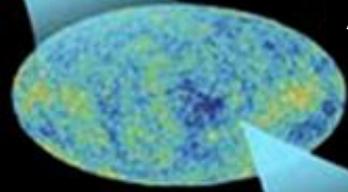


Evolução do Universo

Grande explosão



Após uma pequena
fração de segundo



Após 300 000 anos



Após 13 700 milhões de anos

Desenvolvimento do Universo



Primeiras árvores e répteis

Primeiros dinossauros

Desaparecimento dos dinossauros, mamíferos evoluem

Primeiros primatas

Primeiras plantas

Últimos 10 segundos

Primeiros homo-sapiens

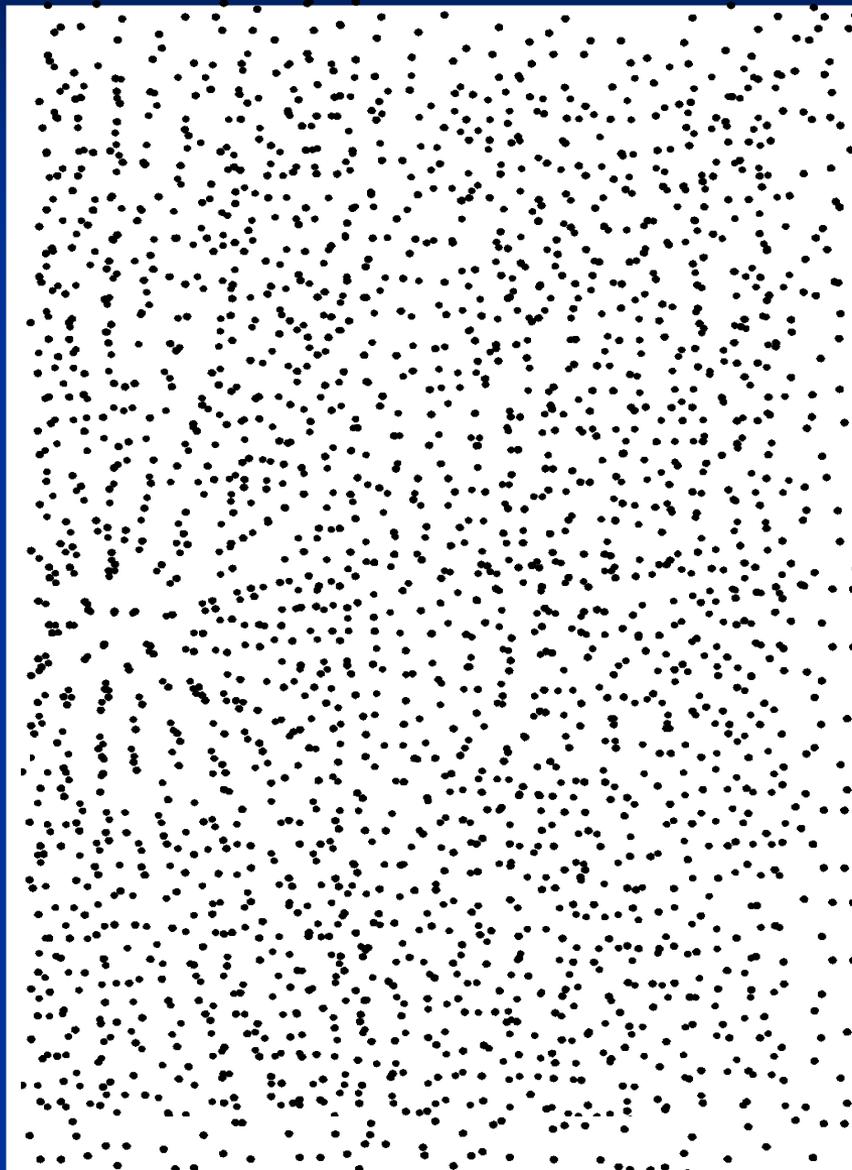
Neanderthais

Toda a história dos humanos



Atividade 6:

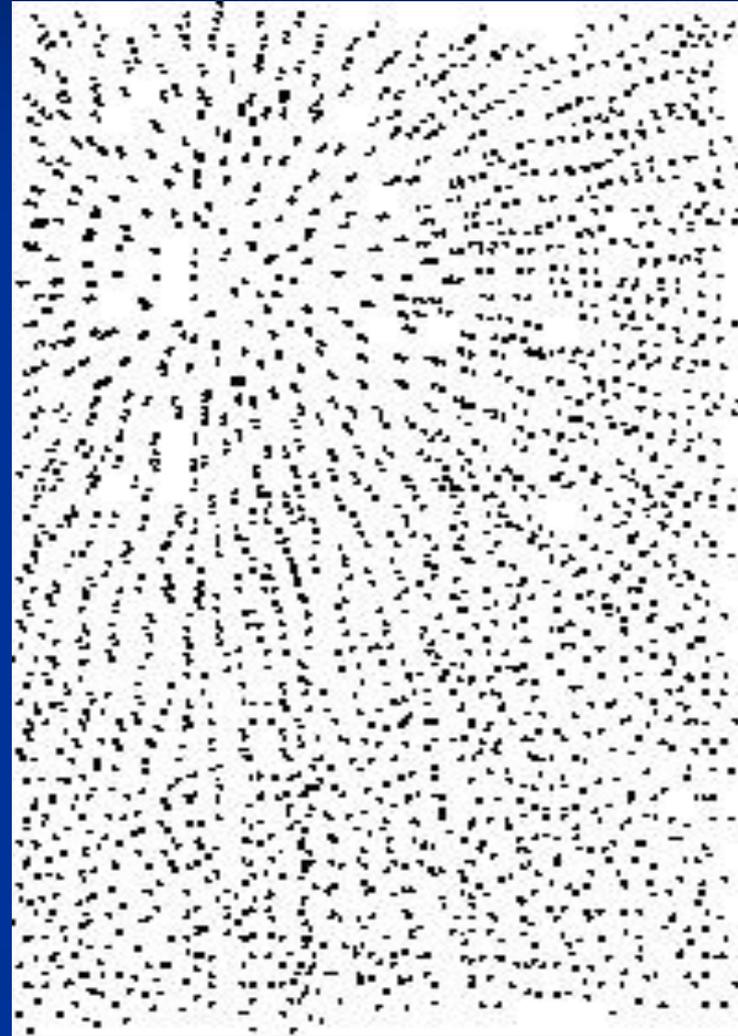
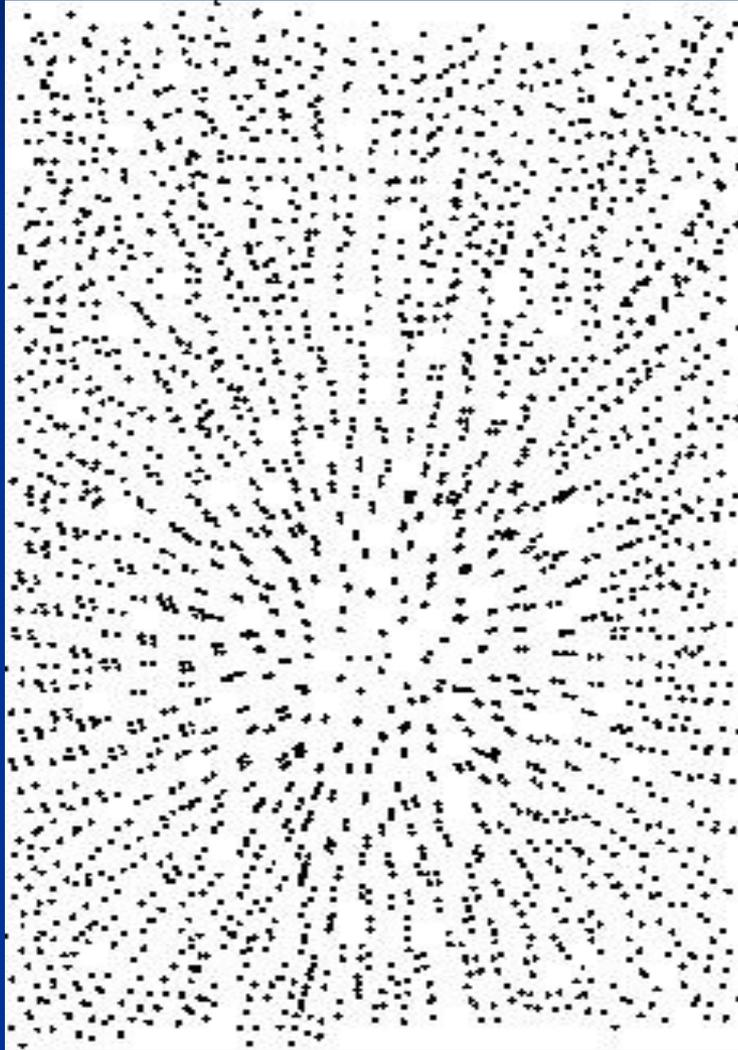
Não existe centro da expansão



100%

105%

Atividade 6: Não existe centro da expansão



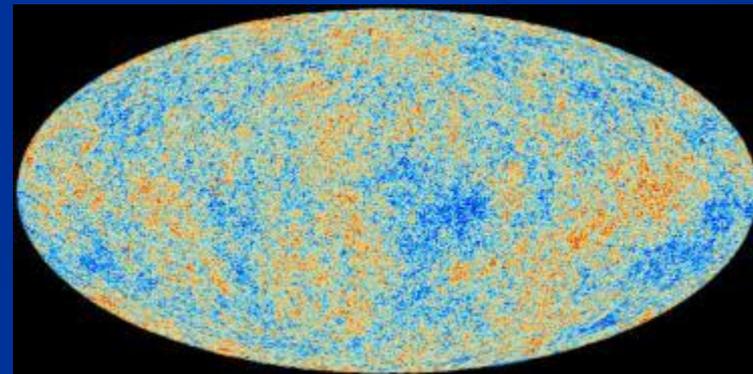
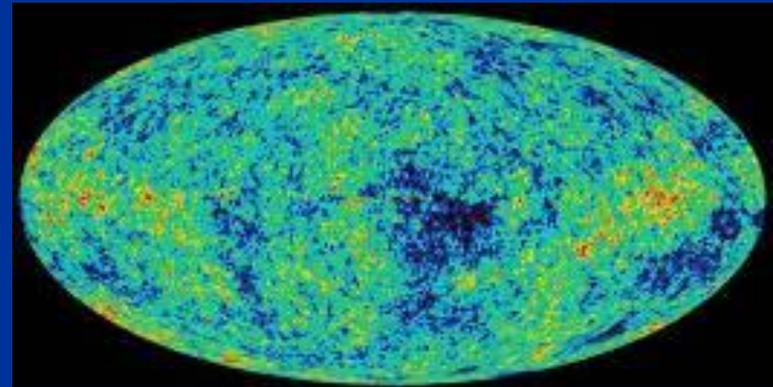
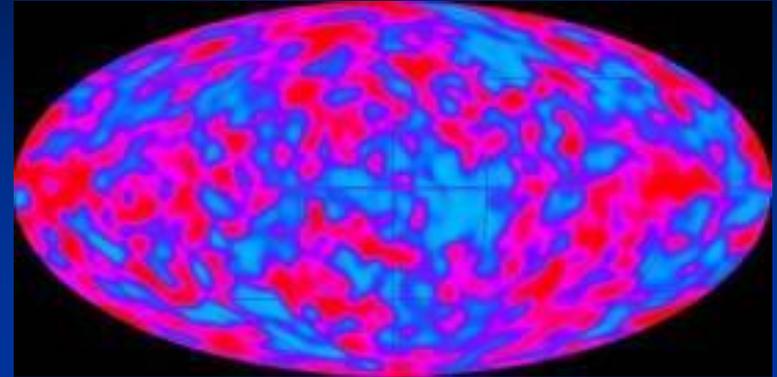
Radiação de fundo de micro-ondas

- Radiação libertada nos 380 000 anos após o *Big Bang*.
- Com o passar do tempo, a expansão do espaço fez com que aumentasse o comprimento de onda.
- Atualmente está na faixa das micro-ondas.



Radiação de fundo de micro-ondas

- O COBE, o WMAP e o PLANCK fizeram um mapa dessa radiação, bastante detalhado, mostrando pequenas diferenças entre zonas: protuberâncias de matéria a partir das quais se começaram a formar as galáxias.



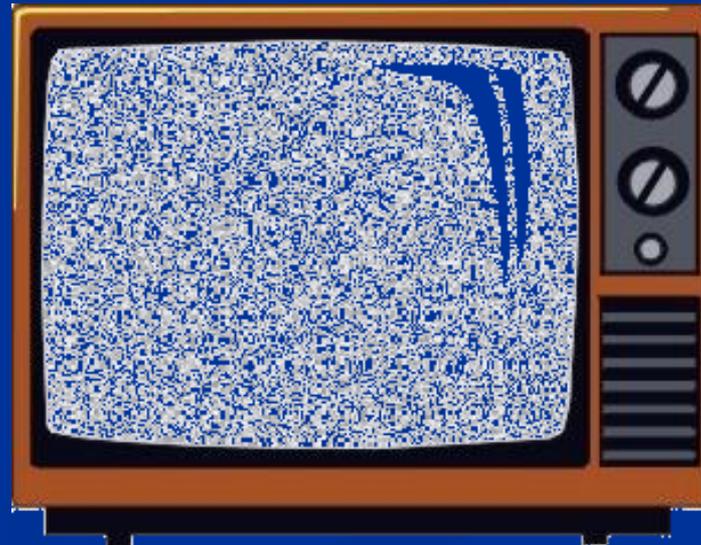
Atividade 7: Radiação cósmica de fundo

- 300 000 anos após o *Big Bang*, os fótons separaram-se da matéria e começaram a viajar, livres, pelo Universo.
- Com a expansão do espaço, os fótons aumentaram o seu comprimento de onda que, atualmente, é $\lambda = 2 \text{ mm}$, equivalente a $T = 2,7 \text{ K} = -270 \text{ }^\circ\text{C}$.



Atividade 7: Radiação cósmica de fundo

- Podemos detetá-la com uma TV analógica. Num canal não sintonizado, um em cada dez pontos vem dessa radiação de fundo.



Matéria escura: Tábua compensatória da atração gravitacional terrestre

Os buracos negros não se veem, mas sabemos que existem porque a sua atração gravitacional obriga os grupos estelares a girar em torno deles.



Ainda que a matéria escura seja invisível, uma forma de a detetar é observar o comportamento dos astros que lhe estão próximos.



Outro processo para detectar a matéria escura: lente gravitacional



A massa de uma lente gravitacional atua como uma lente ótica ao deformar o espaço que a rodeia desviando a luz oriunda de um objeto distante.



Lentes gravitacionais

- A luz segue sempre o caminho mais curto.
- Se a superfície for curva, a linha é curva.



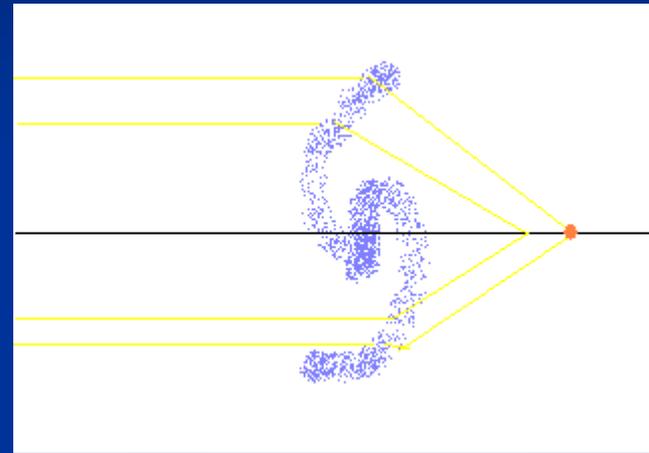
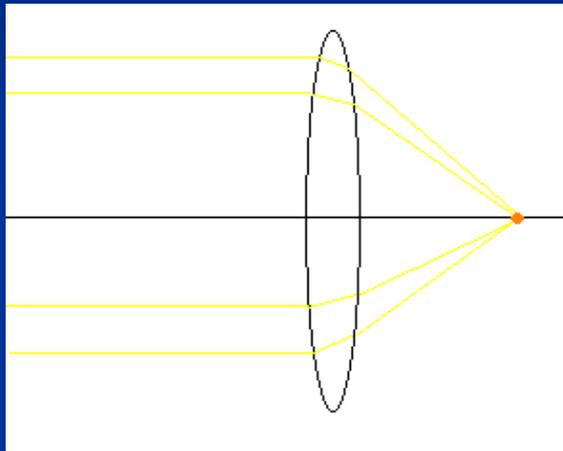
Porque é que a luz se desvia ao passar próximo de uma massa?

- Se existe uma massa, o espaço é curvado e o caminho mais curto entre dois pontos é uma linha curva.

- Ocorre uma situação semelhante no globo terrestre.

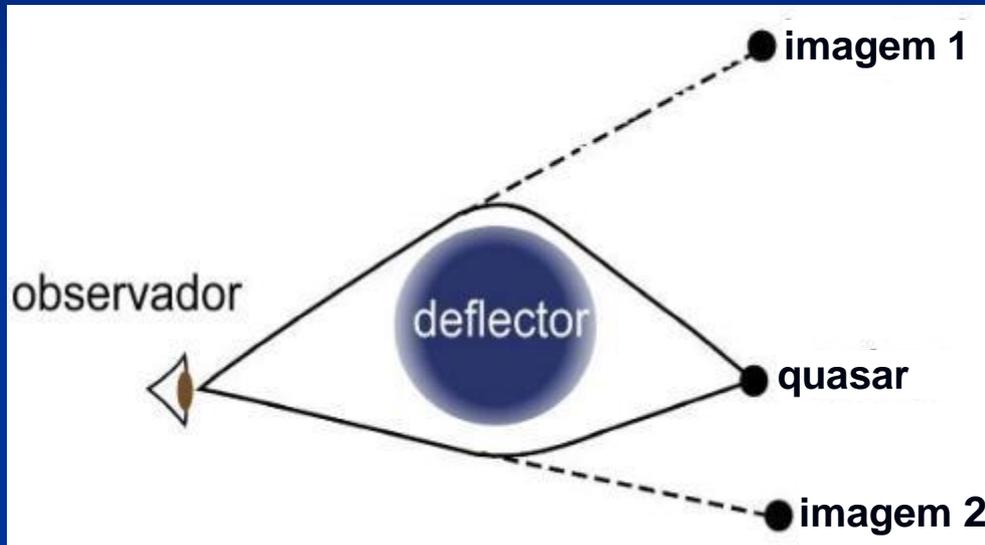


Como funcionam as lentes gravitacionais



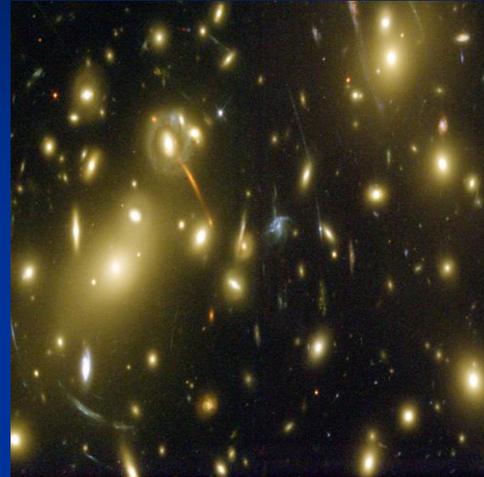
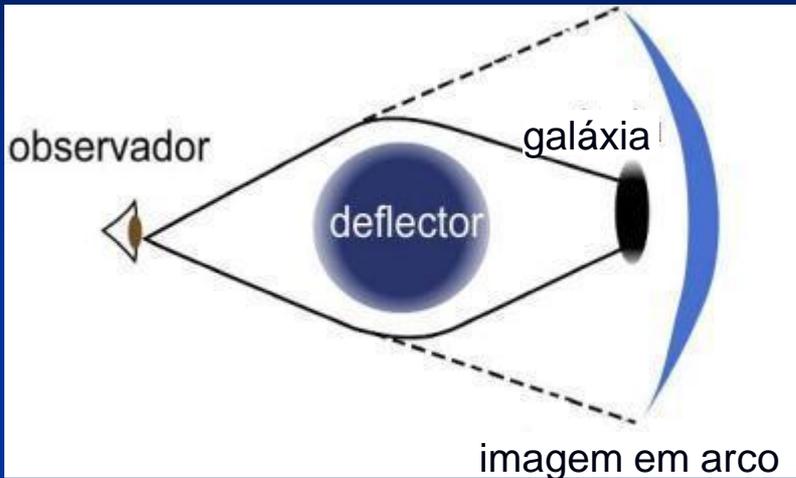
- Numa lente óptica convexa, os raios de luz, paralelos, convergem num ponto: o foco.
- Nas lentes gravitacionais, os raios de luz convergem para uma linha em vez de convergirem para um ponto... este efeito provoca, nas imagens, diversas distorções.

Mudança de posição e multiplicação



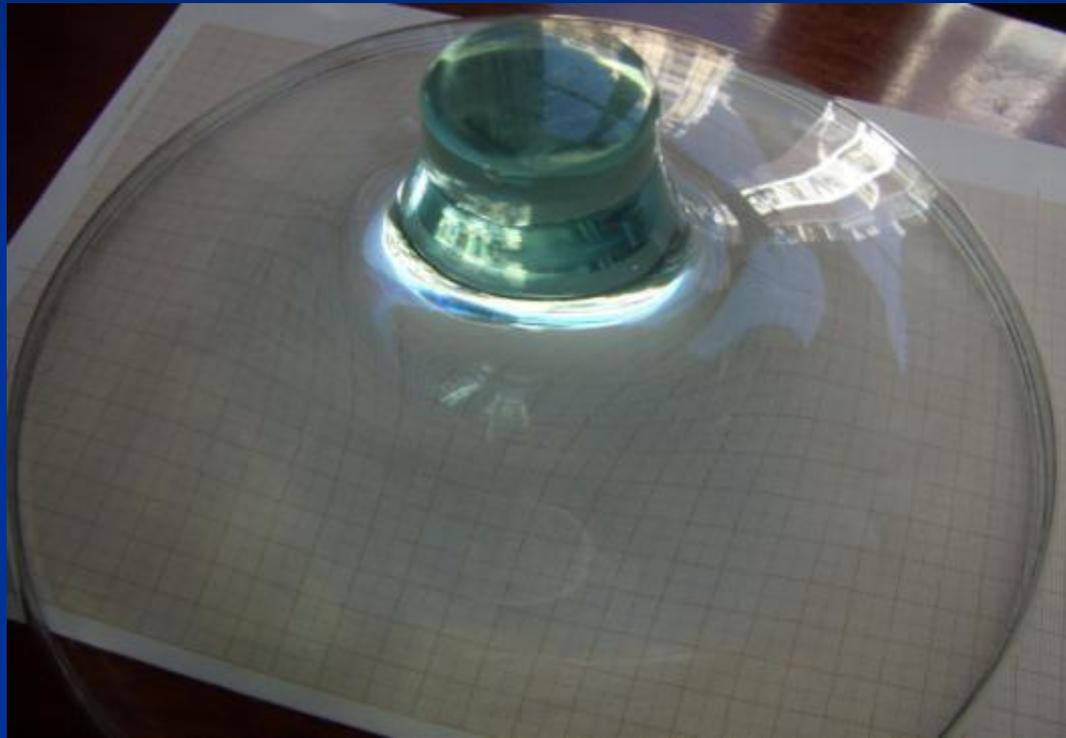
- A deflexão produz duas posições aparentes da estrela, galáxia ou quasar que esteja por detrás.
- As lentes gravitacionais não são iguais; as maiores, podem produzir múltiplas imagens.

Deformação



- Se o corpo deflectido é um objeto extenso, as imagens obtidas são vários arcos brilhantes.
- Se o sistema de lentes for perfeitamente simétrico, os raios convergem e o resultado é um anel.
- Se o corpo deflectido é uma estrela ou um quasar, a imagem obtida é um ponto, ou, por vezes, mais do que um.

Atividade 8: Simulação da deformação com o pé de um copo de vinho



Colocando a base de um copo sobre papel milimétrico, também se pode ver a deformação.

Atividade 8: Simulação da deformação com o pé de um copo de vinho



E olhar através dele.



+



=



Fragmento de arco

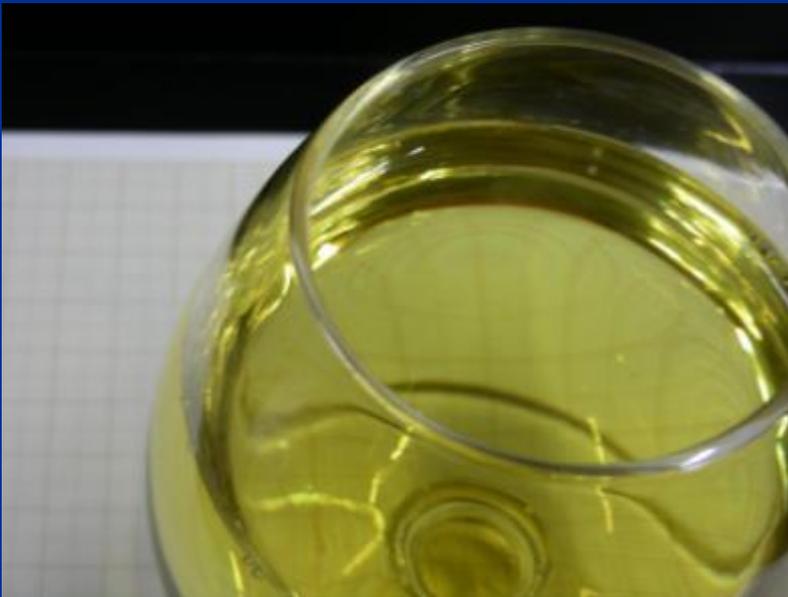


Cruz de Einstein



Anel de Einstein

Atividade 9: Simulação da deformação espacial com um copo de vinho



Copo com vinho branco sobre papel milimétrico: observando através do vinho, pode ver-se a deformação.

Atividade 9: Simulação da deformação espacial com um copo de vinho

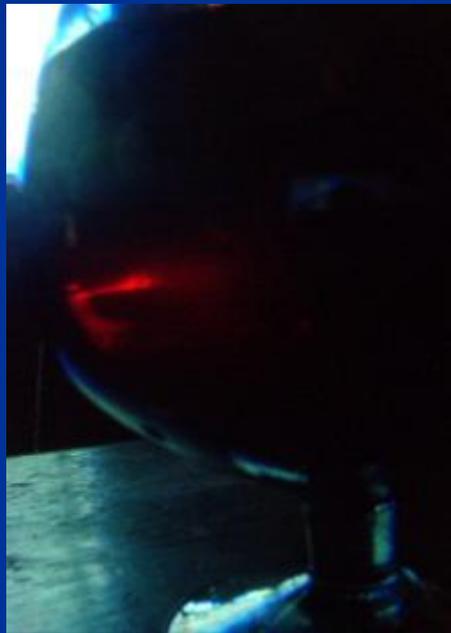


Este simples modelo mostra-nos que “a matéria” pode produzir distorções nas imagens observadas “através” dela.

(O vinho pode ser substituído por outro líquido translúcido)



Atividade 9: Fixando uma lanterna e movendo-nos lentamente observando através do copo de vinho.



Fragmento de arco



Forma amorfa



Cruz de Einstein

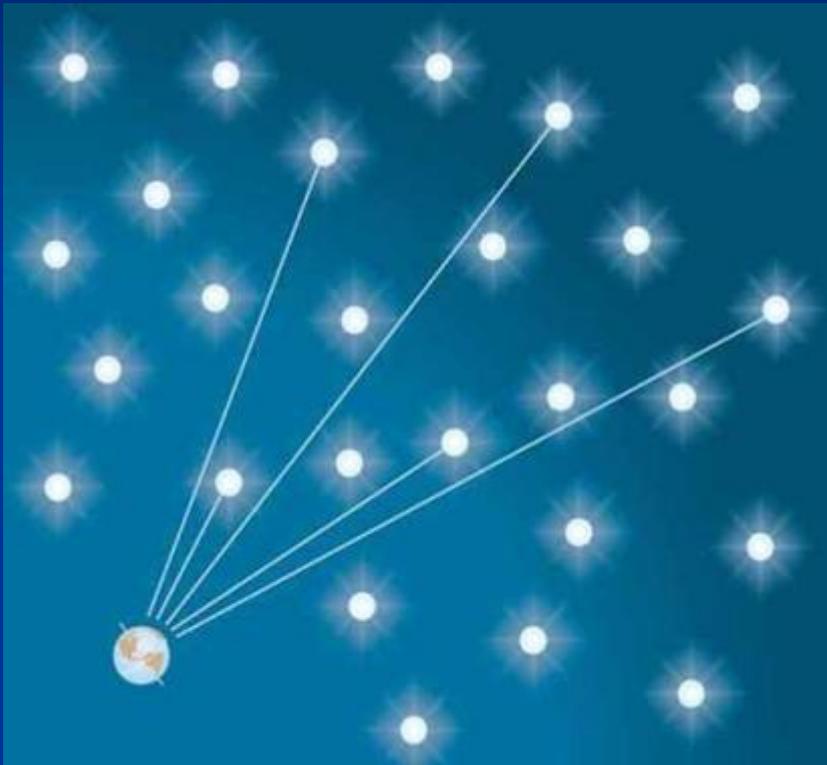
Um tema fora do workshop: Porque é que a noite é escura?

Em 1923, Olbers argumentou que, se:

- O Universo tem uma extensão infinita.
- O número de estrelas é distribuído uniformemente por todo o Universo.
- Todas as estrelas têm uma luminosidade semelhante no Universo...



Um tema fora do workshop: Obscuridade da noite



Um Universo infinito teria um número infinito de objetos e deveria ser brilhante durante a noite.



Porque é que a noite é escura?

Então:

- Qualquer ponto do céu ver-se-ia brilhante, na escuridão, já que, afinal, haveria sempre uma estrela distante a brilhar.
- O número de estrelas em cada “camada de cebola” do céu é proporcional a r^2 , e a sua luz inversamente proporcional a r^2 , logo cada capa forneceria uma quantidade constante de luz à Terra. Havendo um número infinito de capas, o céu ver-se-ia luminoso.



Porque é que a noite é escura?

Falhas:

- As estrelas observam-se mais avermelhadas (menos luminosas) quanto mais distantes, pela expansão.
- Mas, acima de tudo, o céu não tem uma extensão infinita, já que não tem uma idade infinita. Não há infinitas capas de estrelas.

Foi Edgar Allan Poe quem explicou corretamente o fenómeno no seu ensaio “Eureka”, publicado em 1848.

A noite pode continuar a ser escura!



Muito obrigado
pela vossa atenção!

