

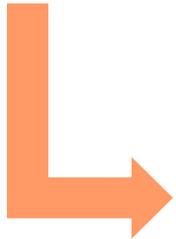
Cosmologia Astrofísica: novas (antigas?) questões sobre a estrutura do universo

Nilo Serpa, Professor

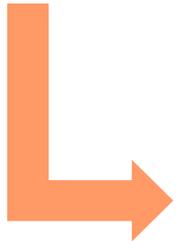




Física



Astronomía



Cosmología



Cosmología Astrofísica

Eventos astrofísicos

NGC 6302



Radio Source 3C75



Premissas fundamentais da cosmologia teórica

- O espaço-tempo é quadridimensional, sendo que, à escala de Gpc , o universo é aproximadamente homogêneo, isotrópico e em expansão uniforme (Λ CDM)
- A luz viaja por geodésicas nulas ($ds^2 = 0$)

Premissas críticas

- *Ockham's razor* – se nós conseguirmos lidar observacionalmente com modelos simétricos simples, não temos necessidade de nenhum modelo complicado
- Isotropia é testada apenas em relação a um ponto (não prova homogeneidade)
- Estamos sempre olhando para o passado

Homogeneidade X Inhomogeneidade

- Entendimento humano e realidade física
- Conjuntura observacional
- Unificação teórica
- Crenças pessoais (Zel'dovich)
- Contexto sócio-cultural

Cosmologias inomogêneas

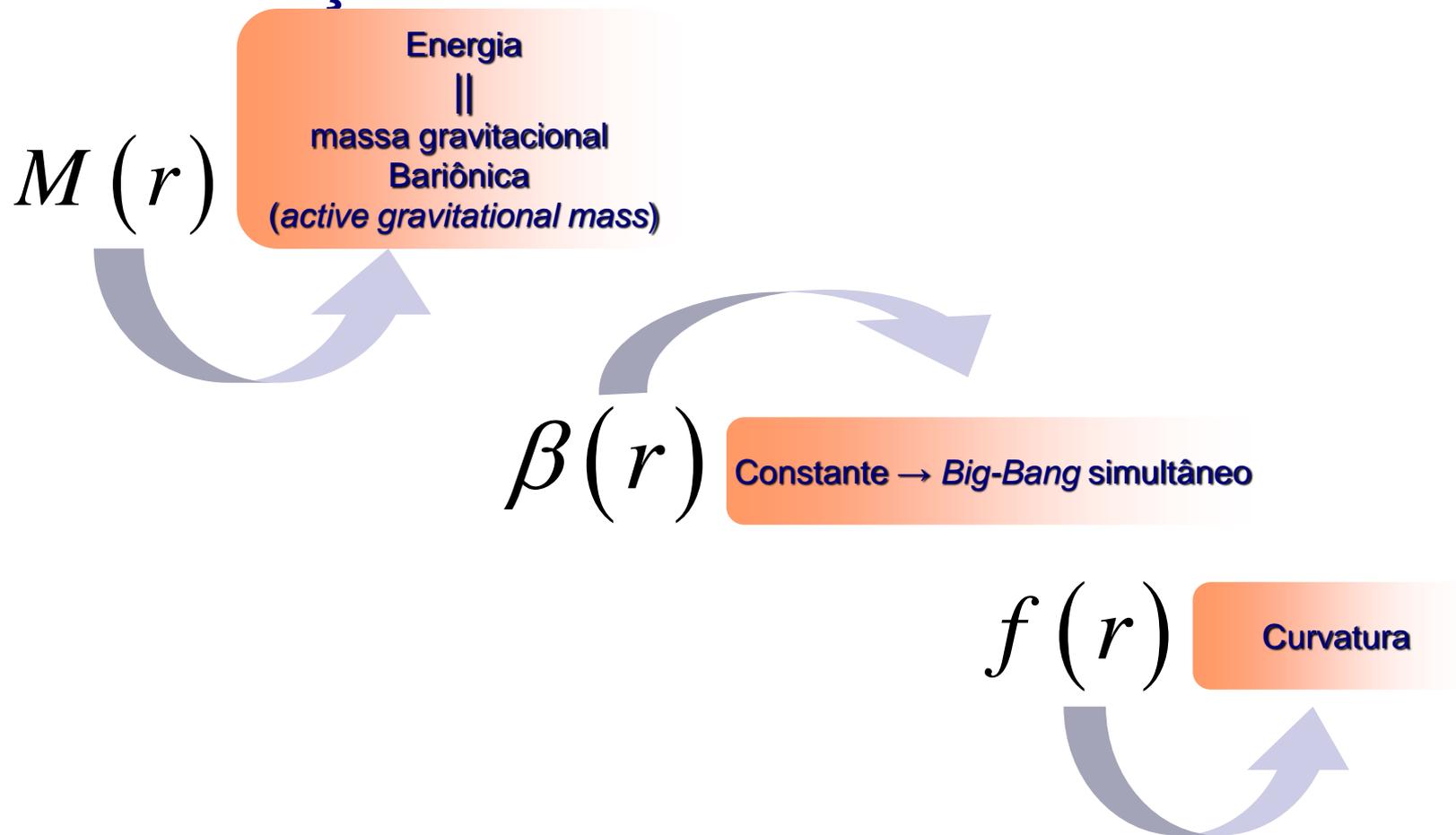
- Cosmologia LT – densidade inomogênea (*dust shells*)
- Cosmologia de Stephani - pressão inomogênea (*gradient of pressure shells*)

Modelagem LT

- Modelo de universo esfericamente simétrico com centro
- Universo supostamente preenchido de maneira inhomogênea por poeira de matéria isenta de pressão

Modelagem LT

■ Três funções arbitrárias:



Métrica LT

- Classe geral de métricas

$$ds^2 = -dt^2 + b^2(r, t) dr^2 + R(r, t)^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

- Família de soluções que descrevem um colapso inhomogêneo de poeira

$$b^2 = \frac{R'(r, t)^2}{1 + f(r)}$$

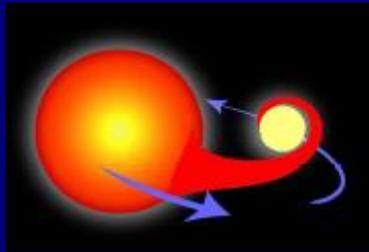
Modelo do Queijo Suíço

O chamado modelo do queijo suíço (*Swiss cheese*) representa um universo inomogêneo no qual cada vazio esférico é descrito por uma métrica LT. Nos limites dessas regiões esféricas a métrica LT é colada à métrica FLRW exterior que descreve a evolução entre as esferas inomogêneas.

FLRW X LT

MODELO	MÉTRICA	FATOR DE ESCALA	DENSIDADE
FLRW	$ds^2 = -dt^2 + a^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right]$	$a = a(t)$	$\rho = \rho(t)$
LT	$ds^2 = -dt^2 + \frac{R'^2}{1 + f(r)} dr^2 + R^2(r, t) d\Omega^2$ $R(r, t) = a(r, t)r$	$a = a(r, t)$	$\rho = \rho(r, t)$

Supernovas Ia



Supernova Ia em Virgem, NGC 4526



Supernovas Ia



- Supernovas Ia derivam de anãs brancas de carbono-oxigênio em sistemas binários. A anã branca absorve massa de sua companheira, em geral gigante vermelha, alcançando assim uma massa crítica de explosão.

Supernovas Ia e cosmologia

vantagens

- Extrema luminosidade ($10^9 - 10^{10} L_{\text{Sol}}$)
- Elevada homogeneidade

Velas
padronizadas

desvantagens

- Evento raro e imprevisível
- Curta duração

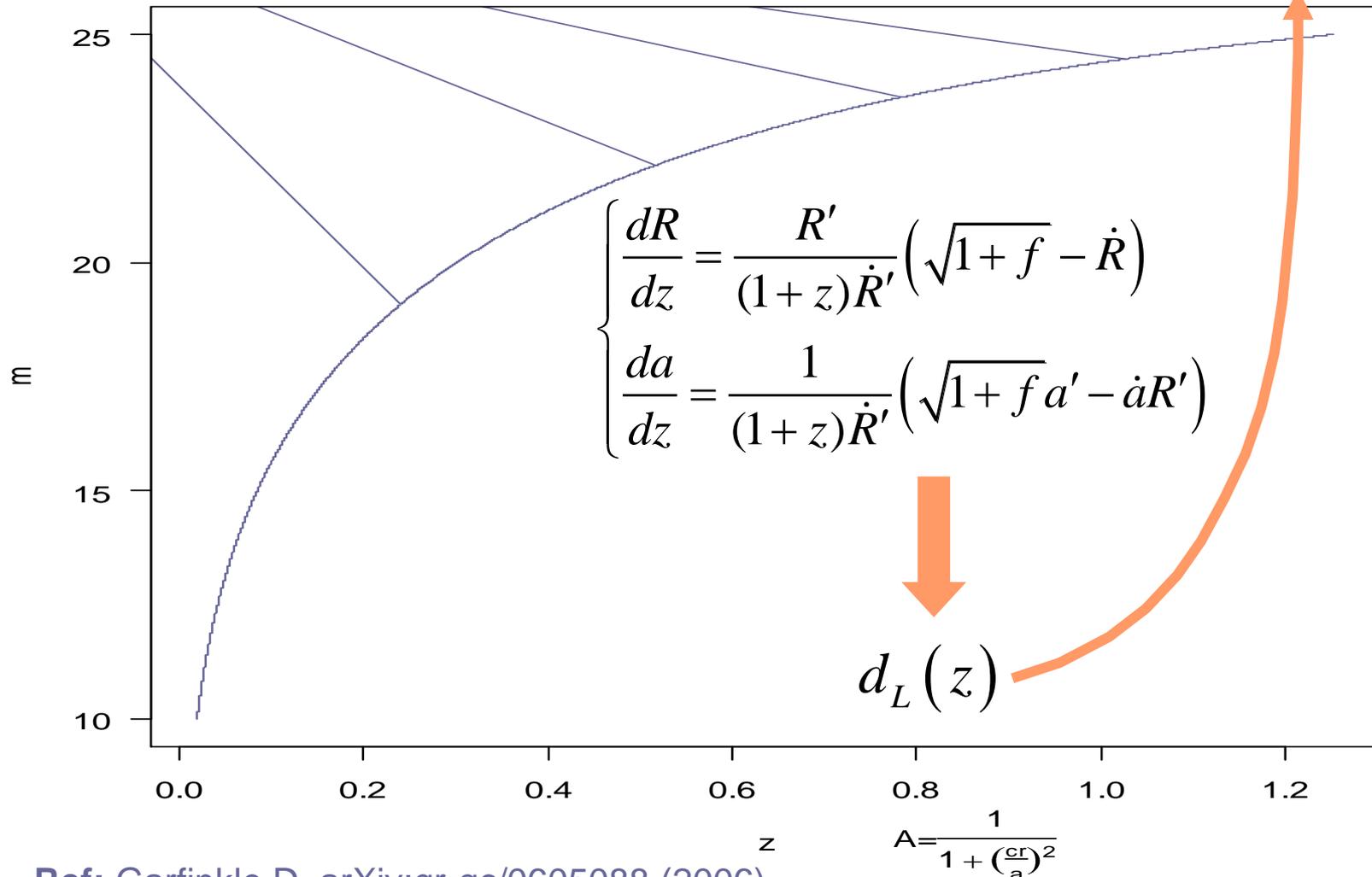
Supernovas Ia no modelo LT

The diagram illustrates the derivation of the matter density parameter Ω_M in the LT model for Type Ia supernovae. It starts with three assumptions, followed by the Einstein equations, and finally a second assumption that leads to the final expression for Ω_M . Orange arrows indicate the flow of information from the assumptions and equations to the final result.

$$\text{Assunção} \begin{cases} R(r,t) = a(r,t)r \\ f = A(r)r^2 \\ M = \beta r^3 \end{cases}$$
$$\text{Equações de Einstein} \begin{cases} \dot{R}^2 = f + \frac{M}{R} \\ \dot{a}^2 r^2 = Ar^2 + \frac{\beta r^3}{ar} \end{cases}$$
$$\text{Assunção} \begin{cases} A(r) = \frac{1}{1+(cr)^2} \end{cases}$$
$$\Omega_M = \left(1 + \frac{9a}{4}\right)^{-1}$$

Supernovas Ia no modelo LT

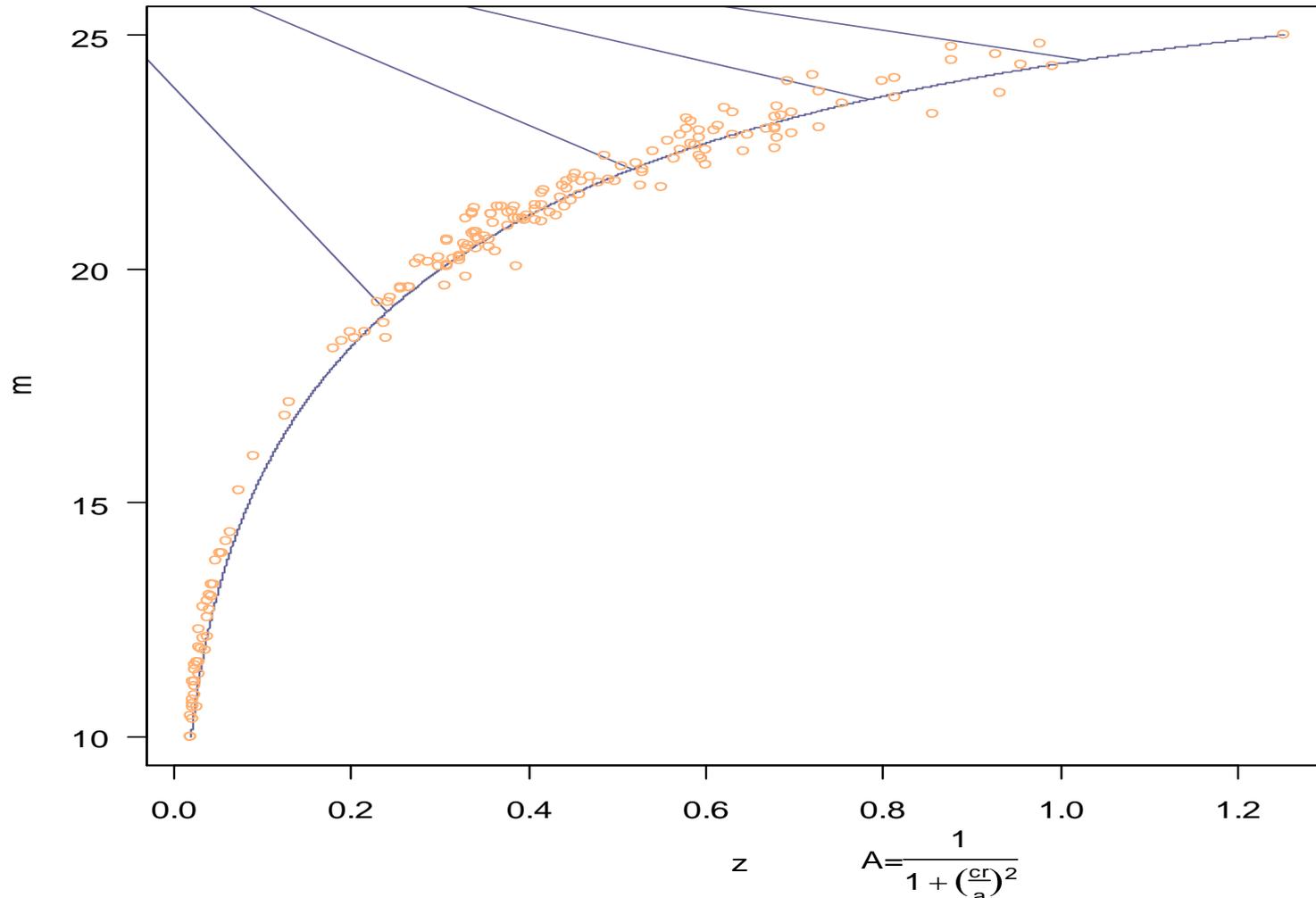
LT plot: $\Omega=0.3$, $c=8.5$; $m = M_B + 5 \log(H_0 d_L)$



Ref: Garfinkle D, arXiv:gr-qc/0605088 (2006).

Supernovas Ia (tabela Riess) superpostas à curva teórica LT

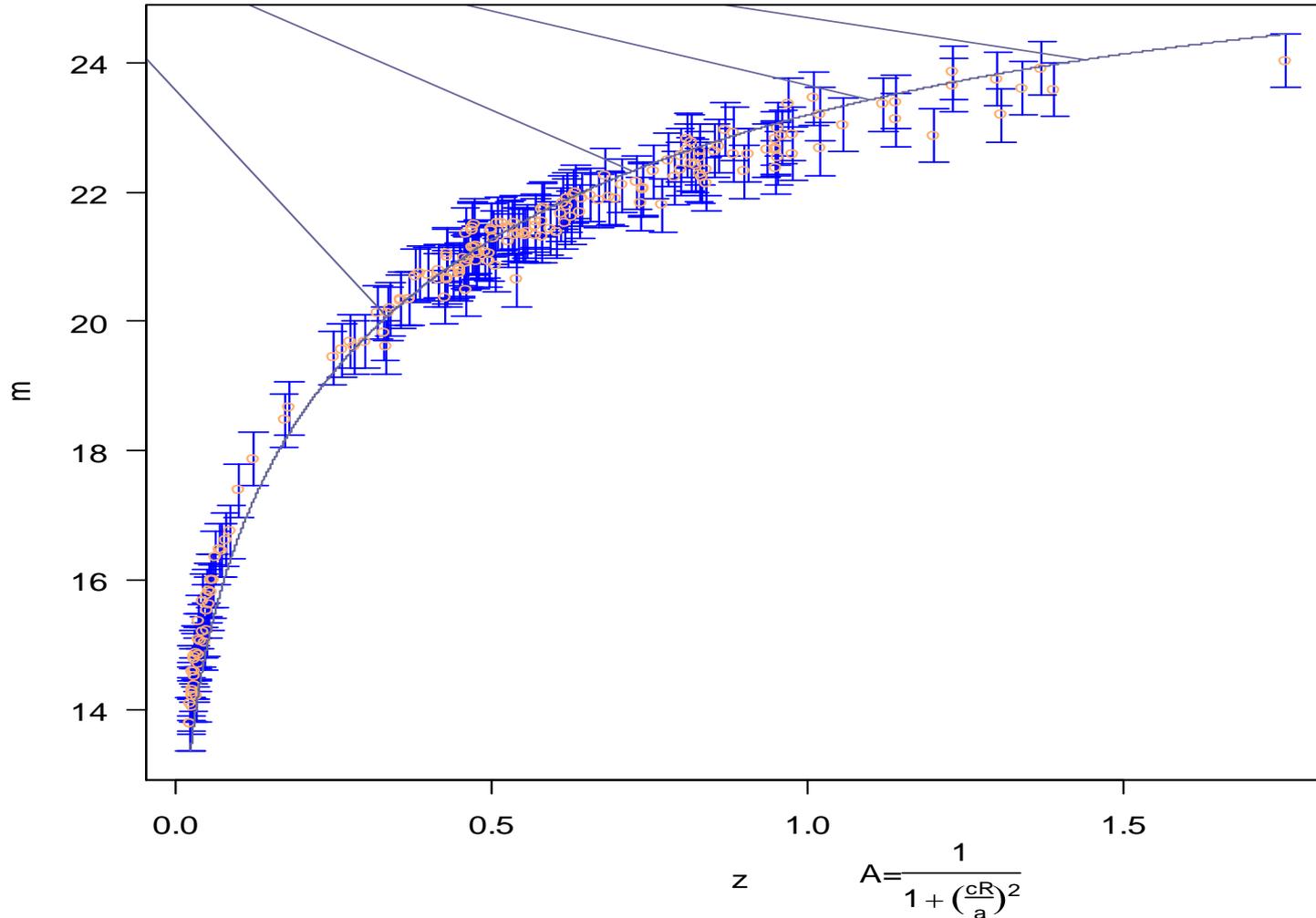
LT plot: $\Omega=0.3$, $c= 8.5$



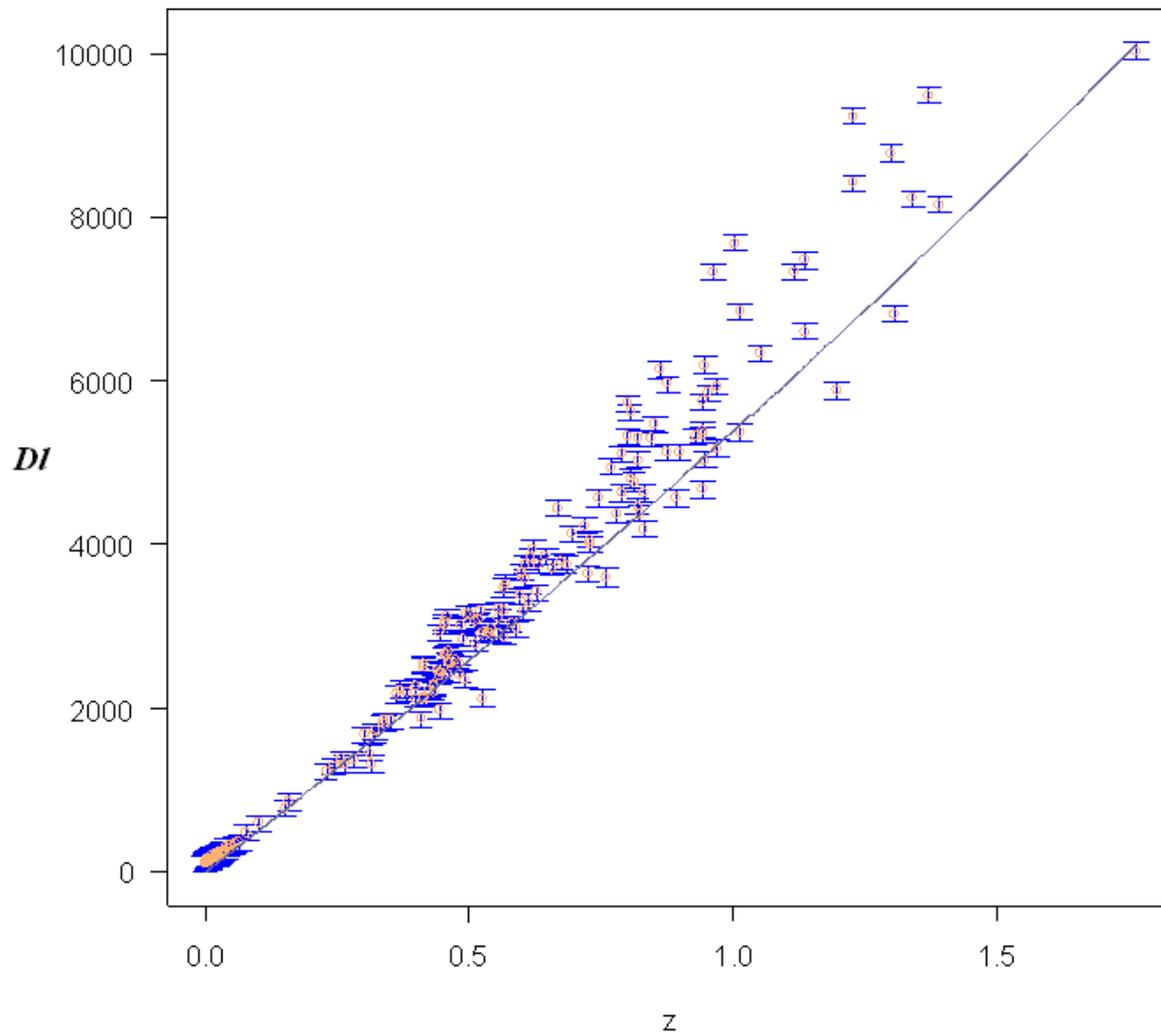
Ref: Riess *et al*, arXiv: astro-ph/0611572v2 (2007).

Supernovas Ia (tabela Riess) superpostas à curva teórica LT

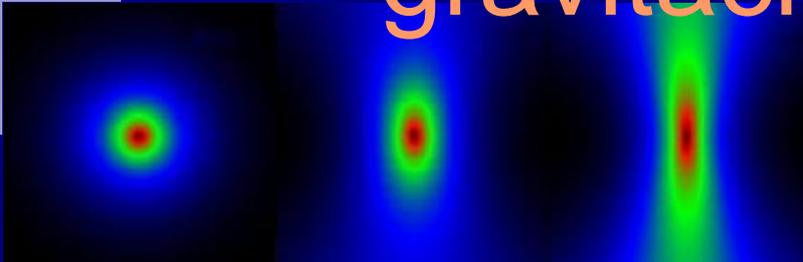
LT plot: $\Omega=0.3$, $c= 8.5$



Distância de luminosidade contra o desvio para o vermelho (curva teórica e dados da tabela Riess)



Lentes gravitacionais



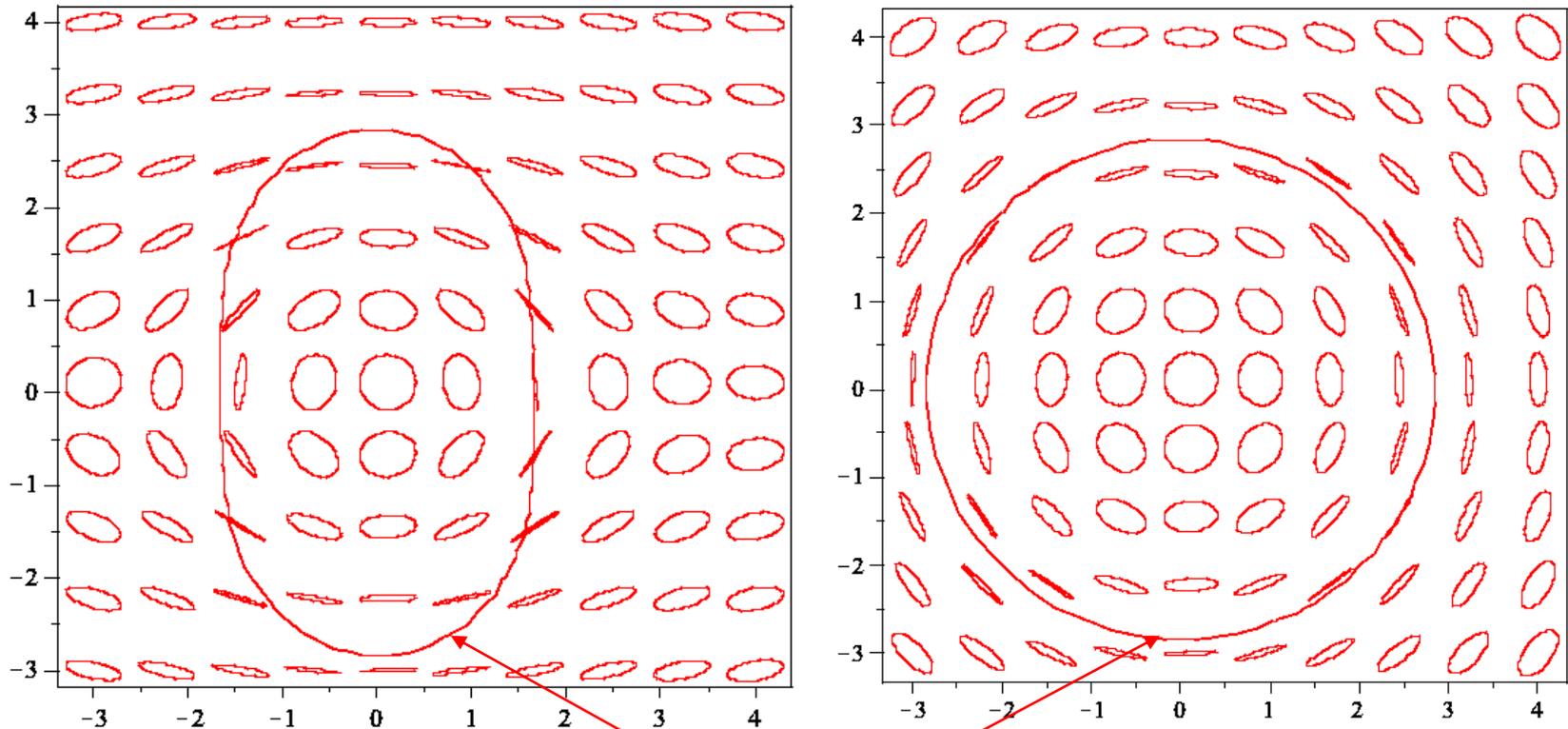
Lenteamento gravitacional

- Resume um coletivo de efeitos do campo gravitacional sobre a radiação eletromagnética, assumindo-a geometricamente representada por raios

Propriedades óticas de uma lente gravitacional

- **Convergência – magnificação isotrópica da luz**
- **Cisalhamento – efeito do campo gravitacional sobre a forma das imagens**

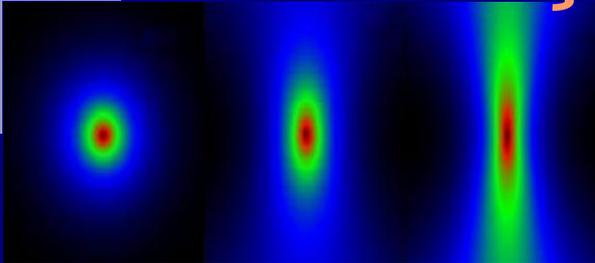
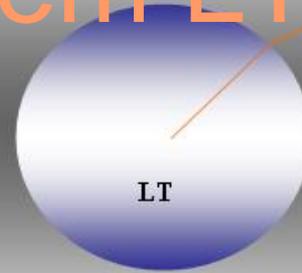
Lenteamento gravitacional: campos de elipses



linhas críticas

Índice de refração em LT

FLRW



Índice de refração na métrica LT assumida

(-) Métrica normal

$$-\left(\frac{dt}{ds}\right)^2 + \frac{R'(r,t)^2}{1+f(r)}\left(\frac{dr}{ds}\right)^2 = 0$$

(+) Métrica deformada

$$-\left(\frac{dt}{ds}\right)^2 + \frac{1}{1+\varepsilon_{44}}\left[\frac{R'(r,t)^2}{1+f(r)} + \frac{\varepsilon_{11}}{2}\right]\left(\frac{dr}{ds}\right)^2 = 0$$

Lei de movimento para
objetos tipo tempo

$$\frac{dt}{dr} = -\frac{R'(r,t)}{\sqrt{1+f}} = -\sqrt{\frac{\varepsilon_{11}}{2\varepsilon_{44}}}$$

Índice de refração

$$\bar{n} = \sqrt{\frac{g_{22}}{Cg_{11}}} e^{-\omega(t) \int \frac{\sqrt{\varepsilon_{11}/2\varepsilon_{44}}}{R(r,t)} dr}$$

Métrica LT em 5D e simetrias cosmológicas

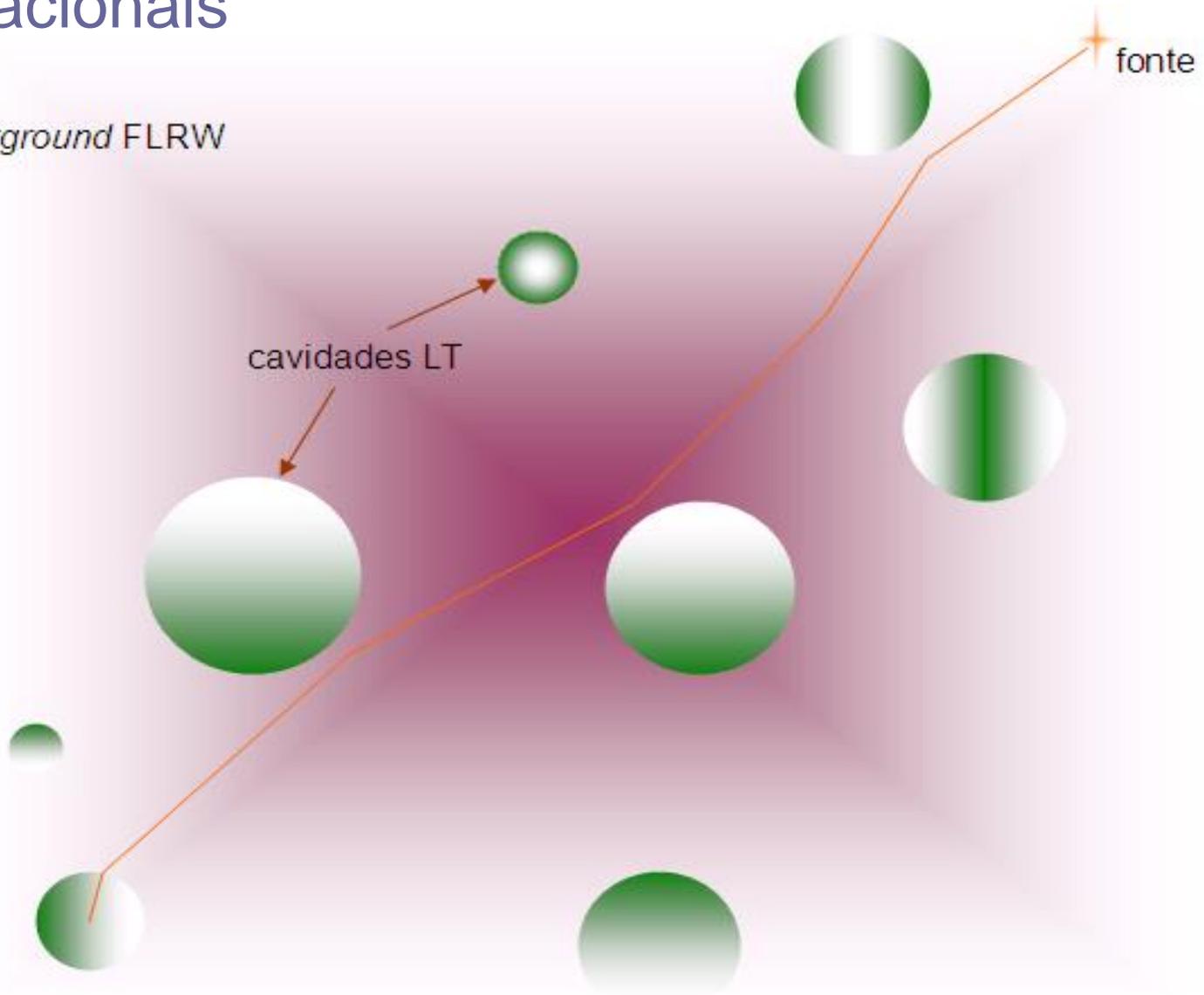
MODELO	MÉTRICA	GRUPO DE ISOMETRIAS
FLRW	$ds^2 = -dt^2 + a^2 \left(\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$	$SO(3,3)$
LT 4D	$ds^2 = -dt^2 + \frac{R'^2}{1+f(r)} dr^2 + R^2(r,t) d\Omega^2$	$SO(2,1)$
LT 5D	$ds^2 = \frac{R'(r,t)^2}{(1+f)} dr^2 + R(r,t)^2 (d\chi^2 + \sin^2 \chi d\Omega^2) - dt^2$	$SO(2,1,1)$

Esquema geral do modelamento das simetrias cosmológicas

- Estrutura das cavidades LT em 5D (não redutível a FLRW, salvo nas junções)
- *Background* FLRW em 4D

Cavidades LT em 5D como lentes gravitacionais

background FLRW



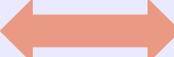
Questões em aberto

- Radiação cósmica de fundo $\rightarrow \Omega_M \approx 1$
- *Surveys* de galáxias $\rightarrow \Omega_M \approx 0.3$
- Supernovas Ia $\rightarrow \Omega_M \approx 0.28 \pm 0.1$

Constante cosmológica?

Questões em aberto

- Universo homogêneo?
- Gravitação na escala de Planck?

quantum spacetime  quantum Riemannian metric

- Impacto da descoberta de ondas gravitacionais na cosmologia?
- Supergravidade?

O futuro próximo da cosmologia astrofísica

- Aprofundamento em estruturas a partir de novos *surveys* (supernovas Ia, lentes gravitacionais, fontes de ondas gravitacionais, etc.)
- Estudo das simetrias cosmológicas
- Aprofundamento da cosmologia teórica do ponto de vista da gravitação quântica



Obrigado!