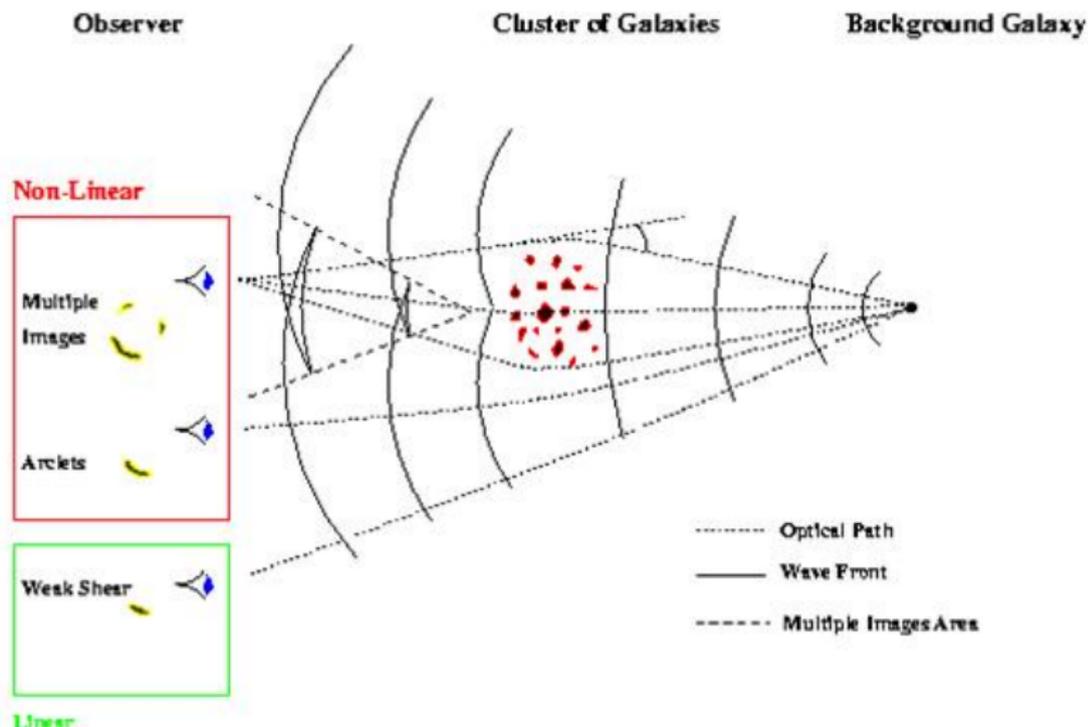


Cosmologia com Lentes Gravitacionais Fracas

Eduardo Cypriano

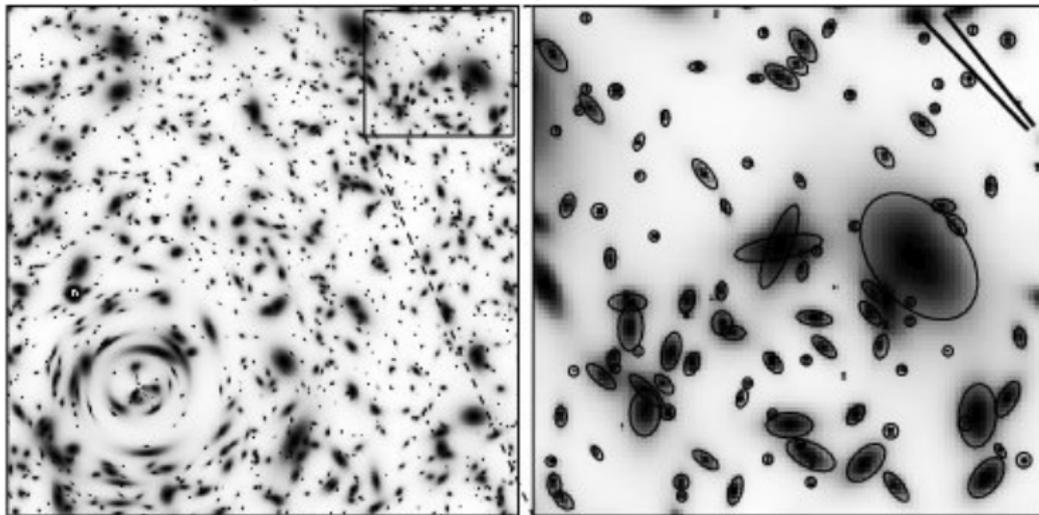
June 24, 2009

- ▶ Lentes Gravitacionais se manifestam em dois regimes: forte e fraco.



- ▶ No regime forte observam-se fenômenos claramente visíveis como a formação de imagens múltiplas e a formação de arcos gravitacionais.
- ▶ Esse tipo de fenômeno ocorre nas regiões centrais de objetos de alta massa e/ou muito compactos.
- ▶ Aglomerados de galáxias, galáxias individuais e até MACHOS podem ser lentes fortes.

- ▶ No regime fraco não se notam efeitos dramáticos nas imagens, mas sim um padrão de distorção coerente.



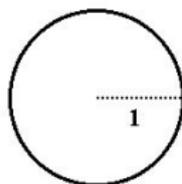
- ▶ No regime fraco o maior ruído associado é a elipticidade intrínseca das galáxias. Se todas as galáxias fossem perfeitamente esféricas o sinal de lentes fracas seria mensurável a partir de galáxias individuais.

- ▶ O efeito de lentes gravitacionais pode ser descrito por duas grandezas fundamentais: a convergência (κ) e o cizalhamento (*shear*, γ).
- ▶ Em termos desses parâmetros a alteração na forma de uma imagem pelo efeito de lentes gravitacionais tem a seguinte forma:

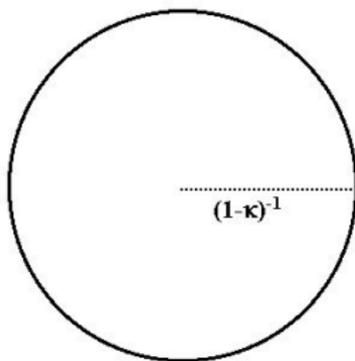
$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix}$$

- ▶ Num modo mais gráfico:

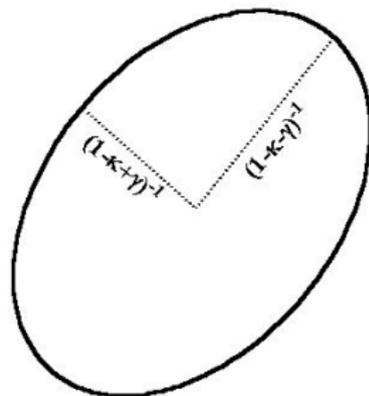
Imagem original



Convergência



Convergência
e
Cizalhamento



- ▶ A convergência está diretamente associada a densidade superficial da lente e é definida como:

$$\kappa = \frac{\Sigma}{\Sigma_{crit}}$$

- ▶ onde a densidade superficial crítica, Σ_{crit} , é dada por

$$\Sigma_{crit} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_s}{D_d D_{ds}}$$

- ▶ De fato, o regime fraco é definido por $\kappa \ll 1$

- ▶ O cizalhamento, por sua vez, está mais relacionado aos gradientes do campo gravitacional e é comumente descrito na forma complexa:

$$\vec{\gamma} = \gamma_1 + i\gamma_2 = |\gamma| (\cos\phi + i\sin\phi),$$

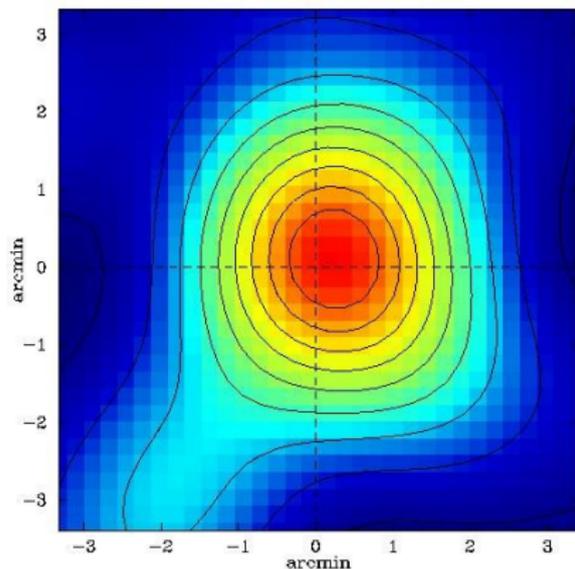
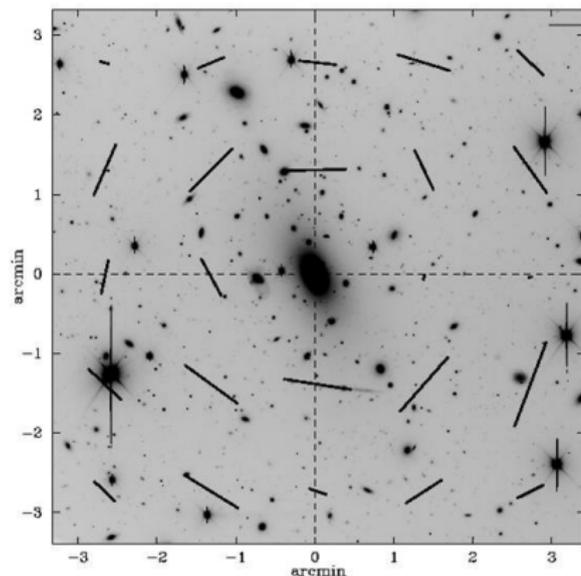
- ▶ Do ponto de vista observacional, o observável no regime de lentes fracas é a elipticidade indizada na forma da imagem de uma galáxia de fundo:

$$\varepsilon \equiv \frac{a-b}{a+b} = \frac{\gamma}{1-\kappa}$$

onde a e b são os eixos maior e menor respectivamente.

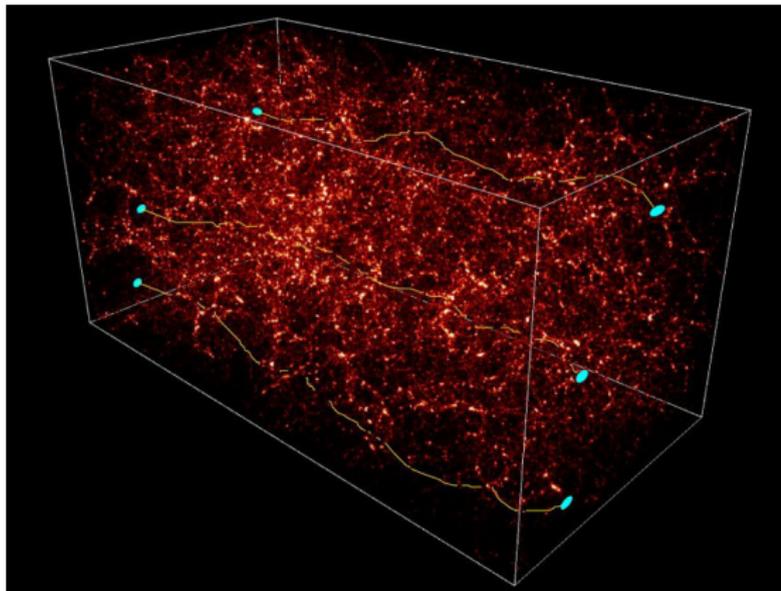
- ▶ No regime ($\kappa \ll 1$) pode-se afirmar que $\varepsilon = \gamma$
- ▶ Não é viável medir κ diretamente pois para isso deveríamos saber qual o tamanho original das fontes.
- ▶ No caso do cisalhamento basta supor que a elipticidade média original das galáxias tende a zero (pois essas tem orientações totalmente descorrelacionadas) que uma elipticidade líquida de uma amostra de galáxias próximas pode ser atribuída ao efeito de lentes.

- ▶ Já vimos que aglomerados de galáxias produzem um sinal de lentes fraca que pode ser medido e que permite a reconstrução da massa da lente (aglomerado).

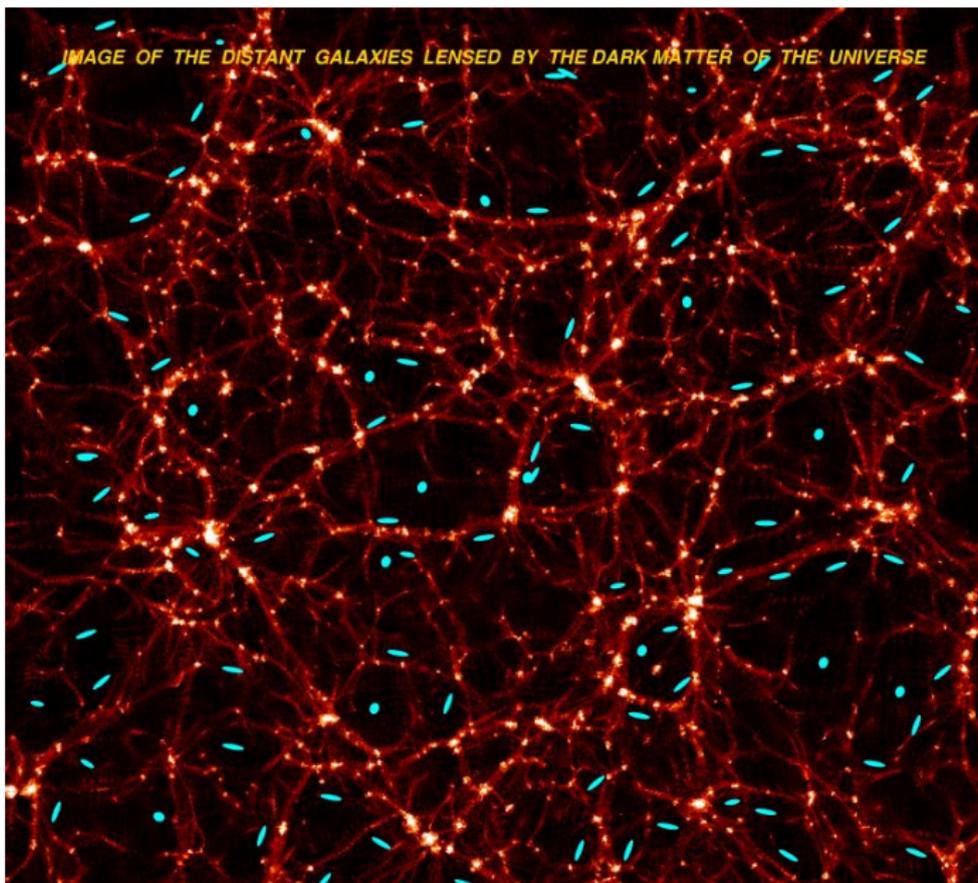


Lentes fracas cosmológicas

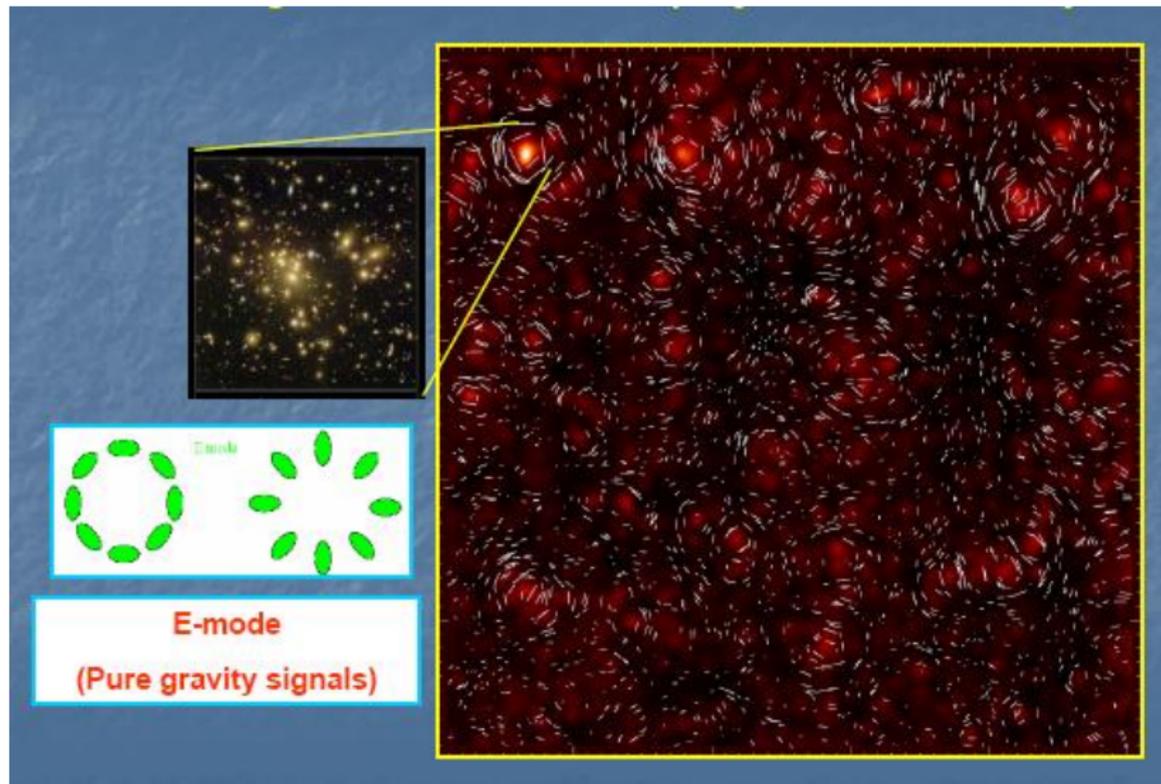
- ▶ Ocorre que a estrutura em grande escala do Universo também produz um efeito de lentes fracas



Lentes fracas cosmológicas

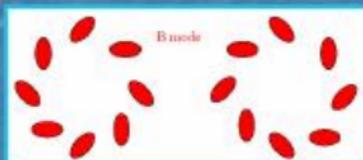


Lentes fracas cosmológicas

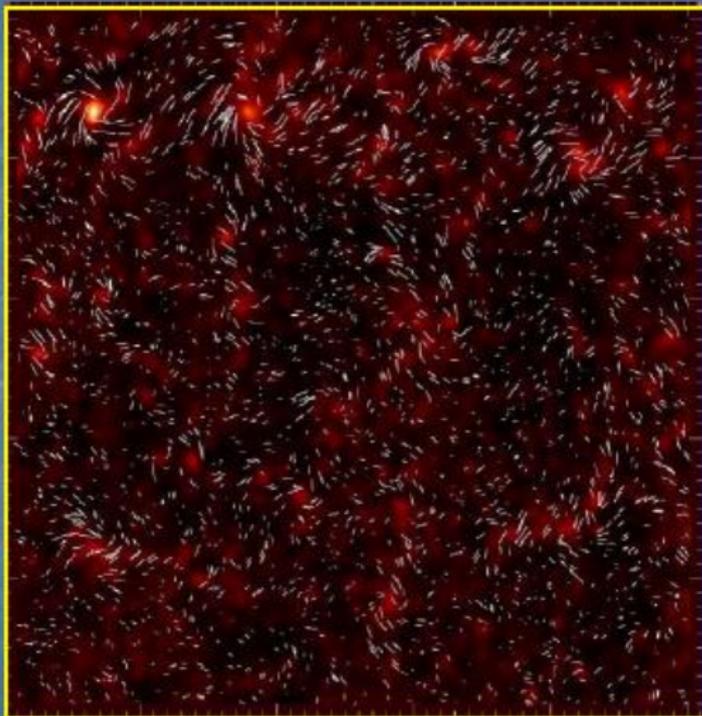


Lentes fracas cosmológicas

Gravitational field has
null rotational:
Shear gives only “E” type
configurations

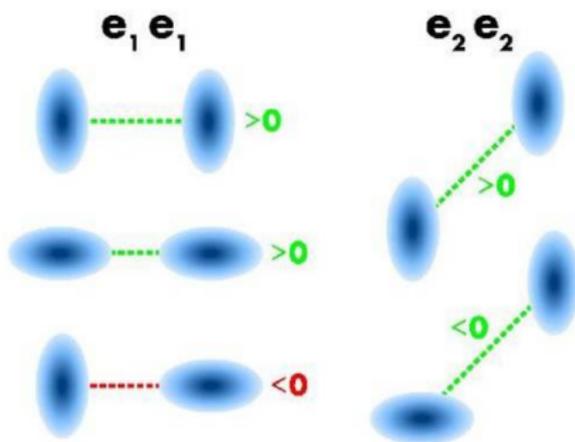


B-mode
(Systematic residuals)



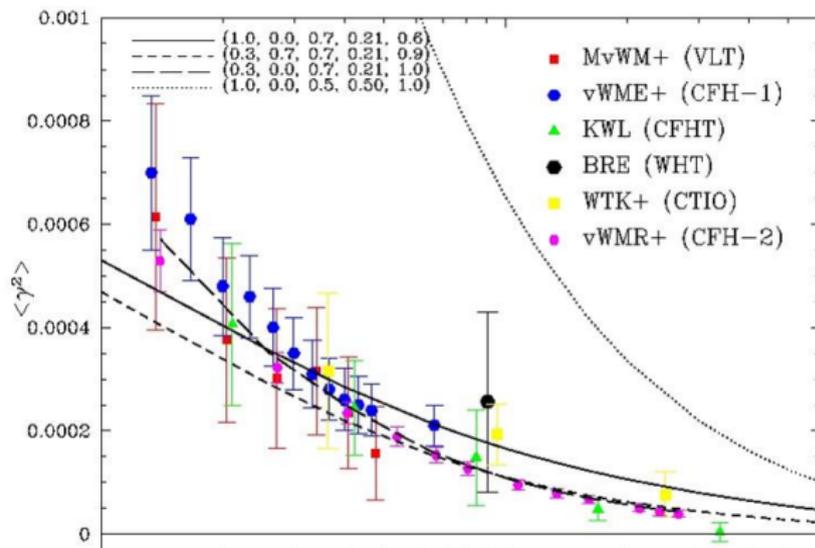
Lentes fracas cosmológicas

- ▶ Ao contrário do caso de aglomerados, onde existe um centro de massa bem definido, para as lentes cosmológicas existe toda uma rede de estruturas entre o observador e a galáxia de fundo. Como podemos então medir o efeito de lentes fracas ?
- ▶ A solução é correlacionar pares de galáxias.



Lentes fracas cosmológicas

- ▶ No ano 2000 foram feitas as primeiras medidas de lentes fracas cosmológicas por quatro grupos diferentes que obtiveram resultados consistentes entre si (Bacon, Refregier & Ellis 2000, Kaiser et al. 2000, Van Waerbeke et al. 2000 e Wittman et al. 2000).



Lentes fracas cosmológicas: parâmetros cosmológicos

- ▶ A estatística de lentes que descrevemos $\xi(\theta) = \langle \gamma(0)\gamma(\theta) \rangle$ é apenas uma das estatísticas que caracteriza a função de correlação de 2 pontos do campo do cisalhamento as outras duas são a variância da massa e do cisalhamento em aberturas (para uma descrição detalhada ver e.g. Bartelmann & Schneider 2001).
- ▶ Variância da massa de abertura $\langle M_{ap}^2 \rangle$. É calculada a partir do cisalhamento considerando que $\gamma(\theta) = \kappa(<\theta) - \kappa(\theta)$
- ▶ Variância do cisalhamento de abertura: $\langle |\gamma_{av}|^2 \rangle(\theta)$ que, pode provar-se, é equivalente a $\langle |\kappa_{av}|^2 \rangle(\theta)$. Essa estatística nada mais é do que a variância do cisalhamento dentro de círculos de raio θ

Lentes fracas cosmológicas: parâmetros cosmológicos

- ▶ Todas essas estatísticas são equivalentes e dependem basicamente do espectro de potência e portanto de parâmetros cosmológicos:

$$Q(\theta) = 2\pi \int_0^\infty l dl P_\kappa(l) F(l\theta)$$

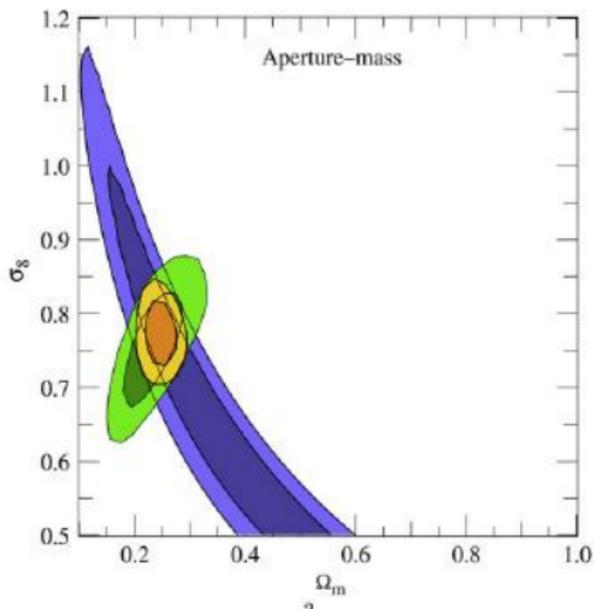
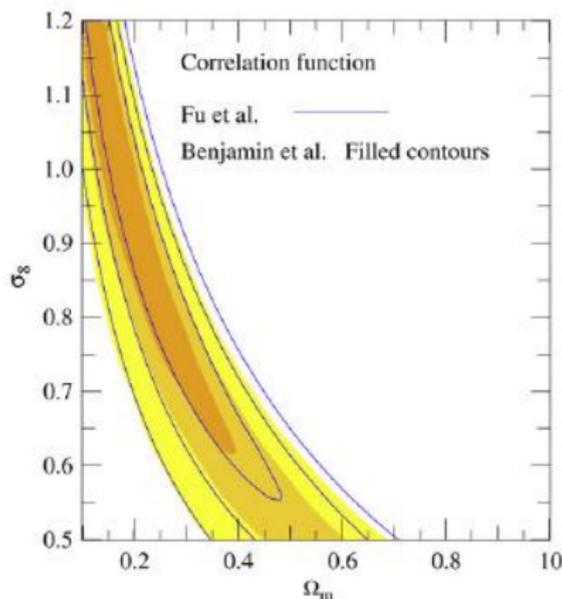
onde

$$F(\eta) = \begin{cases} \frac{J_0(\eta)}{\pi^2} & \text{for } Q = \xi_\mu \\ \left[\frac{J_1(\eta)}{\pi\eta} \right]^2 & \text{for } Q = \langle \gamma_{av}^2 \rangle \\ \left[\frac{12J_4(\eta)}{\pi\eta^2} \right]^2 & \text{for } Q = \langle M_{ap}^2 \rangle \end{cases}$$

Lentes fracas cosmológicas: parâmetros cosmológicos

- ▶ Como no caso da contagem de aglomerados a determinação de $P(k)$ num dado instante permite a determinação precisa de uma combinação entre σ_8 e Ω_M .

D. Munshi et al. / Physics Reports 462 (2008) 67–121



Lentes fracas cosmológicas: parâmetros cosmológicos

Table 4

Reported constraints on the power spectrum normalization σ_8 for $\Omega_m = 0.3$ for a flat Universe, obtained from a given "statistic" (from [303] and extended)

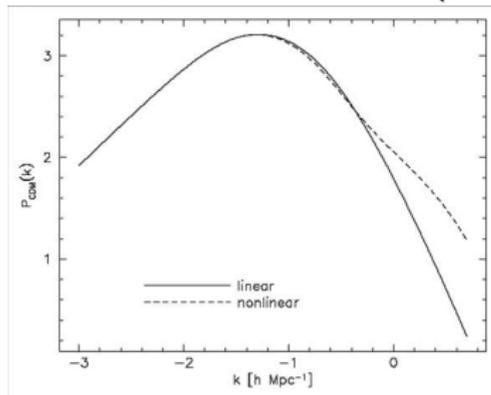
ID	$\sigma_8 (\Omega = 0.3)$	Statistic	Field	m_{lim}	CosVar	E/B	z_s	r
Maoli et al. 01	1.03 ± 0.05	(γ^2)	VLT + CTIO + WHT + CFHT	–	No	No	–	0.21
Van Waerbeke et al. 01	0.88 ± 0.11	$(\gamma^2), \xi(r), (M_{3p}^2)$	CFHT 8 deg 2 .	$l = 24.5$	No	No (yes)	1.1	0.21
Rhodes et al. 01	$0.91^{+0.25}_{-0.29}$	$\xi(r)$	HST 0.05 deg 2	$l = 26$	Yes	No	0.9–1.1	0.25
Hoelstra et al. 02 [116]	0.81 ± 0.08	(γ^2)	CFHT + CTIO 24 deg 2 .	$R = 24$	Yes	No	0.55	0.21
Bacon et al. 03	0.97 ± 0.13	$\xi(r)$	Keck + WHT 1.6 deg 2	$R = 25$	Yes	No	0.7–0.9	0.21
Refrégier et al. 02	0.94 ± 0.17	(γ^2)	HST 0.36 deg 2 .	$l = 23.5$	Yes	No	0.8–1.0	0.21
Van Waerbeke et al. 02	0.94 ± 0.12	(M_{3p}^2)	CFHT 12 deg 2 .	$l = 24.5$	Yes	Yes	0.78–1.08	0.1–0.4
Hoelstra et al. 02	$0.91^{+0.05}_{-0.12}$	$(\gamma^2), \xi(r), (M_{3p}^2)$	CFHT + CTIO 53 deg 2 .	$R = 24$	Yes	Yes	0.54–0.66	0.05–0.5
Brown et al. 03	0.74 ± 0.09	$(\gamma^2), \xi(r)$	COMBO17 1.25 deg 2 .	$R = 25.5$	Yes	No (Yes)	0.8–0.9	–
Hamana et al. 03	$(2\sigma) 0.69^{+0.35}_{-0.26}$	$(M_{3p}^2), \xi(r)$	Subaru 2.1 deg 2 .	$R = 26$	Yes	Yes	0.8–1.4	0.1–0.4
Jarvis et al. 03	$(2\sigma) 0.71^{+0.12}_{-0.16}$	$(\gamma^2), \xi(r), (M_{3p}^2)$	CTIO 75 deg 2 .	$R = 23$	Yes	Yes	0.66	0.15–0.5
Rhodes et al. 04	1.02 ± 0.16	$(\gamma^2), \xi(r)$	STIS 0.25 deg 2 .	$(j) = 24.8$	Yes	No	1.0 ± 0.1	–
Heymans et al. 05	0.68 ± 0.13	$(\gamma^2), \xi(r)$	GEMS 0.3 deg 2 .	$(m_{006}) = 25.6$	Yes	No (Yes)	~ 1	–
Massey et al. 05	1.02 ± 0.15	$(\gamma^2), \xi(r)$	WHT 4 deg 2 .	$R = 25.8$	Yes	Yes	~ 0.8	–
Van Waerbeke et al. 05	0.83 ± 0.07	$(\gamma^2), \xi(r)$	CFHT 12 deg 2 .	$l = 24.5$	Yes	No (Yes)	0.9 ± 0.1	0.1–0.3
Heiterscheidt et al. 06	0.8 ± 0.1	$(\gamma^2), \xi(r)$	GaBoDS 13 deg 2 .	$R = [21.5, 24.5]$	Yes	Yes	~ 0.78	$h \in [0.63, 0.77]$
Semoloni et al. 06	0.90 ± 0.14	$(M_{3p}^2), \xi(r)$	CFHTLS-DEEP 2.3 deg 2 .	$l = 25.5$	Yes	Yes	~ 1	$r = \Omega h$
Hoelstra et al. 06	0.85 ± 0.06	$(\gamma^2), \xi(r), (M_{3p}^2)$	CFHTLS-WIDE 22 deg 2 .	$l = 24.5$	Yes	Yes	0.8 ± 0.1	$r = \Omega h$
Benjamin et al. 07	0.74 ± 0.04	$\xi(r)$	Various 100 deg 2	Various	Yes	Yes	0.78	$r \simeq \Omega h$
Fu et al. 08	0.70 ± 0.04	$(\gamma^2), \xi(r), (M_{3p}^2)$	CFHTLS-WIDE 57 deg 2 .	$l = 24.5$	Yes	Yes	0.95	$r \simeq \Omega h$

"CosVar" tells us whether or not the cosmic variance has been included, "E/B" tells us whether or not a mode decomposition has been used in the likelihood analysis. z_s and r are the priors used for the different surveys identified with "ID".

- ▶ A principal razão para a diferença de resultados foi a determinação imprecisa da distribuição de *redshift* das galáxias fonte

Lentes fracas cosmológicas: parâmetros cosmológicos

- ▶ A comparação dos resultados obtidos através de lentes gravitacionais fracas cosmológicas amostra prioritariamente uma região do espectro de potência da matéria escura cuja evolução é não-linear (pequenas escalas)



Bartelmann & Schneider 1999

- ▶ A teoria não-linear é altamente complexa, de modo que as previsões teóricas para essa região do espectro de potência vem de simulações numéricas.

Lentes fracas cosmológicas: parâmetros cosmológicos

Table 4

Reported constraints on the power spectrum normalization σ_8 for $\Omega_m = 0.3$ for a flat Universe, obtained from a given "statistic" (from [303] and extended)

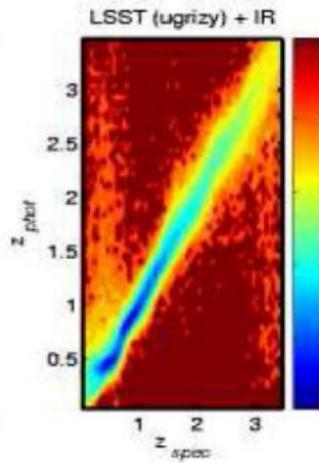
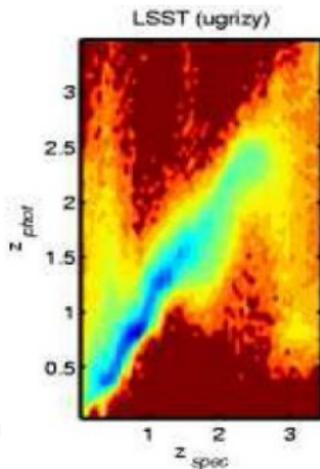
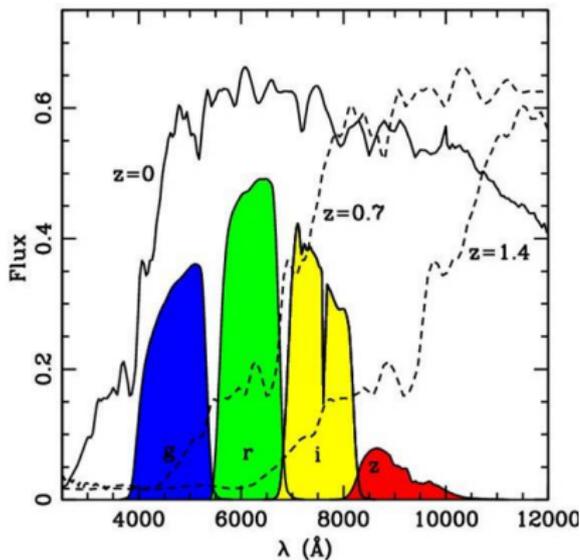
ID	$\sigma_8 (\Omega = 0.3)$	Statistic	Field	m_{lim}	CosVar	E/B	z_s	r
Maoli et al. 01	1.03 ± 0.05	(r^2)	VLT + CTIO + WHT + CFHT	–	No	No	–	0.21
Van Waerbeke et al. 01	0.88 ± 0.11	$(r^2), \xi(r), (M_{3p}^2)$	CFHT 8 deg ² .	$l = 24.5$	No	No (yes)	1.1	0.21
Rhodes et al. 01	$0.91^{+0.25}_{-0.29}$	$\xi(r)$	HST 0.05 deg ²	$l = 26$	Yes	No	0.9–1.1	0.25
Hoelstra et al. 02 [116]	0.81 ± 0.08	(r^2)	CFHT + CTIO 24 deg ² .	$R = 24$	Yes	No	0.55	0.21
Bacon et al. 03	0.97 ± 0.13	$\xi(r)$	Keck + WHT 1.6 deg ²	$R = 25$	Yes	No	0.7–0.9	0.21
Refrégier et al. 02	0.94 ± 0.17	(r^2)	HST 0.36 deg ² .	$l = 23.5$	Yes	No	0.8–1.0	0.21
Van Waerbeke et al. 02	0.94 ± 0.12	(M_{3p}^2)	CFHT 12 deg ² .	$l = 24.5$	Yes	Yes	0.78–1.08	0.1–0.4
Hoelstra et al. 02	$0.91^{+0.05}_{-0.12}$	$(r^2), \xi(r), (M_{3p}^2)$	CFHT + CTIO 53 deg ² .	$R = 24$	Yes	Yes	0.54–0.66	0.05–0.5
Brown et al. 03	0.74 ± 0.09	$(r^2), \xi(r)$	COMBO17 1.25 deg ² .	$R = 25.5$	Yes	No (Yes)	0.8–0.9	–
Hamana et al. 03	$(2\sigma) 0.69^{+0.35}_{-0.26}$	$(M_{3p}^2), \xi(r)$	Subaru 2.1 deg ² .	$R = 26$	Yes	Yes	0.8–1.4	0.1–0.4
Jarvis et al. 03	$(2\sigma) 0.71^{+0.12}_{-0.16}$	$(r^2), \xi(r), (M_{3p}^2)$	CTIO 75 deg ² .	$R = 23$	Yes	Yes	0.66	0.15–0.5
Rhodes et al. 04	1.02 ± 0.16	$(r^2), \xi(r)$	STIS 0.25 deg ² .	$(l) = 24.8$	Yes	No	1.0 ± 0.1	–
Heymans et al. 05	0.68 ± 0.13	$(r^2), \xi(r)$	GEMS 0.3 deg ² .	$(m_{006}) = 25.6$	Yes	No (Yes)	~1	–
Massey et al. 05	1.02 ± 0.15	$(r^2), \xi(r)$	WHT 4 deg ² .	$R = 25.8$	Yes	Yes	~0.8	–
Van Waerbeke et al. 05	0.83 ± 0.07	$(r^2), \xi(r)$	CFHT 12 deg ² .	$l = 24.5$	Yes	No (Yes)	0.9 ± 0.1	0.1–0.3
Heiterscheidt et al. 06	0.8 ± 0.1	$(r^2), \xi(r)$	GaBoDS 13 deg ² .	$R = [21.5, 24.5]$	Yes	Yes	~0.78	$h \in [0.63, 0.77]$
Semoloni et al. 06	0.90 ± 0.14	$(M_{3p}^2), \xi(r)$	CFHTLS-DEEP 2.3 deg ² .	$l = 25.5$	Yes	Yes	~1	$r = \Omega h$
Hoelstra et al. 06	0.85 ± 0.06	$(r^2), \xi(r), (M_{3p}^2)$	CFHTLS-WIDE 22 deg ² .	$l = 24.5$	Yes	Yes	0.8 ± 0.1	$r = \Omega h$
Benjamin et al. 07	0.74 ± 0.04	$\xi(r)$	Various 100 deg ²	Various	Yes	Yes	0.78	$r \simeq \Omega h$
Fu et al. 08	0.70 ± 0.04	$(r^2), \xi(r), (M_{3p}^2)$	CFHTLS-WIDE 57 deg ² .	$l = 24.5$	Yes	Yes	0.95	$r \simeq \Omega h$

"CosVar" tells us whether or not the cosmic variance has been included, "E/B" tells us whether or not a mode decomposition has been used in the likelihood analysis. z_s and r are the priors used for the different surveys identified with "ID".

- ▶ Conforme foi citado de passagem, a determinação precisa de parâmetros cosmológicos através de lentes fracas depende do conhecimento da distância das galáxias fonte.

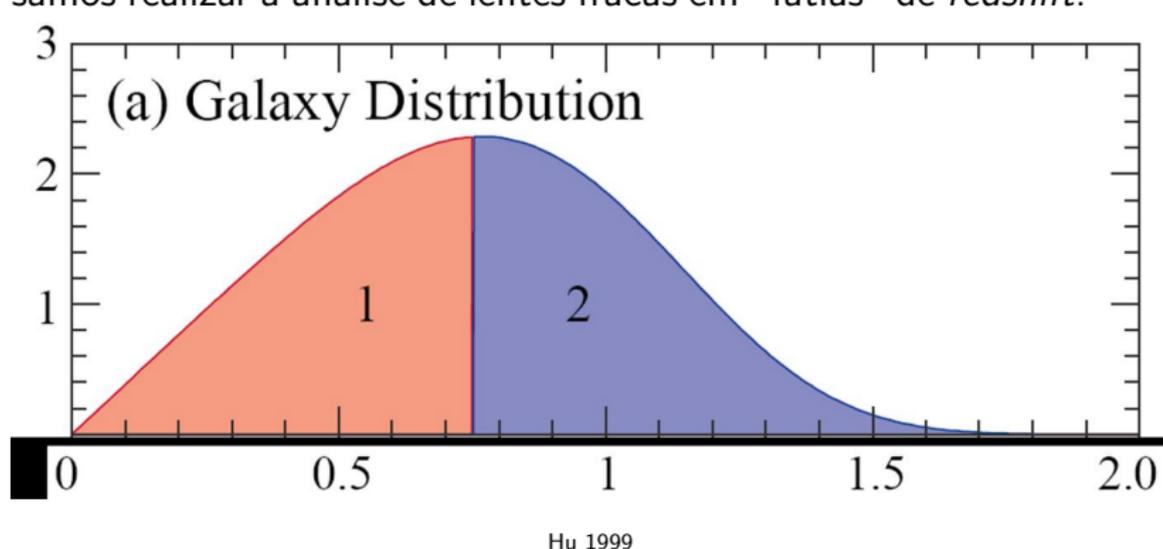
Lentes fracas cosmológicas: *redshifts* fotométricos

- ▶ Para obter *redshifts* de uma quantidade imensa de galáxias muito pouco luminosas a única solução viável são os *redshifts* fotométricos.



Lentes fracas cosmológicas: tomografia

- ▶ Uma vez conhecida a distância de todas as galáxias fonte com alguma precisão é natural imaginar que possamos realizar a análise de lentes fracas em “fatias” de *redshift*.



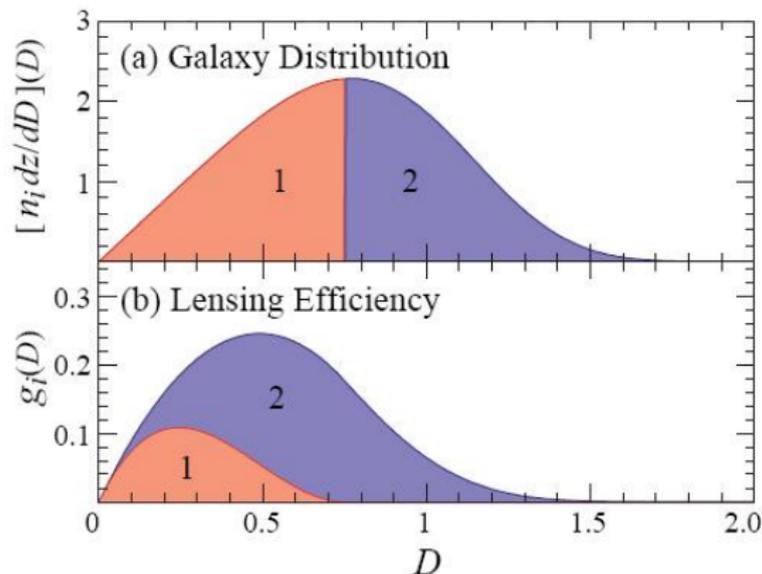
Lentes fracas cosmológicas: tomografia

- ▶ Definamos então a eficiência de lentes:

$$g_i(D) = D_A(D) \int_D^\infty dD' \left[n_i \frac{dz}{dD} \right] (D') \frac{D_A(D' - D)}{D_A(D')}$$

- ▶ Em outros termos g é apenas a soma ponderada de todos os $\frac{D_s}{D_d D_{ds}}$

Lentes fracas cosmológicas: tomografia



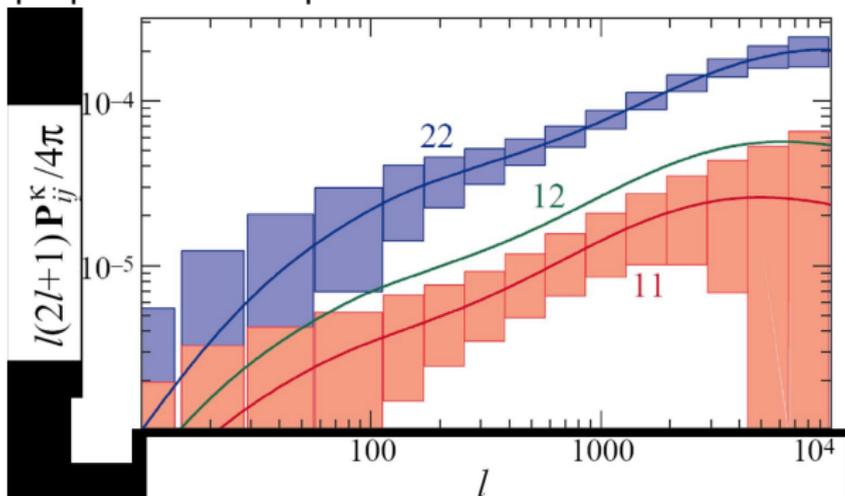
- ▶ As eficiências se superpõem
- ▶ A amostra mais distante é mais “eficiente” (tem mais sinal de lentes porque está as distâncias envolvidas são maiores distante e porque sua luz atravessa um maior número de estruturas)

Lentes fracas cosmológicas: tomografia

- ▶ Definamos então o espectro de potência de lentes:

$$\begin{aligned} P_{ij}^k(\ell) &\equiv \frac{1}{2\ell+1} \langle a_{(\ell m) i}^* a_{(\ell m) j} \rangle \\ &\approx 2\pi^2 \ell \int dD \frac{g_i(D) g_j(D)}{D_A^3(D)} \Delta_{\Phi}^2(k_\ell, D) \end{aligned}$$

- ▶ P_{ii}^k (correlação dentro de uma mesma fatia de *redshift*) num dado z é proporcional ao quadrado da eficiência.



Lentes fracas cosmológicas: tomografia

- ▶ A tecnica da tomografia com apenas dois sub-conjuntos aumenta (e muito !) a sensibilidade das lentes em relação aos parâmetros cosmológicos (incluindo a energia escura).
- ▶ Seria natural então, imaginar que uma sub-divisão em mais sub-conjuntos traria melhoras ainda maiores.
- ▶ Ocorre porém, que como existe uma superposição na eficiência de cada sub-conjunto essa melhoria é cada vez para sub-divisões maiores. Um conjunto de 5 “fatias” é uma solução ótima
- ▶ Se considerarmos que essa divisão é feita através de *redshifts* fotométricos que são relativamente incertos (i.e. os sub-conjuntos tem intersecções) esse número ótimo deve ser ainda menor. **Redshifts fotométricos são realmente importantes !**

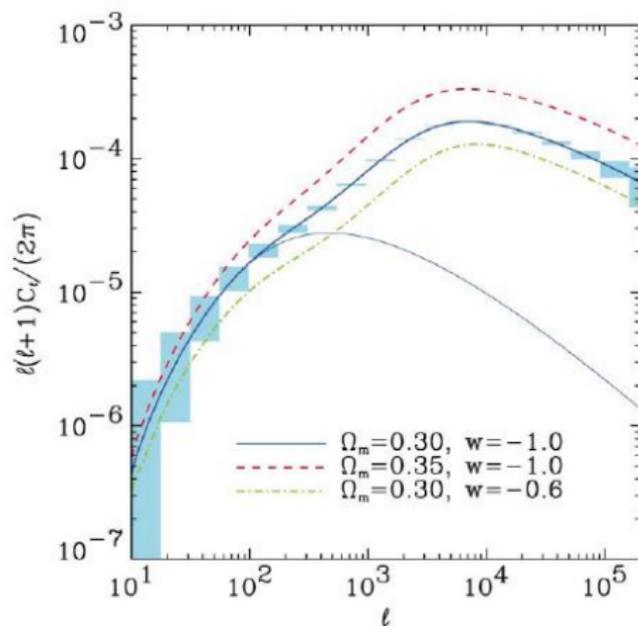
Lentes fracas cosmológicas: tomografia

- ▶ As incertezas do espectro de lentes tem duas origens principais.
- ▶ Nas pequenas escalas domina o fator $\langle \gamma_{int}^2 \rangle \delta_{ij} / \bar{n}_i$
- ▶ Onde γ_{int}^2 é o ruído intrínseco mais o erro na medida e \bar{n}_i o número de galáxias por steradiano no sub-conjunto i .
- ▶ Em escalas maiores é erro é dominado pela variância cósmica

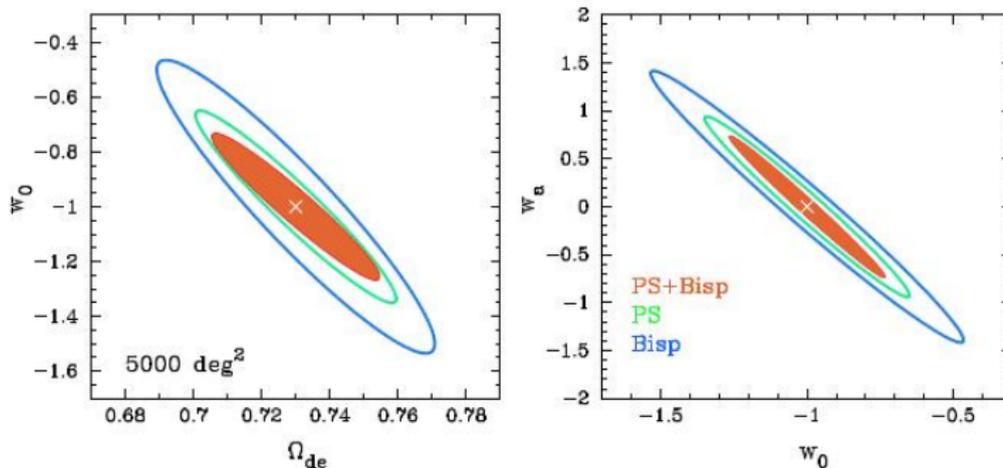
Lentes fracas cosmológicas: tomografia

- ▶ A dependência do espectro de potência de lentes com os parâmetros cosmológicos é bem aproximada por:

$$P^k \propto \Omega_{DE}^{-3.5} \sigma_8^{2.9} z_s^{1.6} |w|^{0.31}$$



Lentes fracas cosmológicas: tomografia



Hoekstra & Jain 2008

Lentes fracas cosmológicas: erros sistemáticos

- ▶ Medidas de lentes fracas cosmológicas são afetadas por dois erros sistemáticos principais: alinhamentos intrínsecos e erros sistemáticos na medição da forma das galáxias.

Lentes fracas cosmológicas: alinhamentos intrínsecos

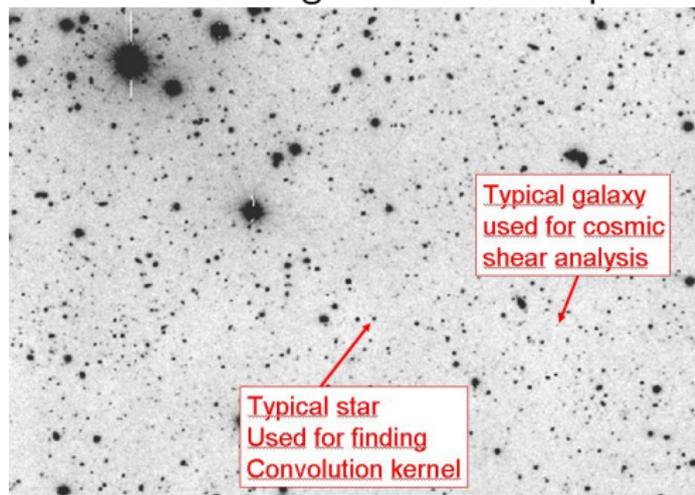
- ▶ Podem existir dois tipos de alinhamentos intrínsecos: galáxia-galáxia (II) ou cizalhamento-galáxia (GI)
- ▶ II - Galáxias que estão próximas fisicamente (i.e. mesmo *redshift*) podem, por efeitos de maré “apontar” na direção de um centro de massa local.
- ▶ Esse efeito foi detectado usando amostras locais (sem efeitos de lentes) e é mais pronunciado para galáxias elípticas.
- ▶ GI - Suponha uma concentração de massa em baixo z . Uma galáxia no mesmo *redshift* estará “apontando” em sua direção, mas uma galáxia mais distante sofrerá o efeito do cizalhamento e tenderá apontar na direção perpendicular a esse centro de massa.
- ▶ Esse efeito cancela parcialmente o sinal de lentes fracas cosmológicas.

Lentes fracas cosmológicas: alinhamentos intrínsecos

- ▶ Il pode ser corrigido removendo-se ou penalizando pares intrínsecamente próximos ou através de modelos.
- ▶ GI pode ser corrigido através de modelos e pode ser minimizado removendo as galáxias elípticas das amostras.
- ▶ Em ambos casos a qualidade dos *redshifts* é crucial !

Lentes fracas cosmológicas: medidas

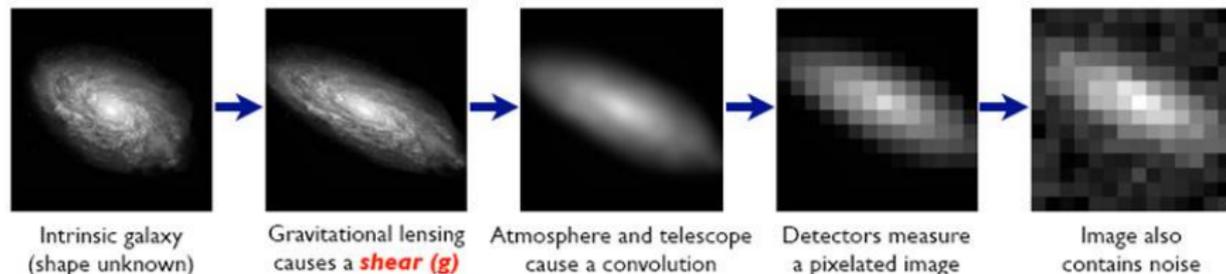
- ▶ Porque medidas da forma das galáxias são um problema ?



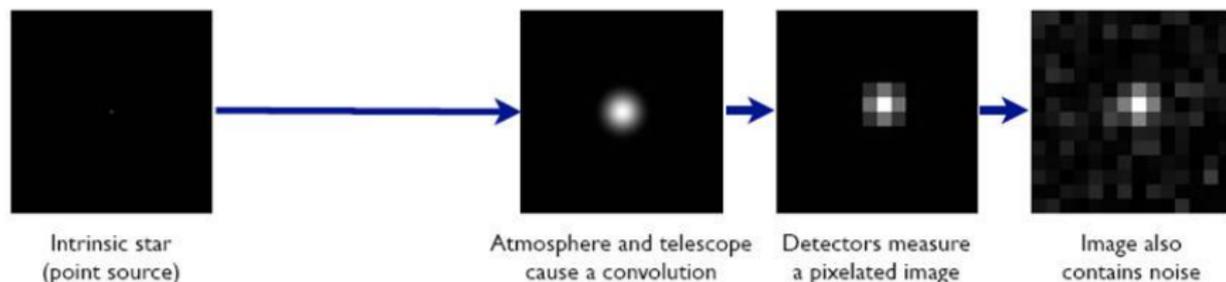
- ▶ É preciso determinar o cizalhamento de uma galáxi a partir de uma imagem convolvida por vários fatores.

The Forward Process.

Galaxies: Intrinsic galaxy shapes to measured image:



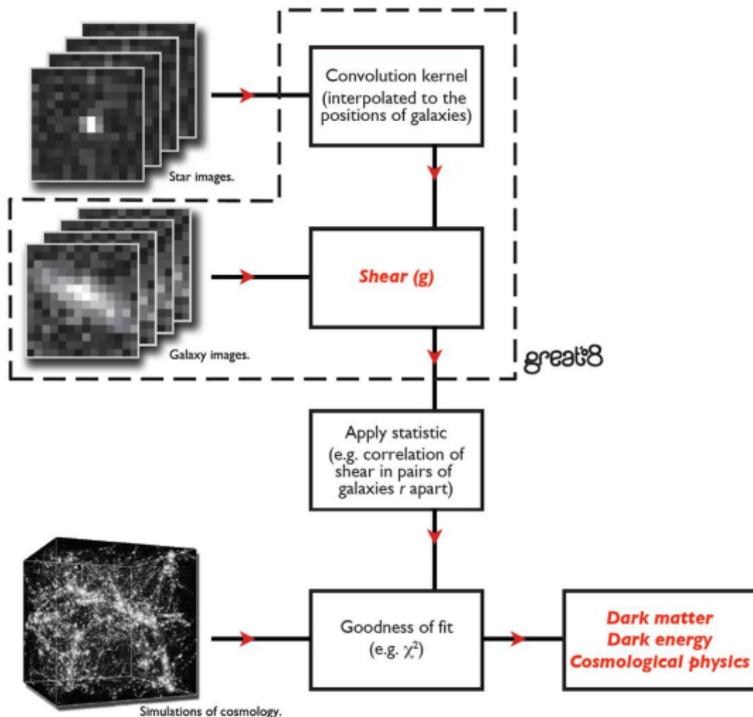
Stars: Point sources to star images:



Lentes fracas cosmológicas: medidas

A full weak lensing pipeline:

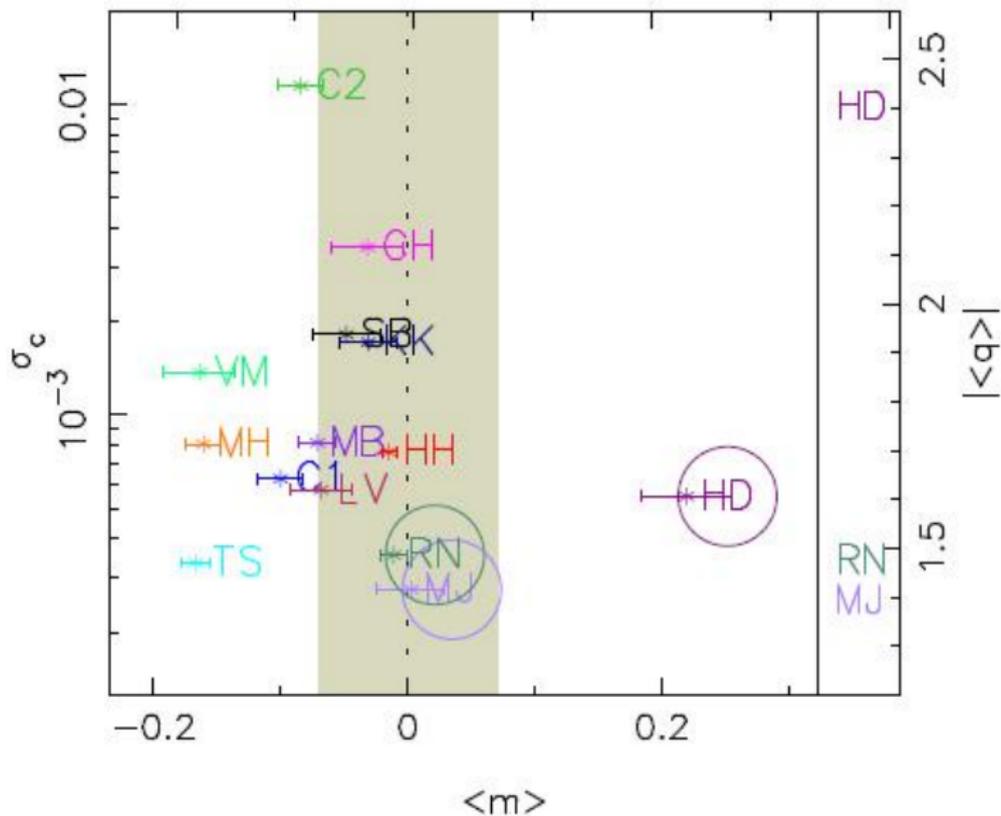
The broader context typical for cosmological measurements



Lentes fracas cosmológicas: medidas

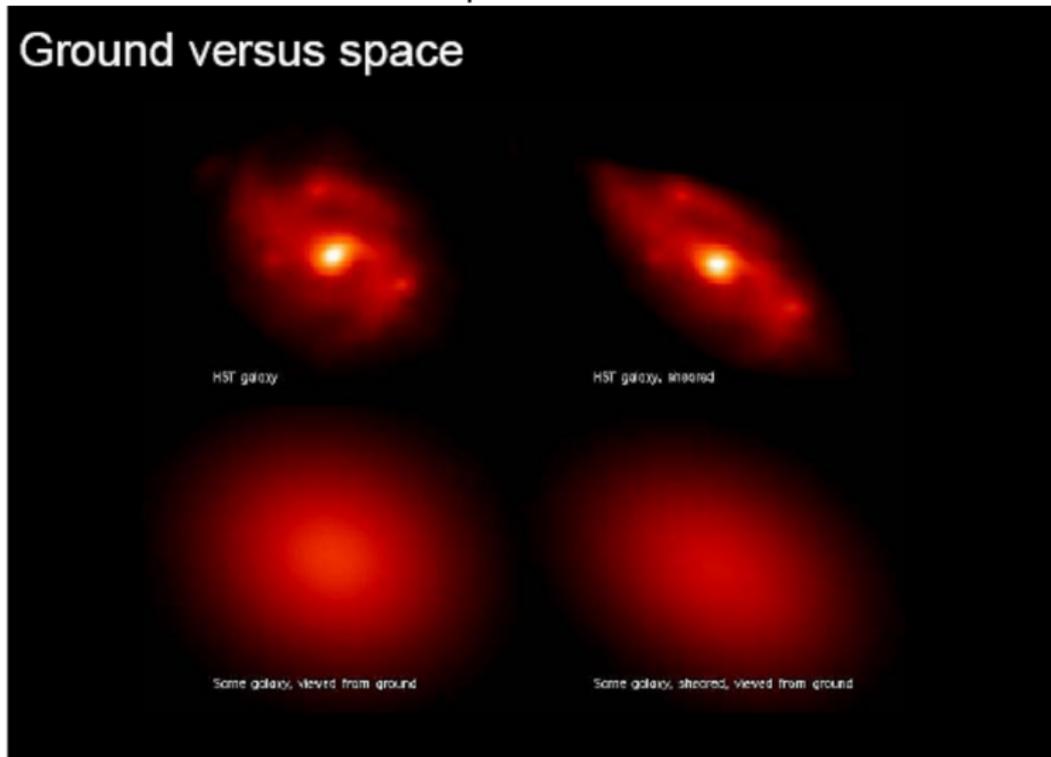
- ▶ Atualmente nenhum dos diversos métodos existentes para medir a forma de galáxias de modo deconvoluído possui a precisão necessária para a determinação de w com precisão da ordem de 1%.
- ▶ A comunidade de lentes está avançando nessa questão usando competições “cegas” onde são fornecidas imagens aos participantes e esses devem recobrar o cizalhamento das galáxias (e.g. o projeto STEP Heynmans et al. 2006 e Massey et al. 2007, além do desafio GREAT08)

Lentes fracas cosmológicas: medidas



Lentes fracas cosmológicas: medidas

- ▶ Dados esses problemas observações espaciais são particularmente interessantes para lentes



Lentes fracas cosmológicas: medidas

- ▶ Lentes gravitacionais fracas são reconhecidas com uma das ferramentas mais poderosas, senão a mais, para a determinação da equação de estado da energia escura.
- ▶ Entretanto essa técnica ainda não está totalmente amadurecida e requer o controle de erros sistemáticos bastante complexos.