

Aula III: Testes observacionais do Princípio Cosmológico (e do modelo cosmológico padrão)

Carlos Bengaly



Resumo

- Testes observacionais da isotropia cosmológica
 - Estado-da-arte
 - Testando isotropia com Supernovas do tipo Ia
 - Testando isotropia com traçadores da estrutura em grande escala

Resumo

- Testes observacionais da isotropia cosmológica
 - Estado-da-arte
 - Testando isotropia com Supernovas do tipo Ia
 - Testando isotropia com traçadores da estrutura em grande escala
- Existe uma escala de homogeneidade cósmica de fato?

Resumo

- Testes observacionais da isotropia cosmológica
 - Estado-da-arte
 - Testando isotropia com Supernovas do tipo Ia
 - Testando isotropia com traçadores da estrutura em grande escala
- Existe uma escala de homogeneidade cósmica de fato?
- Testes de consistência do modelo cosmológico padrão

Resumo

- Testes observacionais da isotropia cosmológica
 - Estado-da-arte
 - Testando isotropia com Supernovas do tipo Ia
 - Testando isotropia com traçadores da estrutura em grande escala
- Existe uma escala de homogeneidade cósmica de fato?
- Testes de consistência do modelo cosmológico padrão
- Conclusões e considerações finais

Testes observacionais da isotropia cosmológica:

Estado da arte

Estado-da-arte

Estado-da-arte

- RCF aparenta isotropia estatística memorável “de olho”, mas examinando de perto...
 - falta de correlação angular em grandes escalas angulares
 - alinhamento do quadrupolo-octopolo
 - assimetria norte sul de forma dipolar
 - baixa potência do quadrupoloModelos alternativos inflacionários, ou mesmo sistemáticos, **não explicam estes resultados**
- Possível **direção preferencial do alinhamento do spin** de galáxias espirais
- Presença de mega-estruturas (**>300 Mpc**) que são difíceis de explicar no cenário padrão de formação de estruturas

Estado-da-arte

Vamos examinar outras observações cosmológicas em busca de sinais que confirmem (ou desproven) estas possíveis violações do princípio cosmológico

- SNs
- traçadores da estrutura em grande escala cosmológica

Testes observacionais da isotropia cosmológica: Supernovas do tipo Ia

CB, Alcaniz, Pigozzo, **Phys.Rev.D 109 (2024) 12, 12; 2402.17741** [astro-ph.CO]

Ver também:

Andrade, CB, Santos, Alcaniz, **ApJ 865, 2, (2018) 119**; 1806.06990 [astro-ph.CO]

Andrade, CB, Alcaniz, Santos, **PRD 97 (2018), 8, 083518, 1711.10536** [astro-ph.CO]

CB, Bernui, Alcaniz, **ApJ 808 (2015), 39, 1503.01413** [astro-ph.CO]

Testando isotropia com SNs

- SNs são excelentes indicadores de distâncias cosmológicas e do MCP
- Será que podemos **testar também o Princípio Cosmológico (PC)** através delas?
- **Um teste prático do PC:** ajustar parâmetros cosmológicos com SNs situadas em diferentes regiões do céu, por ex em **diferentes hemisférios (90deg)**, ou calotas de diferentes tamanhos (**60 deg**, como assumido aqui)
- **Comparar dados reais x simulações de Monte Carlo (MC)** assumindo distribuições uniformes de SNs no céu, ou assumindo distâncias dadas pelo modelo padrão

We assume a cosmographic expression of the luminosity distance [51–53]

$$D_{\text{L}}(z) = (c/H_0) [z + (1 - q_0)z^2/2], \quad (1)$$

where H_0 and q_0 stand for the Hubble Constant and the deceleration parameter, respectively, and $D_{\text{L}}(z)$ is given in Mpc. As the distance modulus definition reads

$$\mu_{\text{model}}(z) \equiv m - M = 5 \log_{10} (D_{\text{L}}(z)/\text{Mpc}) + 25, \quad (2)$$

we obtain the best-fit for the q_0 through a χ^2 minimization, as given by

$$\chi^2 = \vec{\delta}^{\text{T}} (C_{\text{stat+sys}})^{-1} \vec{\delta}, \quad (3)$$

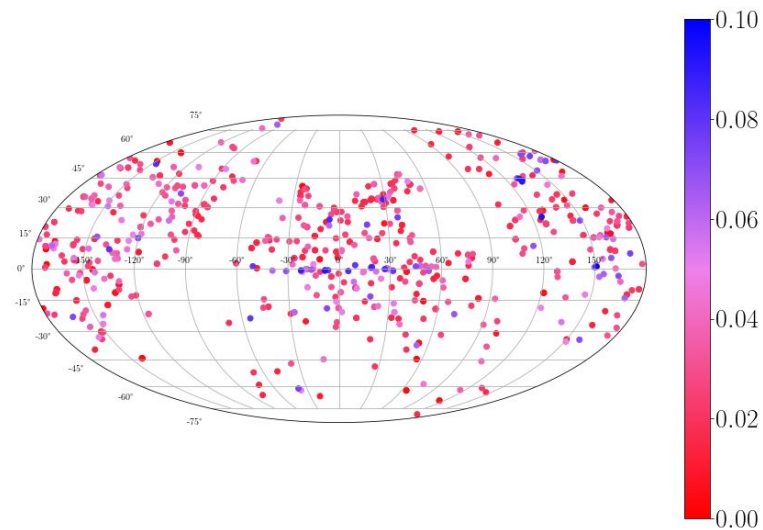
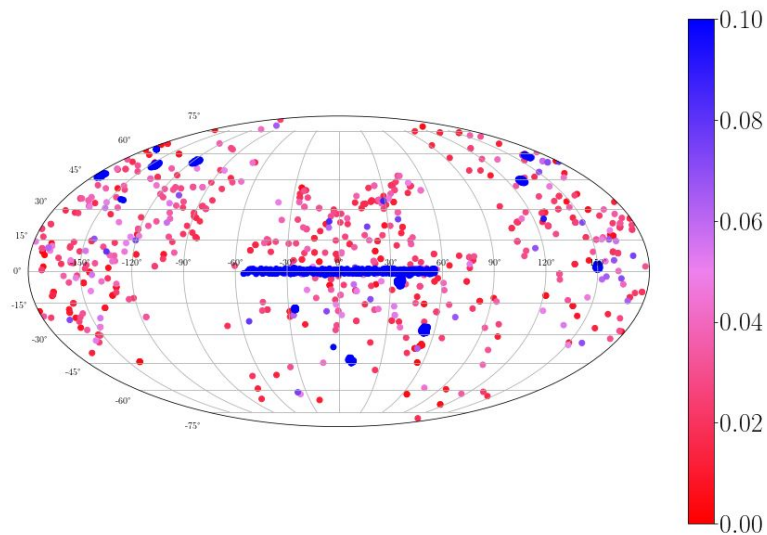
so that $C_{\text{stat+sys}}$ denotes the full SN covariance matrix, and

$$\delta_i = \begin{cases} m_i - M - \mu_i, & i \in \text{Cepheid Hosts} \\ m_i - M - \mu_{\text{model}}(z_i) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

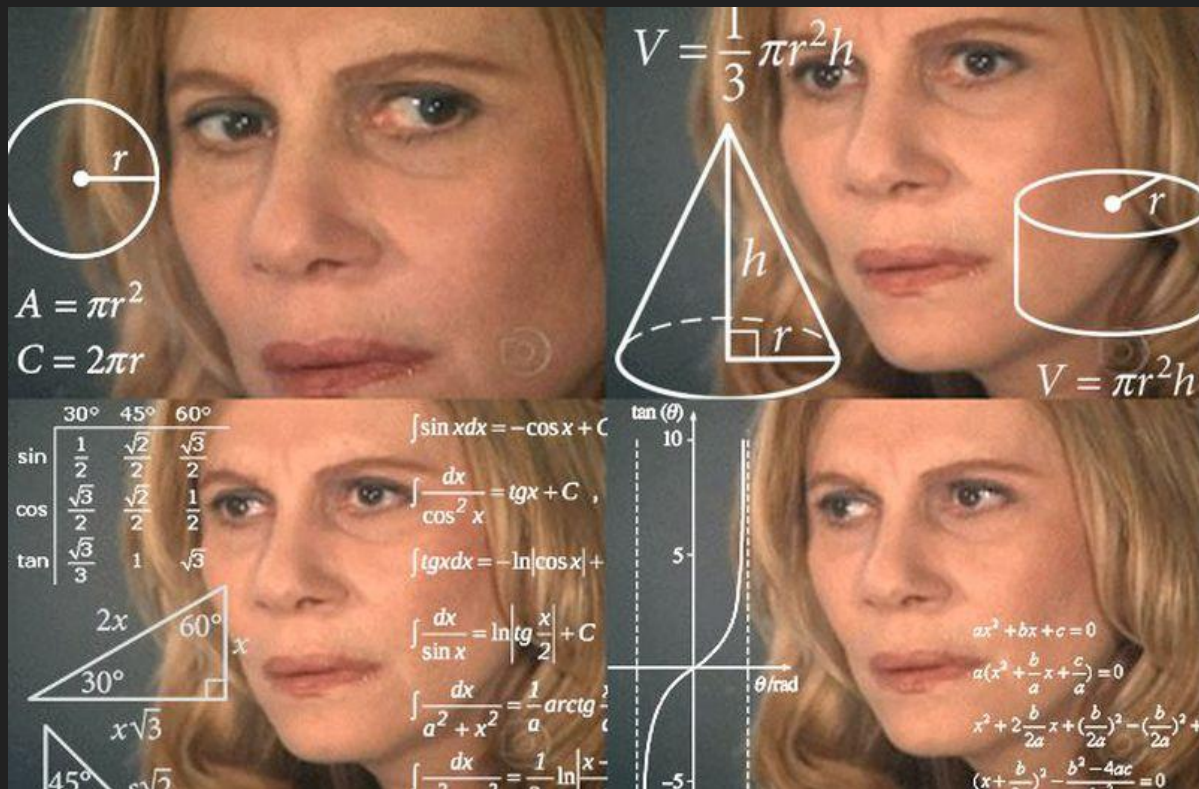
We adopt the following estimator to test the isotropy of the local cosmic acceleration by a similar fashion of [40, 43], as follows

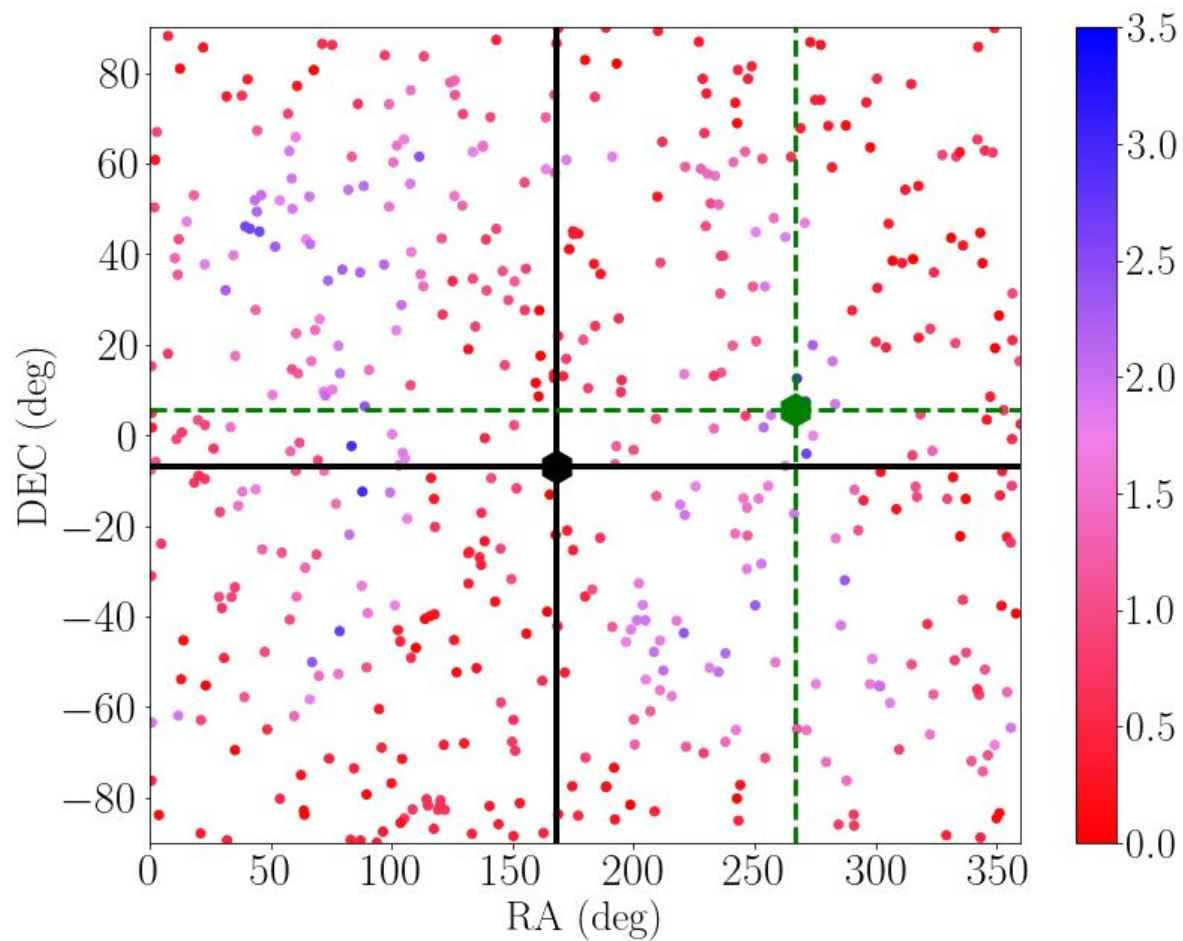
$$\Delta_{q0} = \frac{|q_0^{(\text{“northcap”})} - q_0^{(\text{“southcap”})}|}{\sigma_{q_0}^{2(\text{“northcap”})} + \sigma_{q_0}^{2(\text{“southcap”})}}, \quad (5)$$

Distribuição celeste de SN da
compilação **PantheonPlus** (Brout et
al. 2022); **amostra completa** (à
esquerda) x **amostra $z < 0.1$** (abaixo)



Results





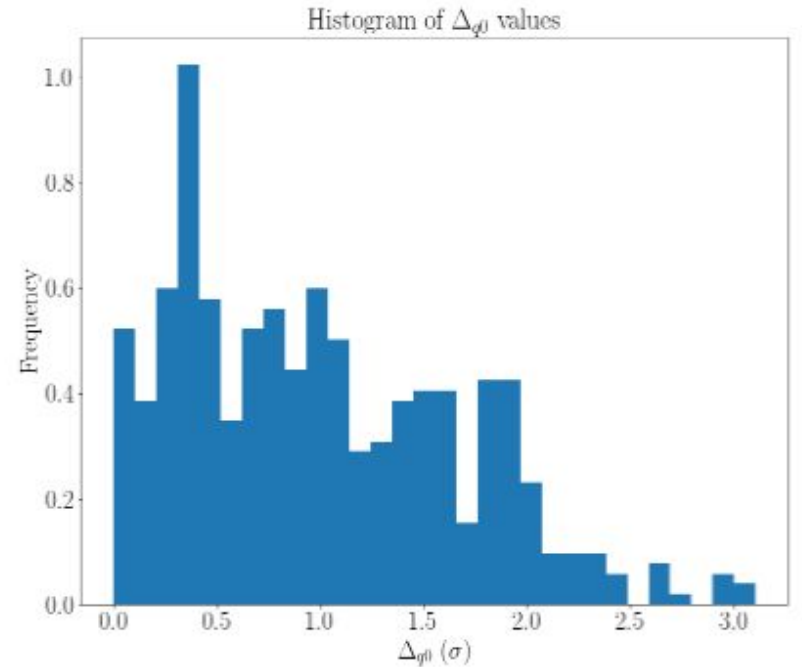
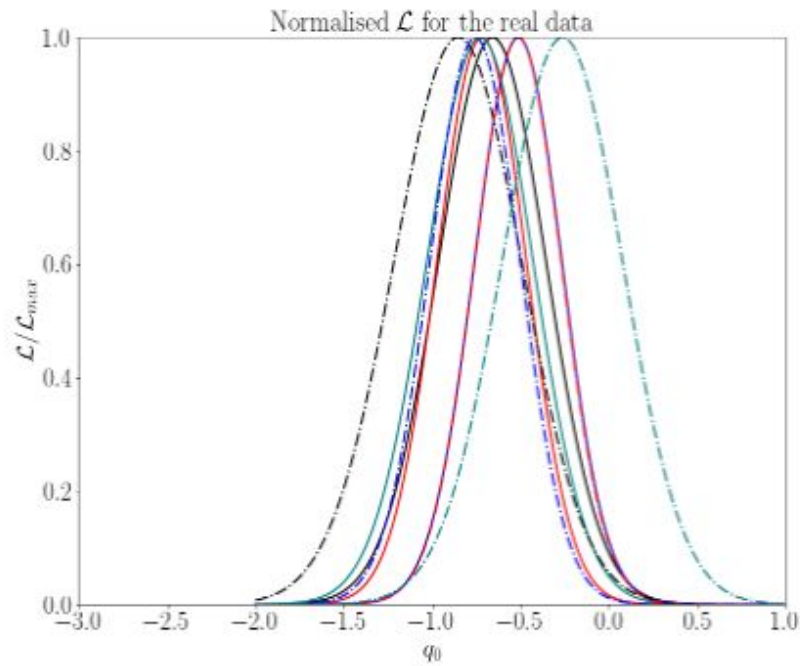


FIG. 3. *Left panel:* Examples of the q_0 normalised likelihood from 4 different directions across the sky. The black, red, blue and teal solid (dashed-dotted) curves represent the “northern” (“southern”) counterpart of each of those directions. *Right panel:* A histogram of Δ_{q_0} values, given in function of C.L. (σ).

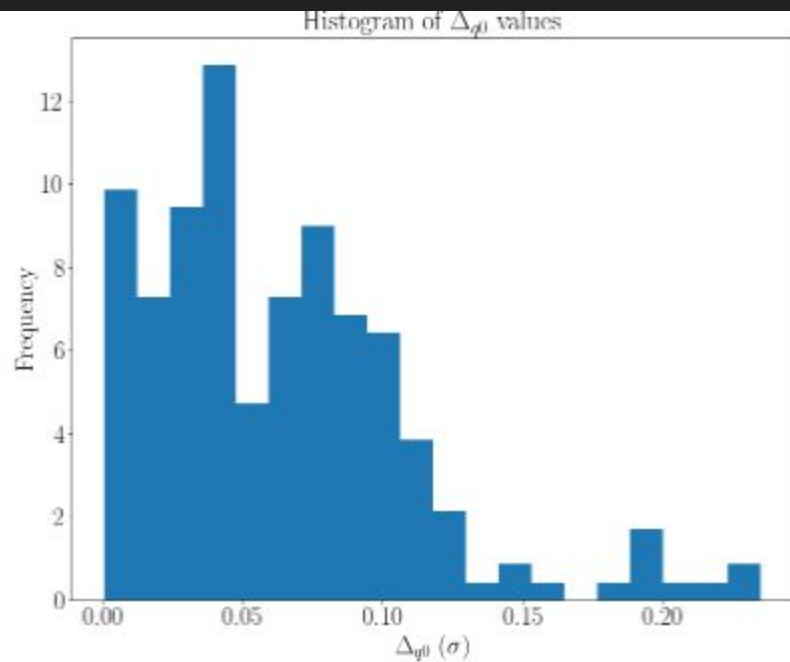
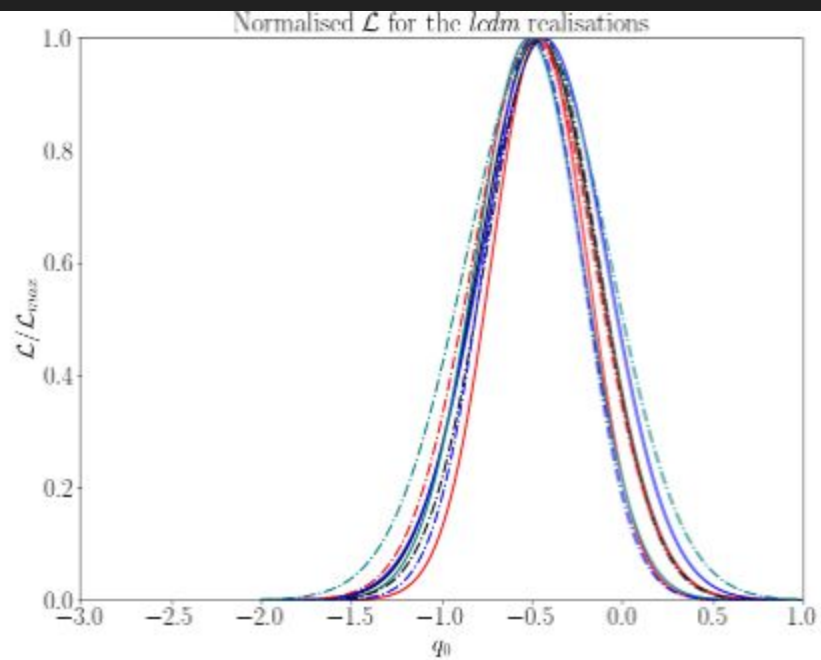


FIG. 5. Same as Fig. 3, but rather for the Λ CDM realisations.

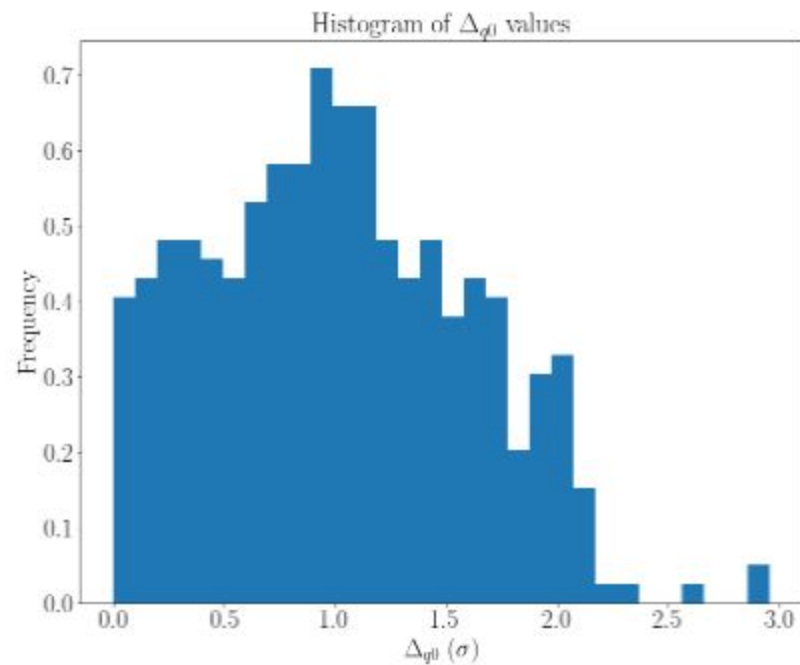
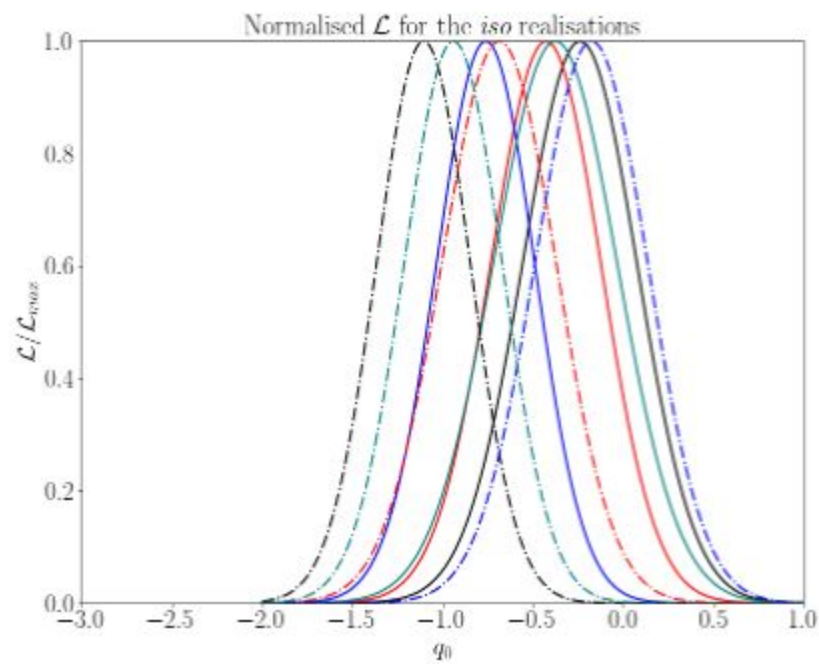


FIG. 6. Same as Fig. 5, but rather for the *iso* realisations.

Conclusões

- Utilizando uma sub-amostra ($0.01 < z < 0.1$) da compilação PantheonPlus, encontramos que o parâmetro de desaceleração q_0 apresenta uma variação máxima de $\Delta q_0 = 3.06$ (NC) através do céu, cuja direção se localiza a $\sim 90^\circ$ do dipolo cinemático da RCF (voltaremos a este dipolo já já...)
- Testamos se este resultado decorre de uma distribuição não-uniforme de SNs no céu, encontrando um máximo $\Delta q_0 = 2.96$ (realizações “iso”). Considerando o resíduo de $\Delta q_0 = 0.24$ (realizações “lcdm”), podemos afirmar que o resultado anterior não apresenta significância estatística – não é um “sinal raro”

Testes observacionais da isotropia cosmológica:

Traçadores da estrutura em grande escala

Testes observacionais da isotropia cosmológica:

Traçadores da estrutura em grande escala

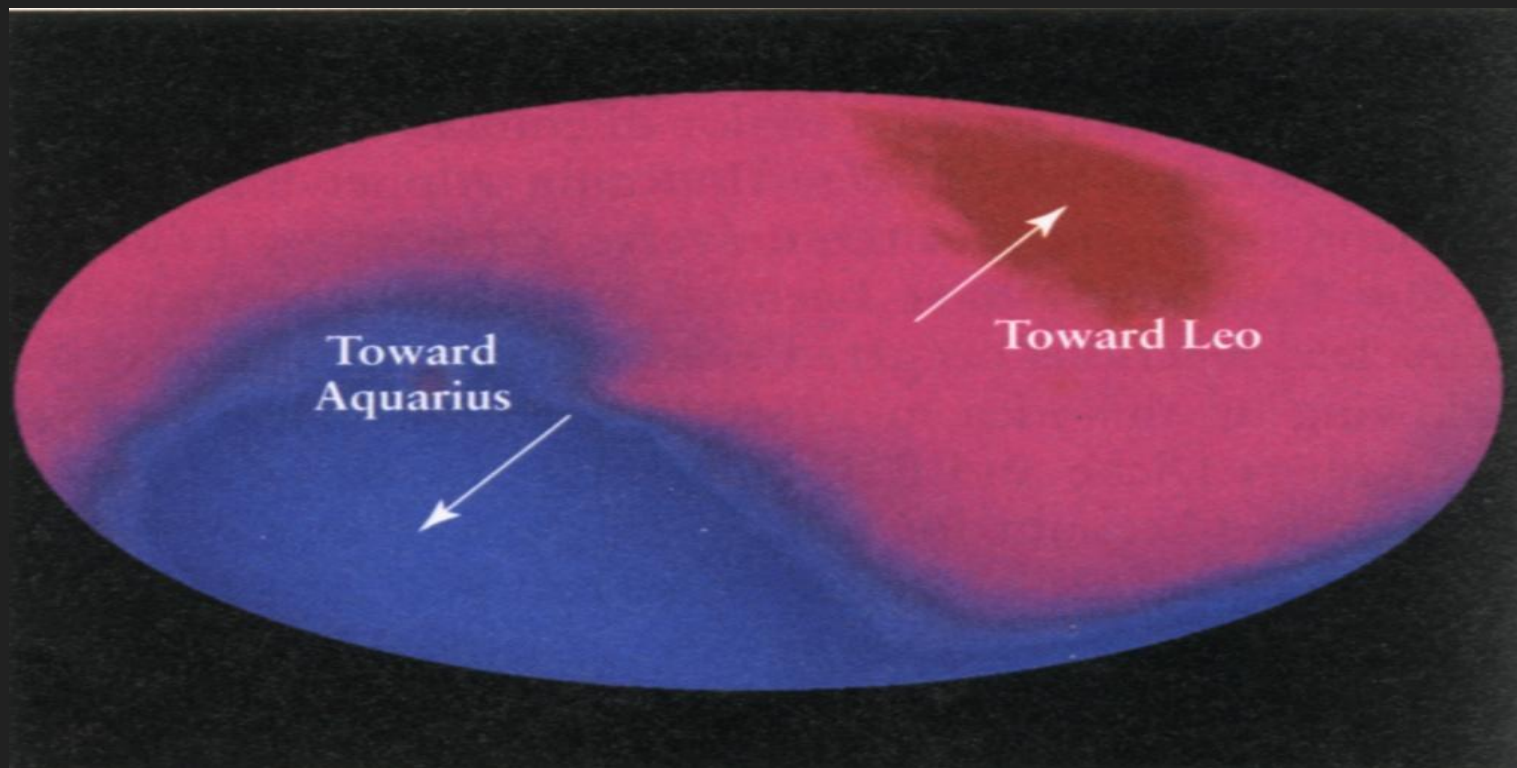
CB, Santos, Maartens, **JCAP 04 (2018) 031**; 1710.08804 [astro-ph.CO]

CB, Maartens, Randriamiarinarivo, Baloyi, **JCAP 09 (2019) 025**,
1905.12378 [astro-ph.CO]

CB, Siewert, Schwarz, Maartens, **MNRAS 486 (2019), 1, 1350**;
1810.04966 [astro-ph.CO]

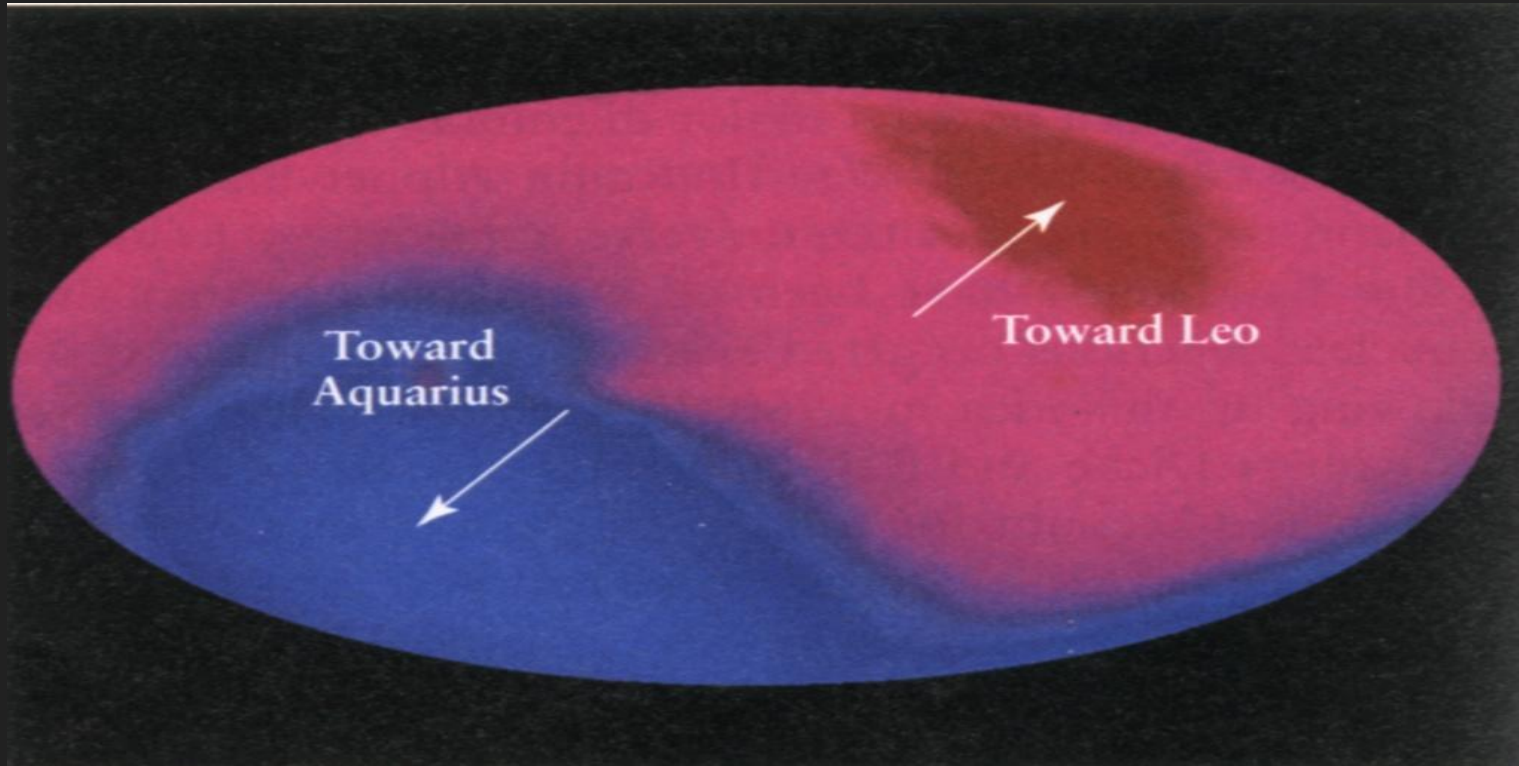
Ver também: SKA1 red book, **PSAP 37 (2020) e007**; 1811.02743 [astro-ph.CO]
Cerutt & CB, in prep

Teste do PC



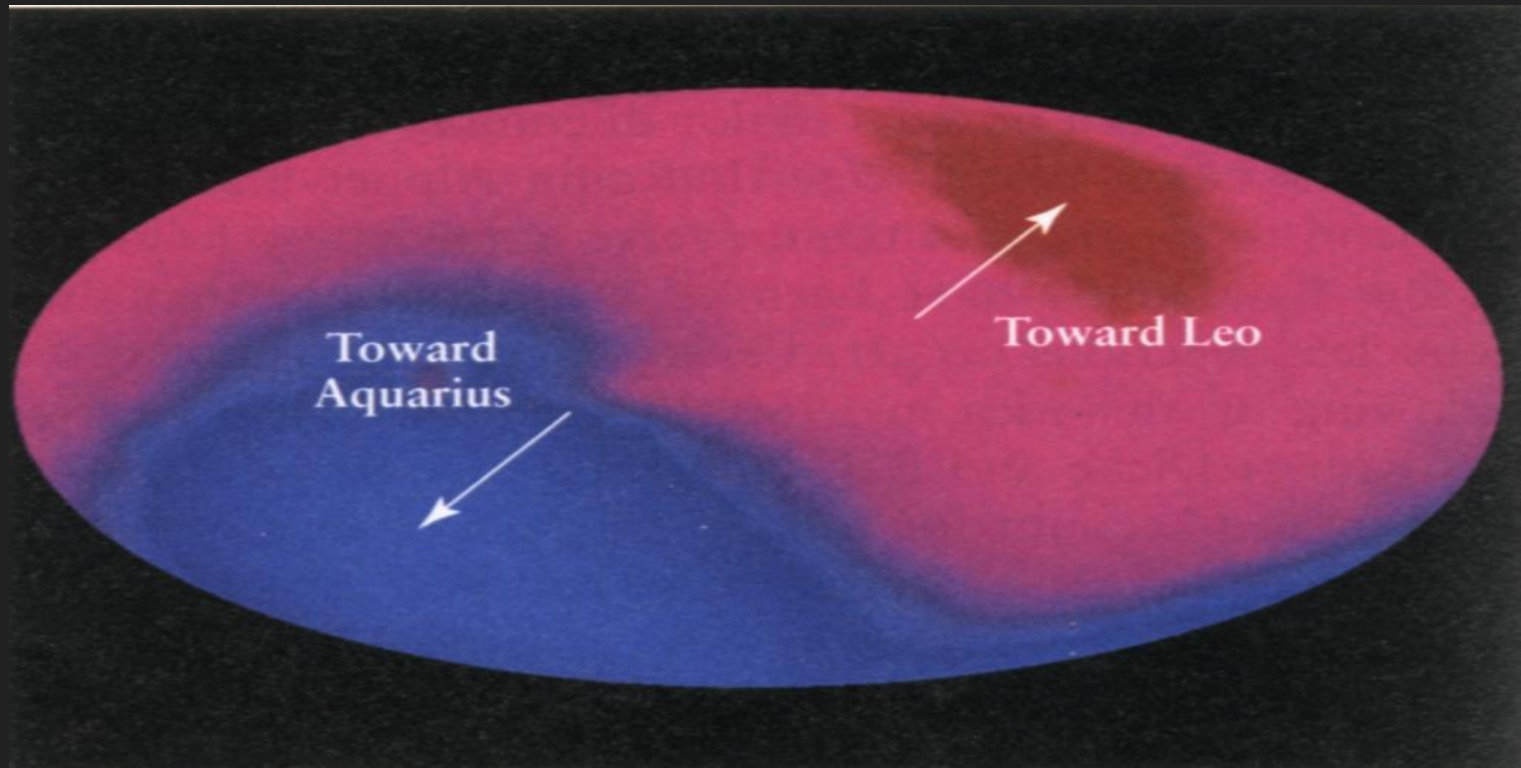
O que é isso?!

Teste do PC

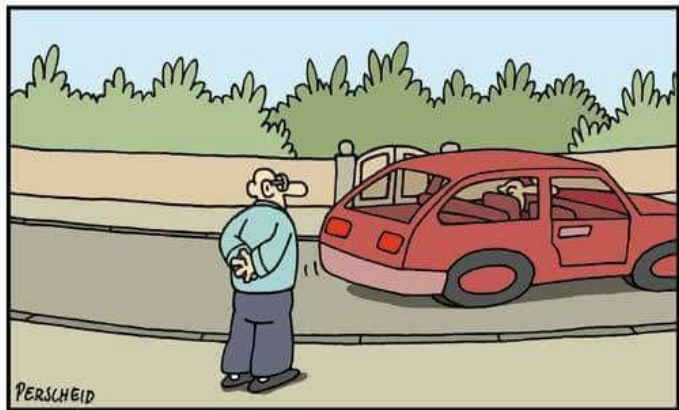
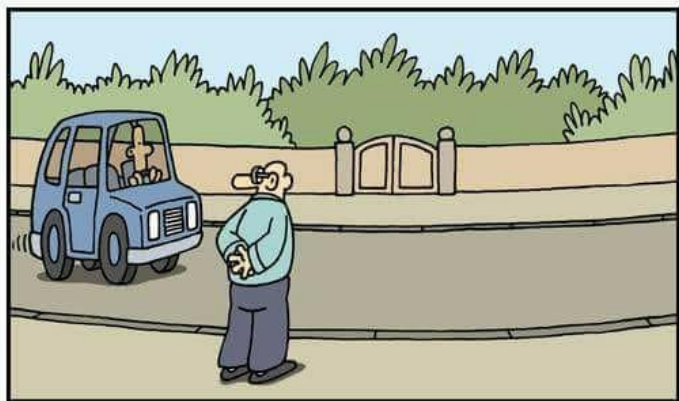


A assinatura de **nosso movimento peculiar** relativo à RCF

Teste do PC



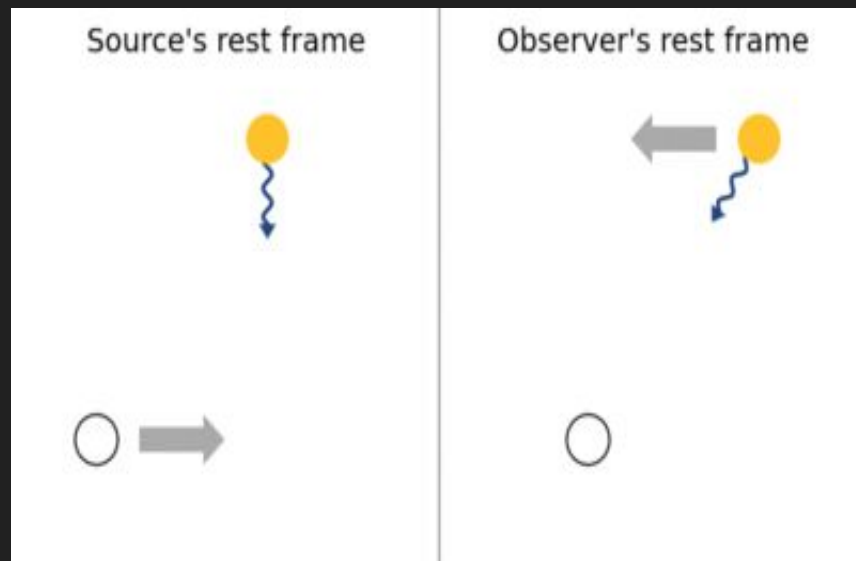
Efeito doppler + aberração dos ângulos



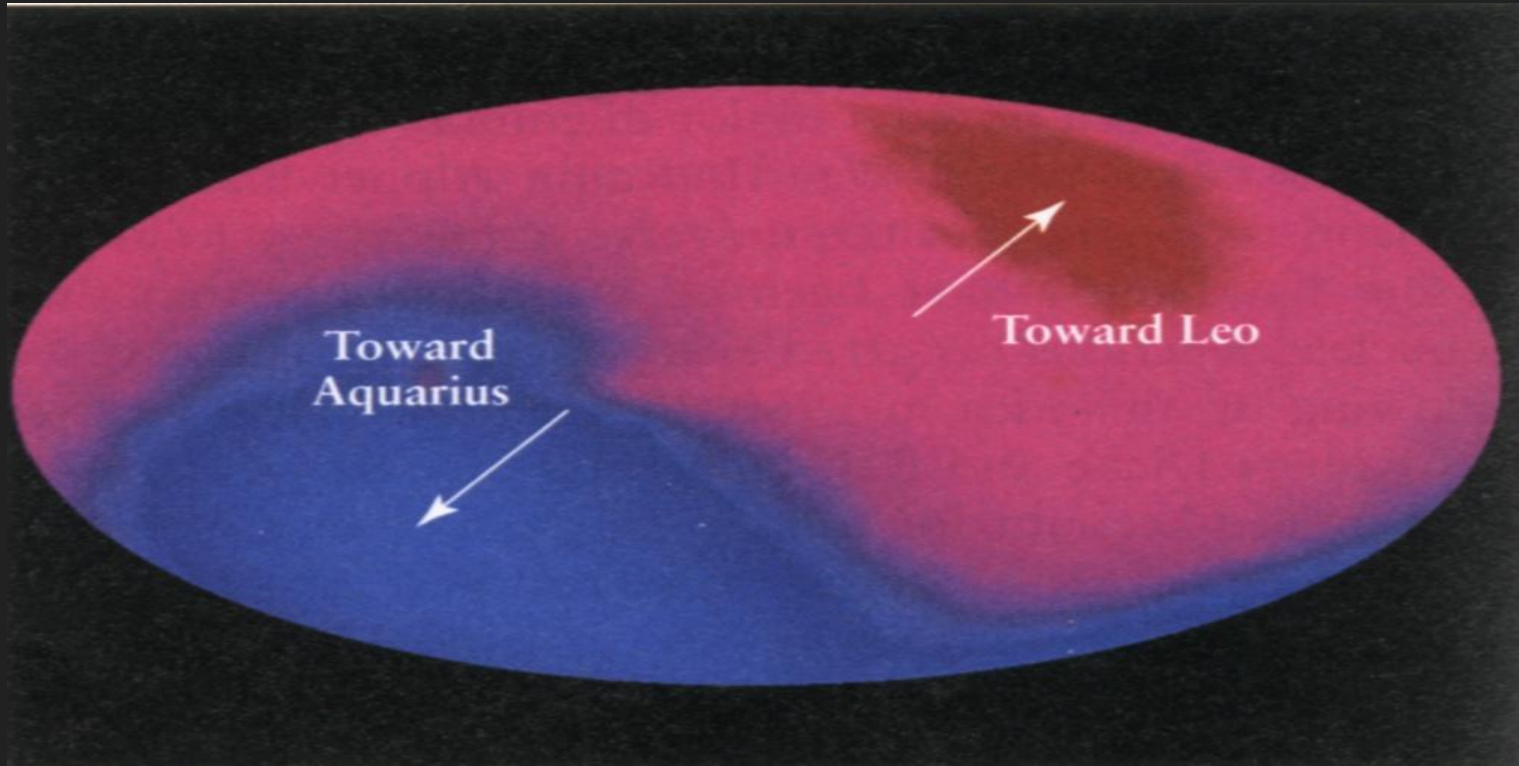
PERSCHIED

A PRACTICAL EXAMPLE OF THE DOPPLER EFFECT

+

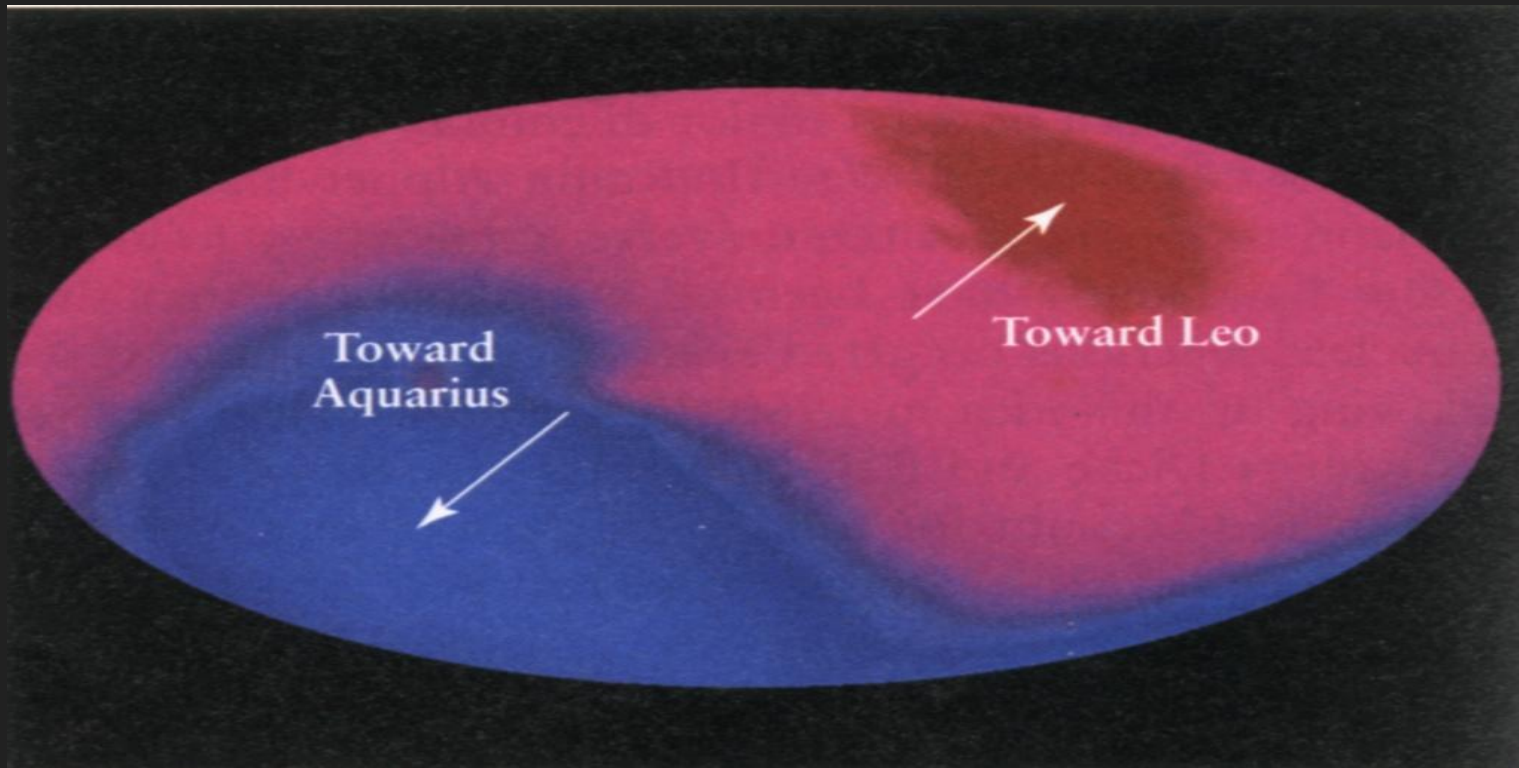


Teste do PC



Teste: podemos ver este sinal na distribuição angular de galáxias?!

Teste do PC



Se o sinal for o mesmo, então o PC é uma hipótese válida!

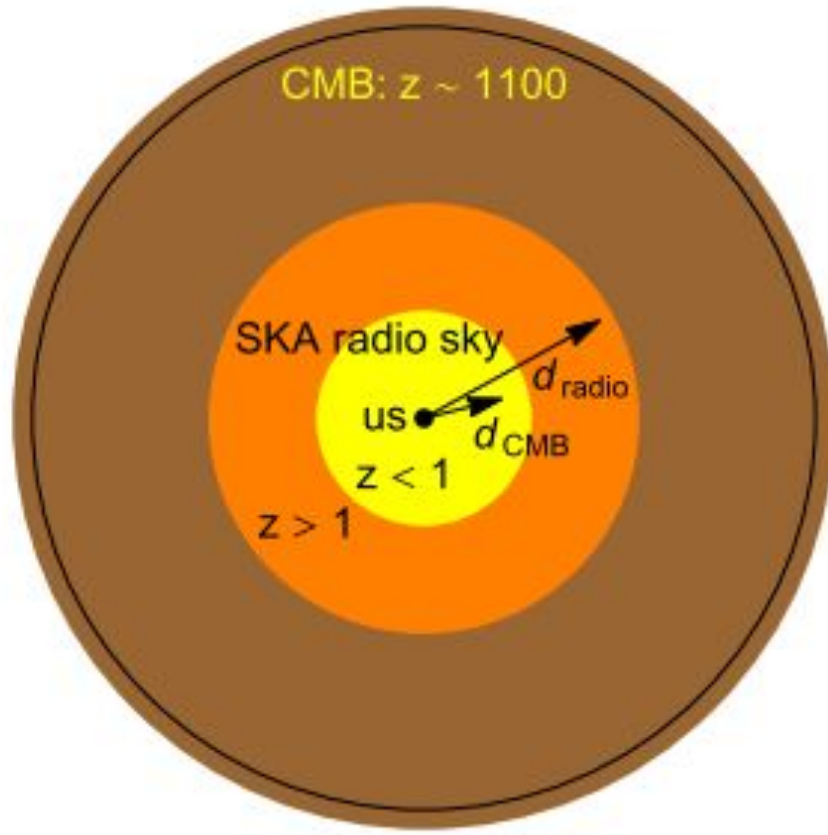
On the expected anisotropy of radio source counts

G. F. R. Ellis[★] and J. E. Baldwin[†] *Orthodox Academy of Crete,
Kolymbari, Crete*

Received 1983 May 31; in original form 1983 March 31

Summary. If the standard interpretation of the dipole anisotropy in the microwave background radiation as being due to our peculiar velocity in a homogeneous isotropic universe is correct, then radio-source number counts must show a similar anisotropy. Conversely, determination of a dipole anisotropy in those counts determines our velocity relative to their rest frame; this velocity must agree with that determined from the microwave background radiation anisotropy. Present limits show reasonable agreement between these velocities.

Créditos: Schwarz+ 2015



Anisotropia de dipolo na contagem em rádio

- Índice espectral $S \propto \nu^{-\alpha}$
- Lei de potências $N(> S) \propto S^{-x}$
- Efeito doppler $\nu_o = \nu_e(1 + \beta \cos \theta)\gamma;$
 $\beta \equiv v/c; \gamma \equiv (1 - \beta^2)^{-1/2}$
- Aberração dos ângulos

$$\tan \theta_o = [\sin \theta_e / (\beta + \cos \theta_e)] \gamma^{-1}$$

Anisotropia de dipolo na contagem em rádio

- Índice espectral $S \propto \nu^{-\alpha}$
- Lei de potências $N(> S) \propto S^{-x}$
- Efeito doppler modifica as relações acima tal como
$$S_o(\nu_o) \propto \delta S_e(\nu_e) \propto \delta \nu_e^{-\alpha} \propto \delta^{1+\alpha} \nu_o^{-\alpha}$$
$$\Rightarrow S_o(\nu_o) \propto S_e(\nu_o) \delta^{1+\alpha}$$
- Já a aberração dos ângulos $d\Omega_o = d\Omega_e \delta^{-2}$

Anisotropia de dipolo na contagem em rádio

- Índice espectral $S \propto \nu^{-\alpha}$
- Lei de potências $N(> S) \propto S^{-x}$

- Combinando ambos os efeitos, temos

$$N_{\text{obs}} = N_{\text{rest}} [2 + x(1 + \alpha)] \beta \cos \theta$$

Anisotropia de dipolo na contagem em rádio

- Índice espectral $S \propto \nu^{-\alpha}$
- Lei de potências $N(> S) \propto S^{-x}$
- Combinando ambos os efeitos, temos

$$N_{\text{obs}} \propto A \cos \theta$$

Anisotropia de dipolo na contagem em rádio

- Índice espectral $S \propto \nu^{-\alpha}$
- Lei de potências $N(> S) \propto S^{-x}$
- Combinando ambos os efeitos, temos

$$A = 0.00462$$

$$\alpha = 0.76, x = 1.0, \beta = 0.00123$$

Construção da amostra I

- Os dois maiores catálogos em rádio de “céu inteiro”:
NVSS (NRAO VLA Sky Survey @ 1400 MHz) vs. **TGSS** (TIFR GMRT Sky Survey @ 150 MHz)

Construção da amostra I

- Os dois maiores catálogos em rádio de “céu inteiro”:
NVSS (NRAO VLA Sky Survey @ 1400 MHz) vs. **TGSS** (TIFR GMRT Sky Survey @ 150 MHz)
- Cobertura do céu: **DEC>-40deg** (NVSS), **DEC>-53deg** (TGSS)

Construção da amostra I

- Os dois maiores catálogos em rádio de “céu inteiro”:
NVSS (NRAO VLA Sky Survey @ 1400 MHz) vs. **TGSS** (TIFR GMRT Sky Survey @ 150 MHz)
- Cobertura do céu: **DEC>-40deg** (NVSS), **DEC>-53deg** (TGSS)
- **Flux threshold selected**

$$100 < S_{\text{TGSS}} < 5500 \text{ mJy}$$

$$f_{\text{sky}} \simeq 0.687; N_{\text{tot}} = 233,395$$

$$20 < S_{\text{NVSS}} < 1000 \text{ mJy}$$

$$f_{\text{sky}} = 0.657; N_{\text{tot}} = 253,313$$

Construção da amostra II

Limpamos o catálogo ainda mais de acordo com:

- Removendo pixels com alto ruído rms (**10mJy/beam**)
- Eliminando o plano galáctico ($|b| < 10\text{deg}$)
- Eliminando fontes a menos de **1deg** de **fontes em rádio e aglomerados locais**
- Regiões cuja emissão em rádio galáctica **excede $T=50\text{mK}$** de acordo com o mapa Haslam (Haslam et al. 1982)

Análise de dados

- Procuramos por uma direção preferencial no céu usando um **método de comparação hemisférica**
- Source count maps produced with **HEALPix** package as well (Nside=64)
- Comparar **mapas de contagem reais x simulados** produzidos usando um código chamado flask, com espectro de potência fiducial fornecido pelo CAMB sources
- $n(z)$ seguindo a simulação **S3**, $b(z)$ segue Nusser & Tiwari 2016:
 $b(z) = 1.6 + 0.7z + 0.35z^2$
- Verificamos como **erros da medida de fluxo**, bem como **calibração de fluxo**, podem afetar nossa estimativa do dipolo

Análise de dados

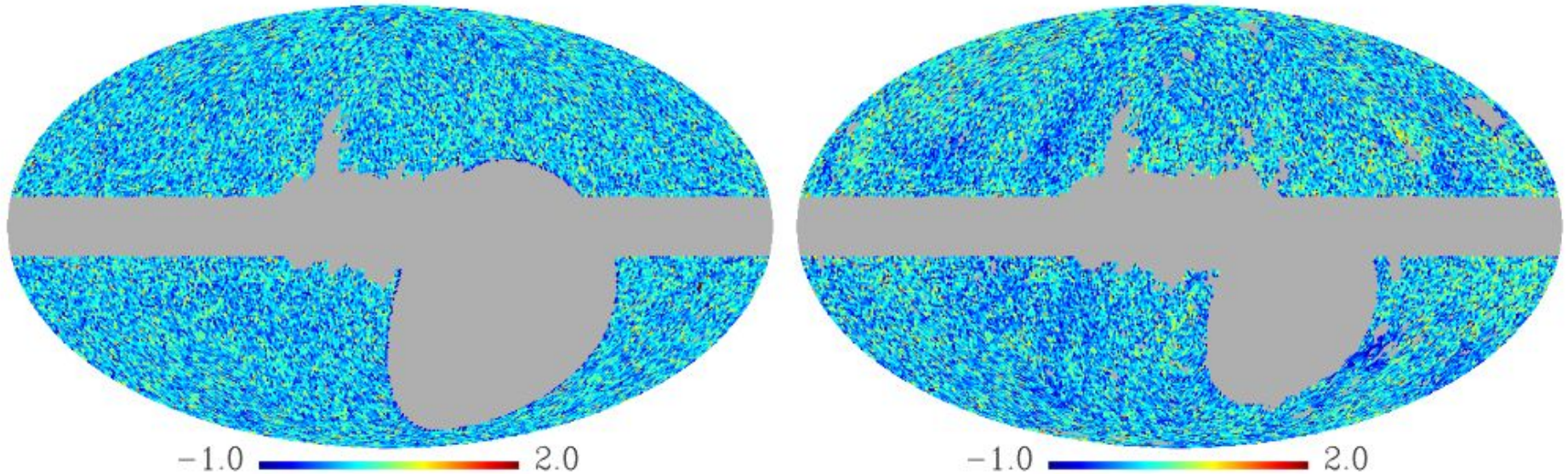
- Procuramos por uma direção preferencial no céu usando um **método de comparação hemisférica**

$$\Delta_i \equiv 2 \frac{n_i^n - n_i^s}{n_i^n + n_i^s};$$

$$n_i \equiv \frac{N_i}{4\pi f_i^{\text{sky}}}$$

- **i** representa a **i-ésima direção** onde dividimos o céu usando o pacote **HEALPix** (nesse caso, escolhemos **nside=16**, logo, temos **3072 direções**)
- Posição do céu onde obtemos o **máximo valor de Δ** => **direção do dipolo**. Já a **amplitude do dipolo** é diretamente dada **por esse valor**

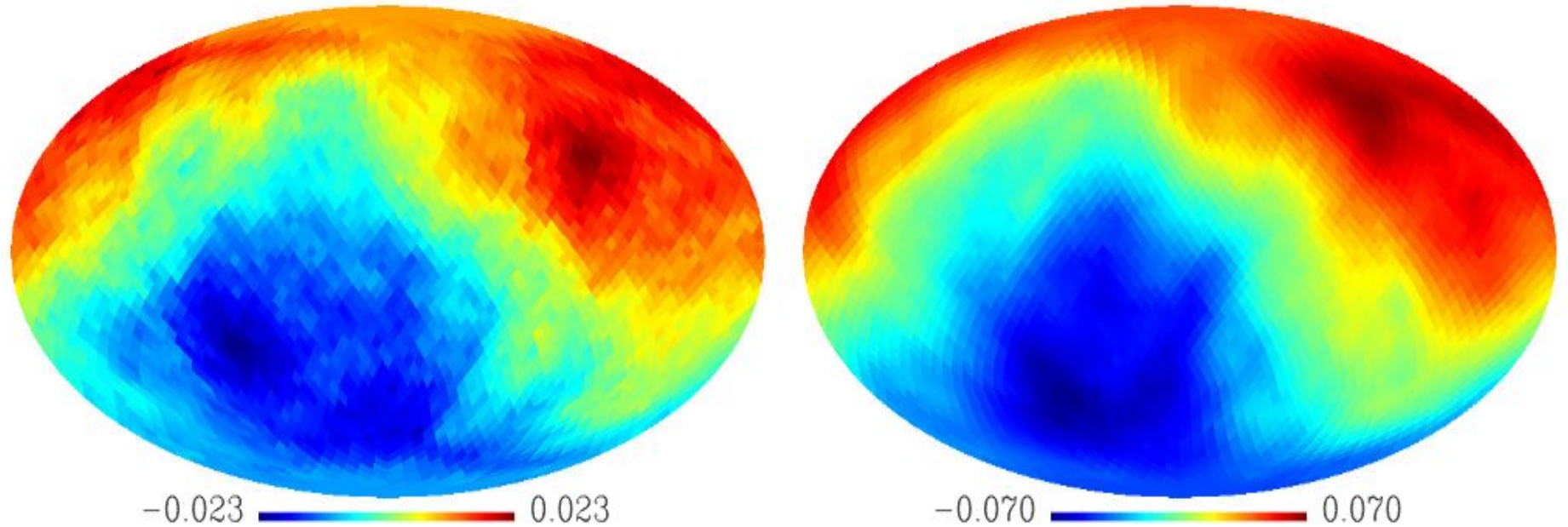
Dados observacionais: contagem de fontes



NVSS (left) versus TGSS (right)

Resultados

Resultados: dados reais



NVSS (esquerda) versus TGSS (direita)

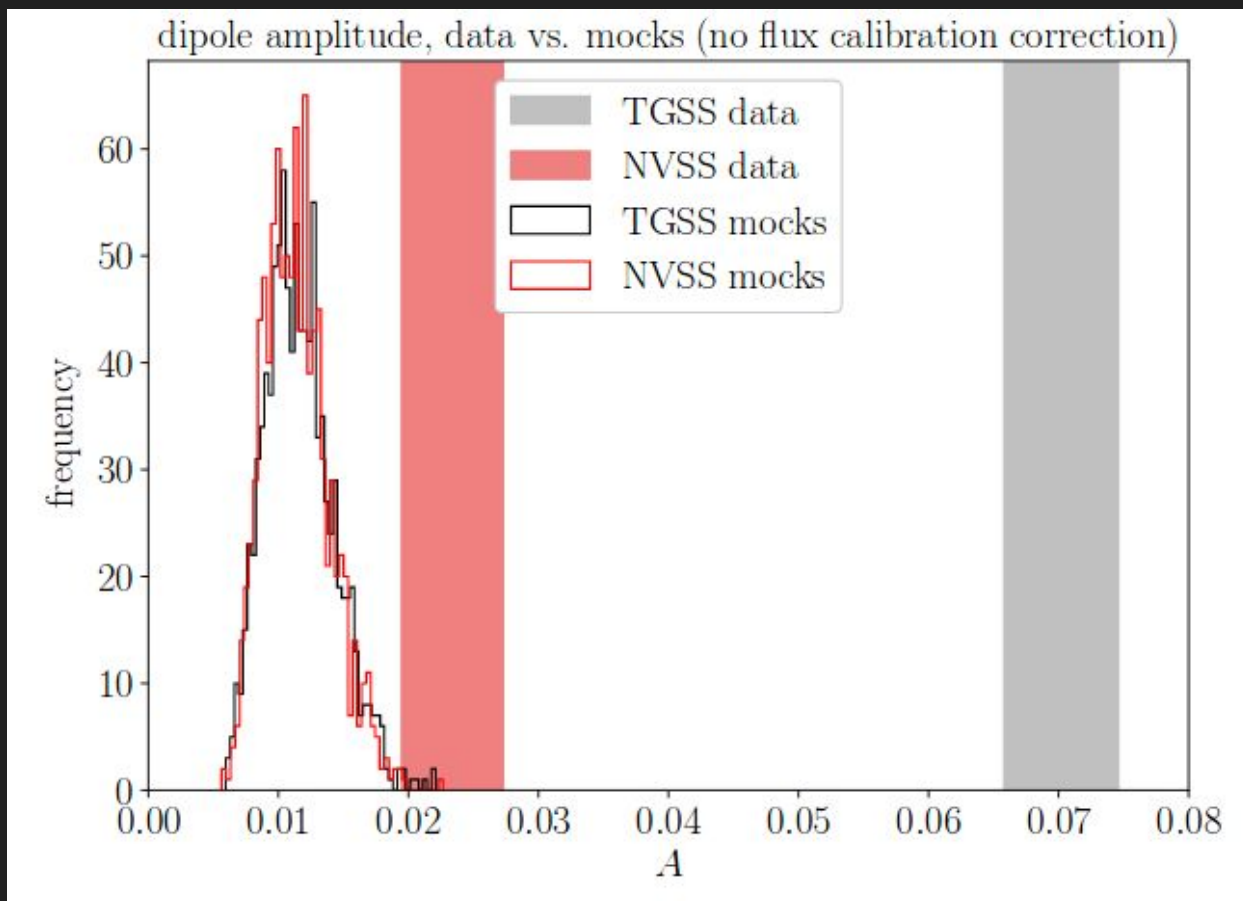
Direção consistente com a da RCF, amplitude está muito maior!

Resultados: dados reais

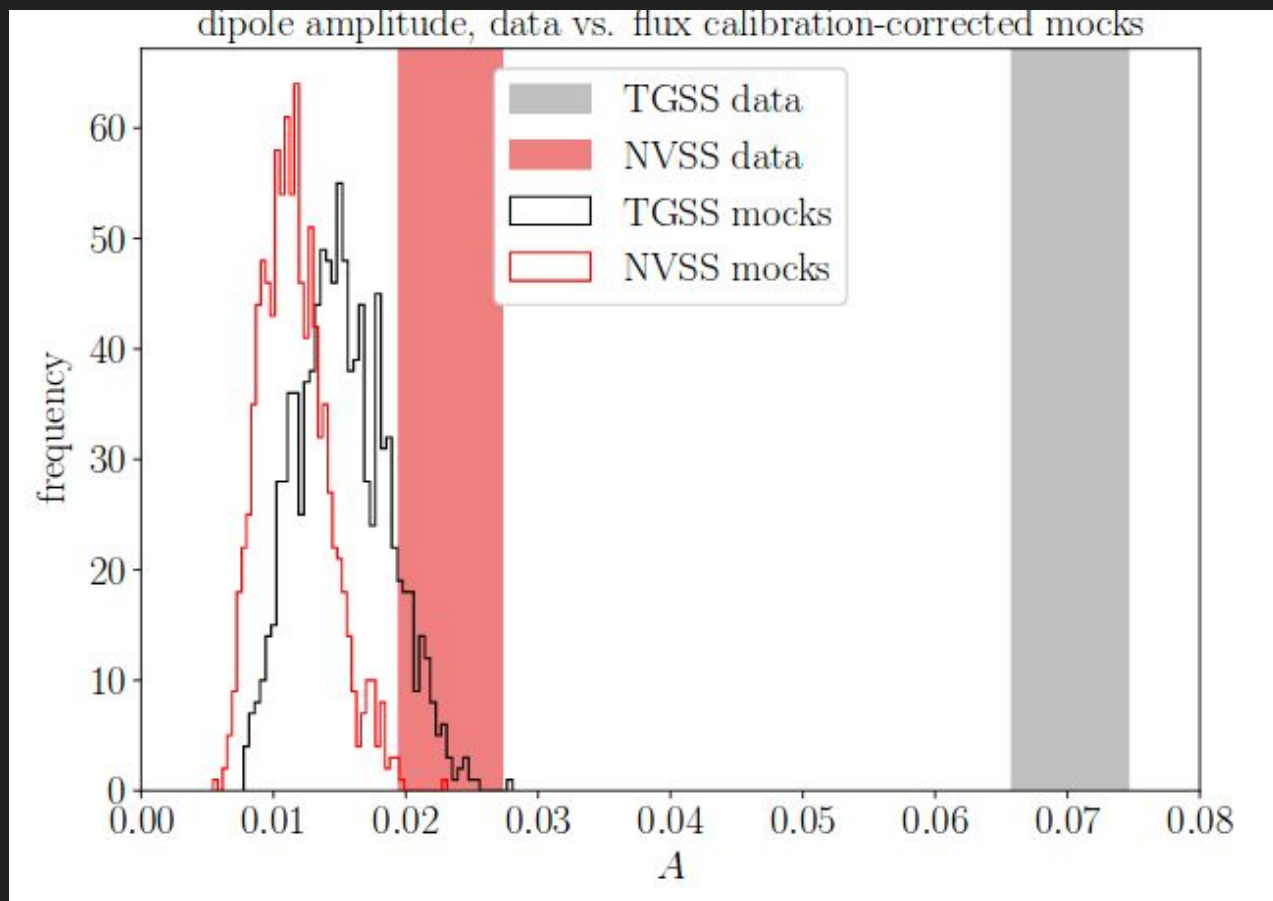
Survey	Flux range (mJy)	A_{obs}	(l, b)	ref.
TGSS	$100 < S < 5000$	0.070 ± 0.004	$(243.00^\circ \pm 12.00^\circ, 45.00^\circ \pm 3.00^\circ)$	This work
NVSS	$20 < S < 1000$	0.023 ± 0.004	$(253.12^\circ \pm 11.00^\circ, 27.28^\circ \pm 3.00^\circ)$	This work
NVSS (other work)	$S > 20$	0.021 ± 0.006	$(244.69^\circ \pm 27.00^\circ, 41.18^\circ \pm 29.00^\circ)$	[9]
	$20 < S < 1000$	0.021 ± 0.005	$(252.22^\circ \pm 10.00^\circ, 42.74^\circ \pm 9.00^\circ)$	[10]
	$S > 15$	0.027 ± 0.005	$(213.99^\circ \pm 20.00^\circ, 15.30^\circ \pm 14.00^\circ)$	[11]
	$S > 25$	0.019 ± 0.005	$(248.47^\circ \pm 19.00^\circ, 45.56^\circ \pm 9.00^\circ)$	[12]
	$S > 20$	0.010 ± 0.005	$(256.49^\circ \pm 9.00^\circ, 36.25^\circ \pm 11.00^\circ)$	[13]
	$S > 20$	0.012 ± 0.005	$(253.00^\circ, 32.00^\circ)$	[17]
	$S > 10$	0.019 ± 0.002	$(253.00^\circ \pm 2.00^\circ, 28.71^\circ \pm 12.00^\circ)$	[16]

amplitude está muito maior!

Resultados: simulações



Resultados: simulações



O que acontece em escalas angulares menores?

Dados e estimador

Dados: Novamente utilizamos o catálogo NVSS em $20 < S < 1000 \text{ mJy}$, a máscara construída em Bengaly et al 2018 - **mais uma região removida a 5 deg de $(l, b) = (207.13, -17.84)$** - e simulações produzidas pelo CAMB e flask com um dipolo fiducial consistente com os obtido no artigo anterior

- **Estimador:**

- traçamos calotas no céu de tamanho angular **$15, 20, 25, 30 \text{ deg}$** e calculamos a **variância da contagem** dentro dela;
- calotas com **$10, 30$ ou 50% de pixels mascarados** são eliminadas
- **ANOVA test** - **variância entre as calotas/variância dentro das calotas**

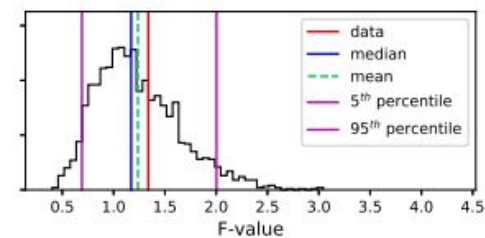
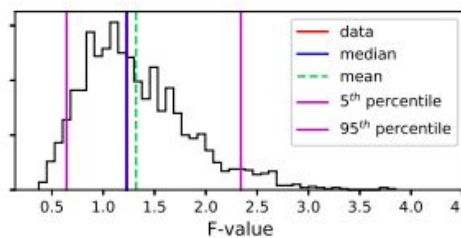
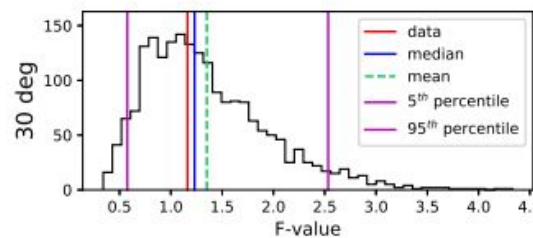
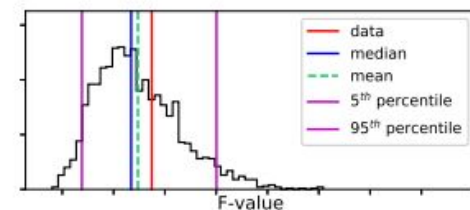
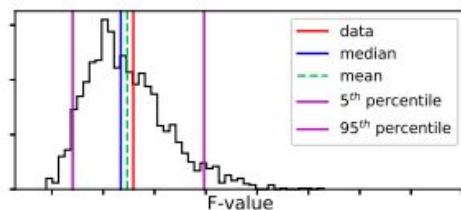
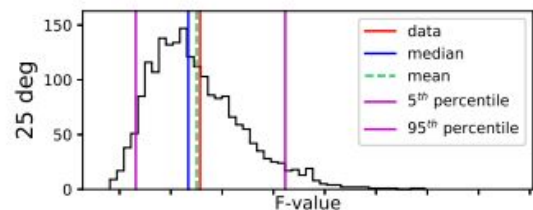
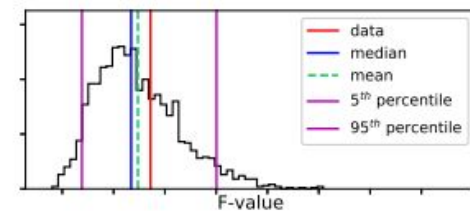
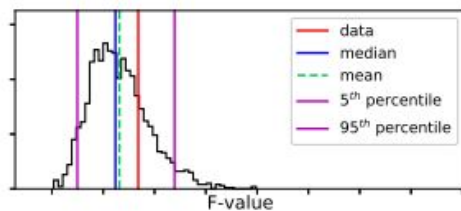
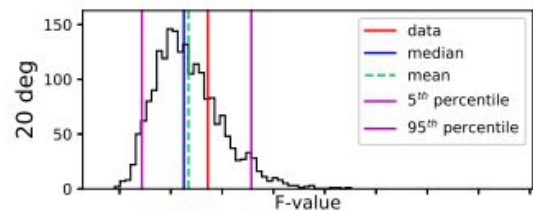
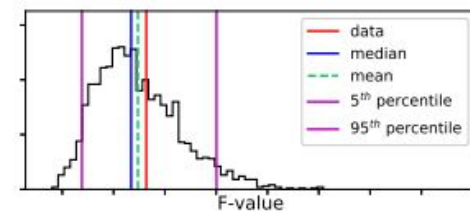
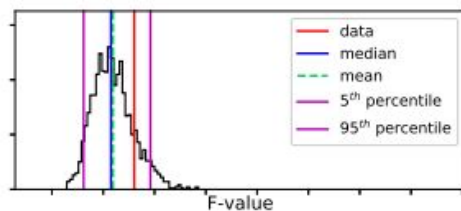
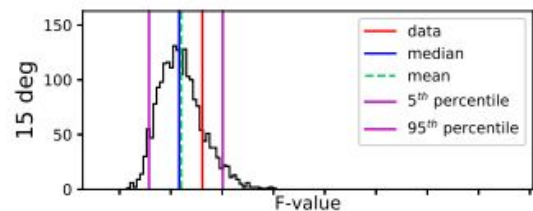
Se o valor-F $\rightarrow 1$: **isotropia estatística dos dados**

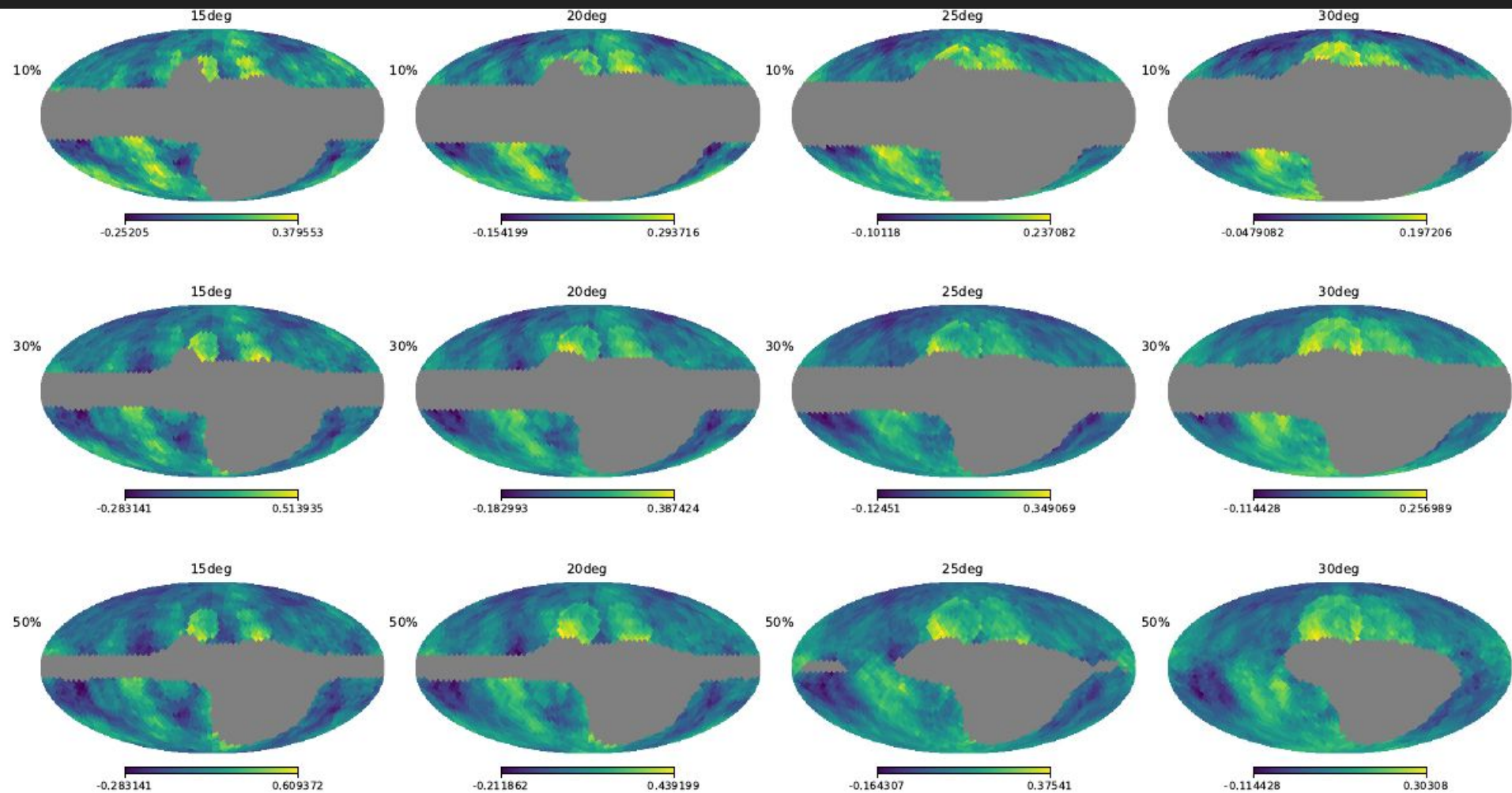
- **estimador de variância local**, comparando **dados vs simulações**
(ver também Alonso et al. 2014; Akrami et al. 2014)

10%

30%

50%



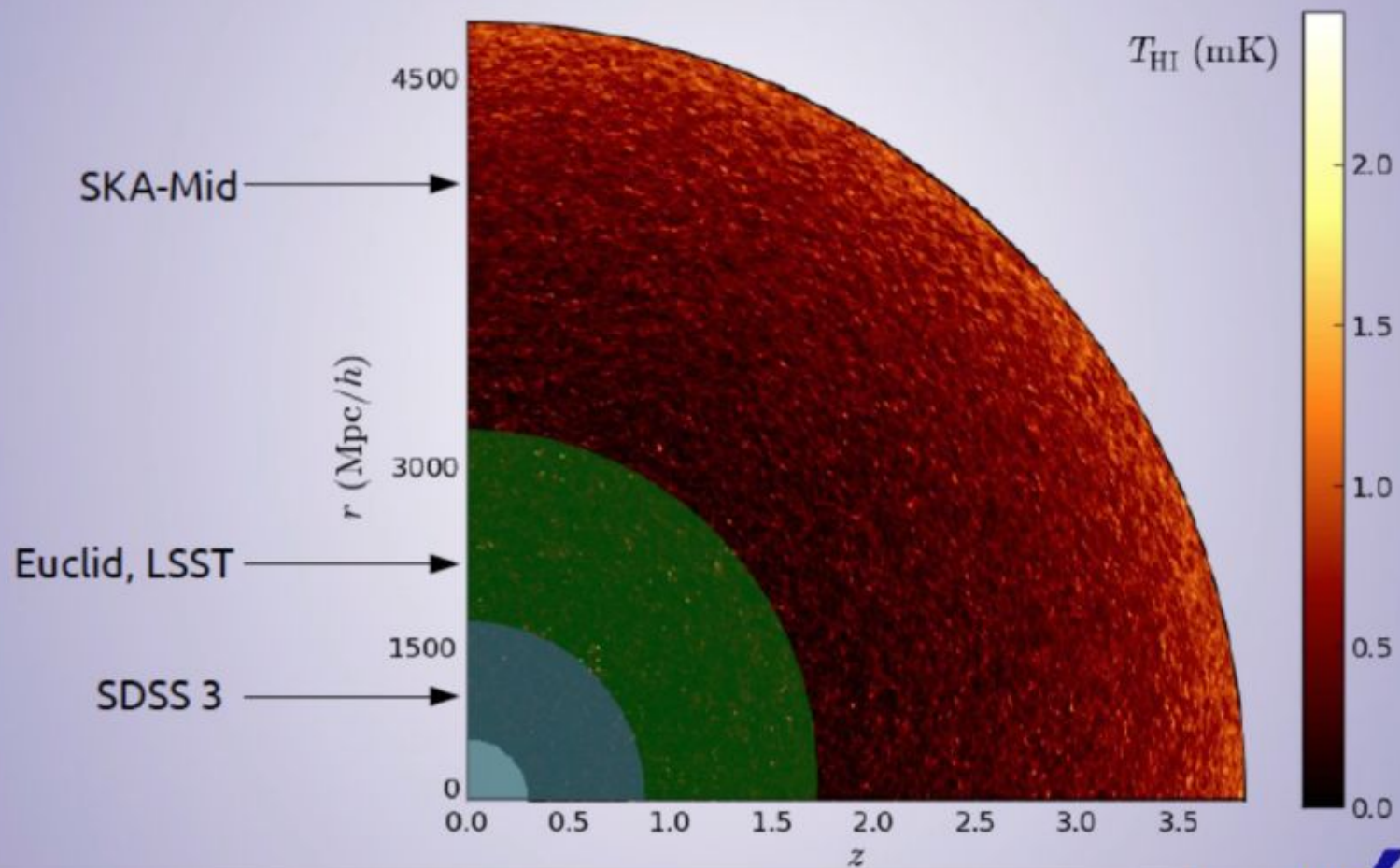


E quanto a dados futuros?





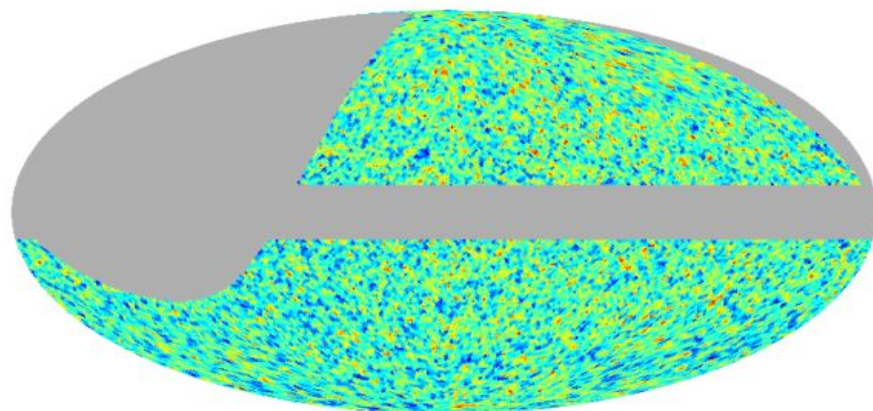
www.skatelescope.org



Perspectivas com o SKA: prescrição

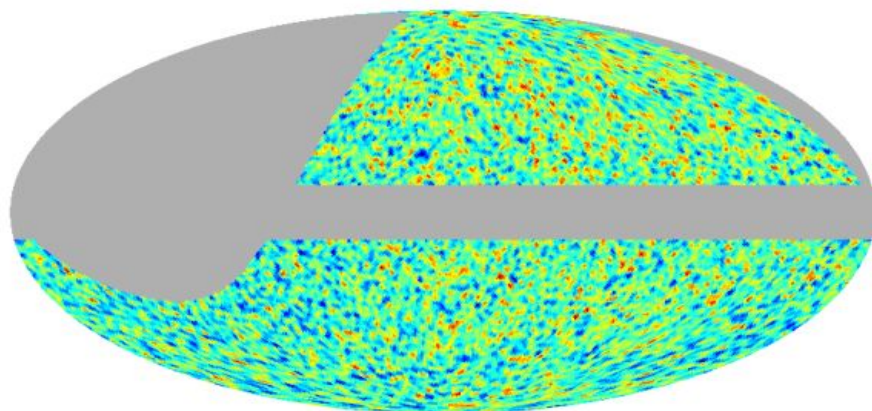
- **SKA1 specs:** ~20000 graus quadrados, $S > 10 \mu\text{Jy}$ e $S > 20 \mu\text{Jy}$;
SKA2 specs: ~25000 graus quadrados, $S > 1 \mu\text{Jy}$ e $S > 5 \mu\text{Jy}$
- **$n(z)$, $s(z)$ e $b(z)$** obtidos usando um código de FL (Alonso+ 2015)
- Power spectrum fiducial consistente com o melhor ajuste do Planck2015 (**CAMB**)
- Simulações obtidas usando o **código flask** (Xavier et al 2016)
- Amostra “**full**” e “ **$z > 0.5$** ” - retiramos objetos em $z < 0.5$ para suprimir influência das estruturas locais

$S > 1\mu\text{Jy}$



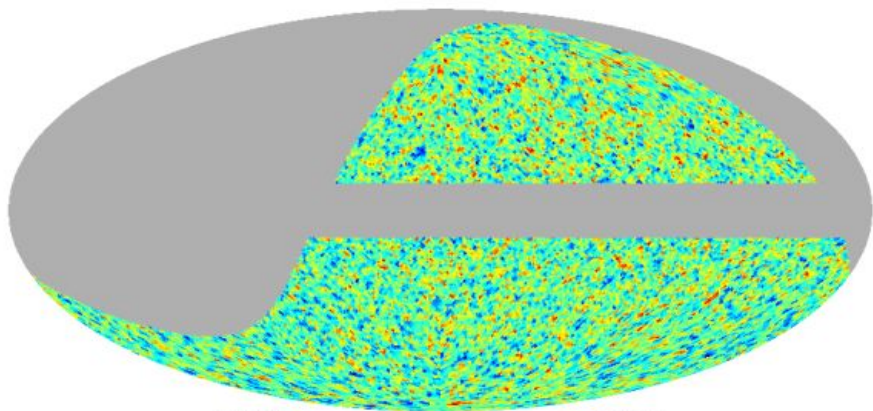
69006  85373

$S > 5\mu\text{Jy}$



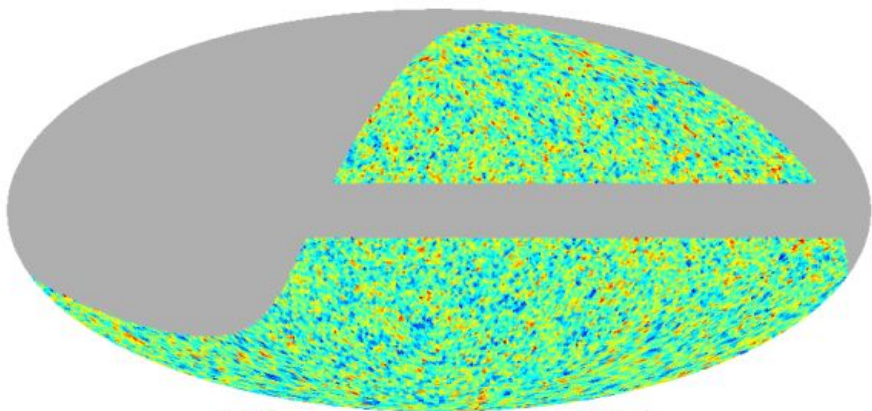
21207  25375

$S > 10\mu\text{Jy}$



11473  14384

$S > 20\mu\text{Jy}$



5836  7823

Perspectivas com o SKA: estimador

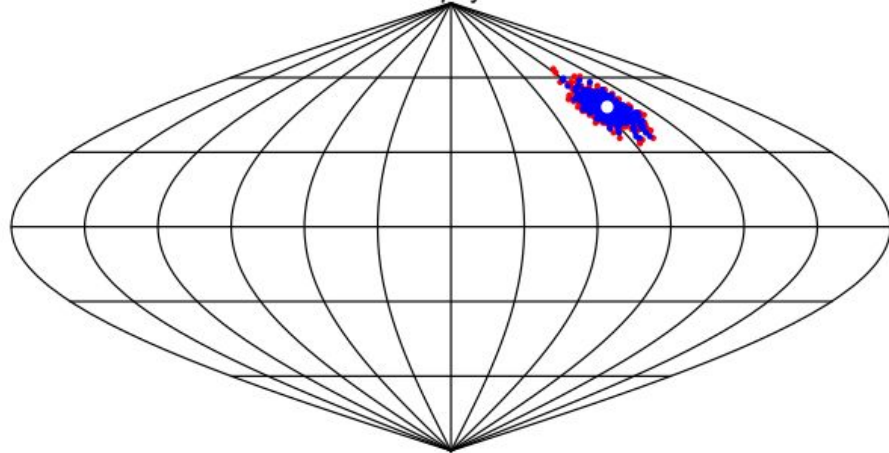
Estimamos o dipolo nos dados usando o seguinte estimador

$$\min \sum_p \frac{[N_p(\mathbf{n}, >S) - \bar{N}(>S) (1 + A \cos \theta_p)]^2}{\bar{N}(>S) (1 + A \cos \theta_p)}$$

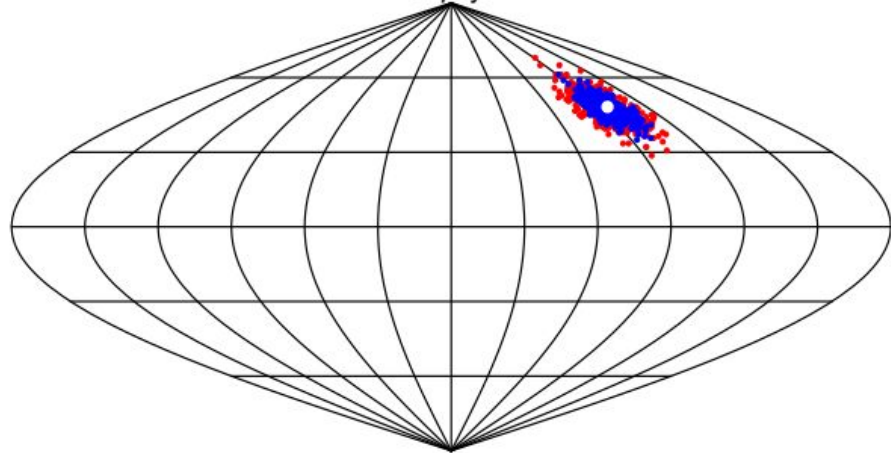
P representa o centro do p-ésimo pixel, para $p=1, \dots, 49152$ -
(Esquema **Nside=64 do Healpix**)

RESULTADOS

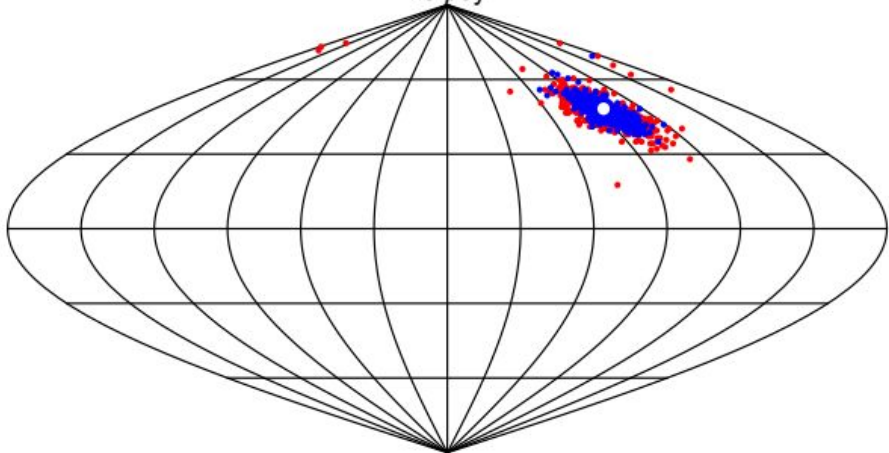
1 μJy



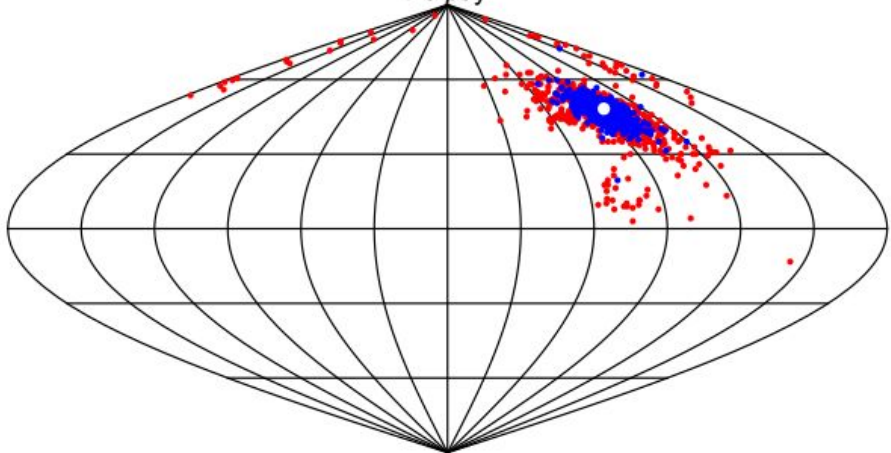
5 μJy



10 μJy



20 μJy

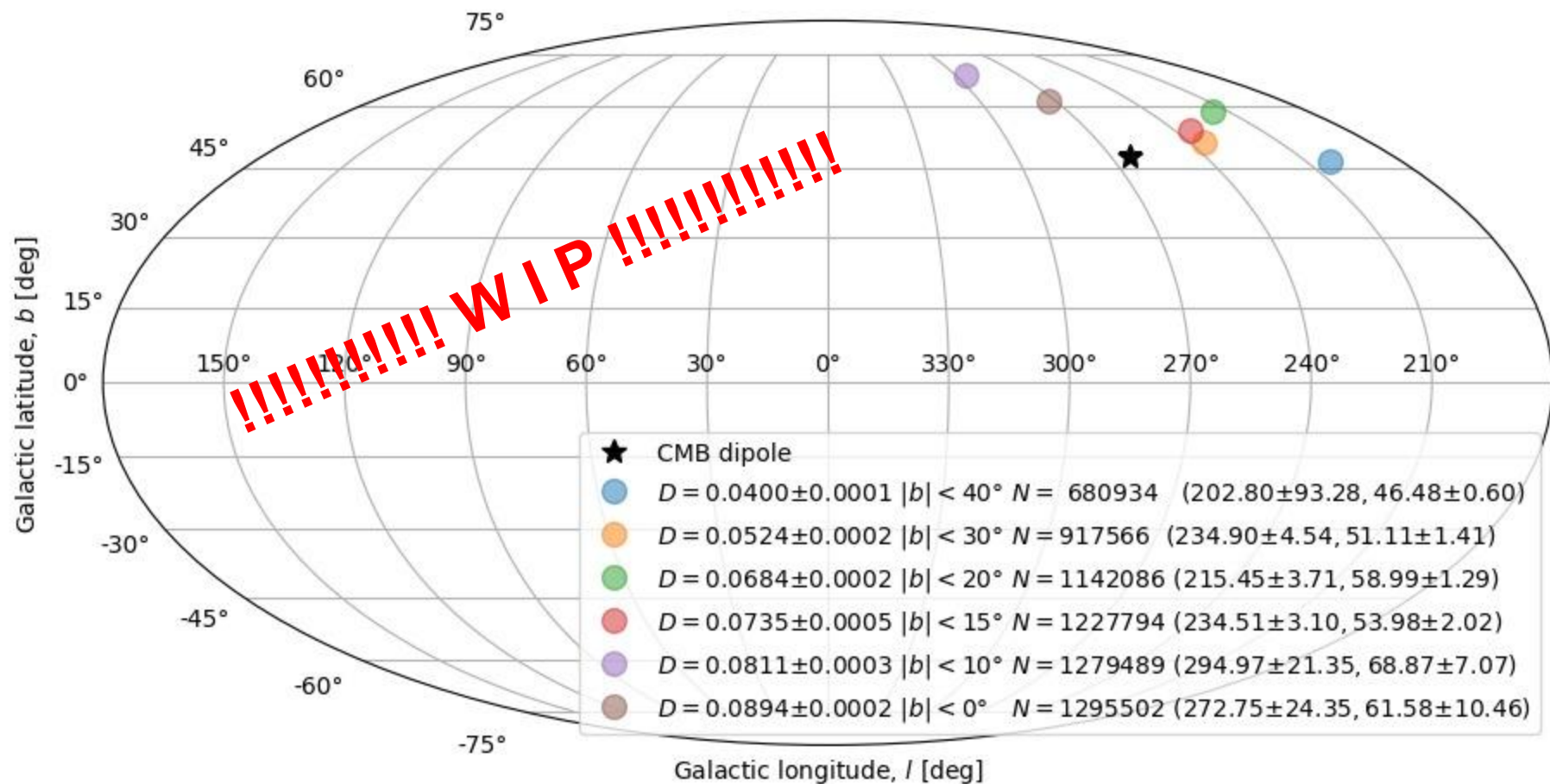


Sample	N_{tot} (10^9)	$S >$ (μJy)	l (deg)	b (deg)	A (10^{-3})
full	2.37	1.0	264.87 ± 6.47	47.42 ± 4.33	4.64 ± 0.33
$z \geq 0.5$	2.07	1.0	264.64 ± 5.57	47.37 ± 3.67	4.64 ± 0.30
full	0.72	5.0	265.15 ± 8.43	47.29 ± 5.58	4.67 ± 0.44
$z \geq 0.5$	0.62	5.0	264.84 ± 5.77	47.43 ± 3.85	4.64 ± 0.30
full	0.33	10.0	264.50 ± 12.71	47.08 ± 6.18	4.66 ± 0.55
$z \geq 0.5$	0.29	10.0	264.56 ± 7.34	47.20 ± 3.97	4.62 ± 0.38
full	0.18	20.0	263.86 ± 25.08	45.50 ± 12.89	4.93 ± 1.03
$z \geq 0.5$	0.15	20.0	265.49 ± 8.65	46.83 ± 4.64	4.65 ± 0.45
fiducial	—		264.02	48.25	4.62

Revisitando o dipolo cinemático com quasares do catálogo Gaia-unWISE (Quaia)
[\[https://arxiv.org/abs/2306.17749\]](https://arxiv.org/abs/2306.17749)

Cerutt & CB, em prep.

Gaia-unWISE Quasar Catalog, $G < 20.5$ $N = 1295502$



Miscelânea

Outros trabalhos testando a isotropia com traçadores da estrutura em grande escala:

- Ribeiro+ em prep. (FRBs)
- Andrade+ MNRAS 490 (2019) 4, 4481; 1905.08864 [astro-ph.CO] (GRBs)
- CB+ MNRAS 475 (2018) 1, L106; 1707.08091 [astro-ph.CO] (galáxias IR)
- CB+ MNRAS 464 (2017) 1, 768; 1606.06751 [astro-ph.CO] (galáxias IR)
- CB+ MNRAS 466 (2017) 3, 2799; 1511.09414 [astro-ph.CO] (aglomerados)

Existe uma escala de homogeneidade cósmica de fato?

Gonçalves, Carvalho, Shao, Lopes-Dias, CB+,

JCAP sub, 2606.07854 [astro-ph.CO]

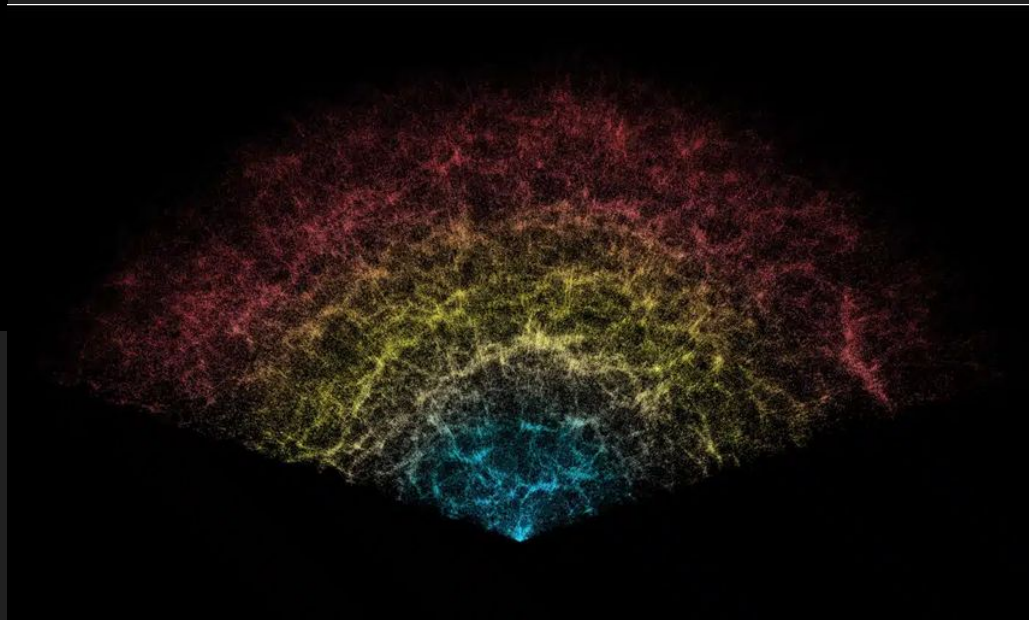
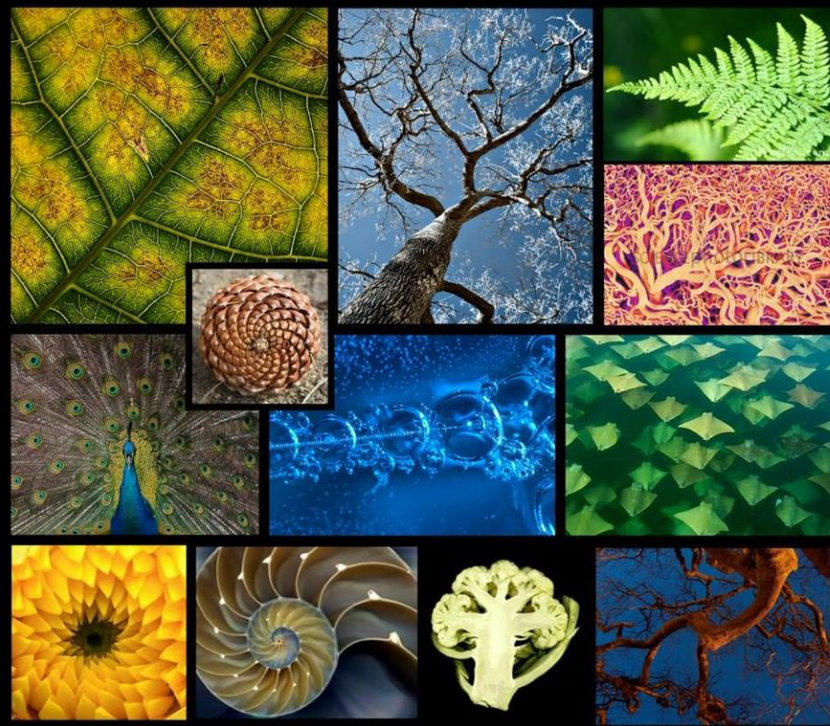
JCAP 10 (2022) 088, 2205.07819 [astro-ph.CO]

JCAP 03 (2021) 029, 2010.06635 [astro-ph.CO]

MNRAS 481 (2018), 4, 5270, 1809.11125 [astro-ph.CO]

MNRAS 475 (2018), 1, L20, 1707.08091 [astro-ph.CO]





Como medir escala de homogeneidade cósmica

É possível ainda realizar alguns testes indiretos da hipótese da homogeneidade estatística, por ex: Contagem de galáxias $N(r)$ em esferas de raio r usando dimensão fractal (Coleman and Pietronero 92):

$$D_2 = \frac{d \ln N(<r)}{dr} \rightarrow 3$$

Como medir escala de homogeneidade cósmica

É possível ainda realizar alguns testes indiretos da hipótese da homogeneidade estatística, por ex: **Contagem de galáxias $N(r)$ em esferas de raio r usando dimensão fractal** (Coleman and Pietronero 92):

$$D_2 = \frac{d \ln N(<r)}{dr} \rightarrow 3$$

quando a distribuição espacial de galáxias for estatisticamente homogênea ($D_2 \rightarrow 3$) ---> **Universo FLRW**

Como medir escala de homogeneidade cósmica

É possível ainda realizar alguns testes indiretos da hipótese da homogeneidade estatística, por ex: **Contagem de galáxias $N(r)$ em esferas de raio r usando dimensão fractal** (Coleman and Pietronero 92):

$$D_2 = \frac{d \ln N(<r)}{dr} \rightarrow 3$$

quando a distribuição espacial de galáxias for estatisticamente homogênea ($D_2 \rightarrow 3$) ---> **Universo FLRW**

Na prática, estabelecemos que **a escala de homogeneidade é atingida quando $D_2 \rightarrow 2.97$** (1% de $D_2=3$).

Escala de homogeneidade com surveys de galáxias

- Verificar se a distribuição espacial de galáxias em um certo intervalo de redshift apresenta uma **escala de homogeneidade**

Escala de homogeneidade com surveys de galáxias

- Verificar se a distribuição espacial de galáxias em um certo intervalo de redshift apresenta uma **escala de homogeneidade**
- Na prática, testamos se a contagem de galáxias dentro de esferas de raios r atinge $D^2 \rightarrow 3$ em algum momento - ou seja, quando essa contagem torna-se **indistinguível de uma distribuição estaticamente homogênea, i.e., randômica**

Escala de homogeneidade com surveys de galáxias

- Verificar se a distribuição espacial de galáxias em um certo intervalo de redshift apresenta uma **escala de homogeneidade**
- Na prática, testamos se a contagem de galáxias dentro de esferas de raios r atinge $D^2 \rightarrow 3$ em algum momento - ou seja, quando essa contagem torna-se **indistinguível de uma distribuição estaticamente homogênea, i.e., randômica**
- Amostras utilizadas: **Galáxias luminosas vermelhas (SDSS-III DR12, SDSS-IV DR16, DESI DR1)**, quasares (SDSS-IV DR14 e DR16)

Escala de homogeneidade com surveys de galáxias

- Verificar se a distribuição espacial de galáxias em um certo intervalo de redshift apresenta uma **escala de homogeneidade**
- Na prática, testamos se a contagem de galáxias dentro de esferas de raios r atinge $D^2 \rightarrow 3$ em algum momento - ou seja, quando essa contagem torna-se **indistinguível de uma distribuição estaticamente homogênea, i.e., randômica**
- Amostras utilizadas: **Galáxias luminosas vermelhas (SDSS-III DR12, SDSS-IV DR16, DESI DR1)**, quasares (SDSS-IV DR14 e DR16)
- Nota: nesse caso, precisamos ainda converter o redshift das fontes em distâncias cosmológicas - ou seja, assumindo um modelo cosmológico. Como evitar isso?

Escala de homogeneidade com surveys de galáxias

- Verificar se a distribuição espacial de galáxias em um certo intervalo de redshift apresenta uma **escala de homogeneidade**
- Na prática, testamos se a contagem de galáxias dentro de esferas de raios r atinge $D^2 \rightarrow 3$ em algum momento - ou seja, quando essa contagem torna-se **indistinguível de uma distribuição estaticamente homogênea, i.e., randômica**
- Amostras utilizadas: **Galáxias luminosas vermelhas (SDSS-III DR12, SDSS-IV DR16, DESI DR1)**, quasares (SDSS-IV DR14 e DR16)
- Nota: nesse caso, precisamos ainda converter o redshift das fontes em distâncias cosmológicas - ou seja, assumindo um modelo cosmológico. Como evitar isso?
Abordagem alternativa: escala de homogeneidade angular! Contagem de objetos em uma casca esférica com um bin de redshift fino ($dz \sim 0.01$).

Como medir escala de homogeneidade cósmica

É possível ainda realizar alguns testes indiretos da hipótese da homogeneidade estatística, por ex: **Contagem de galáxias $N(\theta)$ em esferas de raio r usando dimensão fractal** (Alonso+ 14):

$$\omega(\theta) = \frac{DD(\theta) - 2DR(\theta) + RR(\theta)}{RR(\theta)},$$

$$\mathcal{N}(<\theta) \equiv 1 + \frac{1}{1 - \cos \theta} \int_0^\theta \omega(\theta') \sin \theta' d\theta',$$

$$D_2(\theta) \equiv \frac{d \ln \mathcal{N}}{d \ln \theta} + 2.$$

quando a distribuição angular de galáxias for estatisticamente homogênea ($D_2 \rightarrow 2$) ---> **Universo FLRW**

Na prática, estabelecemos que **a escala de homogeneidade é atingida quando $D_2 \rightarrow 1.98$** (1% de $D_2=2$).

Results

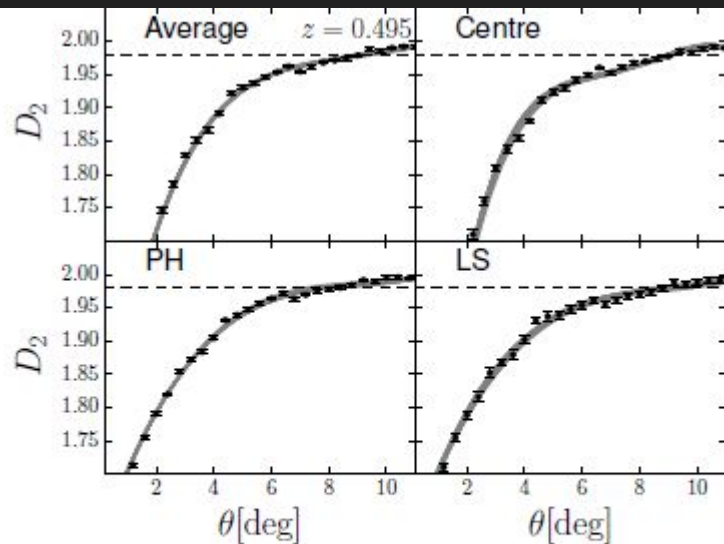


Figure 1. Correlation dimension for the four estimators, in the redshift bin $0.49 < z < 0.50$. The continuous lines represent the polynomial fit performed for each catalogue.

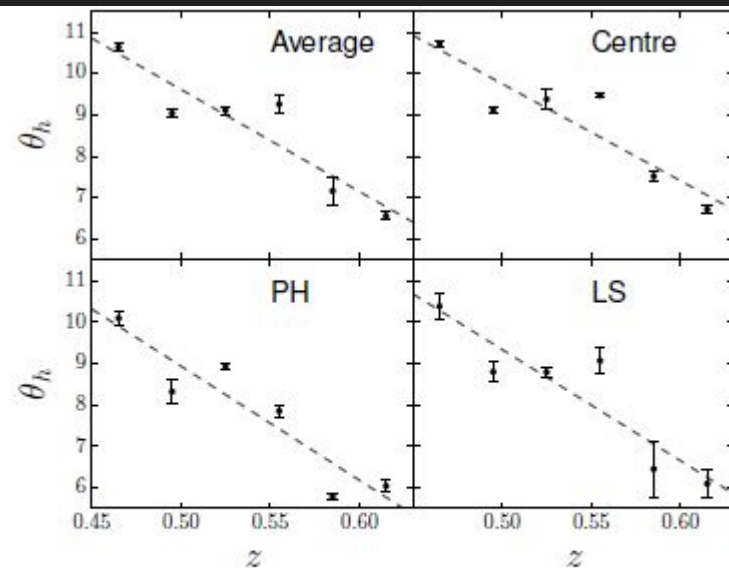
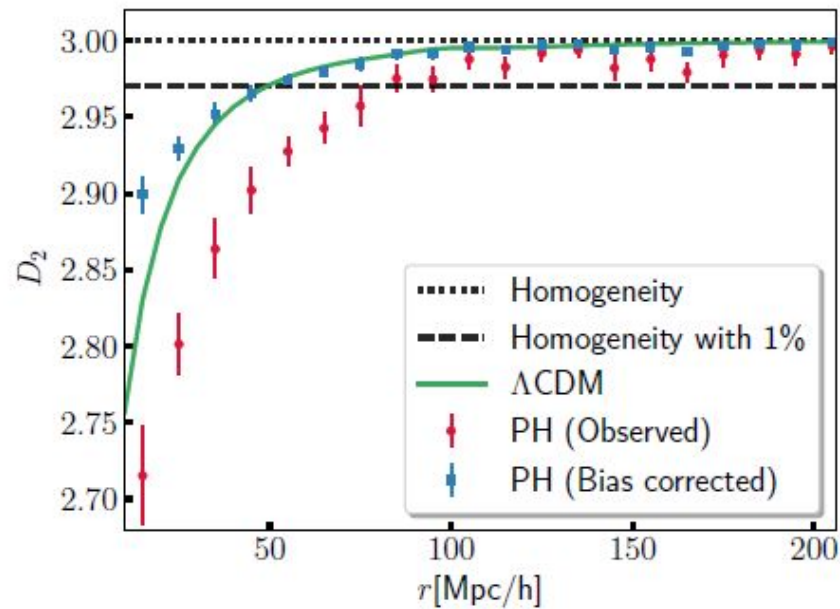
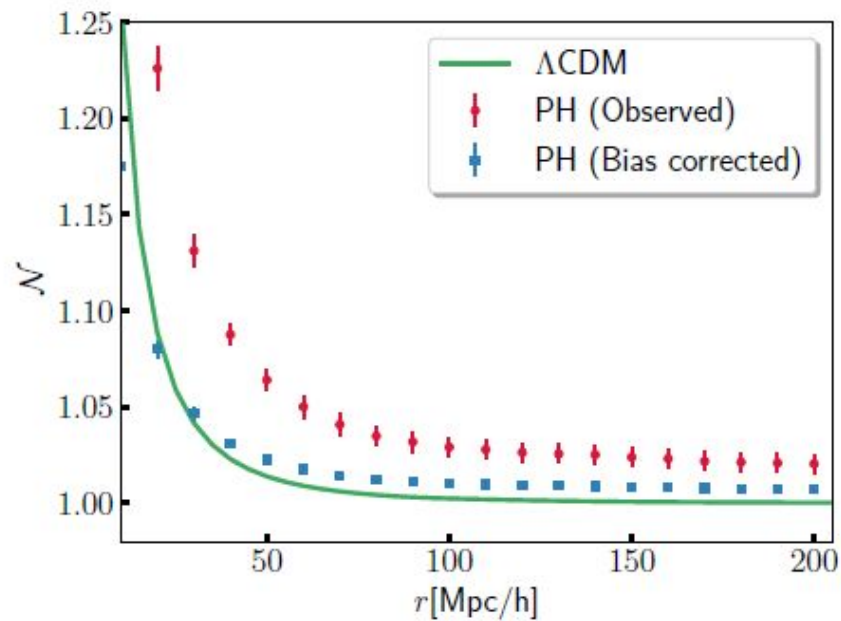


Figure 2. Redshift evolution of the angular homogeneity scale for the four estimators. Data points are measurements in the redshift bins of Table 2. The dashed line is a linear fit to the data points.

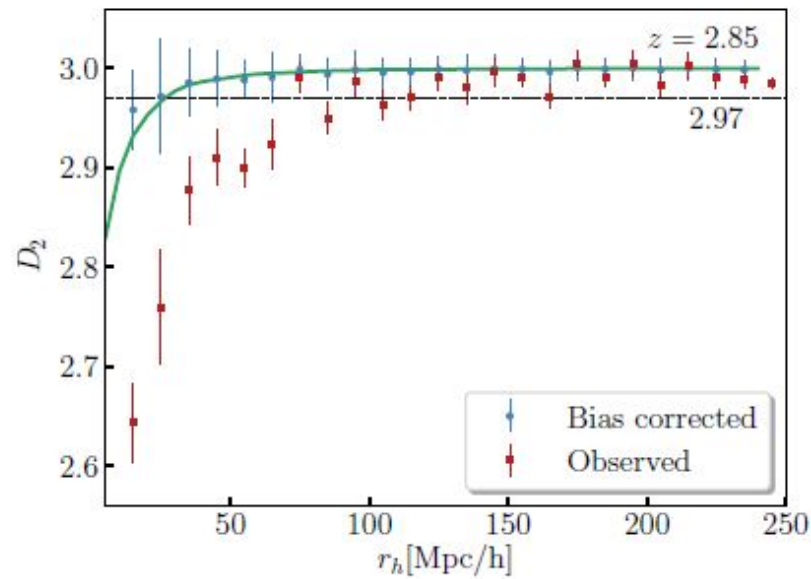
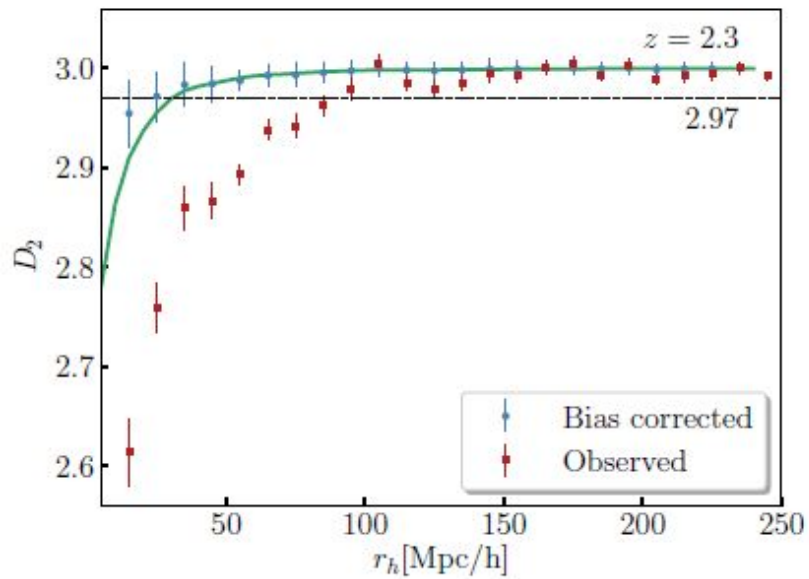
Gonçalves+ MNRAS18a

Dados: SDSS-III DR12 LRG ($0.46 < z < 0.62$)



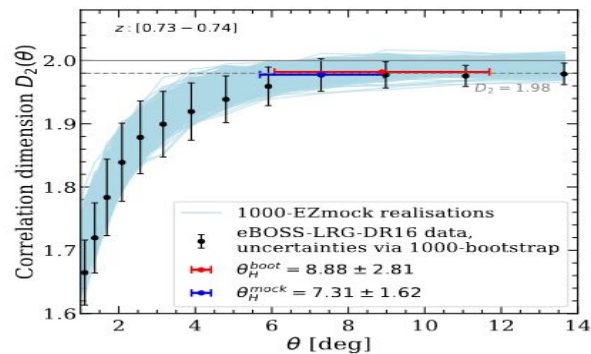
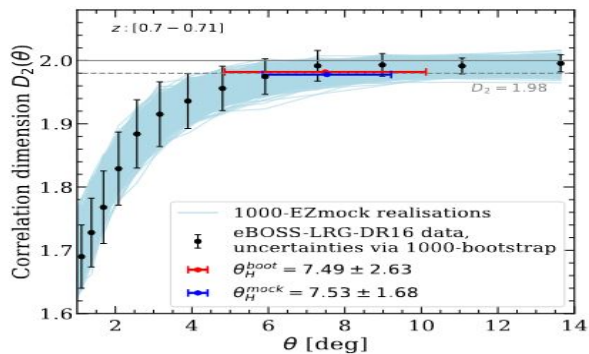
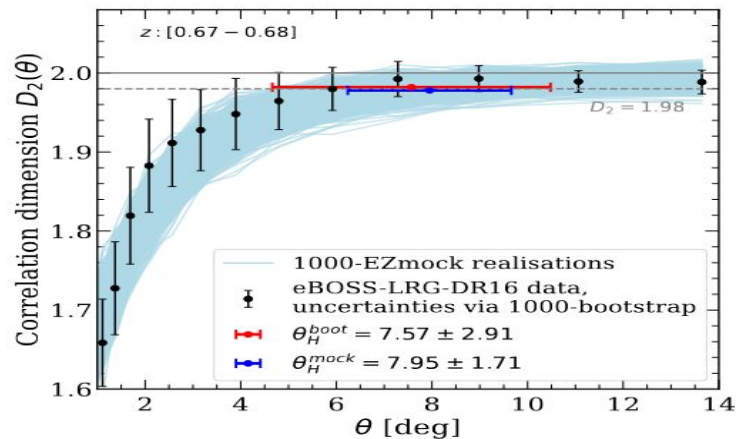
Gonçalves+ MNRAS18b

Dados: SDSS-IV DR14 QSO ($0.80 < z < 2.25$)



Gonçalves+ JCAP21

Dados: SDSS-IV DR16 QSO ($2.2 < z < 3.2$)



Andrade+ JCAP22

Dados: SDSS-IV DR16 LRG ($0.65 < z < 0.75$)

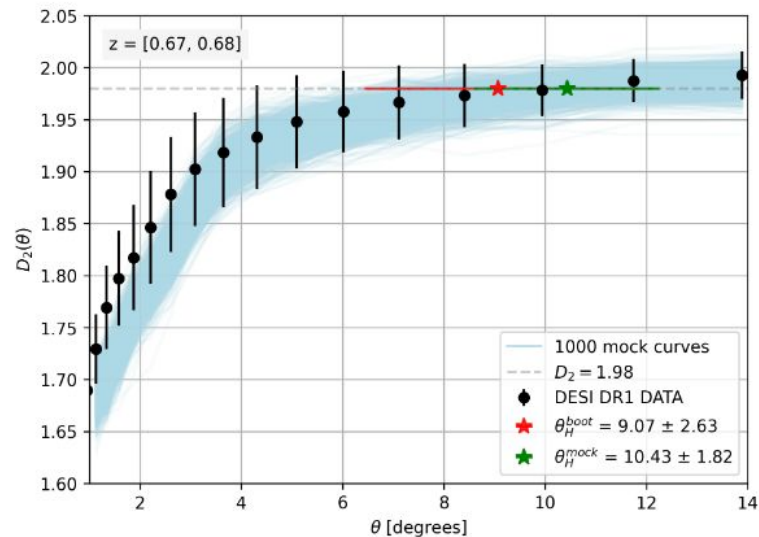
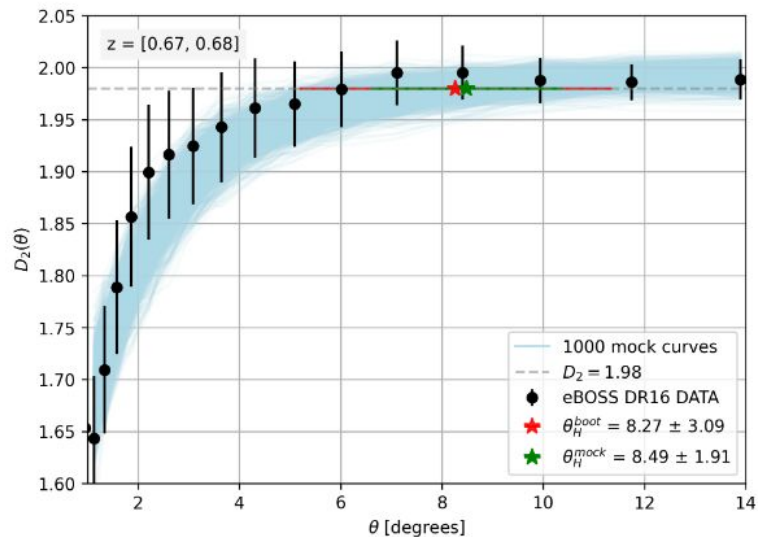
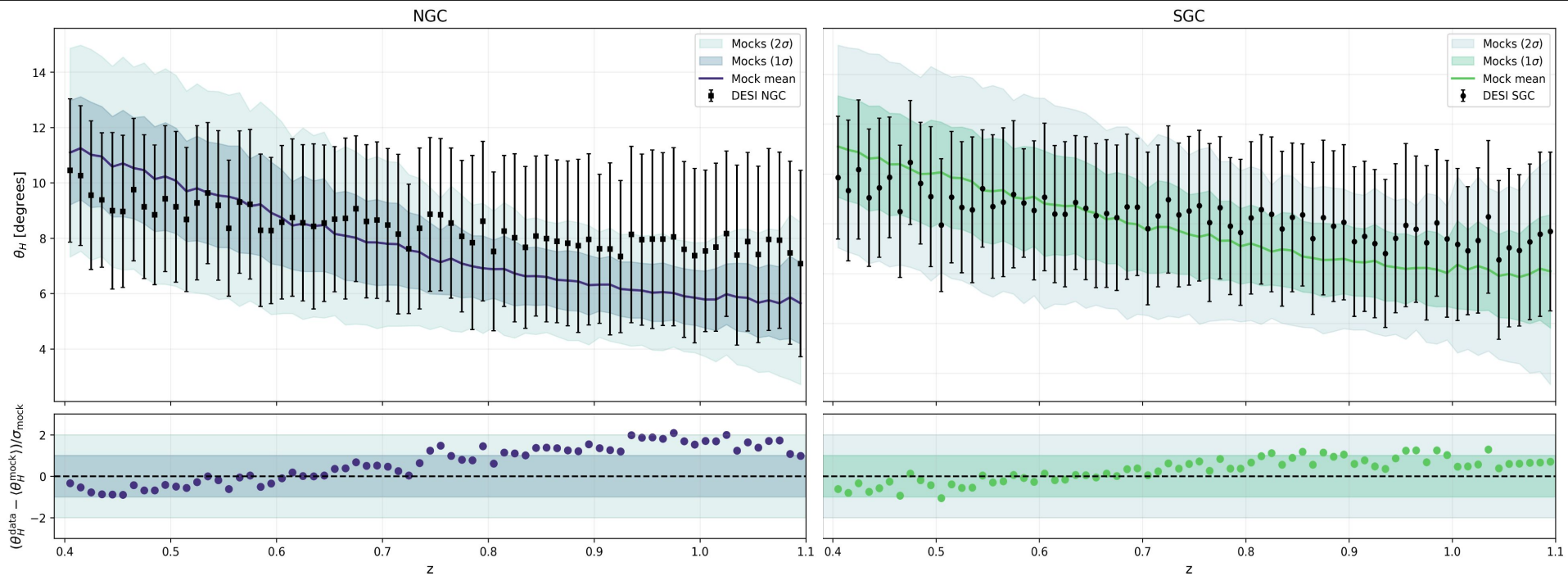


FIG. 6. Measurements of the correlation dimension, $D_2(\theta)$, in the same redshift range $0.67 < z < 0.68$. The left panel shows measurements using the eBOSS DR16 catalog, while the right panel shows measurements using the DESI DR1 catalog, both shows the North Galactic Cap (NGC).

Lopes-Dias+ arXiv:2606.07854

Dados: DESI DR1 LRGs vs. SDSS-IV DR16 LRGs



Lopes-Dias+ arXiv:2606.07854

Dados: DESI DR1 LRGs

Testes de consistência do MCP

Lopes-Dias, Cunha, CB+, [Eur.Phys.J.C 85 \(2025\) 4, 432](#); 2411.19252 [astro-ph.CO]
CB, [Phys.Dark Univ. 35 \(2022\) 100966](#); 2111.06869 [gr-qc]

Testes de consistência do MCP

Podemos realizar alguns testes de consistência do MCP, por exemplo:

- Teste de consistência da métrica FLRW I (Clarkson, Lu, Bassett 08)

$$\Omega_k(z) = \frac{[H(z)D'(z)]^2 - 1}{[H_0 D(z)]^2}$$

Se $\Omega_k(z)=cte$ ou $d\Omega_k(z)/dz=0$ ---> Universo FLRW

Testes de consistência do MCP

Podemos realizar alguns testes de consistência do MCP, por exemplo:

- **Teste de consistência da métrica FLRW I** (Clarkson, Lu, Bassett 08)

$$\Omega_k(z) = \frac{[H(z)D'(z)]^2 - 1}{[H_0 D(z)]^2}$$

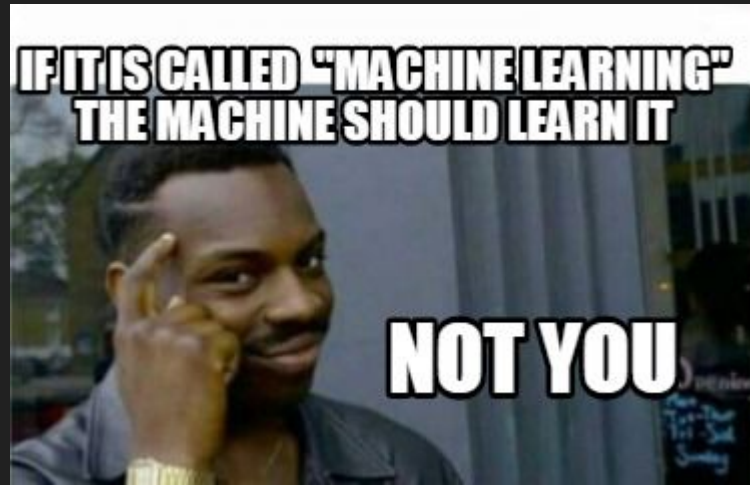
Se $\Omega_k(z)=\text{cte}$ ou $d\Omega_k(z)/dz=0$ ---> **Universo FLRW**

- **Teste de consistência da métrica FLRW II** (Maartens 11)

$$\zeta(z) = 1 - \frac{L_{\parallel}}{L_{\perp}} = 1 - \frac{(1+z)D_A(z)}{D_C(z)} \quad \begin{aligned} L_{\parallel} &\equiv r_s / D_p(z) \\ L_{\perp} &\equiv r_s / [(1+z)D_A(z)] \end{aligned}$$

Se $\zeta(z)=0$ ---> **Universo FLRW**

Um femto-curso de aprendizado de máquina de regressão - conteúdo exclusivo!



Um pequeno parêntesis sobre processos gaussianos...

Reconstruções não-paramétricas

- Reconstruímos as quantidades de interesse - $H(z)$, $DL(z)$, $DA(z)$ etc. utilizando um método chamado **Processos Gaussianos**, um **interpolador de dados** que prevê um valor com base na **relação aprendida entre as variáveis dos dados** e.g. $(x, f(x))$ e $(z, DL(z))$
- A noção de distância entre dois pontos é definida num Processo Gaussiano pelo que chamamos de **kernel**, uma função de dois pontos no espaço, geralmente não linear, que pode ser interpretada como a distância entre os seus pontos de entrada. Um kernel bastante popular é o exponencial quadrático

$$k(x, x') = \sigma^2 \exp \left(-\frac{(x - x')^2}{2l^2} \right)$$

Reconstruções não-paramétricas

- Reconstruímos as quantidades de interesse - $H(z)$, $DL(z)$, $DA(z)$ etc. utilizando um método chamado **Processos Gaussianos**, um **interpolador de dados** que prevê um valor com base na **relação aprendida entre as variáveis dos dados** e.g. $(x, f(x))$ e $(z, DL(z))$
- A noção de distância entre dois pontos é definida num Processo Gaussiano pelo que chamamos de **kernel**, uma função de dois pontos no espaço, geralmente não linear, que pode ser interpretada como a distância entre os seus pontos de entrada. Um kernel bastante popular é o exponencial quadrático

$$k(x, x') = \sigma^2 \exp \left(-\frac{(x - x')^2}{2l^2} \right)$$

- **Fonte:** <https://lamfo-unb.github.io/2018/03/24/gaussian-process/>

Reconstruções não-paramétricas

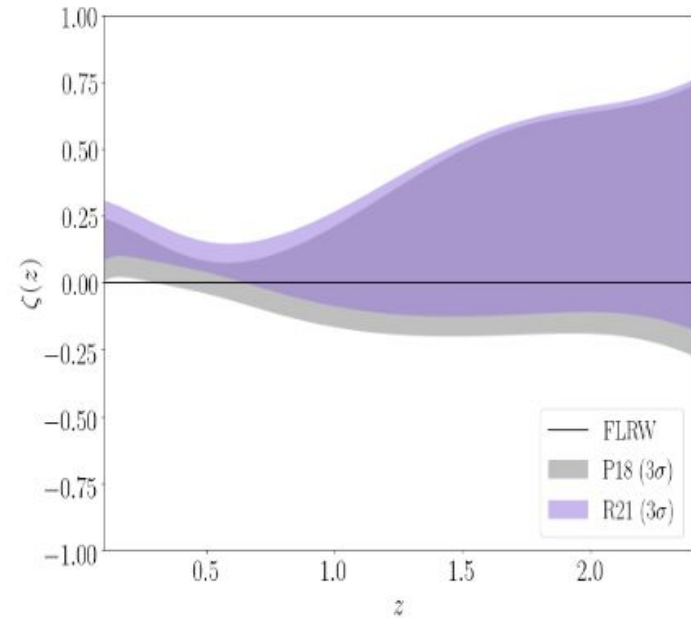
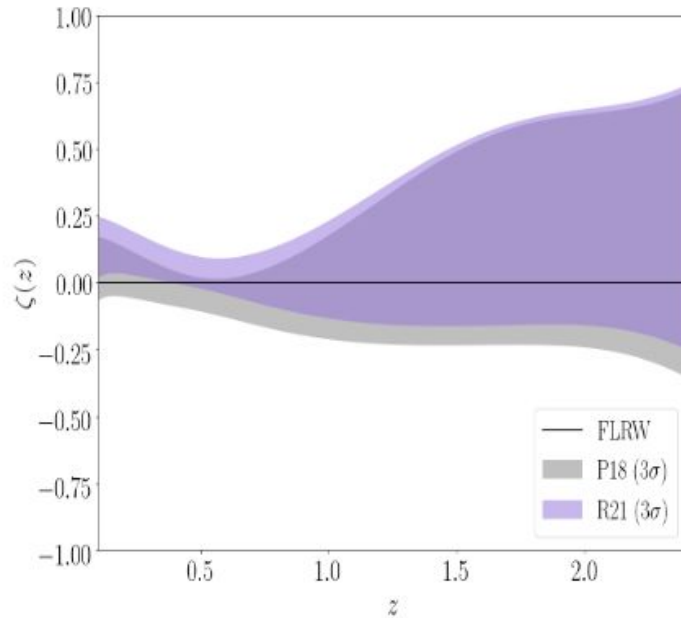
- Reconstruímos as quantidades de interesse - $H(z)$, $DL(z)$, $DA(z)$ etc. utilizando um método chamado **Processos Gaussianos**, um **interpolador de dados** que prevê um valor com base na **relação aprendida entre as variáveis dos dados** e.g. $(x, f(x))$ e $(z, DL(z))$
- A noção de distância entre dois pontos é definida num Processo Gaussiano pelo que chamamos de **kernel**, uma função de dois pontos no espaço, geralmente não linear, que pode ser interpretada como a **distância entre os seus pontos de entrada**. Um **kernel** bastante popular é o **exponencial quadrático**

$$k(x, x') = \sigma^2 \exp \left(-\frac{(x - x')^2}{2l^2} \right)$$

- **GaPP (Gaussian Processes in Python)** (Seikel+ 12; <https://github.com/astrobengaly/GaPP>)

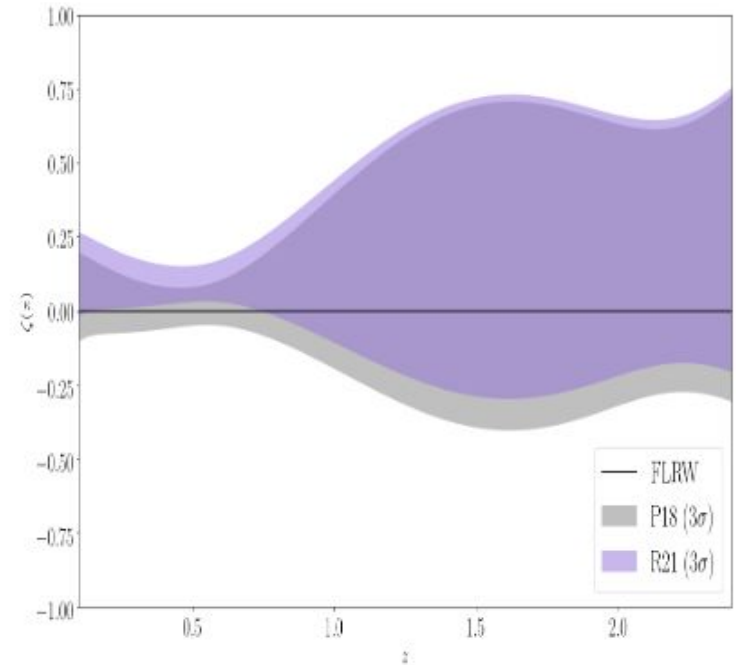
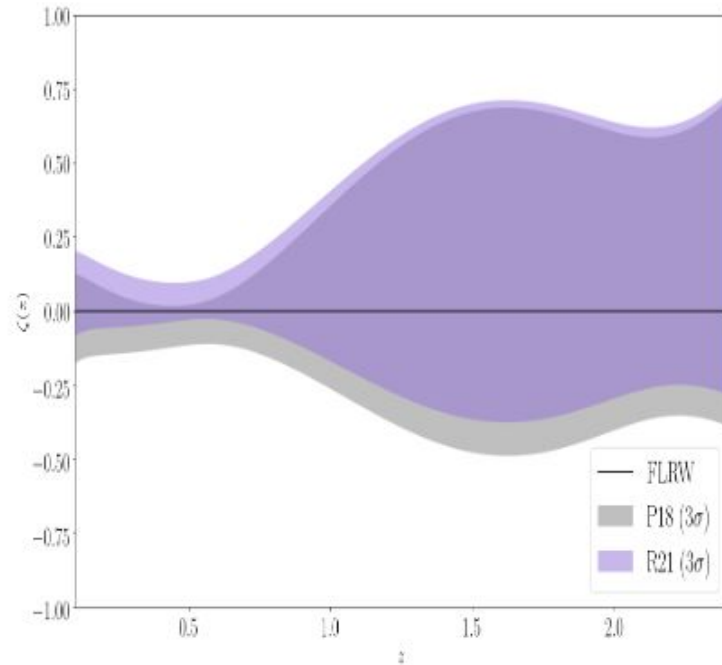
$$\zeta(z) = 1 - \frac{L_{\parallel}}{L_{\perp}} = 1 - \frac{(1+z)D_A(z)}{D_C(z)}$$

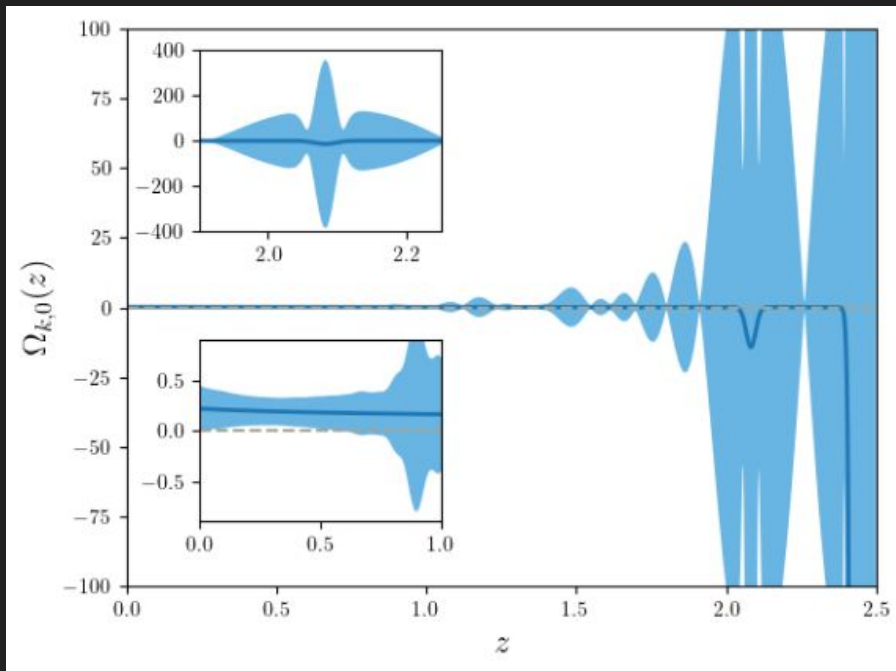
$\zeta(z) \neq 0$ implies FLRW ruled out.



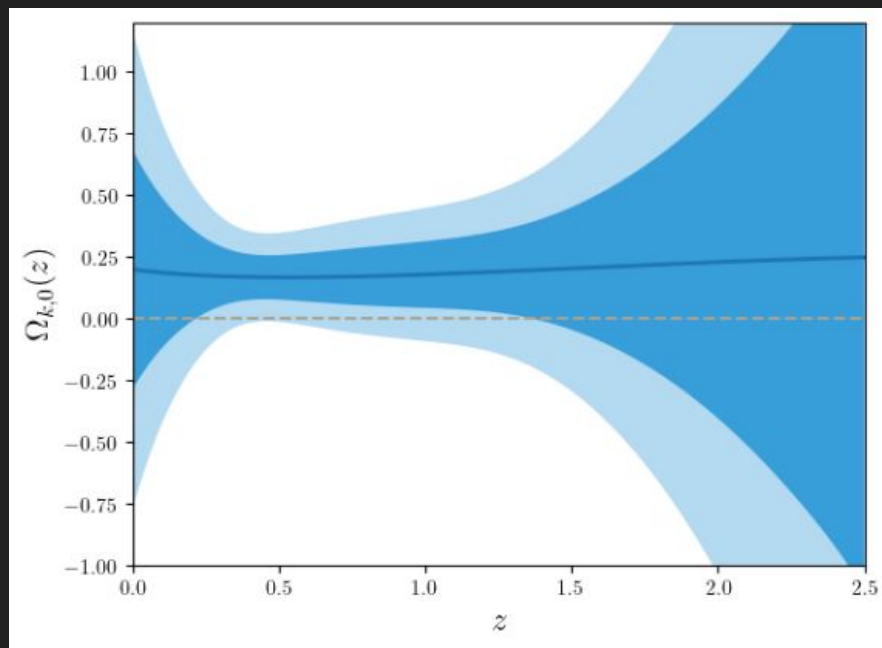
$$\zeta(z) = 1 - \frac{L_{\parallel}}{L_{\perp}} = 1 - \frac{(1+z)D_A(z)}{D_C(z)}$$

$\zeta(z) \neq 0$ implies FLRW ruled out.





$$\Omega_K = \frac{[H(z)D'(z)]^2 - 1}{[H_0 D(z)]}$$



BONUS TRACK: Symbolic regression analysis of dynamical dark energy with DESI-DR2 and SN data

Agripino Sousa-Neto, CB, Javier E. Gonzalez, Jailson S. Alcaniz

e-Print: 2502.10506 [[astro-ph.CO](#)]

Phys.Dark Univ. 50 (2025) 102108

Motivation

- As commented before, DESI collaboration has found a **departure from Λ CDM** using the recently released BAO measurements by DESI, along with CMB and SN data.

Motivation

- As commented before, DESI collaboration has found a **departure from Λ CDM** using the recently released BAO measurements by DESI, along with CMB and SN data.
- Still, **these results are model-dependent**, i.e., they assume the CPL parametrisation $w(a) = w_0 + w_a(1-a)$ for the dark energy eos to probe for deviations from $w(a) = \text{const} = -1$. Similar results are found with other parametrisations.

Motivation

- As commented before, DESI collaboration has found a **departure from Λ CDM** using the recently released BAO measurements by DESI, along with CMB and SN data.
- Still, **these results are model-dependent**, i.e., they assume the CPL parametrisation $w(a) = w_0 + w_a(1-a)$ for the dark energy eos to probe for deviations from $w(a) = \text{const} = -1$. Similar results are found with other parametrisations.
- What happens if we **directly compute $w(a)$ by reconstructing the cosmic expansion rate $H(z)$ from DESI data**, without assuming an explicit functional form for it? Does this result still hold?

Method

- We can write $w(z)$ in terms of $H(z)$ and its derivative $H'(z)$ through

$$w(z) = -\frac{1}{3} \frac{2(1+z)HH' - 3H^2}{H_0^2(1+z)^3\Omega_m - H^2}$$

Method

- We can write $w(z)$ in terms of $H(z)$ and its derivative $H'(z)$ through

$$w(z) = -\frac{1}{3} \frac{2(1+z)HH' - 3H^2}{H_0^2(1+z)^3\Omega_m - H^2}$$

- Conveniently, we can rewrite the above expression as

$$w(z) = -1 - \frac{2(1+z)\tilde{D}'_H(z) + 3\gamma(1+z)^3 \tilde{D}_H^3(z)}{3[\tilde{D}_H(z) - \gamma(1+z)^3 \tilde{D}_H^3(z)]}$$

$$\gamma = \frac{\Omega_m H_0^2 r_d^2}{c^2}$$

$$w(z) = -1 - \frac{2(1+z)\tilde{D}''_M(z) + 3\gamma(1+z)^3 \tilde{D}_M^3(z)}{3[\tilde{D}'_M(z) - \gamma(1+z)^3 \tilde{D}_M^3(z)]}$$

Method

- We can write $w(z)$ in terms of $H(z)$ and its derivative $H'(z)$ through

$$w(z) = -\frac{1}{3} \frac{2(1+z)HH' - 3H^2}{H_0^2(1+z)^3\Omega_m - H^2}$$

- Conveniently, we can rewrite the above expression as

$$w(z) = -1 - \frac{2(1+z)\tilde{D}'_H(z) + 3\gamma(1+z)^3\tilde{D}_H^3(z)}{3[\tilde{D}_H(z) - \gamma(1+z)^3\tilde{D}_H^3(z)]}$$

$$\gamma = \frac{\Omega_m H_0^2 r_d^2}{c^2}$$

$$w(z) = -1 - \frac{2(1+z)\tilde{D}_M''(z) + 3\gamma(1+z)^3\tilde{D}_M'^3(z)}{3[\tilde{D}_M'(z) - \gamma(1+z)^3\tilde{D}_M'^3(z)]}$$

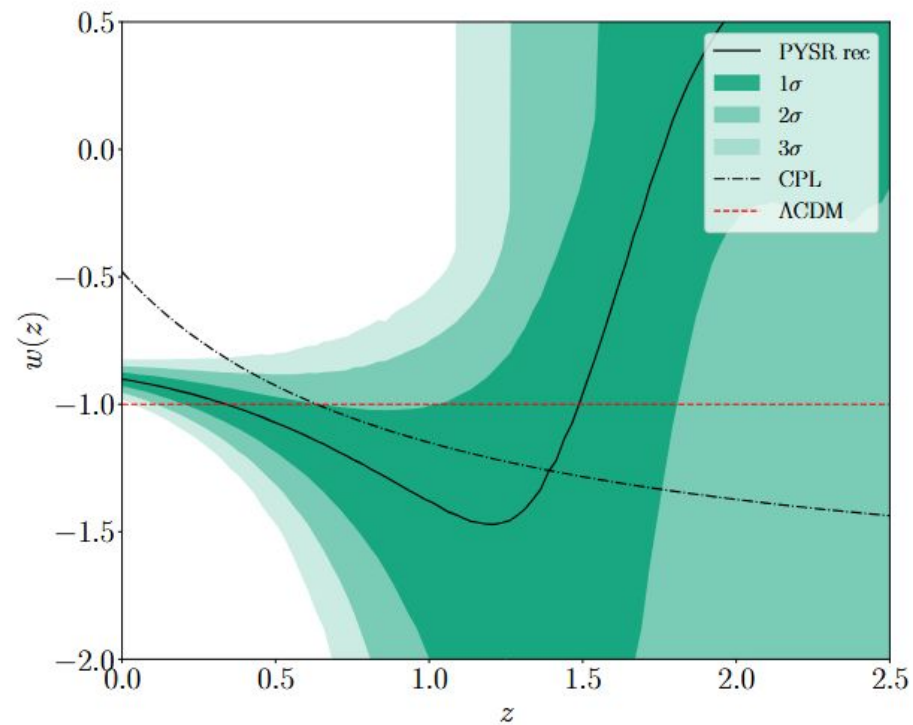
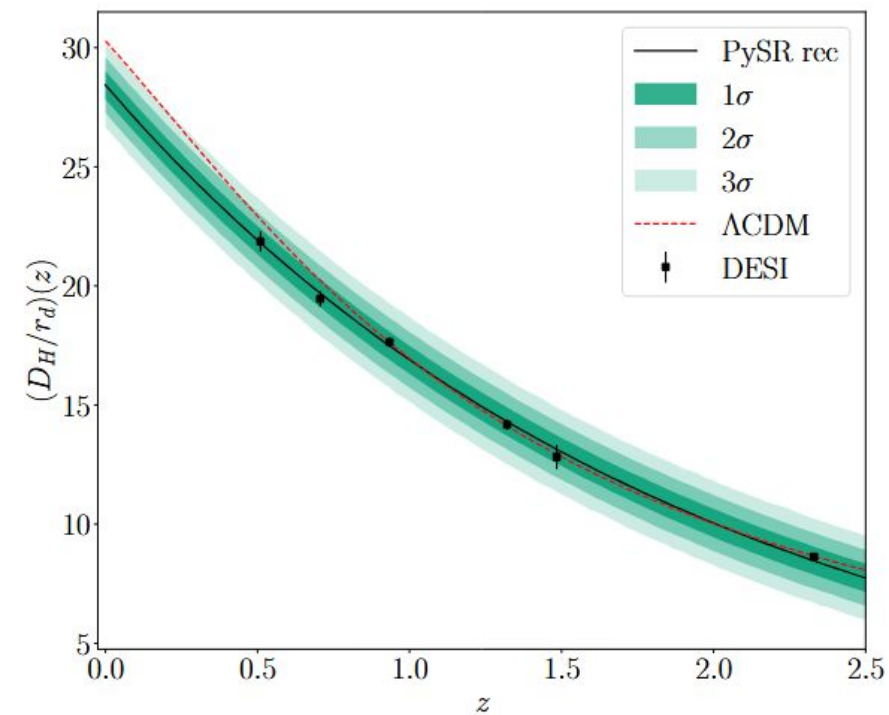
- We employ a method called Python symbolic regression ([PySR](#)), i.e., a supervised learning task in which the model space consists of analytic expressions, to reconstruct **DH/rd from DESI DR2 data alone**, and **DM/rd from DESI DR2 along with Pantheon+ and DESY5 SNe**

Data

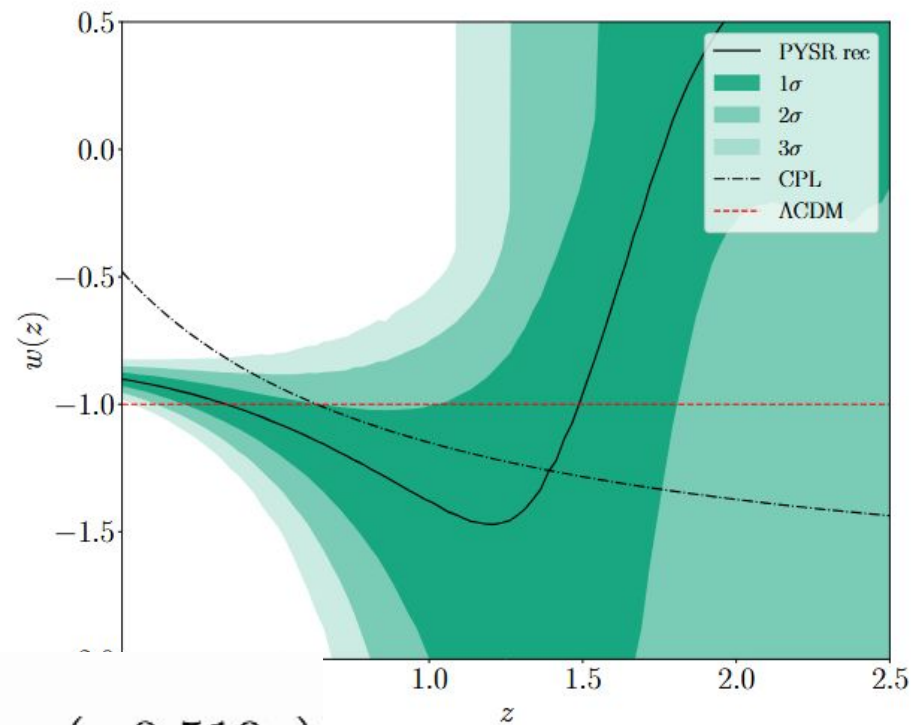
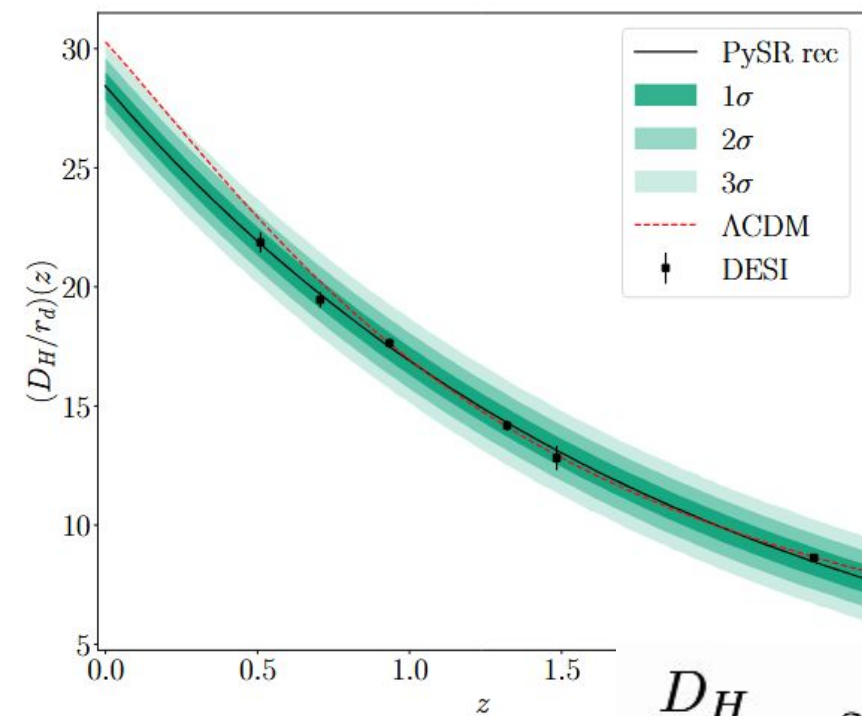
tracer	redshift	z_{eff}	D_H/r_d	D_M/r_d
LRG1	0.4 – 0.6	0.510	21.863 ± 0.425	13.588 ± 0.167
LRG2	0.6 – 0.8	0.706	19.455 ± 0.330	17.351 ± 0.177
LRG3+ELG1	0.8 – 1.1	0.934	17.641 ± 0.193	21.576 ± 0.152
ELG2	1.1 – 1.6	1.321	14.176 ± 0.221	27.601 ± 0.318
QSO	0.8 – 2.1	1.484	12.817 ± 0.516	30.512 ± 0.760
Ly α	1.8 – 4.2	2.330	8.632 ± 0.101	38.988 ± 0.531

Note: in this case, we assumed $rd = (101.0 \pm 2.3) \text{ Mpc/h}$, provided by Verde+2017 (arXiv:1607.05297) and $\Omega_m = 0.30$

Results

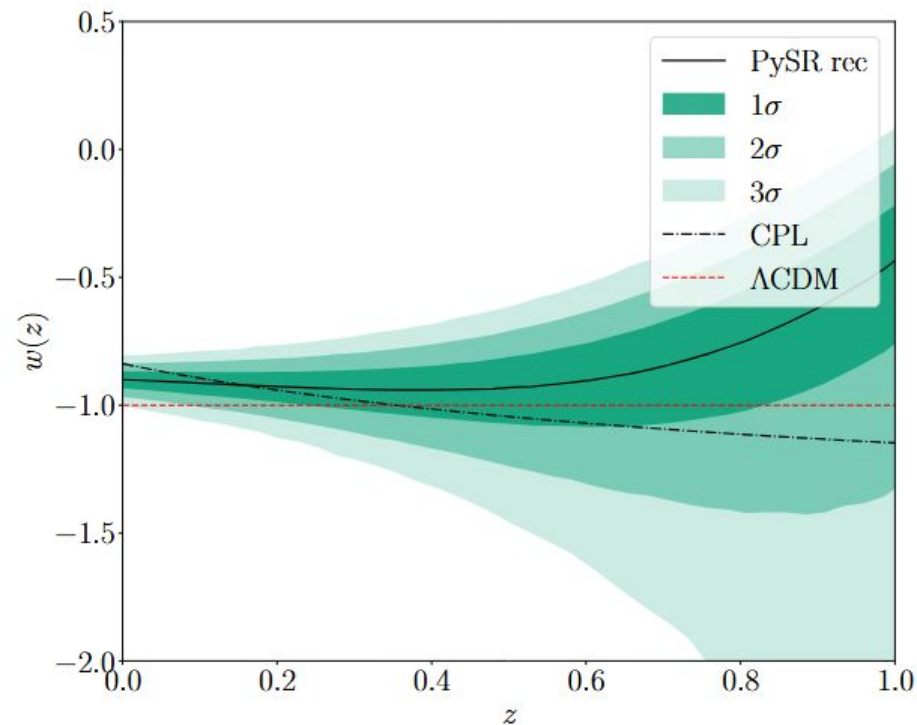
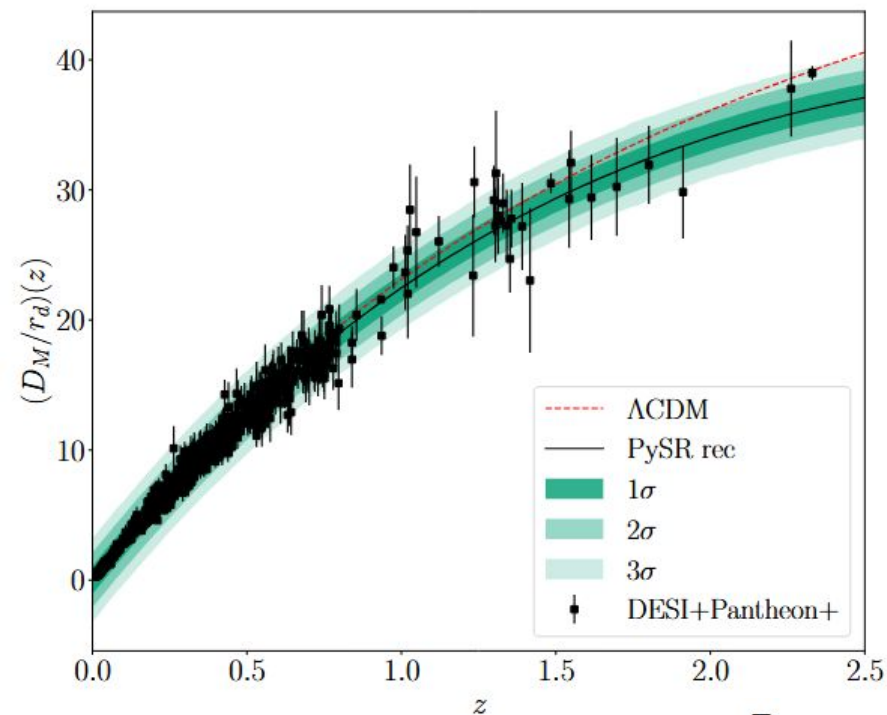


Results



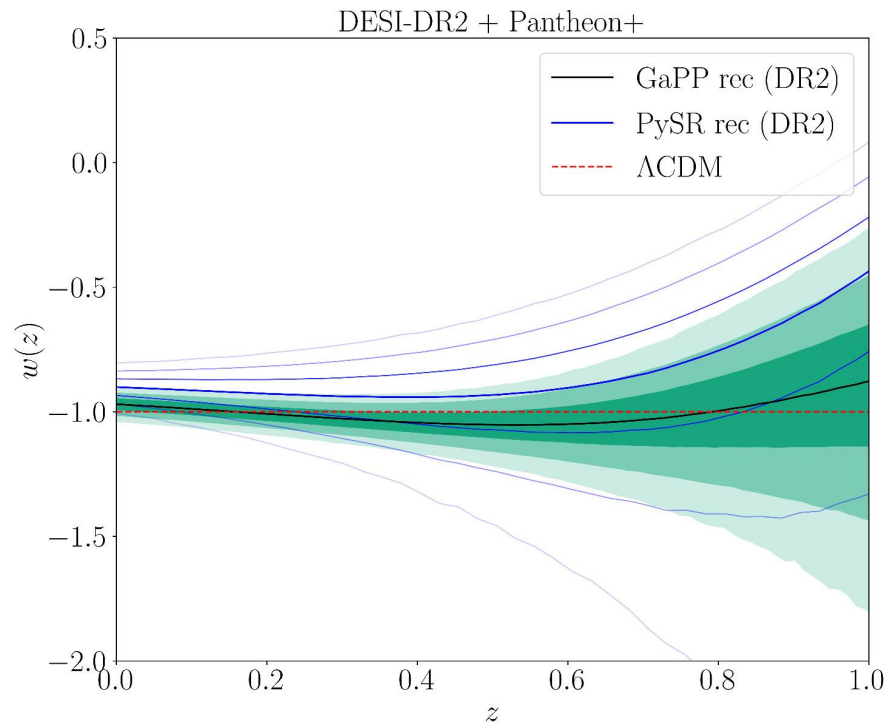
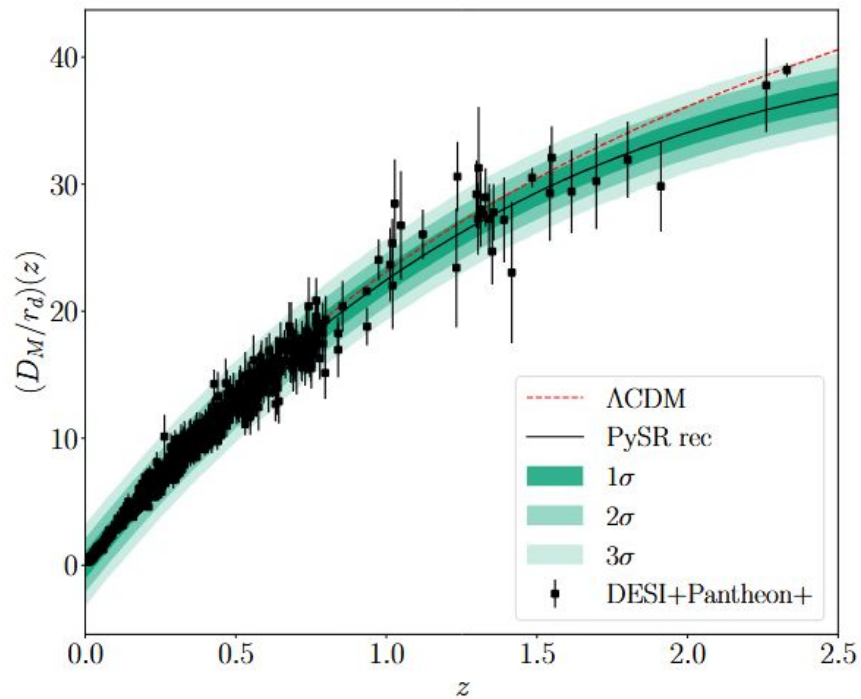
$$\frac{D_H}{r_d} = 28.4 \exp(-0.519z)$$

Results

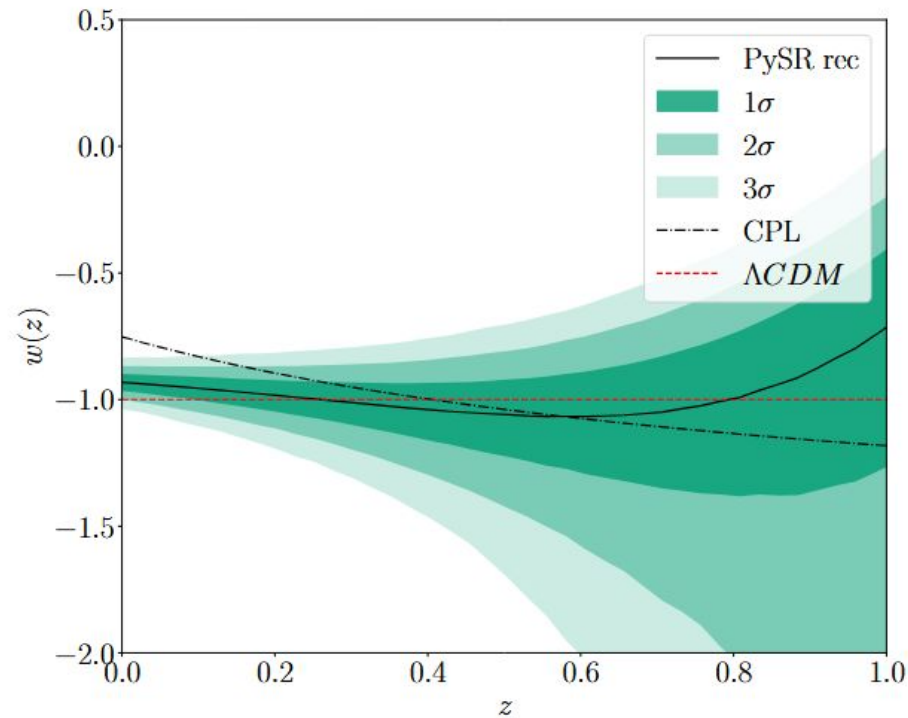
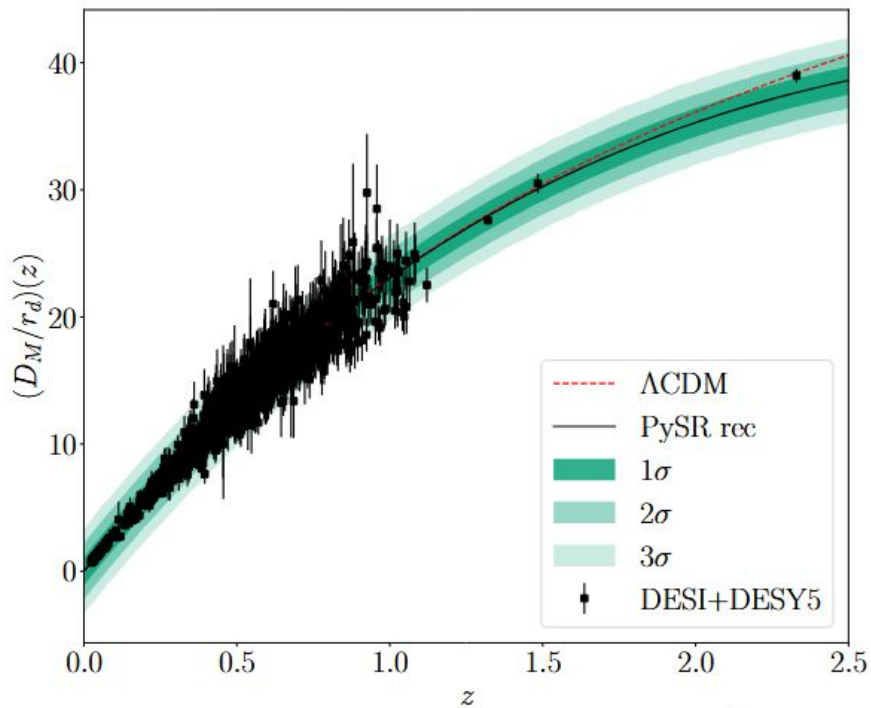


$$\frac{D_M}{r_d} = 33.3z \exp(-0.274z)$$

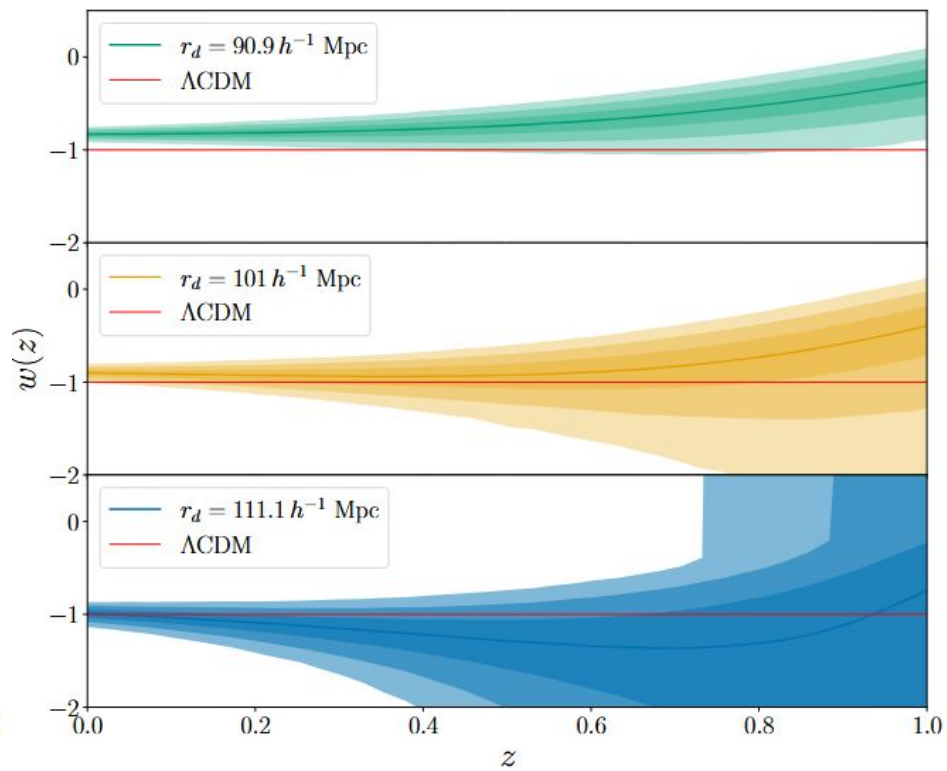
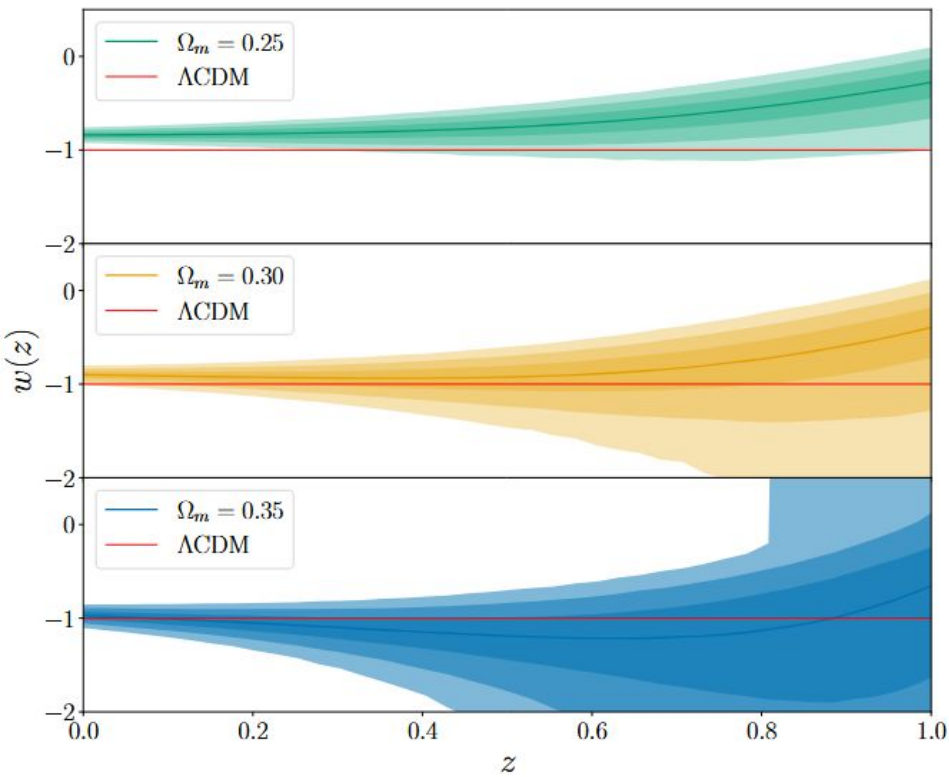
Results



Results

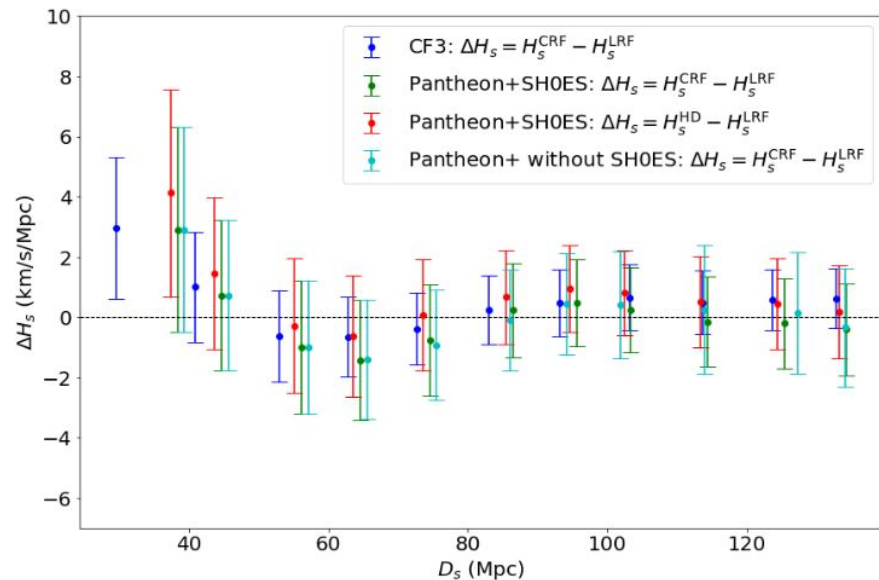


$$\frac{D_M}{r_d} = 30.1z \exp(-0.262z).$$



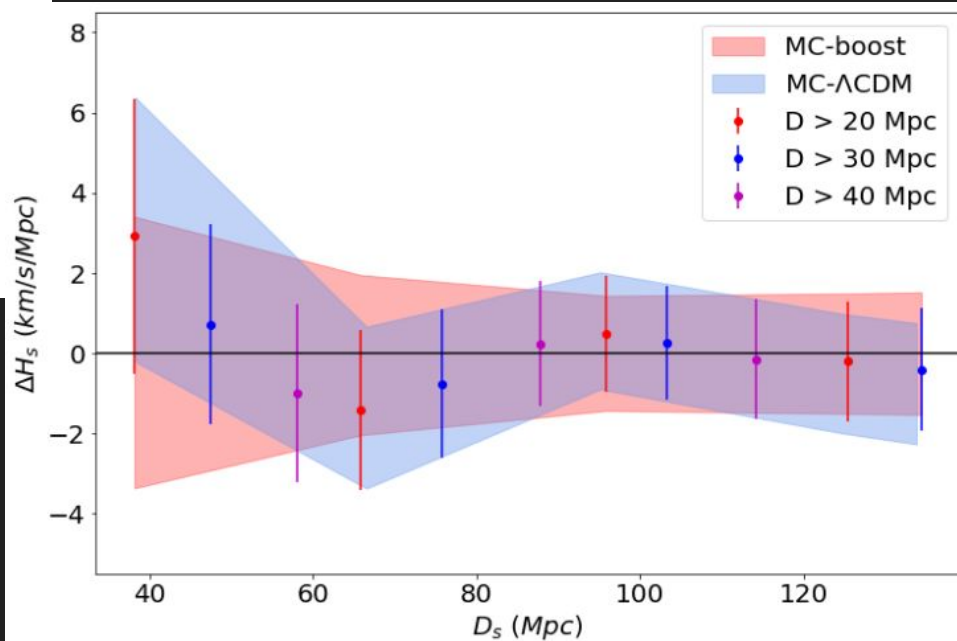
Results are not highly sensitive to the r_d and Ω_m prior assumptions. Deviations of $w(z)=-1$ at very late times are found for lower values of these quantities, but those values are mostly ruled out by current observations.

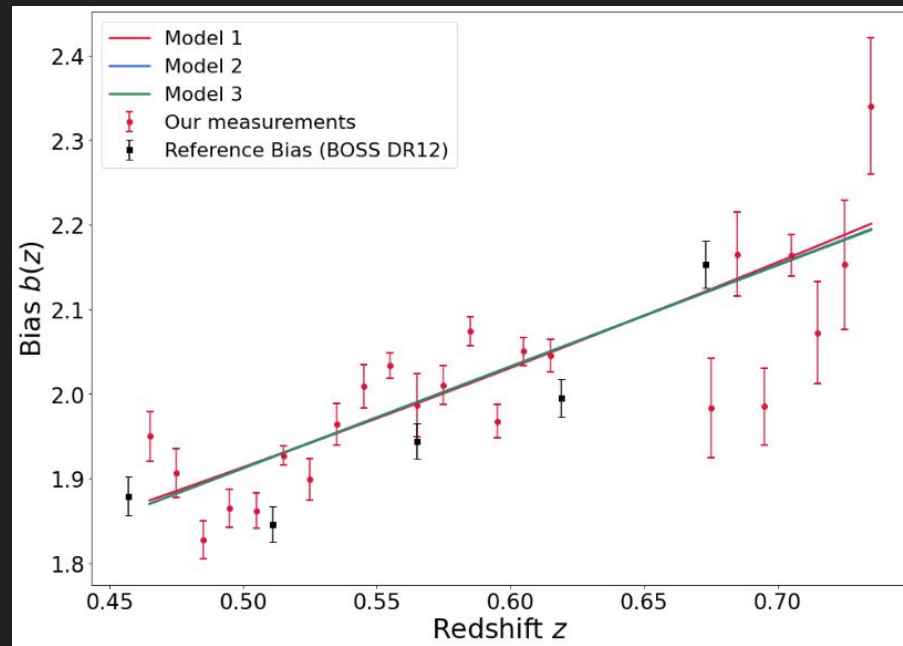
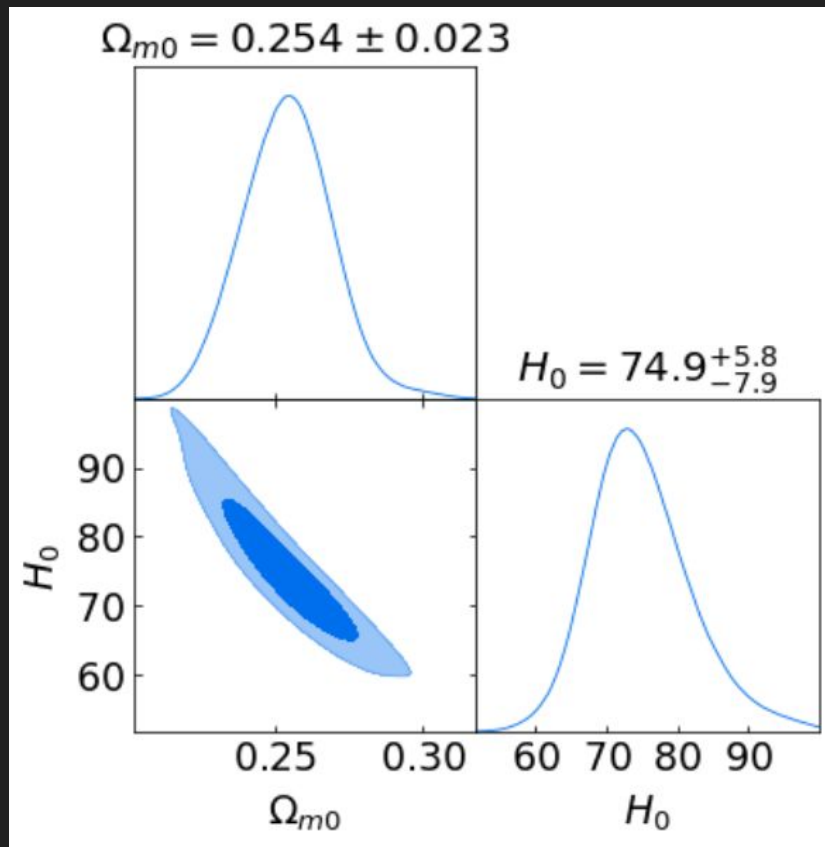
Miscelânea



Xiaoyun Shao & CB

Phys.Rev.D 113 (2026) 12, 123510





Xiaoyun Shao, Rodrigo S. Gonçalves, CB+
JCAP accepted

[Submitted on 17 Jul 2026]

Morphological Bias: How Ellipticals and Spirals Trace the Cosmic Web Differently

Paula S. Ferreira, Carlos A.P. Bengaly, Renyue Cen

We present a data-driven measurement of galaxy bias and scale-dependent relative bias for elliptical and spiral galaxies using angular auto- and cross-power spectra from DES and DESI Legacy Imaging Surveys DR8. We introduce the cross-tracer clustering ratio (CTCR), which uses the ratio of auto- to cross-power spectra to isolate the relative clustering of morphological tracers as a function of angular multipole ℓ . Across both surveys, ellipticals are more strongly clustered than spirals; the cleanest CTCR constraints come from DESI, where the two morphological samples have better-matched redshift distributions. The difference is scale dependent: the relative bias is close to unity on large angular scales, $\ell \lesssim 50$, but increases toward smaller scales, reaching an average separation of 2.6σ at $\ell \sim 150$ -200. A complementary linear-bias analysis confirms that ellipticals are positively biased relative to the matter field, while spirals are consistent with weak bias or anti-bias. Unlike narrowly selected LRG samples, our morphologically selected elliptical samples show little redshift evolution, consistent with a broader halo-mass distribution. The results are robust to two covariance estimators, contamination tests, luminosity splits, and comparisons with two N-body mock catalogs. These new findings provide empirical evidence that galaxy morphology imprints both the amplitude and scale dependence of galaxy bias, and establish CTCR as a useful observable for testing halo occupation and assembly-bias models with future imaging surveys.

Subjects: **Cosmology and Nongalactic Astrophysics (astro-ph.CO)**; Astrophysics of Galaxies (astro-ph.GA)

Cite as: [arXiv:2607.15573](https://arxiv.org/abs/2607.15573) [astro-ph.CO]

(or [arXiv:2607.15573v1](https://arxiv.org/abs/2607.15573v1) [astro-ph.CO] for this version)

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2607.15573> 

Conclusões e considerações finais

Conclusões e considerações finais

- O modelo cosmológico padrão hoje (Λ CDM) nos permite conhecer bem como o Universo evolui em grande escala - **mas será que realmente entendemos o Universo?! o que são matéria e energia escuras?!**
- Devemos sempre revisitar as **hipóteses fundamentais por trás do MCP**. Seriam elas **hipóteses fisicamente válidas**, ou apenas **aproximações matemáticas**?
- Testar a **validade observacional do Princípio Cosmológico** é crucial para **estabelecer a validade do MCP** - não importa qual seja o modelo de matéria/energia escura!
- Até agora, encontramos sempre **evidência a favor do Princípio Cosmológico** como uma **hipótese válida para descrever o Universo em largas escalas**
Testes mais precisos serão possíveis com surveys futuros como **SKA, Euclid, DESI J-PAS!**

Espero que tenham gostado!

Contato: carlosbengaly@on.br; carlosap87@gmail.com

Espero que tenham gostado!

Contact: carlosbengaly@on.br; carlosap87@gmail.com



Espero que tenham gostado!

Contact: carlosbengaly@on.br; carlosap87@gmail.com



Espero que tenham gostado!

Contact: carlosbengaly@on.br; carlosap87@gmail.com

**DIVULGUEM CIÊNCIA!
VERIFIQUEM SUAS FONTES!**

#VIVAACIENCIA!