



载人空间站工程巡天空间望远镜 宇宙学应用研究课题进展

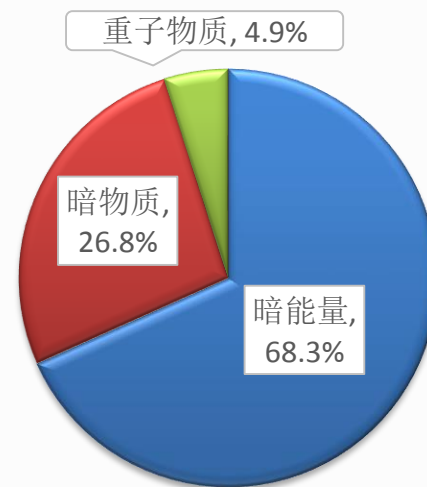
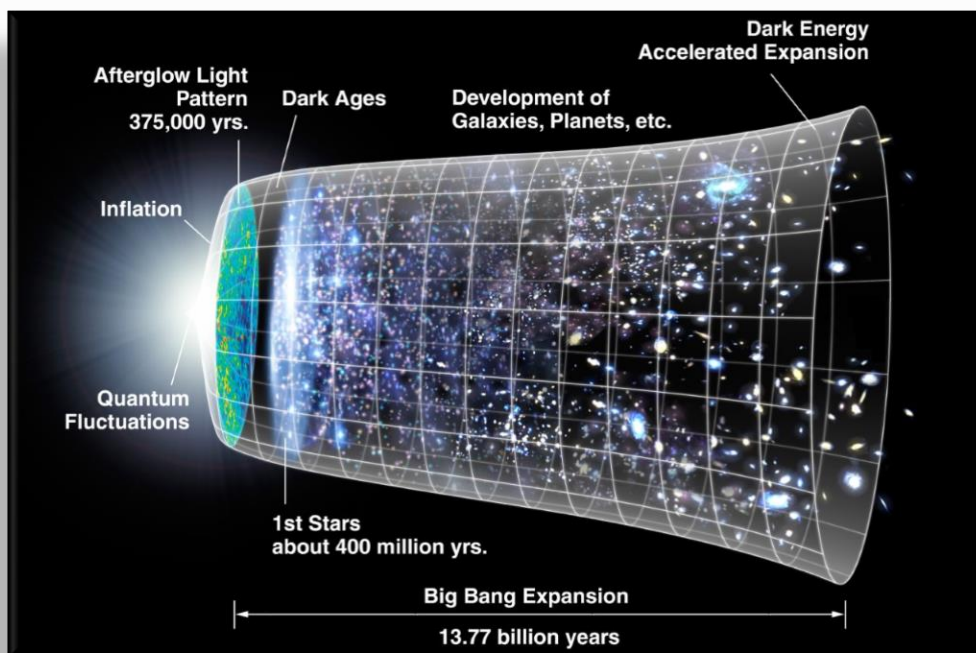
詹虎 李然 陈坤全 赵公博
方文娟 康熙 陈学雷 巩岩 黄庆国

CSST国台科学中心科学研讨会
2021.10.29



课题概况

- ❑ 宇宙学是巡天空间望远镜（CSST）的驱动性研究方向
- ❑ 观测任务：17500平方度多色成像与无缝光谱巡天+深场
- ❑ 重大科学问题：暗能量本质、暗物质属性、检验引力理论、中微子质量序、早期暴胀物理机制等
- ❑ CSST宇宙学探针：强、弱引力透镜，大尺度结构，星系团等

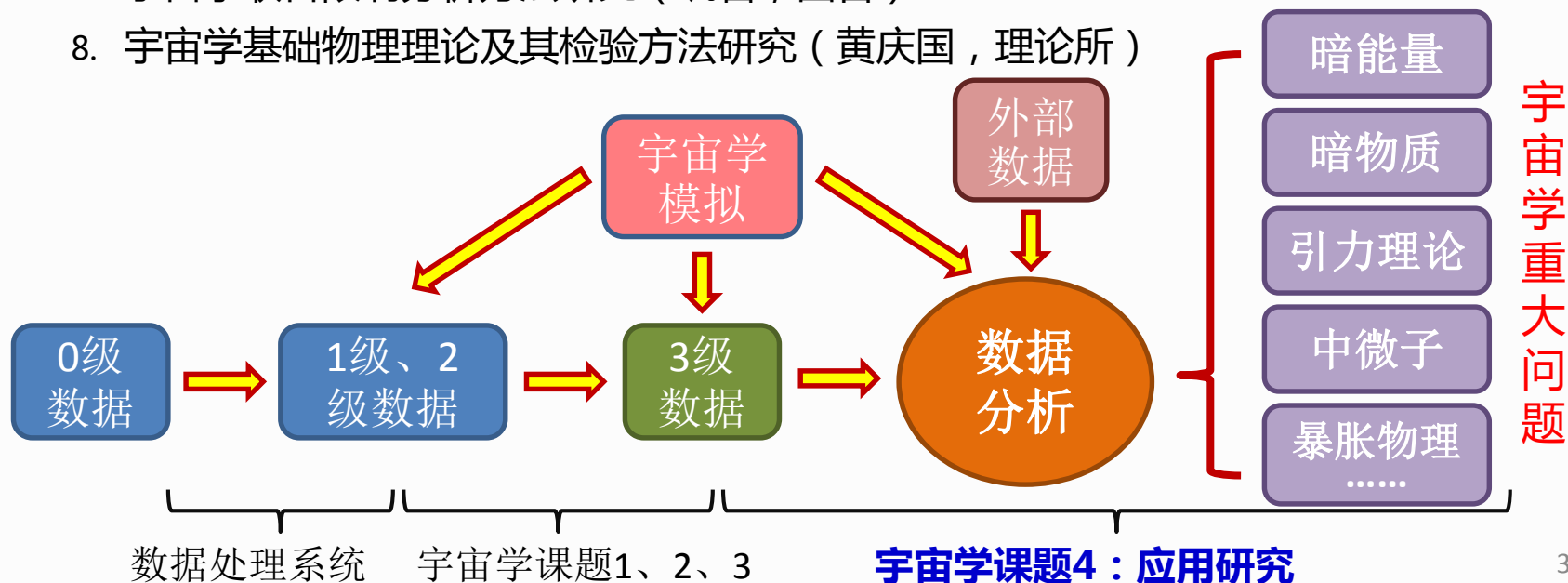


宇宙组分

课题概况

□ 子课题设置

1. 引力透镜效应的优化测量与分析方法研究（李然，国台）
2. 角成团性的优化测量与分析方法研究（陈坤全，中山大学）
3. 红移空间成团性的优化测量与分析方法研究（赵公博，国台）
4. 星系团统计的优化测量与分析方法研究（方文娟，中科大）
5. 宇宙网络结构的测量与分析方法研究（康熙，浙大/紫台）
6. 宇宙学交叉关联性的优化测量与分析方法研究（陈学雷，国台）
7. 宇宙学联合限制分析方法研究（巩岩，国台）
8. 宇宙学基础物理理论及其检验方法研究（黄庆国，理论所）

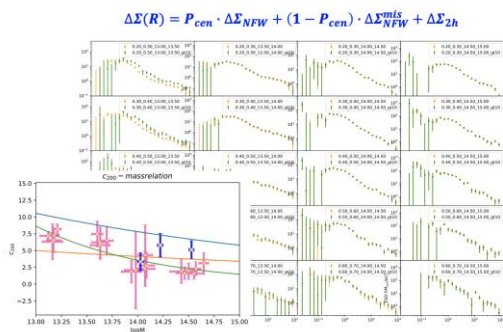


课题进展：引力透镜效应研究

剪切信号目录获取

- 从DECaLS巡天提取shear catalog开展多项宇宙学研究 (张骏团队)

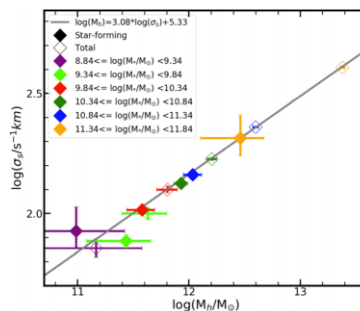
暗物质晕的c-M关系测量



王佳琪 et al., in preparation

卫星星系速度弥散和暗晕透镜质量关系

(与王慧元团队的合作)

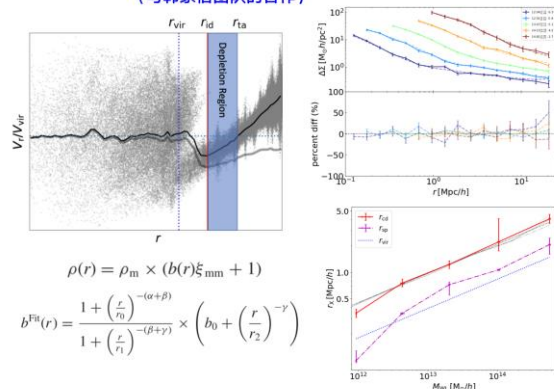


星系样本来自NYU - VAGC sample of the SDSS DR7. 红移范围: $0.01 \leq z \leq 0.2$. 中央星系是通过 halo-based group-finding algorithm 来定义.

实线代表最佳拟合线: $\log M_h = (3.08 \pm 0.05)$, $\log \sigma_s = (5.33 \pm 0.11)$. 这个结果与维里定理预言的 $M_h - \sigma_s$ 关系 ($M_h \propto \sigma_s^3$) 符合得非常好.

暗物质质量Depletion Radius的测量

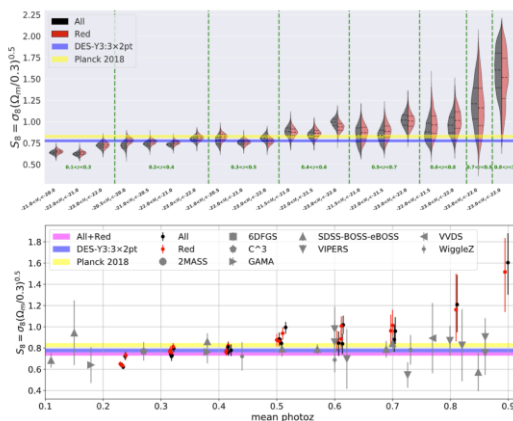
(与韩家信团队的合作)



Fong et al., in preparation

利用星系成团性和星系-星系透镜限制 σ_8

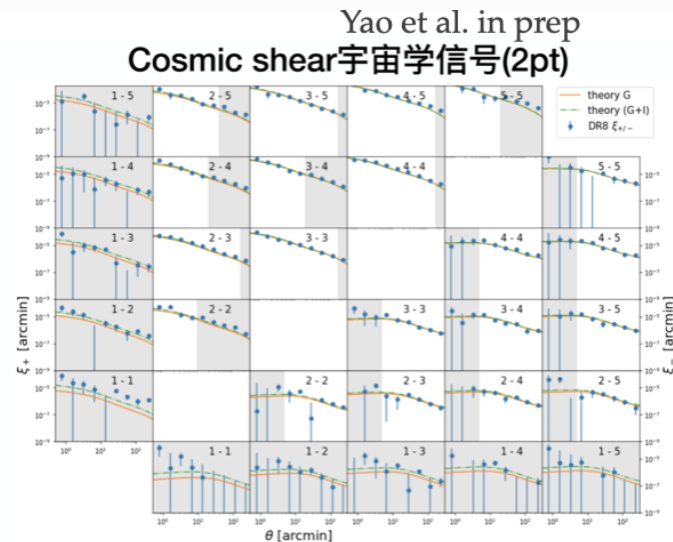
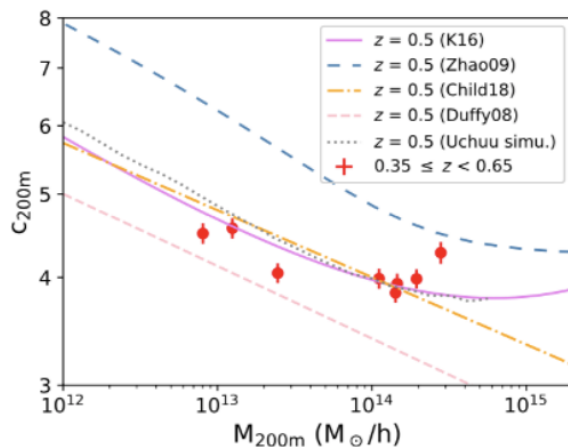
张子文 et al. in preparation



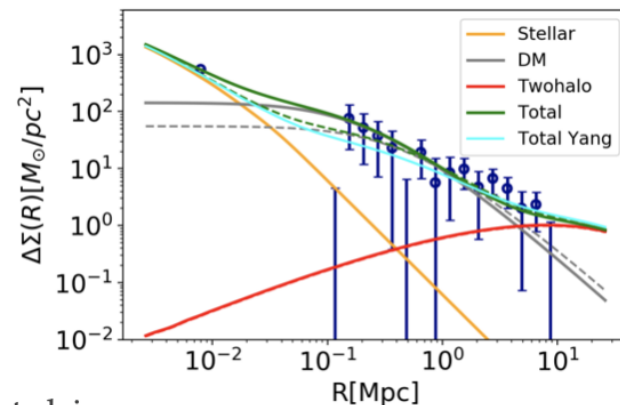
课题进展：引力透镜效应研究

徐伟伟、姚骥、王春香、陕欢源、李然等人利用独立的DECals shear catalog开展系列weak lensing研究工作。

❖ Xu et al. 2021 观测到暗晕质量和concentration在大质量段的上翘趋势



G-G lensing + Stellar Dynamics
constrain halo mass profile



Wang et al. in prep

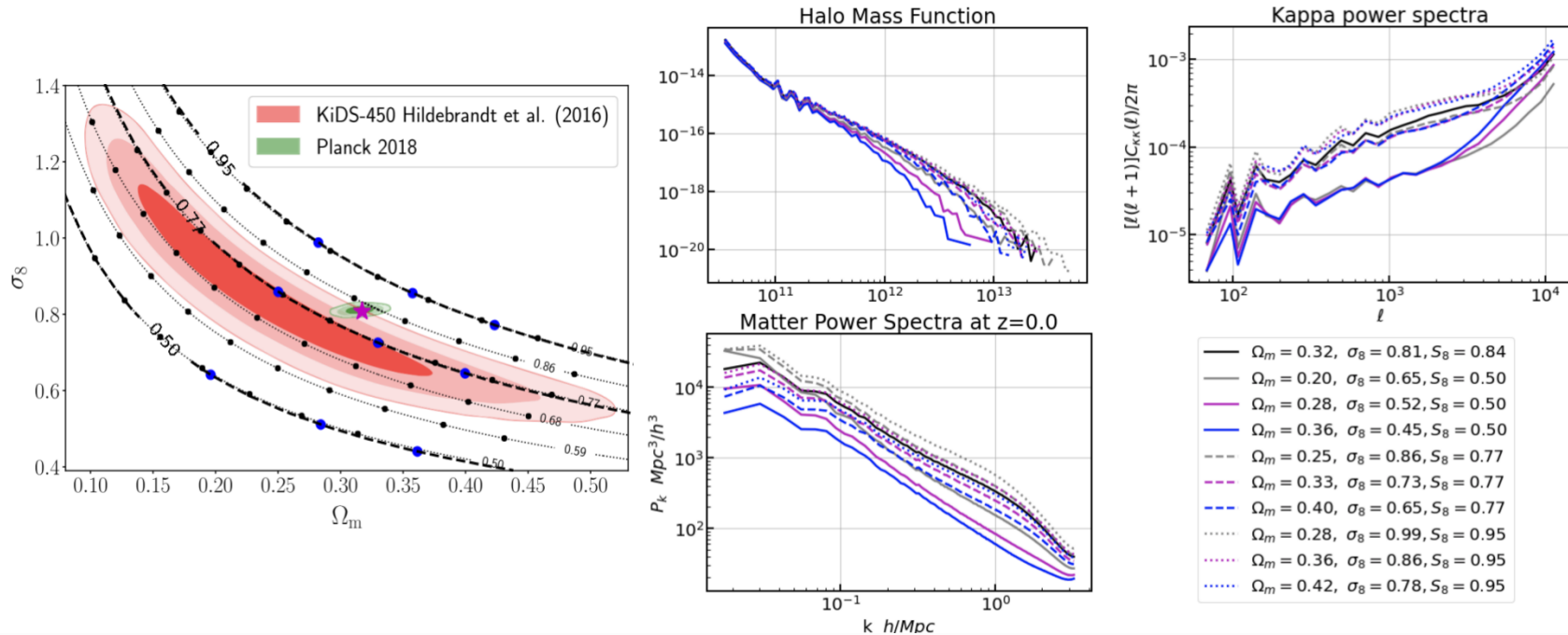
课题进展：引力透镜效应研究

透镜光锥emulator初步搭建

搭建弱透镜宇宙学分析专用的emulator的运行和构造管线。

主要关心 (Ω_m - σ_8) 参数空间

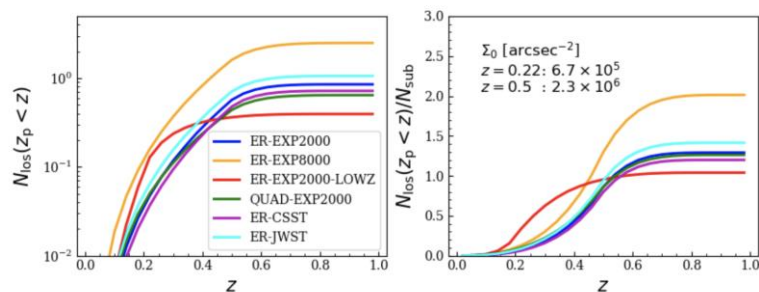
将量化光锥构造方式、精度等因素给协方差矩阵和宇宙学限制带来的影响



余瑜团队

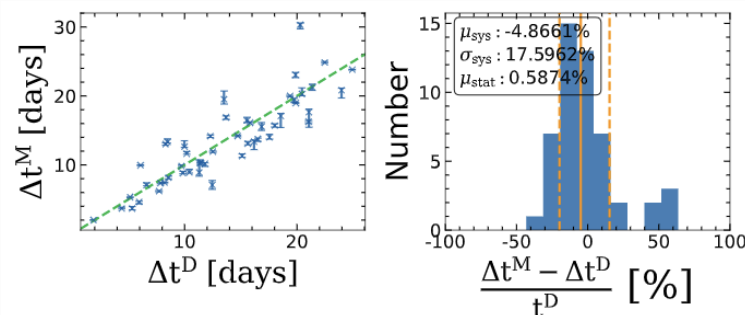
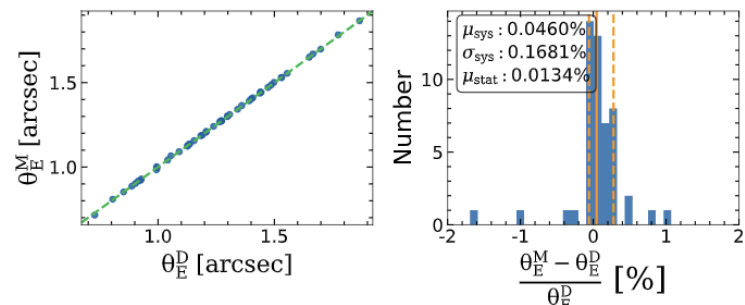
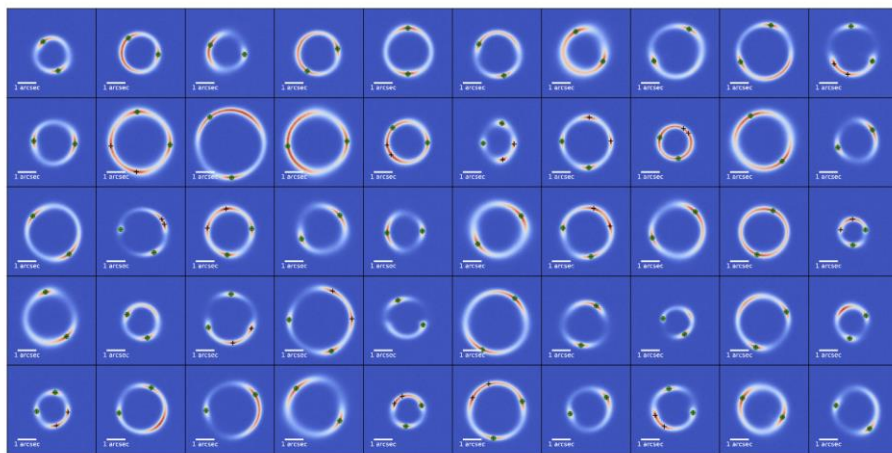
课题进展：引力透镜效应研究

强引力透镜



- 针对强引力透镜系统的不同科学目的建立了多批模拟图像，开展了系列科学案例研究（李然团队）。

- 针对CSST分辨率，计算了强引力透镜系统中低质量subhalo的探测率（He et al. 2021 (submitted)）。



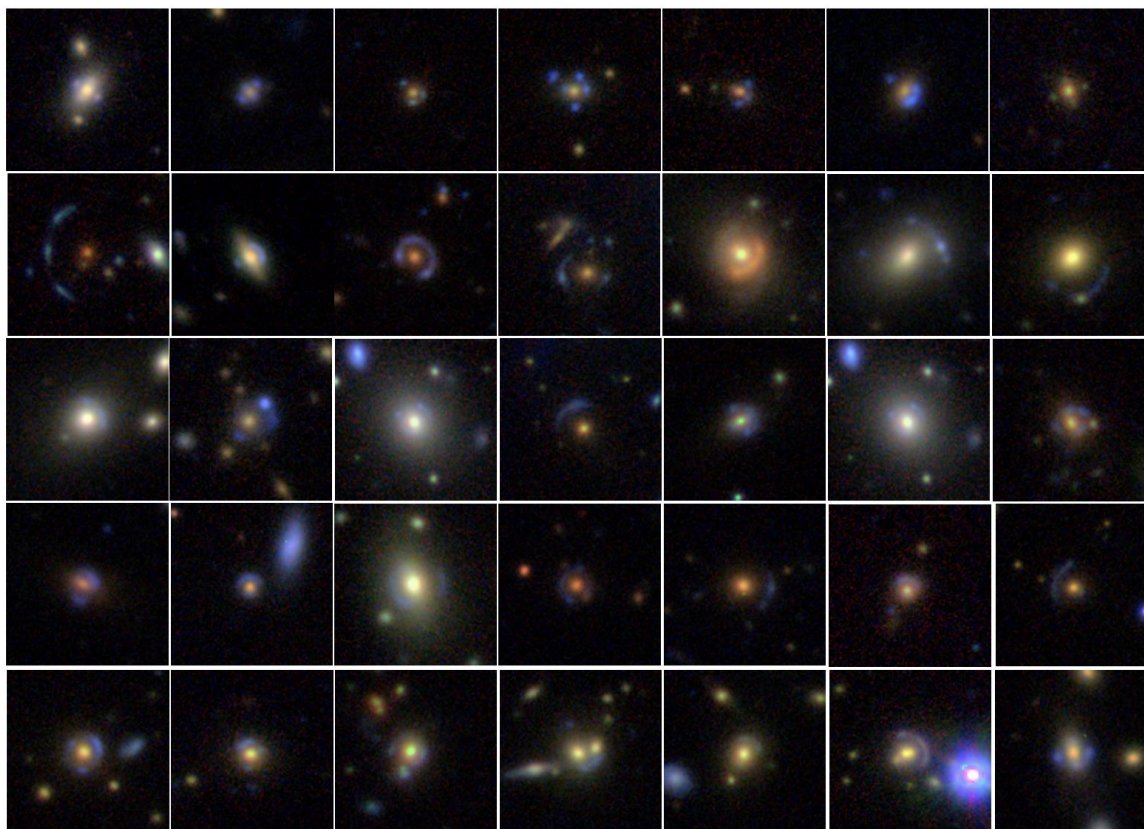
- 针对50个空间分辨率的透镜，测试了高精度自动化建模流水线，考察了爱因斯坦半径、时间延迟等物理量测量精度（Cao et al. 2021 (accepted)）。

课题进展：引力透镜效应研究

强引力透镜

- 基于KIDS数据利用机器学习的方法发现了一大批新的高质量强引力透镜样本（李瑞团队）。

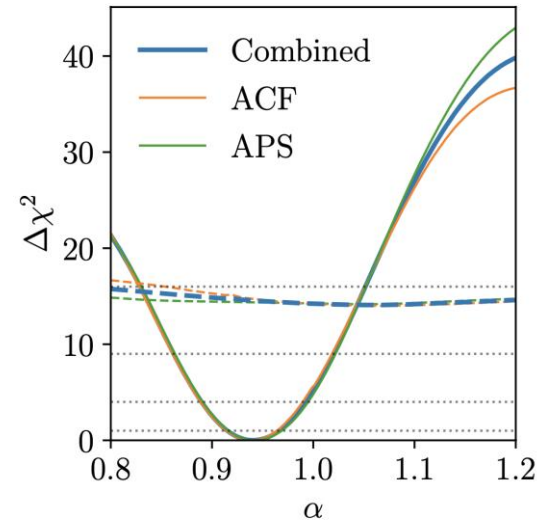
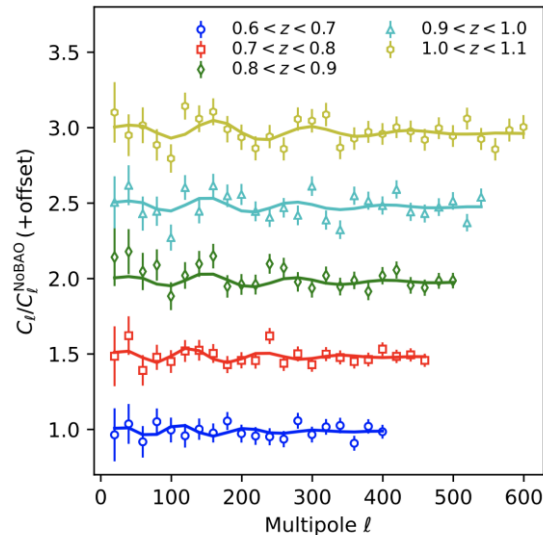
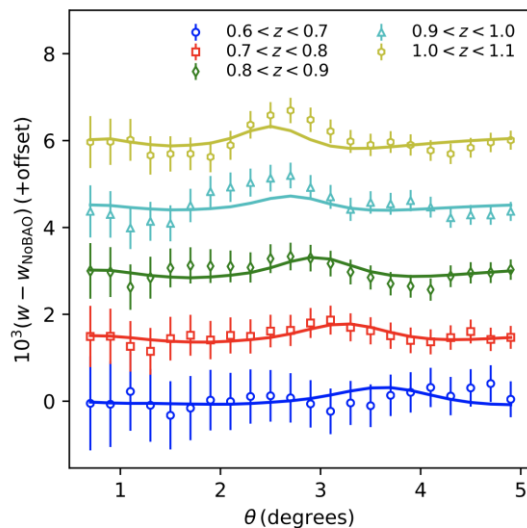
Samples in KiDS DR4 (Li et al. 2020)



课题进展：星系角成团性研究

Photometric data analysis with DES Y3

- BAO is measured using w and C_ℓ results are consistent with each other.
- $D_M/r_d = 18.92 \pm 0.51$, 2.5% measurement of the BAO at $z = 0.83$.
- Most precise BAO measurement from photometric surveys.

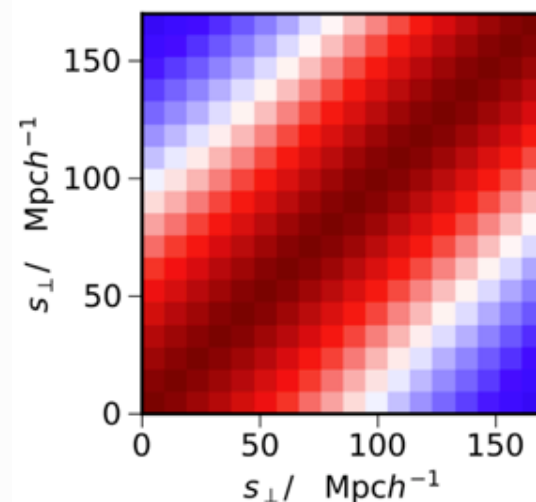
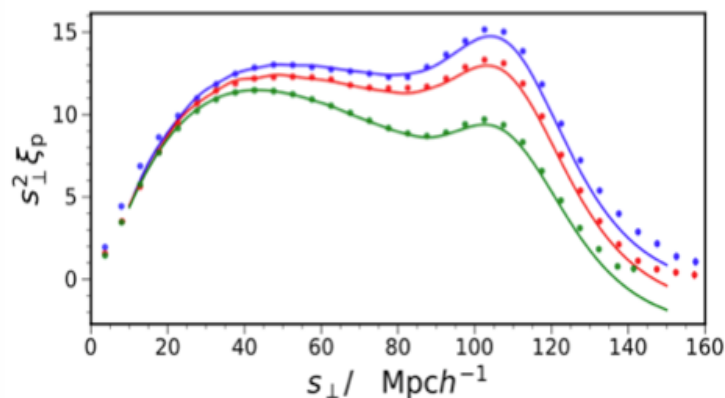
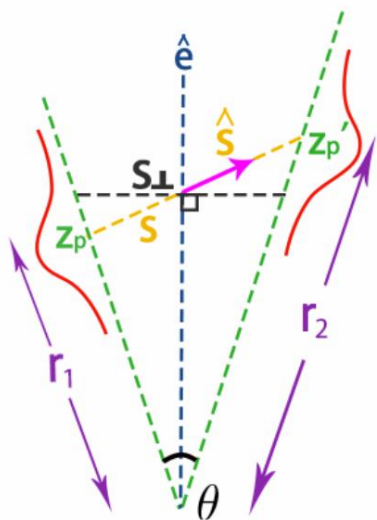


DES collaboration, 2017.04646

课题进展：星系角成团性研究

New clustering statistics for photometric data

- 3D correlation akin to spec-z analysis is developed, can effectively summarize the auto and cross correlations in conventional tomographic bin analysis.
- General photo-z distribution included in modeling.
- Gaussian covariance is obtained, strong cross correlation due to photo-z mixing.
- The BAO constraint is comparable to the w analysis, offer an alternative photometric clustering analysis route.

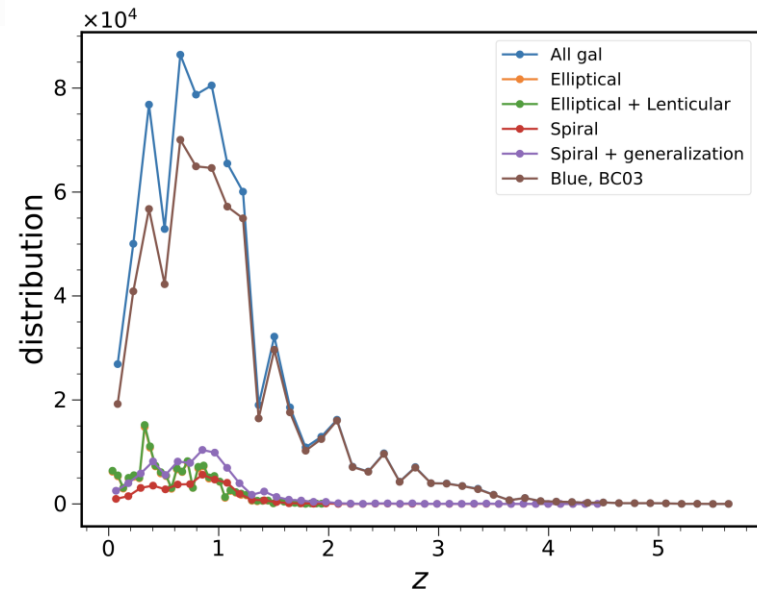
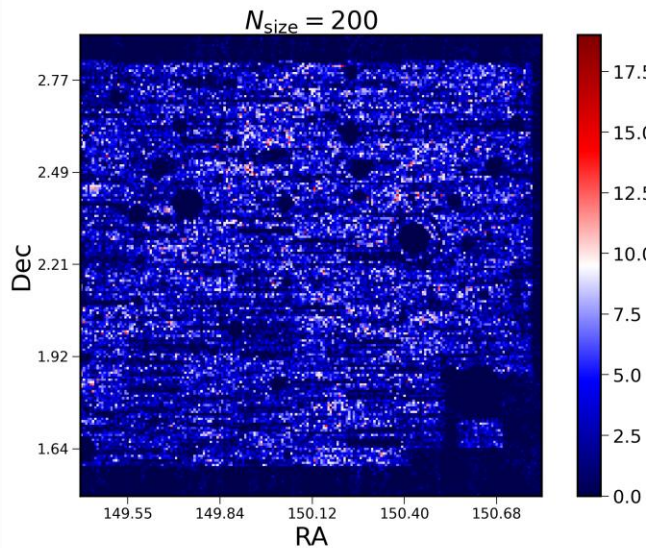


Credit: Chan et al, to appear

课题进展：星系角成团性研究

CSST photometric sample properties

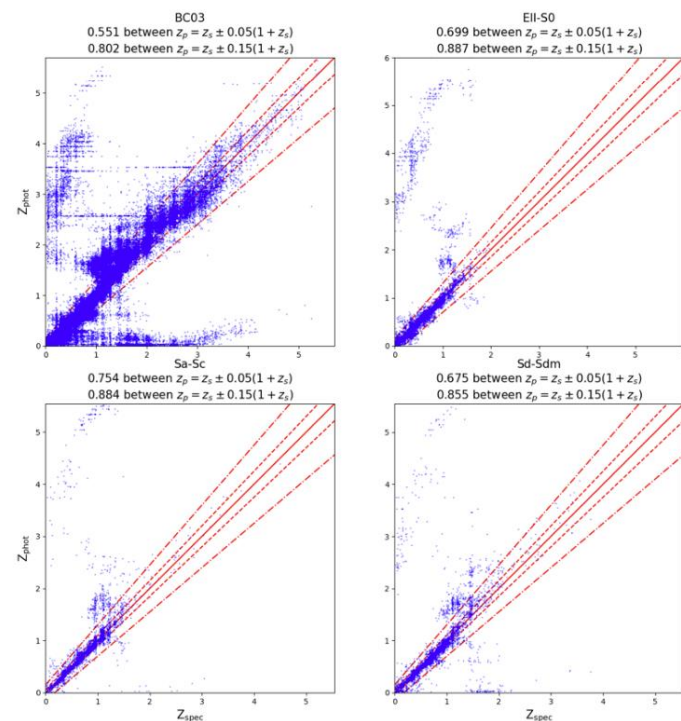
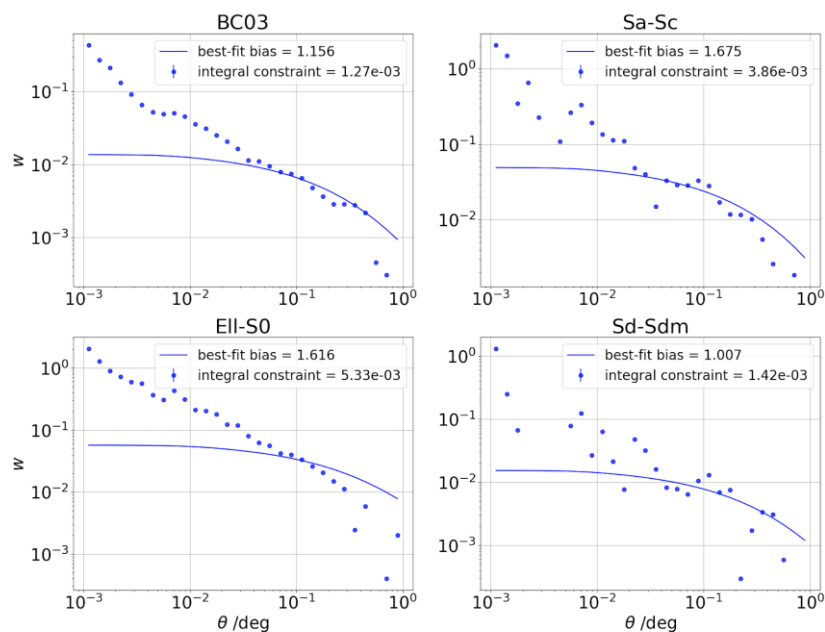
- To make forecast and maximize the scientific gain from the CSST photometric data, the CSST photometric galaxy sample properties such as their bias parameters, redshift distribution, and photo-z accuracy must be known.
- COSMOS catalog ~ 1.4 sq deg, r band 2σ depth up to 26.5.
- Most of the cosmological photometric analysis rely on red galaxies, while for $z > 1.2$, the samples contains only blue galaxies. To increase the scientific gain, the blue galaxies must be better understood.



课题进展：星系角成团性研究

Clustering of different types of galaxies

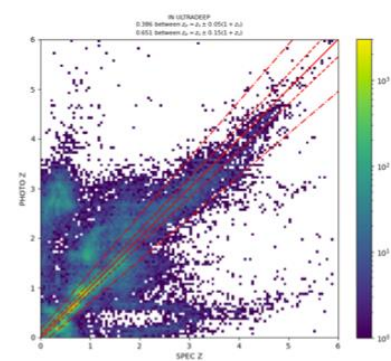
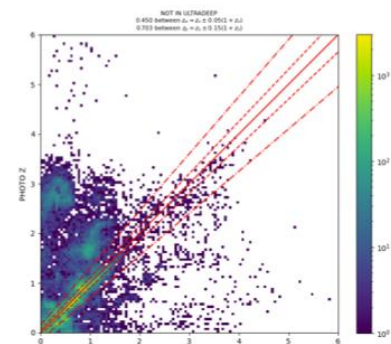
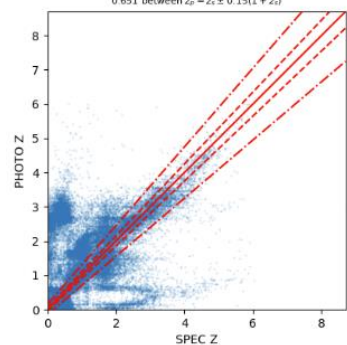
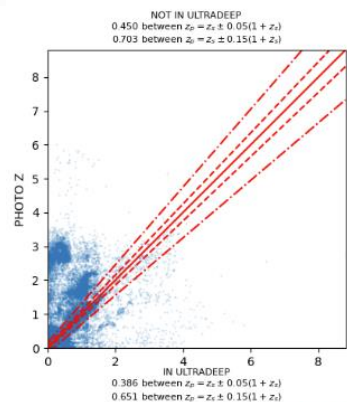
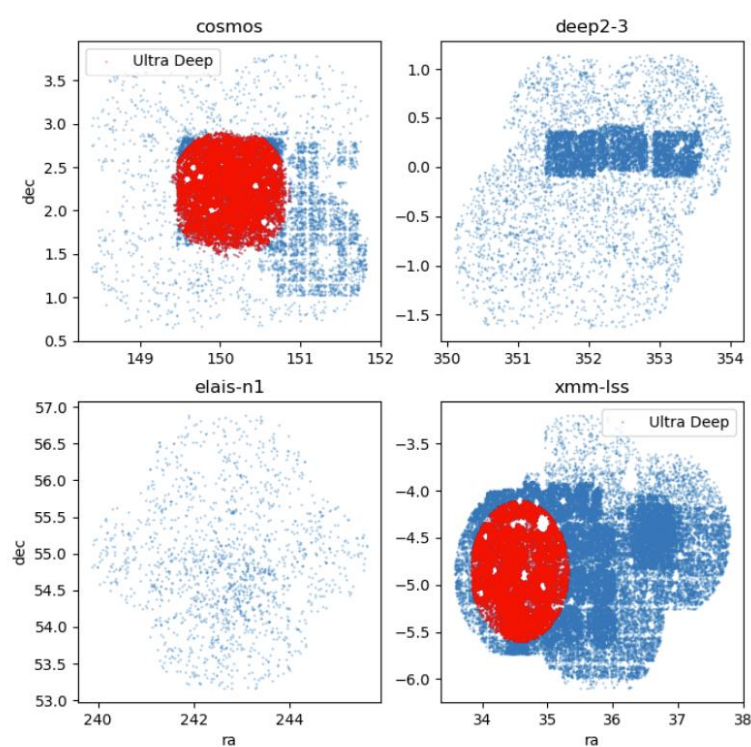
- The correlation function and hence the bias of different galaxy types are measured.
- Elliptical and spiral galaxies have higher bias, ~ 1.6 , blue (BC03) and Sd-Sdm has lower values ~ 1 .
- Red galaxies have better photo-z than the blue ones.
- More refined division is too noisy due to small sample size.



课题进展：星系角成团性研究

Deep or Ultradeep sample from HSC

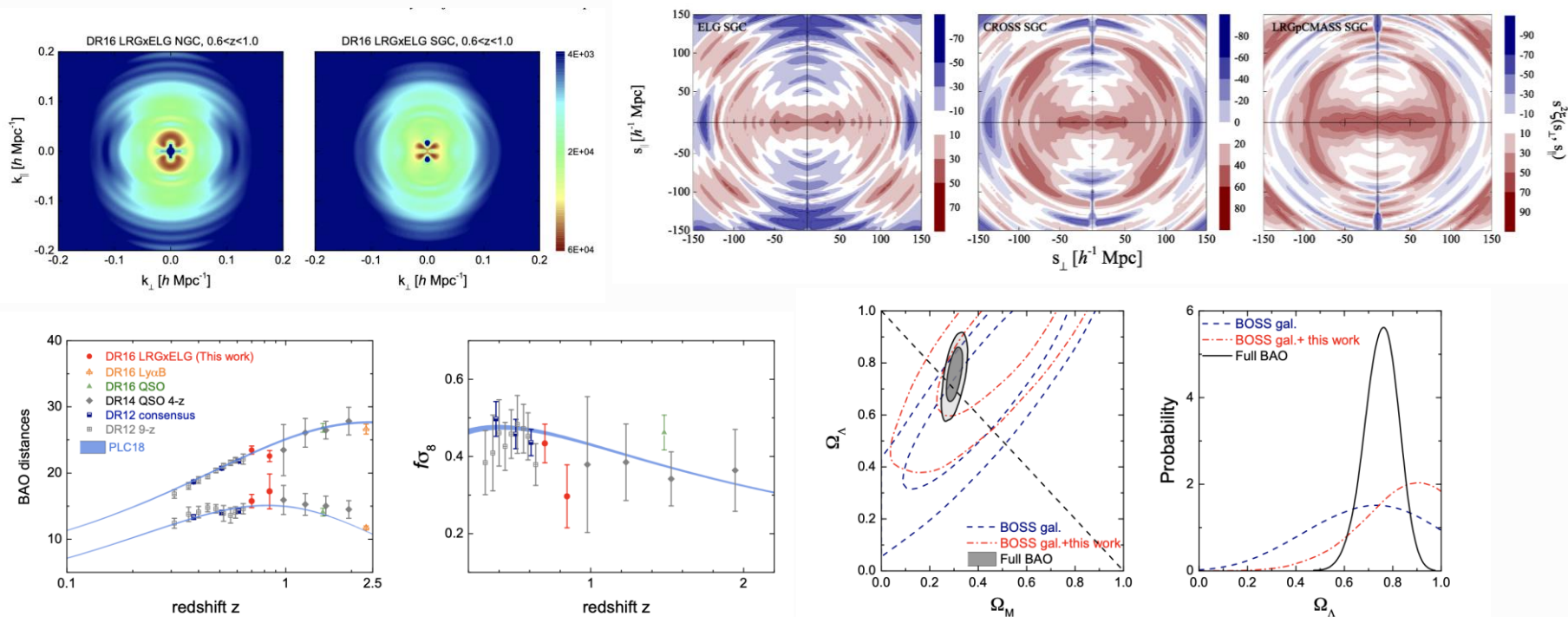
- HSC offers much larger area coverage, but less accurate photo-z.
- In the process of selecting the appropriate sample from four deep fields in HSC, the photo-z obtained from le share is poor compared to official one.



课题进展：红移空间成团性研究

依托eBOSS星系巡天重建宇宙演化历史

- eBOSS合作组顺利完成观测、数据处理和宇宙学应用，领衔eBOSS合作组，成功利用多重类型星体开展交叉关联分析，在高置信度探测红移畸变信号，在 11σ 独立证认了宇宙加速膨胀（赵公博、王钰婷）

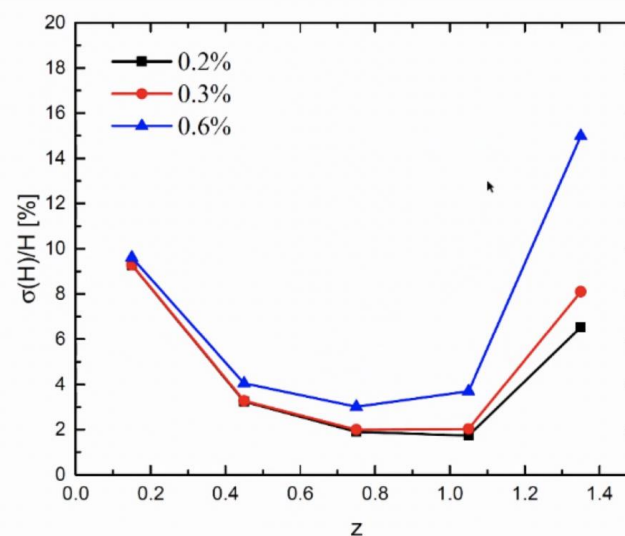
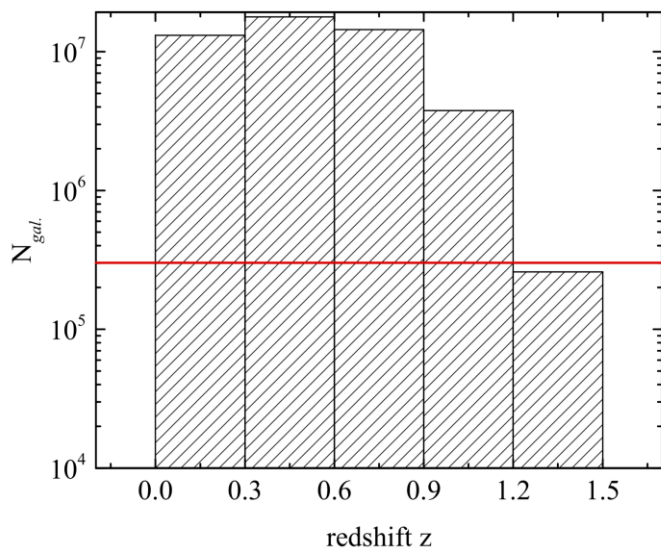


Zhao, Wang et al [eBOSS], 2021 MNRAS, 504, 33 , Wang, Zhao et al [eBOSS], 2020 MNRAS, 498, 3470

课题进展：红移空间成团性研究

基于CSST无缝光谱宇宙学预研究

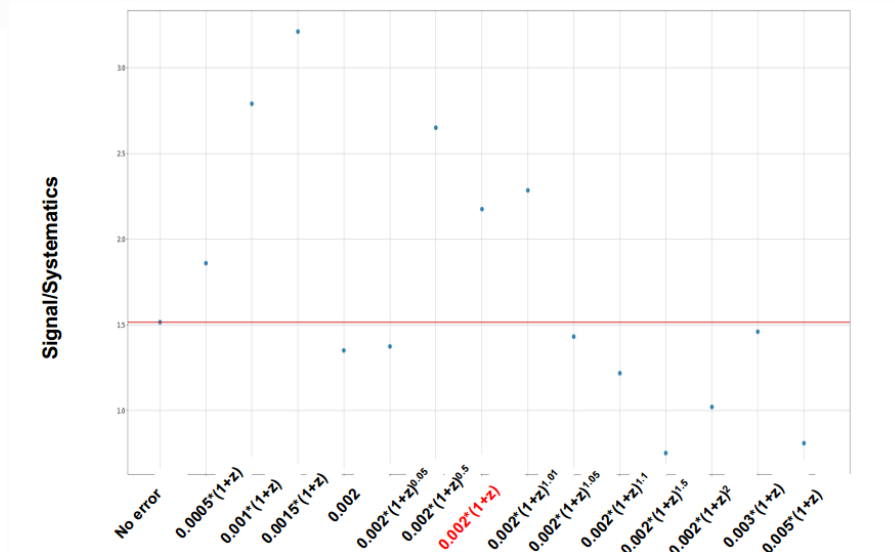
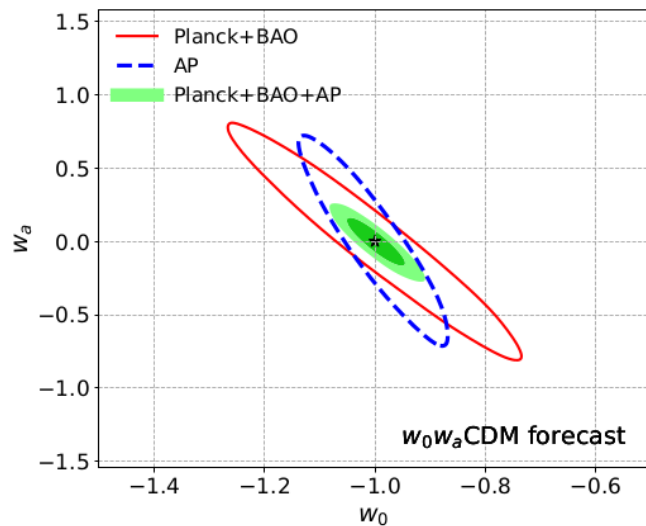
- 无缝光谱红移精度对BAO距离精度的影响（王钰婷，赵公博，袁硕）。
- 基于模拟的星系红移分布（左图），15,000 平方度的巡天面积，不同光谱红移精度 $\delta z/(1+z)$ ，利用Fisher方法预研 $H(z)$ 精度（右图）。
- 基于0.3%的红移精度，在0.6-1.2红移区间，CSST有望实现跟DESI测量精度(ie, $\sigma(H)/H$ ($0.6 < z < 1.5$) = 1.3% - 2.2%) 可比拟的BAO距离测量。



课题进展：红移空间成团性研究

Alcock-Paczyński 检验应用于 CSST 的预研究

- 检查了CSST无缝光谱红移误差对 AP 检验宇宙学分析的影响，文章正在撰写中（李霄栋（中山大学））。
- AP 方法可大大提高宇宙学限制（右图预测 $z < 1.4$ ，30M星系）。CSST 无缝光谱红移误差可能对宇宙学结果造成影响，红移误差 $\approx \sigma * (1+z)$ ， σ 范围为 0.002 - 0.005。在 BigMDPL 模拟 [38403 粒子，(2500 Mpc/h)³] 测试发现不会产生严重系统效应。对统计置信度影响有限，以 $0.002*(1+z)$ 为例，此时，信号 / 系统误差 提高约 47%，信号 / 统计误差（信噪比）仅降低约 10%。



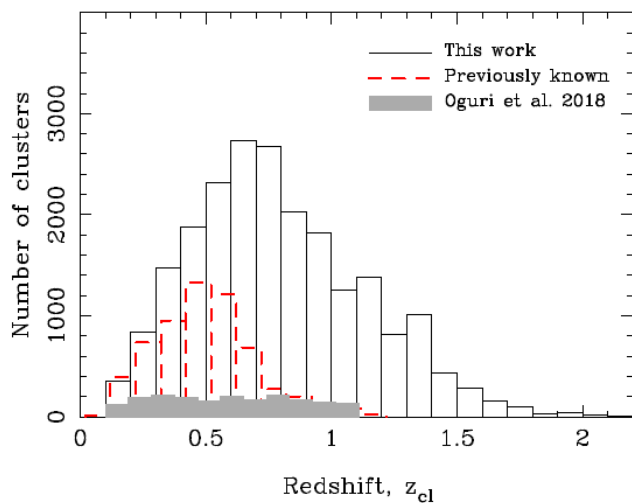
课题进展：星系团研究

从HSC-SSP×unWISE数据证认星系团

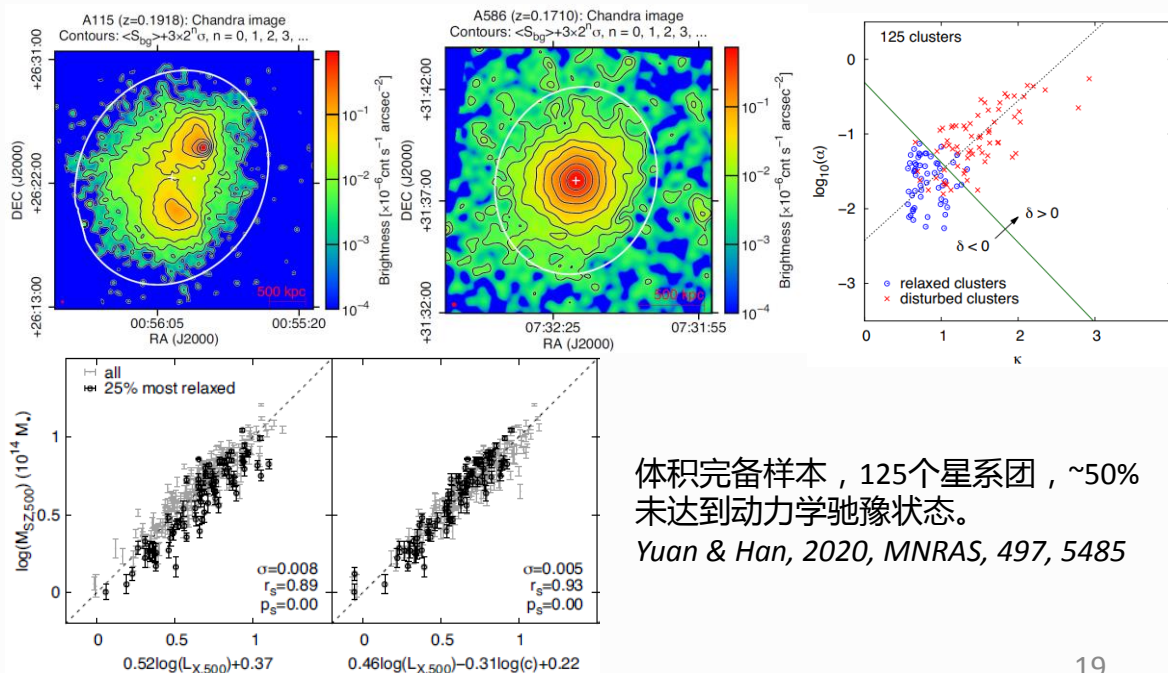
- 利用星系测光红移，从HSC约800平方度数据证认出21,661个红移范围 $0.1 < z < 2$ 星系团，其中5537个星系团 $z > 1$ ，642个 $z > 1.5$ （显著扩大 $z > 1$ 星系团数目）。

动力学状态对质量估计的影响

- 在X射线波段构建一个完备且动力学无偏袒的样本，作为以后CSST星系团质量估计的校准样本。



Wen & Han 2021, MNRAS, 500, 1003, Data available at http://zmtt.bao.ac.cn/galaxy_clusters/



体积完备样本，125个星系团，~50%未达到动力学弛豫状态。

Yuan & Han, 2020, MNRAS, 497, 5485

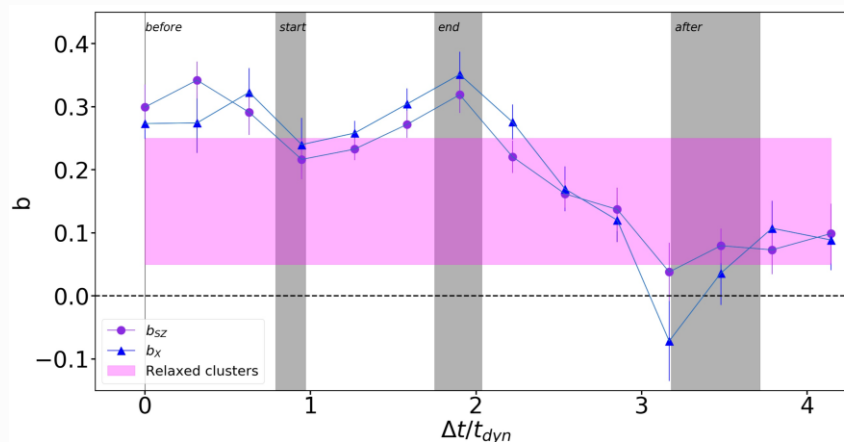
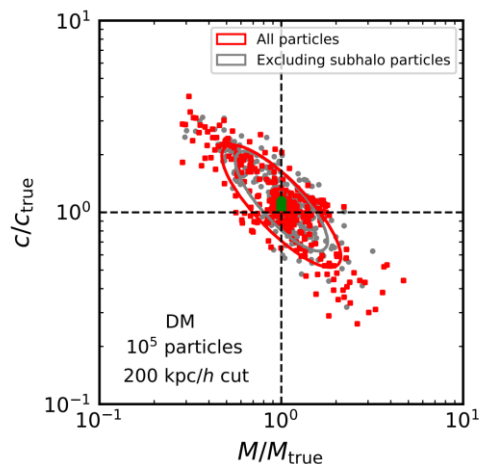
课题进展：星系团研究

使用oPDF方法来测量星系团质量

- 应用银河系质量估计方法oPDF (*Han et al. 2016*) 到星系团，并使用300星系团模拟样本来估计星系团质量。
- 统计平均没有偏差，但是受到静态平衡和球对称假设的影响，估计质量和紧致因子有较大的分布，如下图左。

星系团性质对其质量测量的影响

- 使用300星系团流体模拟研究不同星系团性质对于星系团质量（流体静态平衡）估计产生的影响。
- 星系团质量偏差主要受星系团动力学状态的影响，该偏差随星系团并和变化，如下图右。

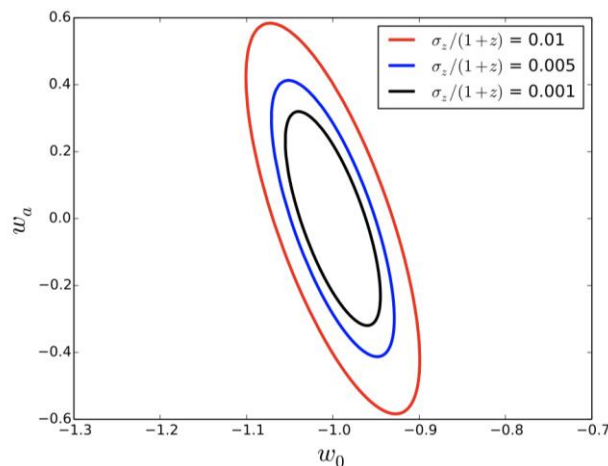
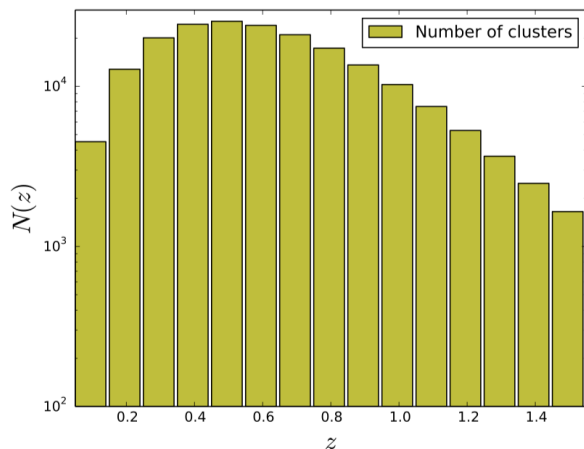


左：Li et al (2021),
MNRAS, 505, 3907
右：Gianfagna et al
(2021), MNRAS, 502,
5115

课题进展：星系团研究

星系团计数对宇宙学参数的限制

- 假设星系团富度-质量关系满足log-normal分布（基于HSC CAMIRA星系团数据），预测CSST星系团样本的红移分布。
- 对星系团富度-质量关系做self-calibration，利用Fisher matrix预测CSST星系团丰度对暗能量状态方程等宇宙学参数的限制结果，发现其对测光红移有较为明显的依赖性。



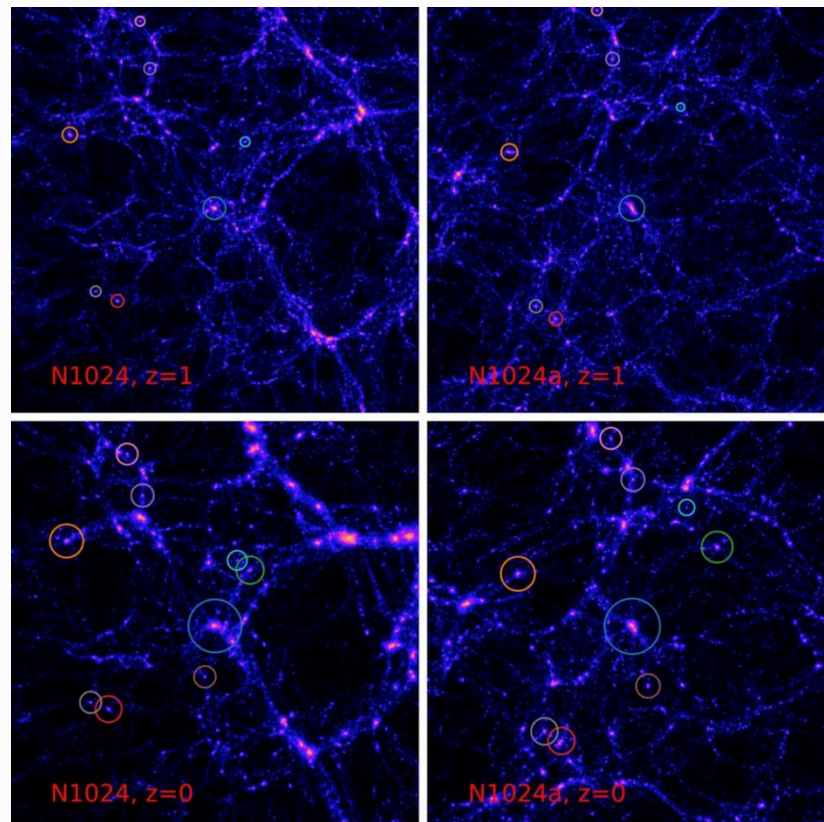
parameters	w_0 CDM	w_0w_a CDM
$\Omega_c h^2$	0.0312	0.037
σ_8	0.097	0.114
n_s	0.0733	0.78
w_0	0.058	0.0848
w_a	-	0.477
FoM ^{DE}	-	36

Zhang, WF, Chen, Wen (2021), in preparation

课题进展：宇宙网络结构研究

暗晕角动量-大尺度环境的关系

- 近十年的观测和理论研究表明：星系的角动量/自旋与其所在的宇宙大尺度环境有很强的相关-漩涡星系角动量平行于Filament, 椭圆星系垂直于Filament, 角动量-大尺度环境相关性的机制还不清楚。
- 孪生宇宙模拟：两个模拟具有非常类似的初始条件，但是在尺度上扰动相位存在差异。
- 大尺度环境改变后暗晕的角动量也相应的发生了旋转。这表明大尺度环境是主导星系/暗晕角动量形成的主要原因。



孪生宇宙模拟, *Chen et al. 2021, ApJ*

课题进展：宇宙网络结构研究

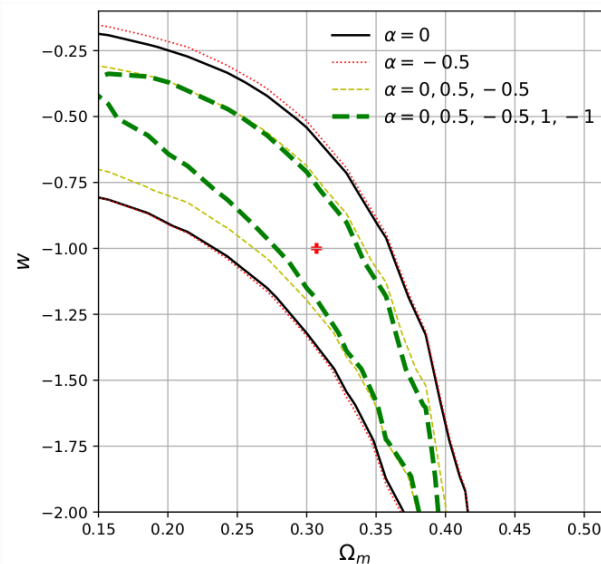
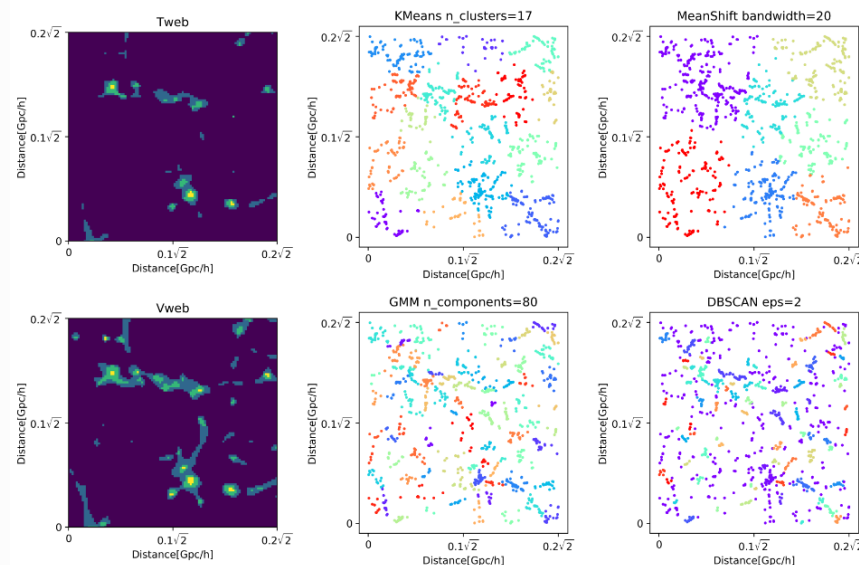
AI 刻画宇宙网结构

- 采用 AI 聚类算法，对星系分布的拓扑结构进行刻画。
- 已经与 TWeb / VWeb 的结果进行了对比。目前正在研究其对宇宙学参数的依赖性。

环境加权关联函数

weighting all objects by ρ^α

- 研究 mark weighted correlation function 的宇宙学应用。
- 基于数值模拟的研究表明，在关联函数中引入环境密度幂次的加权，可把宇宙学限制能力提高一倍 (Yizhao Yang et al., 2020, *ApJ*, 900, 6) 。
- 目前正在1). 将该方法应用于 SDSS 数据，2). 研究其他环境加权方法 (已取得理想结果，文章初稿已完成) 。

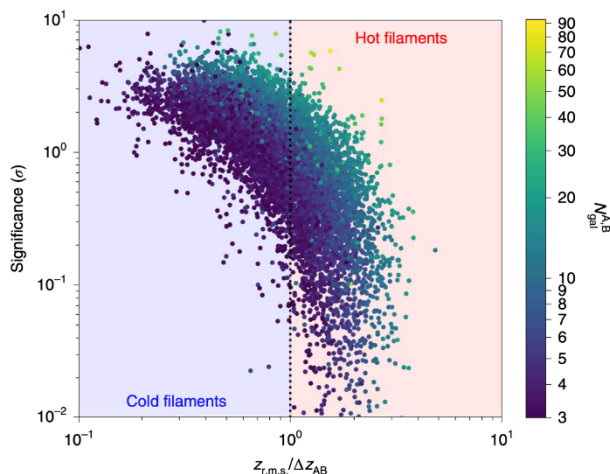


课题进展：宇宙网络结构研究

纤维结构自旋

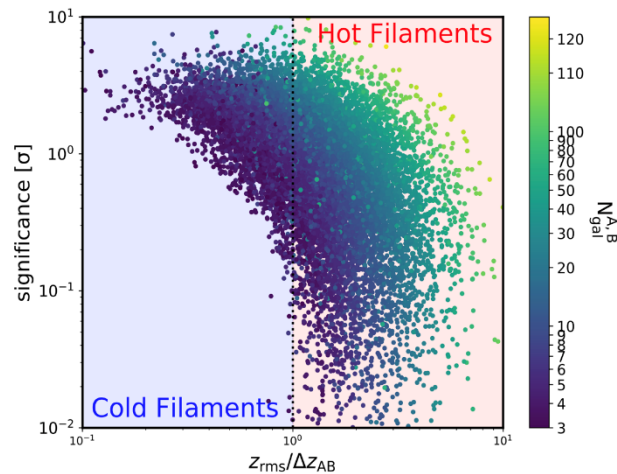
- 我们利用SDSS的星系数据，发现宇宙中的纤维结构存在自旋，其沿着Filament脊柱旋转。文章发表在Nature Astronomy。
- 最近我们利用模拟数据，验证了观测结果：发现纤维结构中的暗物质分布也存在自旋。

Filament spinning: Observation vs. Theory



Observation: SDSS

Wang, Libeskind, Tempel, Kang, Guo. 2021 Nature Astronomy



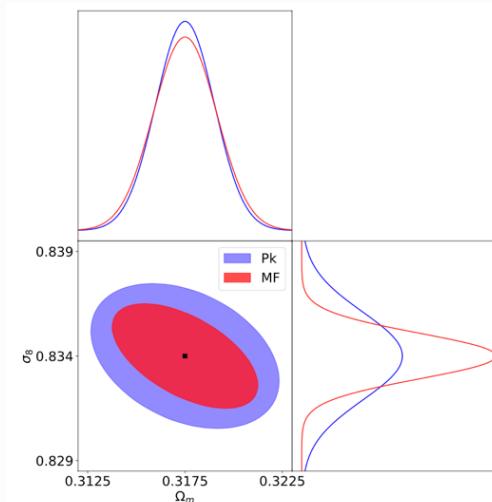
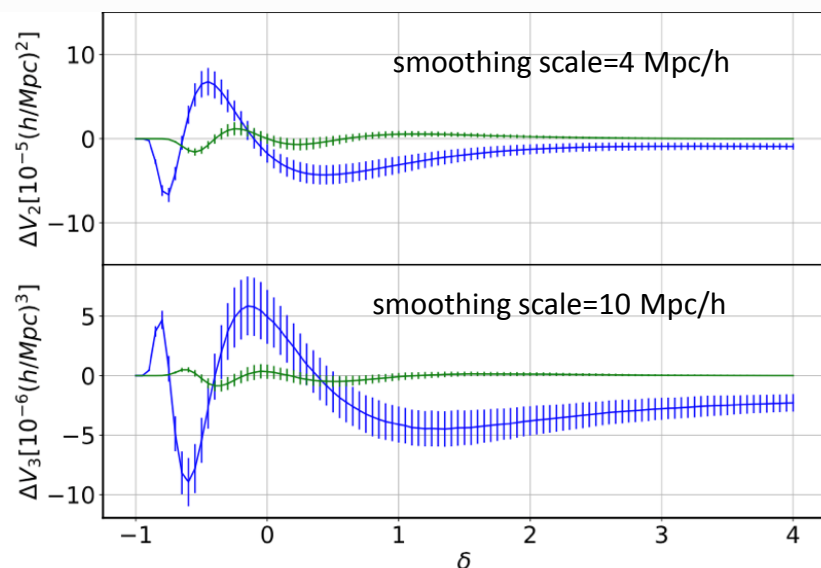
Simulation: TNG300-1

Next step: z dependence?

课题进展：宇宙网络结构研究

红移畸变效应对大尺度结构形态学特征的影响

- 大尺度结构形态学特征由四阶闵氏泛函 (MF) 完备描述, 可探测非线性统计信息, 且测量简单, 对传统的N阶统计量构成重要补充。
- 正如两点关联函数或功率谱会受到红移畸变效应(RSD)的影响, MF也会受到RSD的影响。研究这一影响对MF的宇宙学应用以及研究宇宙速度场都有重要意义。
- 借助Qujote模拟, 我们分析了RSD对大尺度结构形态学特征的影响, 特别是认证了由fingers-of-god效应引起的独特变化。

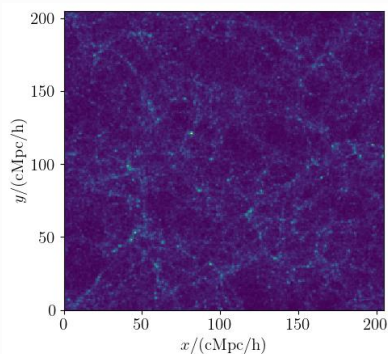


利用Fisher matrix方法, 我们预言了红移空间MF和功率谱对宇宙学参数的限制, 发现MF更有优势。

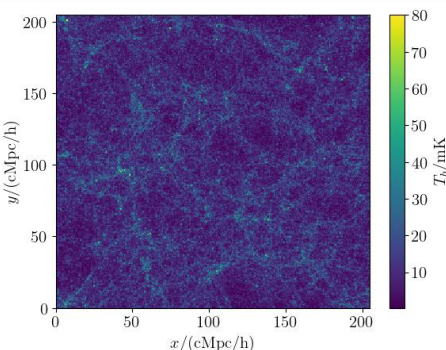
课题进展：宇宙学交叉关联性研究

光学-射电交叉关联

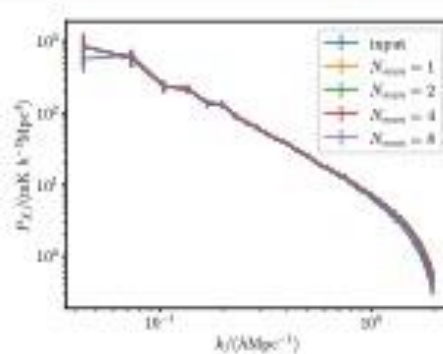
- CSST与FAST, SKA (2027)中性氢巡天交叉关联以提高中性氢信噪比，精确测量光学-中性氢相关谱功率，测定中性氢与红移和恒星分布的关系。
- 已构建了仿真模拟管线路程，利用数值模拟 IllustrisTNG 生成了CSST和FAST模拟数据，完成了CSST-FAST 光学-中性氢互相关功率谱模拟测量。
- 下一步计划：完成SKA模拟数据和CSST-SKA 光学-中性氢互相关功率谱模拟测量，并进而分析用CSST不同测光选择条件得到的不同星系样本与中性氢分析的相关性。



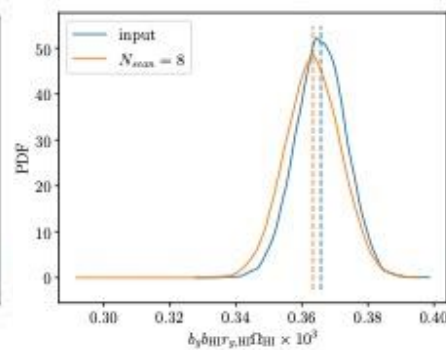
CSST 光学星系



FAST中性氢



cross-correlation

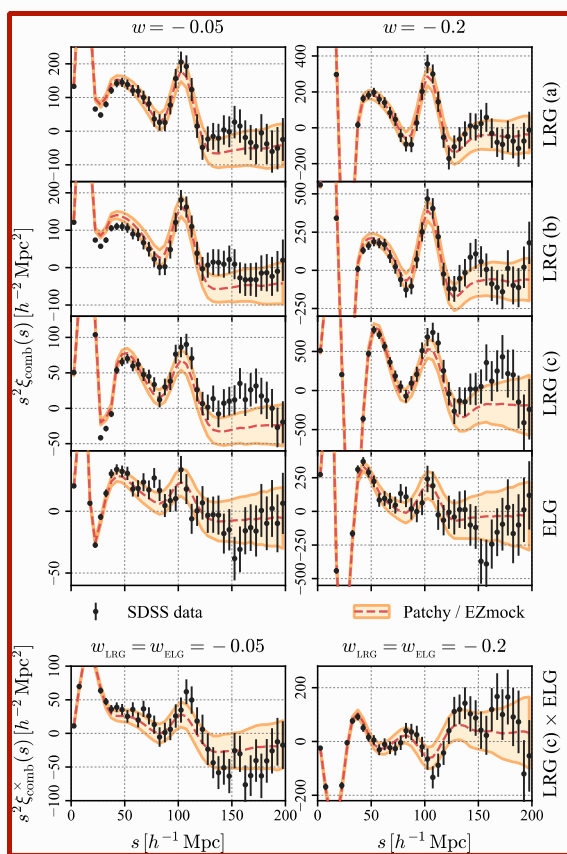


parameter measurement

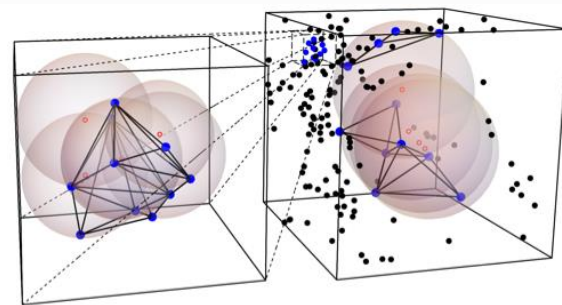
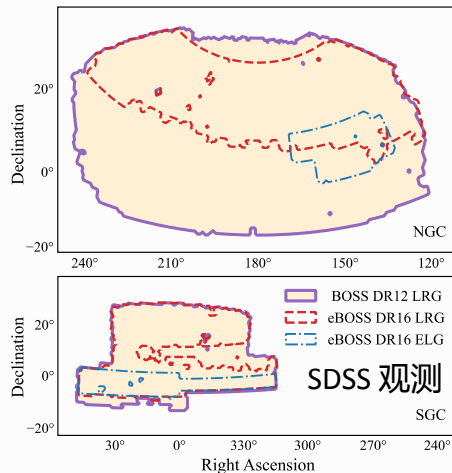
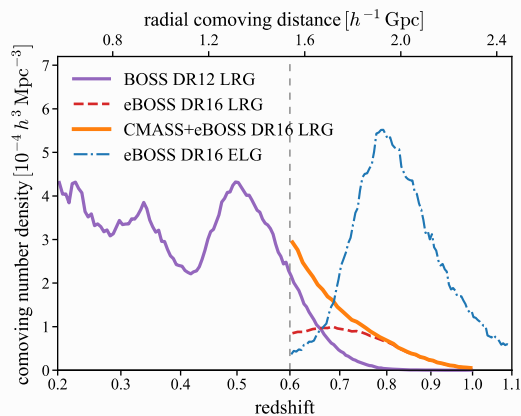
课题进展：宇宙学交叉关联性研究

星系-空洞交叉关联

- Delaunay triangulation Void FindEr (DIVE) 程序 (<https://github.com/cheng-zhao/DIVE>) 已完成。

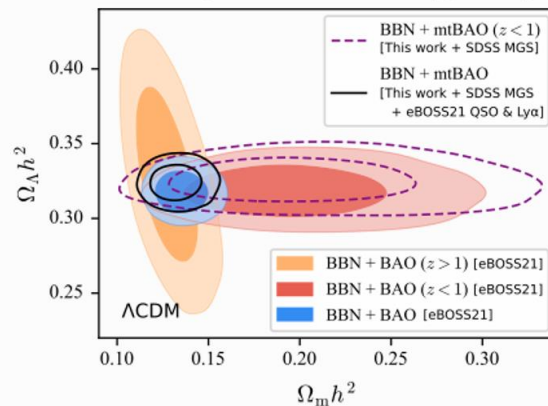


2点关联函数



星系 (蓝)、暗晕 (黑) 与空洞 (红)

mtBAO: multi-tracer BAO
eBOSS21: previous work (galaxy only)



课题进展：宇宙学交叉关联性研究

引力透镜剪切场与星系密度交叉关联

- 观测星系密度本身受引力透镜影响,交叉关联可用于校准multiplicative bias m 。
- 应用于Subaru HSC巡天, 清晰地探测到了这一信号，应用于宇宙学，可显著改进参数估计。

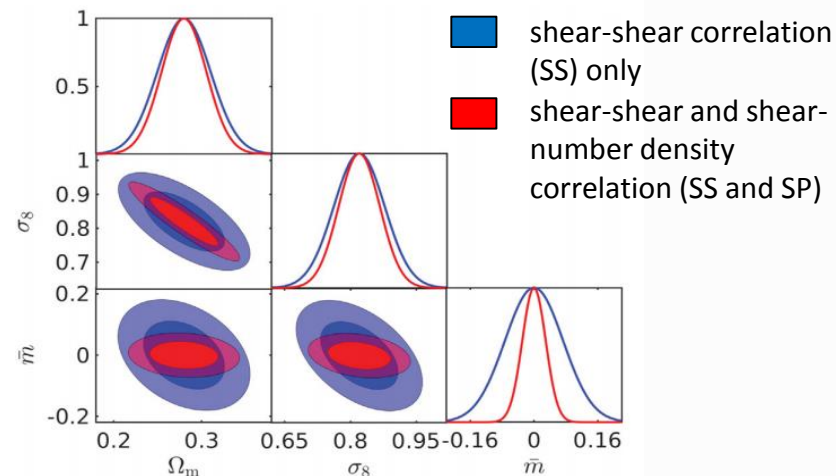
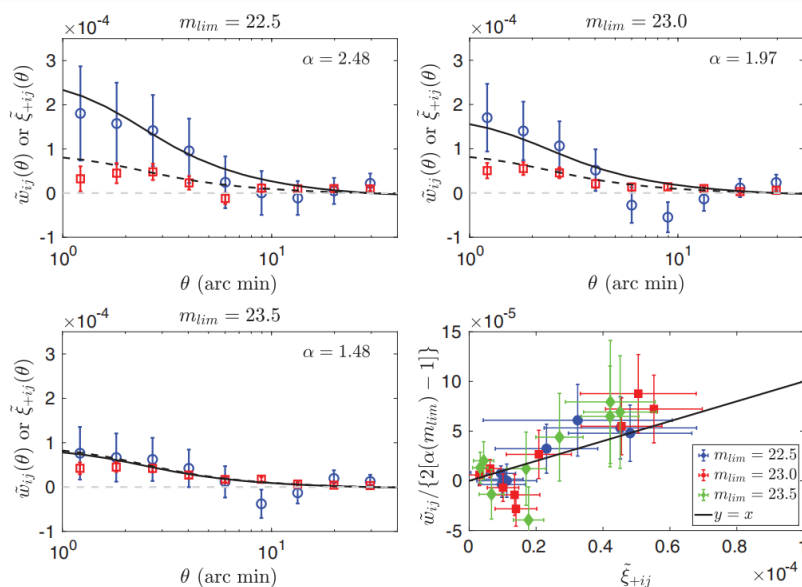


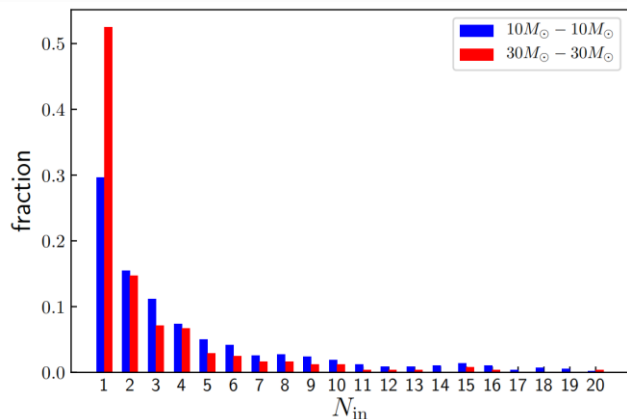
TABLE I. Forecast constraints for a 15000 deg² survey.

	SS only	SS and SP
Ω_m (68% C.L.)	0.032	0.027
σ_8 (68% C.L.)	0.059	0.051
$\bar{m}$ (68% C.L.)	0.075	0.032
S_8 (68% C.L.)	0.043	0.020

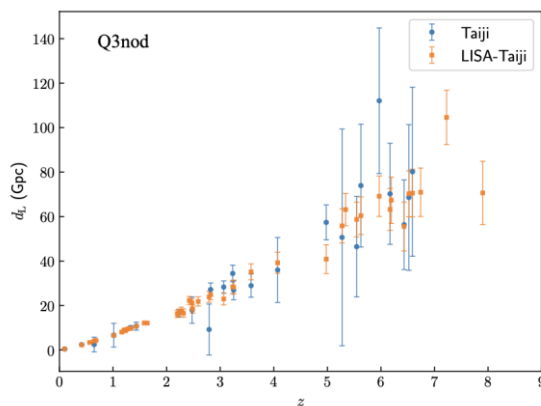
Credit: Liu et al., 2021, PRD, 103, 123504

课题进展：宇宙学交叉关联性研究

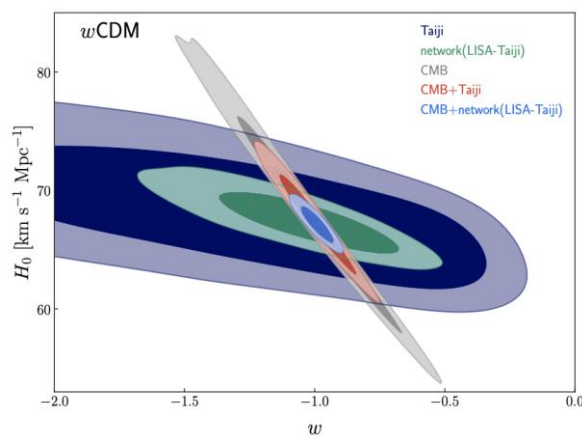
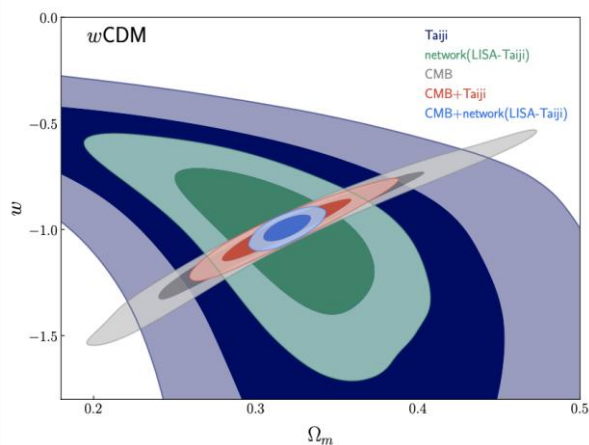
引力波源与星系关联和定位



定位体积内的星系数



光度距离测量



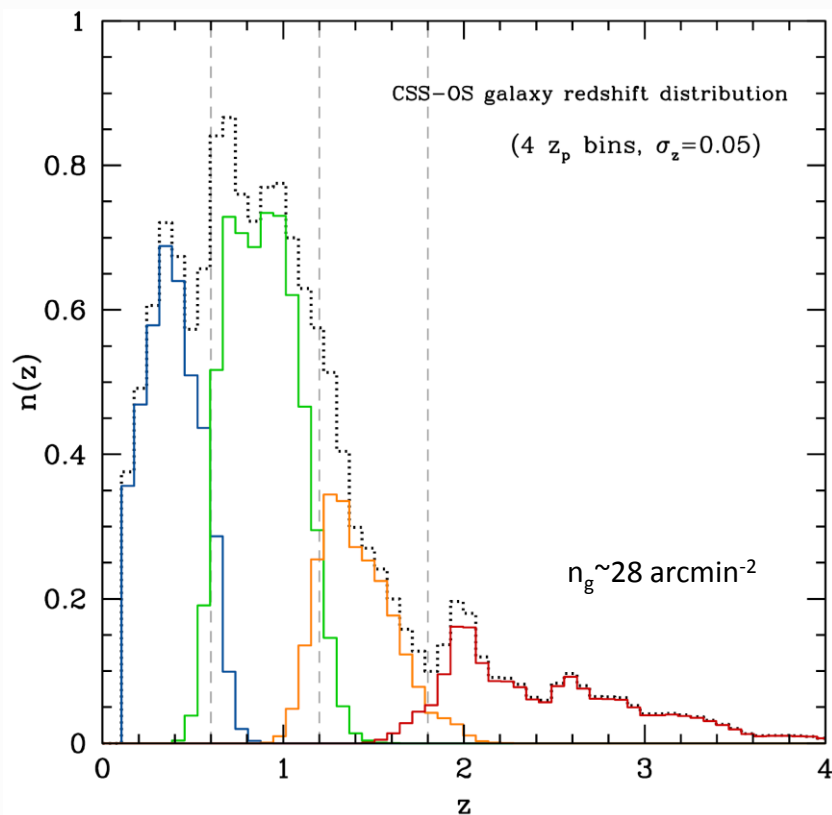
LISA-Taiji 宇宙学参数测量

- 模拟：400 deg², 0.15 ≤ z ≤ 0.25, 恒星质量黑洞并合200例、大质量黑洞并合500例, 450000 个星系, 随机选 1000 个作为宿主。
- 10M_⊙-10M_⊙ 双黑洞并合：近 30%引力波事件在定位体积内只包含一个星系, 与CSST星表对比可直接识别其宿主星系。
- 30M_⊙-30M_⊙ 双黑洞并合：约 50% 事件能被识别, 用引力波探测器网络比单个探测器提升定位精度。
- 标准汽笛宇宙学：用LISA-Taiji网络, H₀的测量精度可达接近1%。利用CMB+引力波网络, w的限制精度可达4%

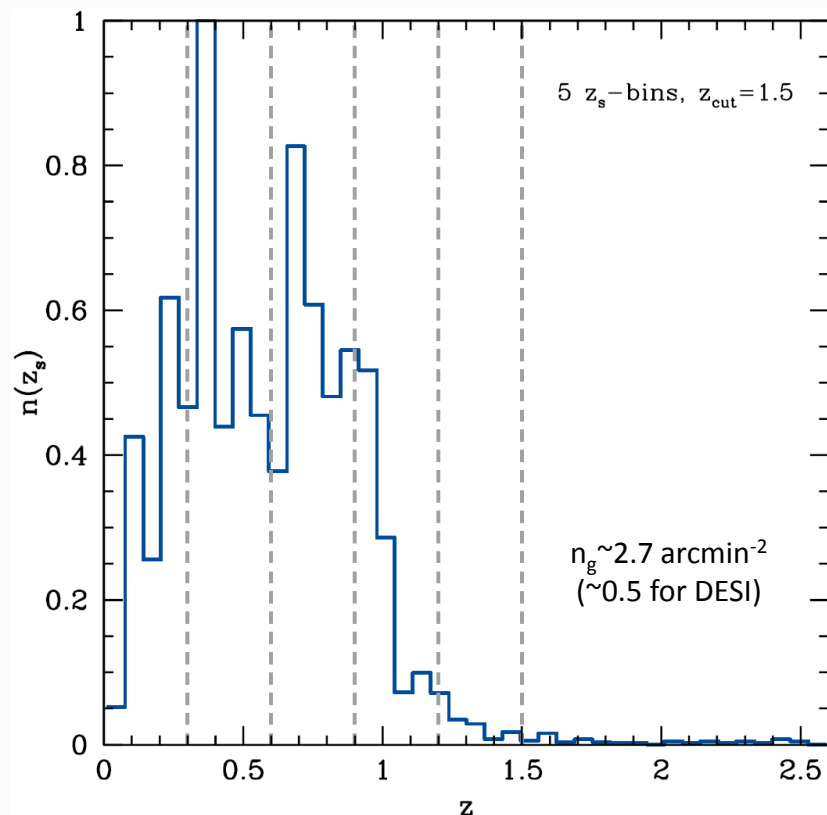
下一步：推广到CSST光学巡天所覆盖的全部面积17500 deg²

课题进展：宇宙学联合分析研究

CSST主要模拟数据



测光观测模拟数据基于COSMOS星表

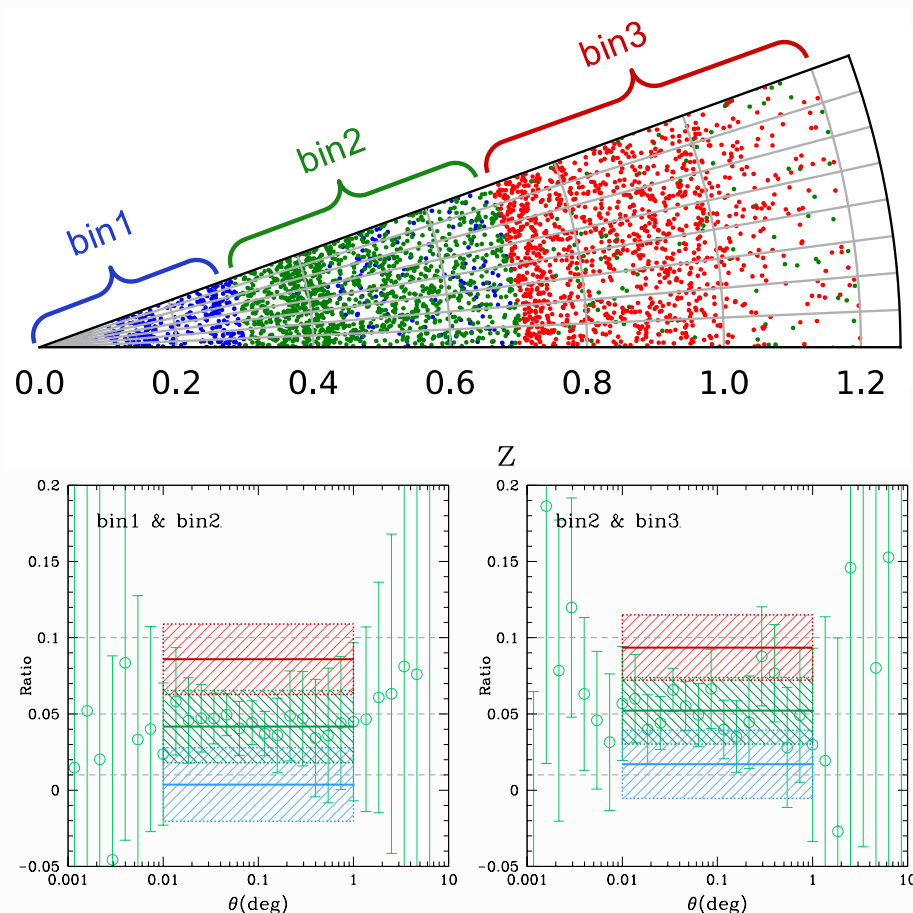


无缝光谱观测模拟数据基于zCOSMOS星表

Gong et al. ApJ, 883, 203 (2019)

课题进展：宇宙学联合分析研究

CSST光谱巡天闯入星系污染自消除方法研究



CSST H α & [OIII] 光谱巡天

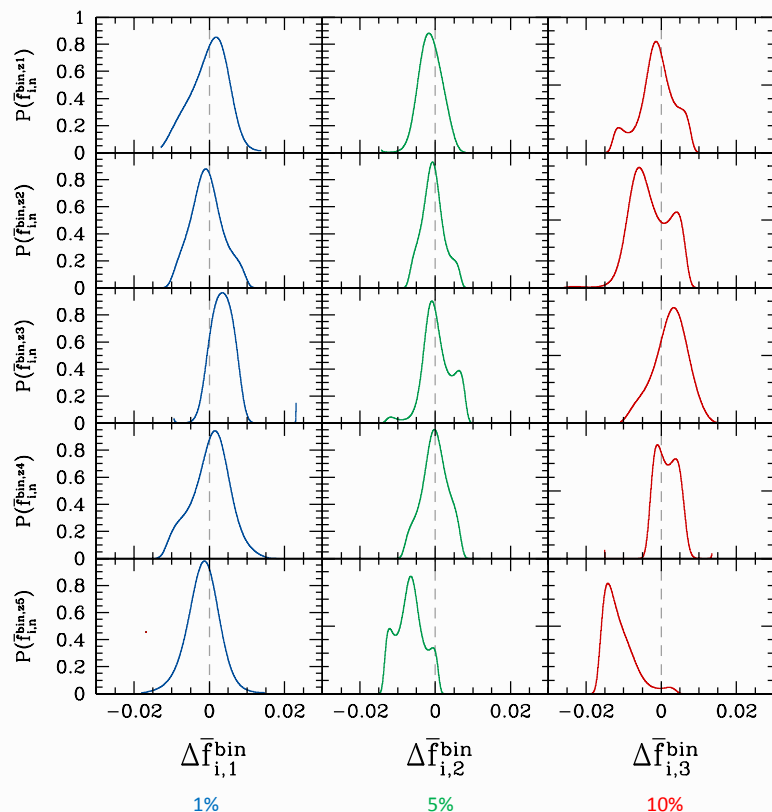
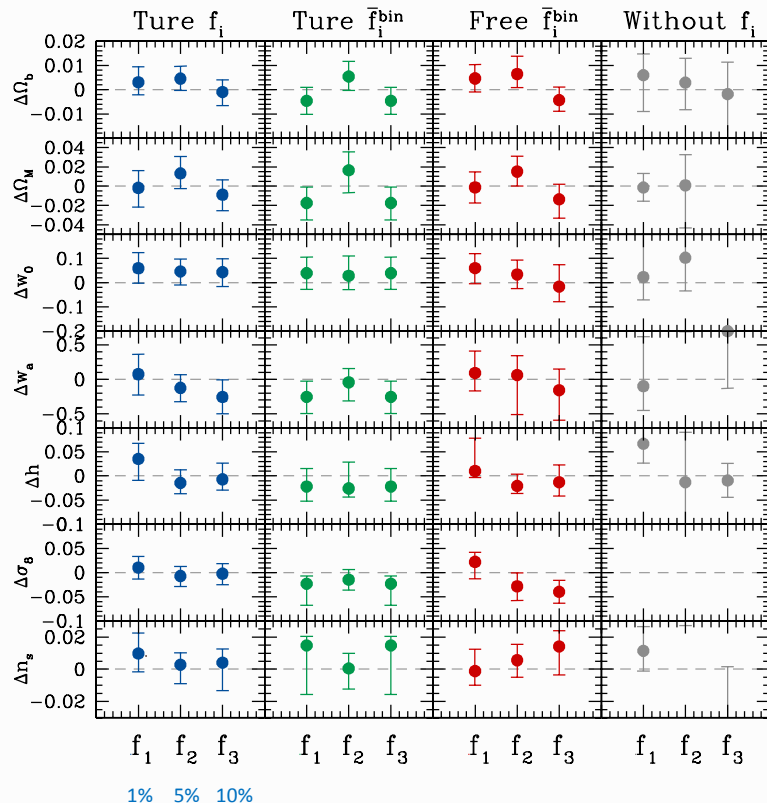
根据CSST无缝光谱观测生成模拟星表进行研究。

利用模拟数据和建议的 estimator 估计不同红移区间闯入星系的份数和可能范围。

$$\bar{r}_t = \frac{\sum_N a_n w_t^{ij}(\theta_n)}{\sum_N a_n w_t^j(\theta_n)}$$

课题进展：宇宙学联合分析研究

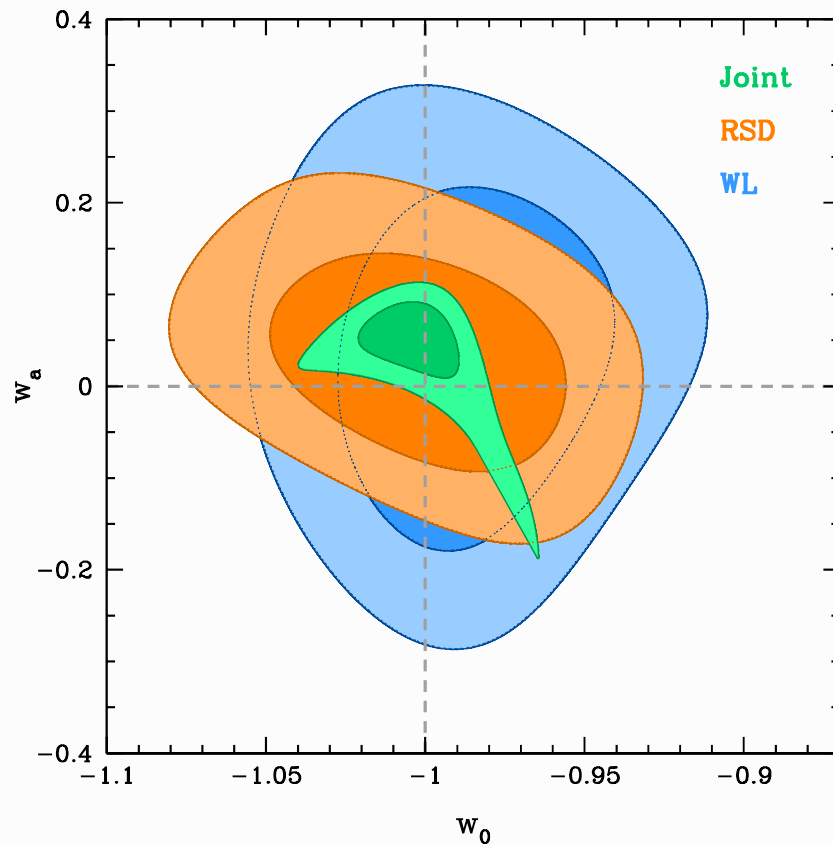
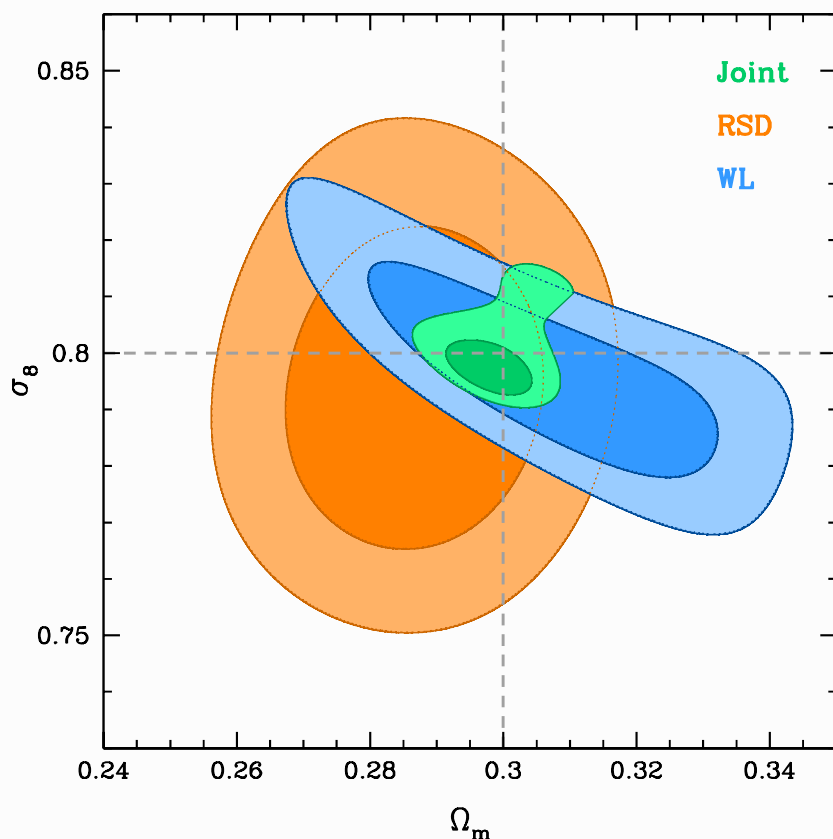
CSST光谱巡天闯入星系污染自消除方法研究



此方法可以有效的去除闯入星系污染，可以在闯入星系份数 $f_i < 1\% \sim 10\%$ 时精确的限制宇宙学参数，并在较大红移范围内估算闯入星系份数 (Gong et al., ApJ, 919, 12 (2021))。

课题进展：宇宙学联合分析研究

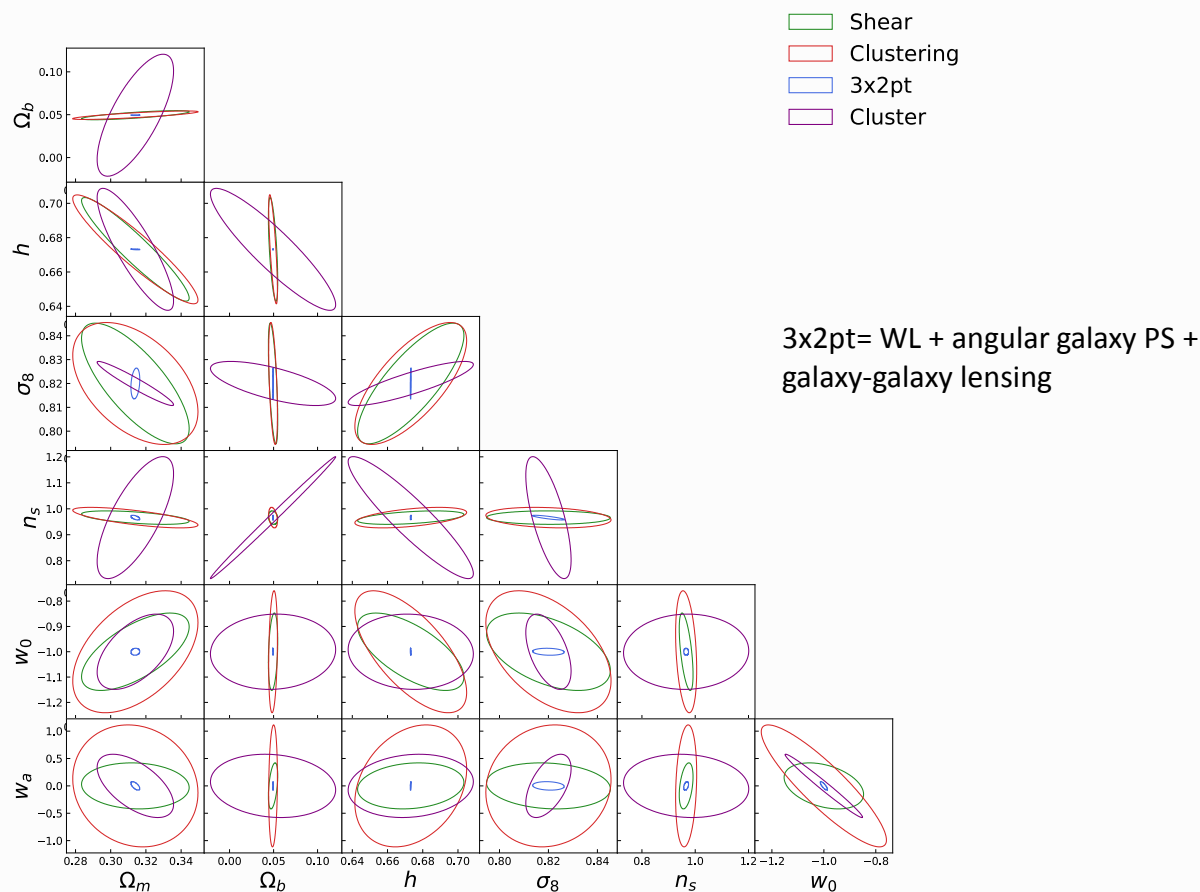
WL和RSD观测对暗能量和暗物质的限制



利用CSST的WL和RSD观测，可以将暗能量和暗物质相关参数限制到3%和5%以内，比现有观测的限制能力高一个量级（Gong et al. *ApJ*, 883, 203 (2019)）。

课题进展：宇宙学联合分析研究

CSST几个主要观测对宇宙学参数的限制

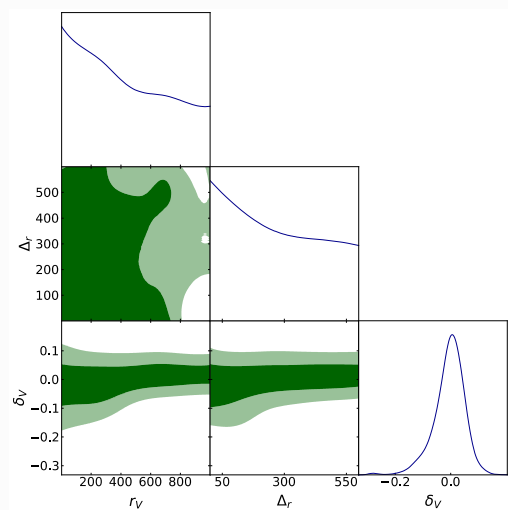


利用CSST的弱引力透镜、星系角功率谱、3x2pt和星系团计数观测对各宇宙学参数的限制，比现有观测的限制能力高至少一个量级。

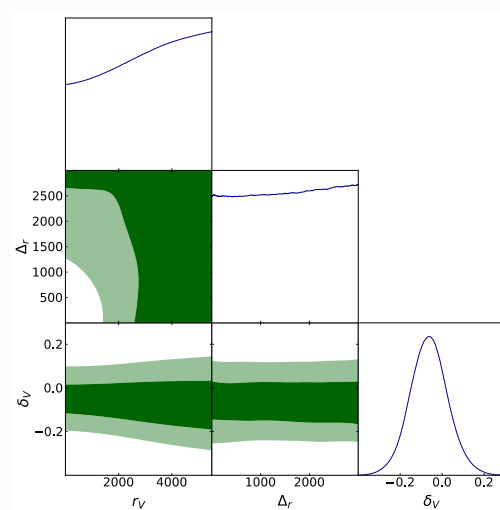
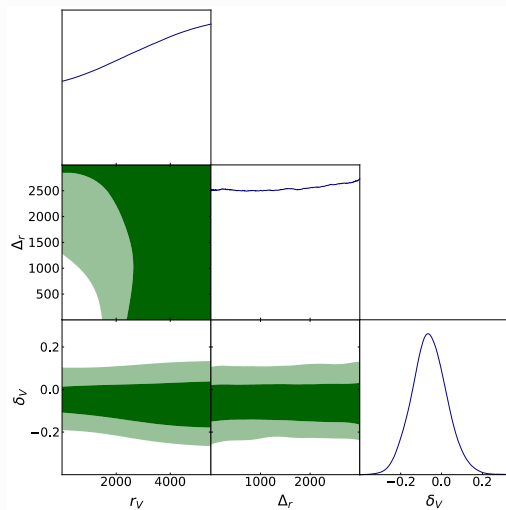
课题进展：宇宙基础物理及其检验

宇宙学空洞

- 从超新星数据中没有发现LambdaLTB模型下用GBH函数表征的大空洞的证据，但是仍需全天星系巡天项目确认 (*Rong-Gen Cai, Jia-Feng Ding, Zong-Kuan Guo, Shao-Jiang Wang, Wang-Wei Yu (2012.08292 PRD.103.123539)*) 。



空洞半径



空洞深度

课题进展：宇宙基础物理及其检验

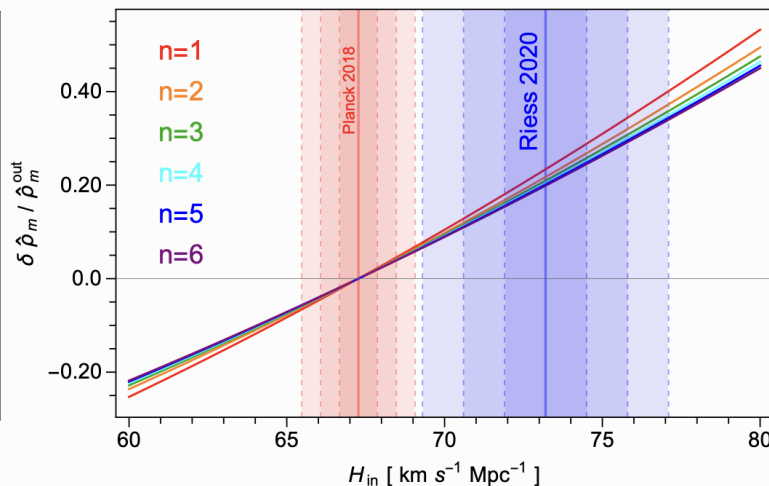
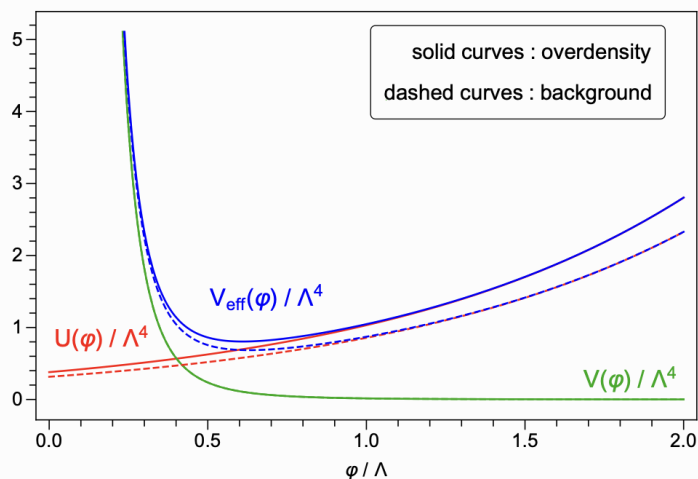
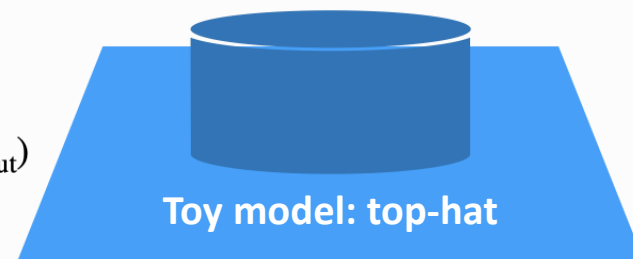
变色龙暗能量

有效势 $\downarrow$ Peebles-Ratra势 $V(\varphi) = \alpha \Lambda^4 \left(\frac{\Lambda}{\varphi} \right)^n$

$V_{\text{eff}}(\varphi) = V(\varphi) + \Omega(\varphi) \hat{\rho}_m$ $\leftarrow$ 物质场密度 $\hat{\rho}_m^{\text{in}} > \hat{\rho}_m^{\text{out}}$

$\uparrow$ 变色龙场 $\uparrow$ 伸缩子耦合 $\Omega(\varphi) = \exp\left(\frac{\varphi}{\Lambda}\right)$

$\Rightarrow V_{\text{eff}}(\langle\varphi\rangle_{\text{in}}) > V_{\text{eff}}(\langle\varphi\rangle_{\text{out}})$
 $\Rightarrow H_{\text{in}} > H_{\text{out}}$

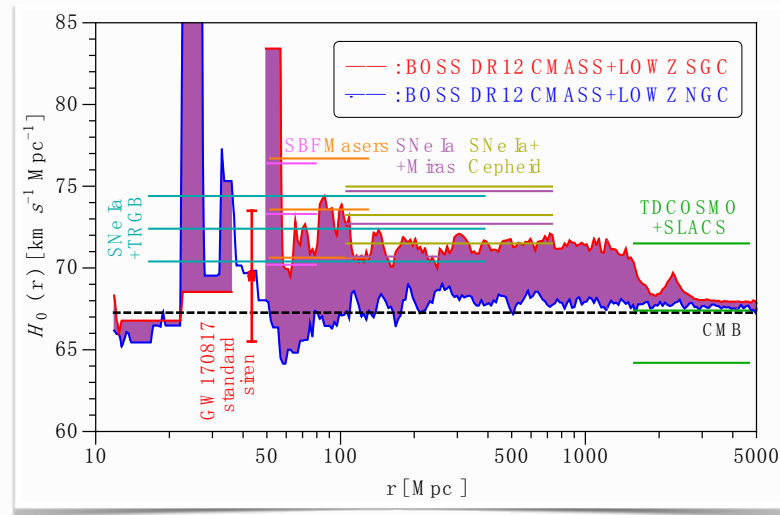
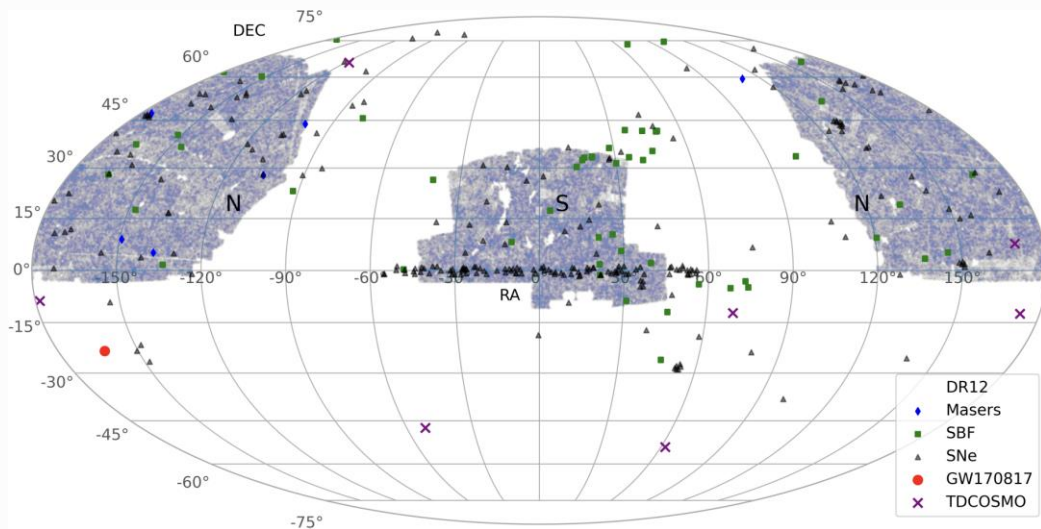


Rong-Gen Cai, Zong-Kuan Guo, Li Li, Shao-Jiang Wang, Wang-Wei Yu (2102.02020
PRD.103.L121302)

课题进展：宇宙基础物理及其检验

变色龙暗能量

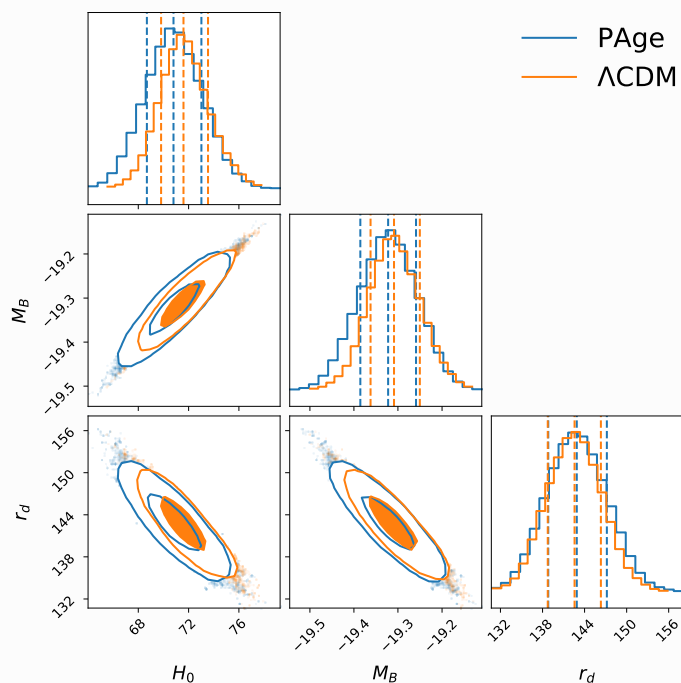
- 预测南半球物质密度稍高，其局部哈勃常数较大；而观测到的超新星大部分位于南半球，用其测量得到的哈勃常数也确实偏大，但是未来我们需要全天星系巡天项目对星系bias因子更为精确的测量。



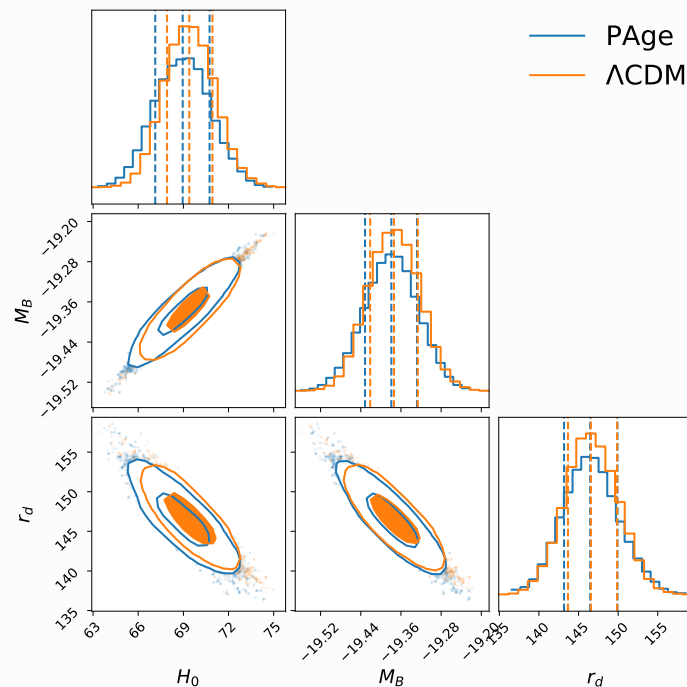
课题进展：宇宙基础物理及其检验

晚期模型无关检验

- 利用一种模型无关对晚期宇宙演化的参数化方法，使用标准烛光(SN)+标出尺子(BAO)+标准时钟(CC)数据，对 (H_0, M_B, r_d) 参数联合拟合，发现晚期宇宙相对标准宇宙模型的偏离很小 (Rong-Gen Cai, Zong-Kuan Guo, Shao-Jiang Wang, Wang-Wei Yu, Yong Zhou (2107.13286))。



CC数据的BC03数据集



CC数据的MS11数据集



谢谢！