

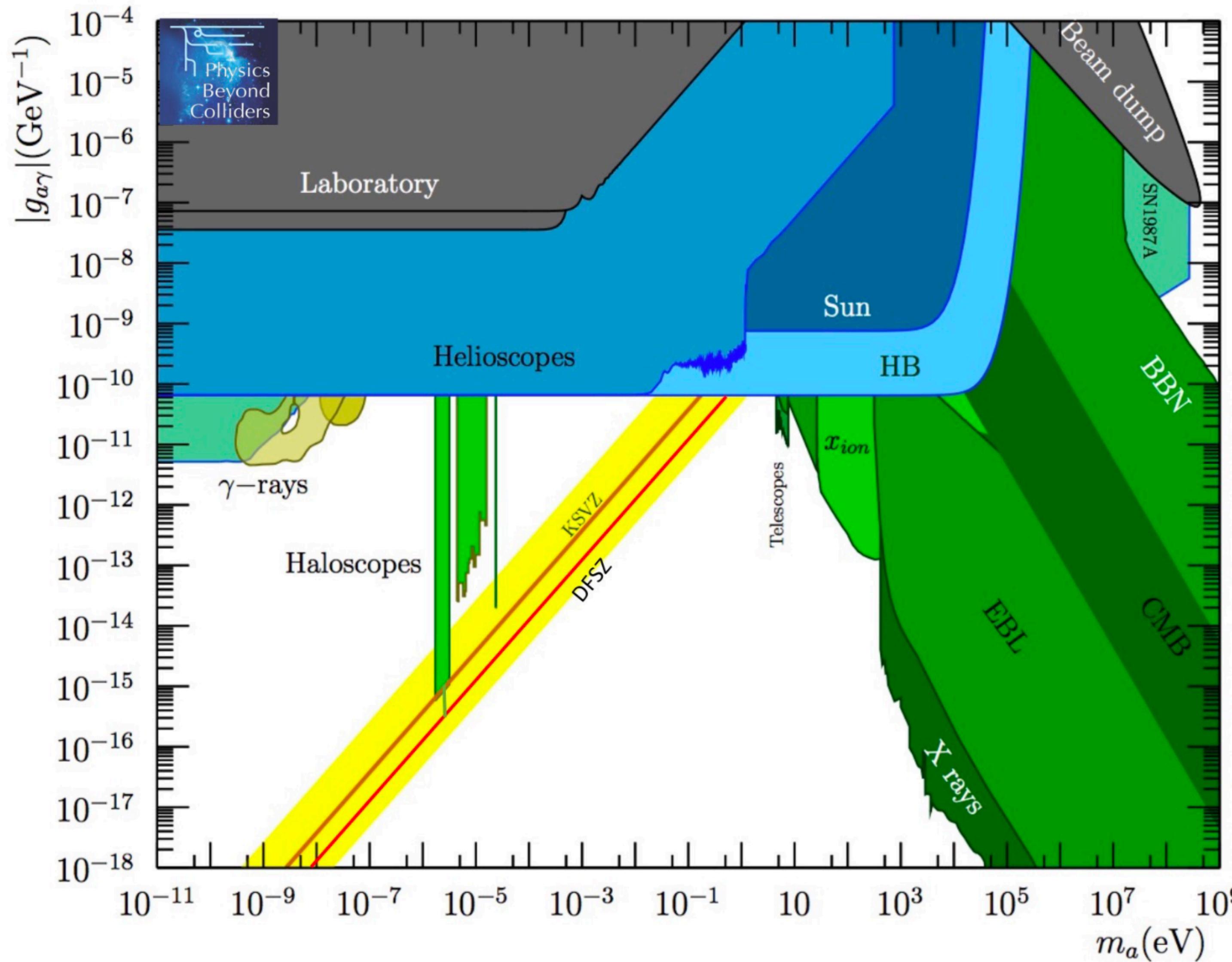
Searching for Axion-like Particles with Cosmic shear and Line Intensity Maps

Shirasaki (2021) PRD, 103, 103014 ; arXiv:2102.00580

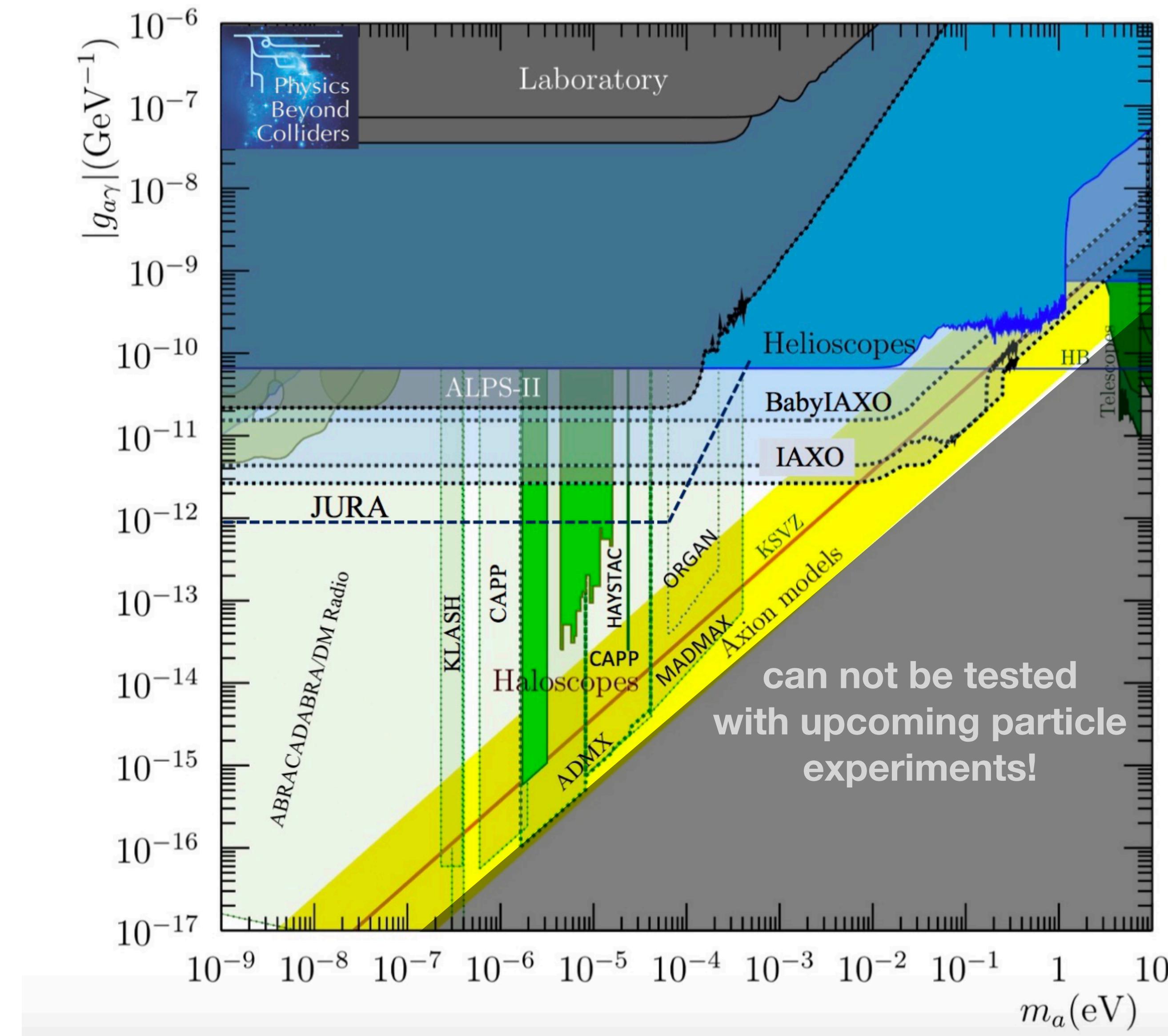
What are Axion-like particles (ALPs)?

- ALPs = pseudo-scalar bosons
 - 様々なBeyond-Standard-Model (e.g. string theory) で予言される
 - ALPsの一般的な性質：光子への崩壊 ($a \rightarrow \gamma + \gamma$)
 - 2つのパラメタ：particle mass m_a , 崩壊結合定数 $g_{a\gamma\gamma}$
 - QCD axions では $m_a \propto g_{a\gamma\gamma}$ だが、ALPsでは二つは独立なパラメタ
- ALPs は暗黒物質かもしれない。まだ見つかっていない。**見つけたい。**

Current constraints of ALPs



... and Future



→ 今回は天文観測を使って
1eV付近のALPsを
深掘りできることを示す

Our Idea

Testing the “darkness” of dark matter

- ALPsの崩壊で得られる光子の周波数

$$m_a c^2 = 2h\nu \rightarrow \nu = 1.21 \times 10^{14} (m_a/1 \text{ eV}) \text{ Hz}, \lambda = 2460 (m_a/1 \text{ eV})^{-1} \text{ nm}$$

- ALPs = 暗黒物質なら, ALPsは大規模構造を形成する
- 大規模構造に沿って特定の周波数の光子が来ているかを見つければ良い
 - 大規模構造のトレーサー: **Cosmic shear** (弱重力レンズ効果)
 - 特定の周波数の光子: **Line intensity mapping** (輝線強度マッピング観測)

Cosmic shear (weak lensing) maps

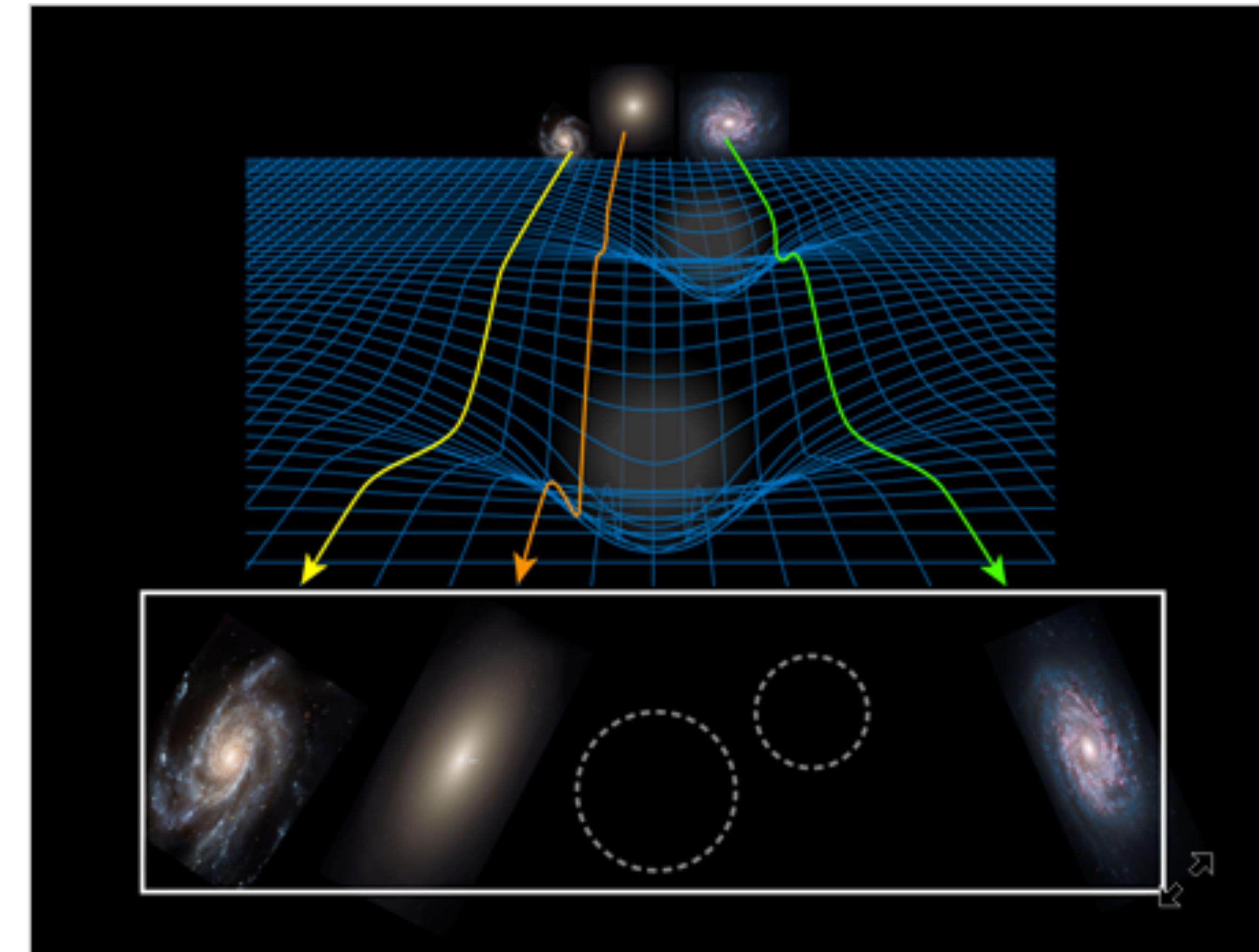
- 手前の重力源により、背景銀河の形が歪む
- 歪みの度合い

視線方向共動距離

$$\int d\chi \, W_{\text{lens}}(\chi) \delta_m(\chi \vec{\theta}, \chi)$$

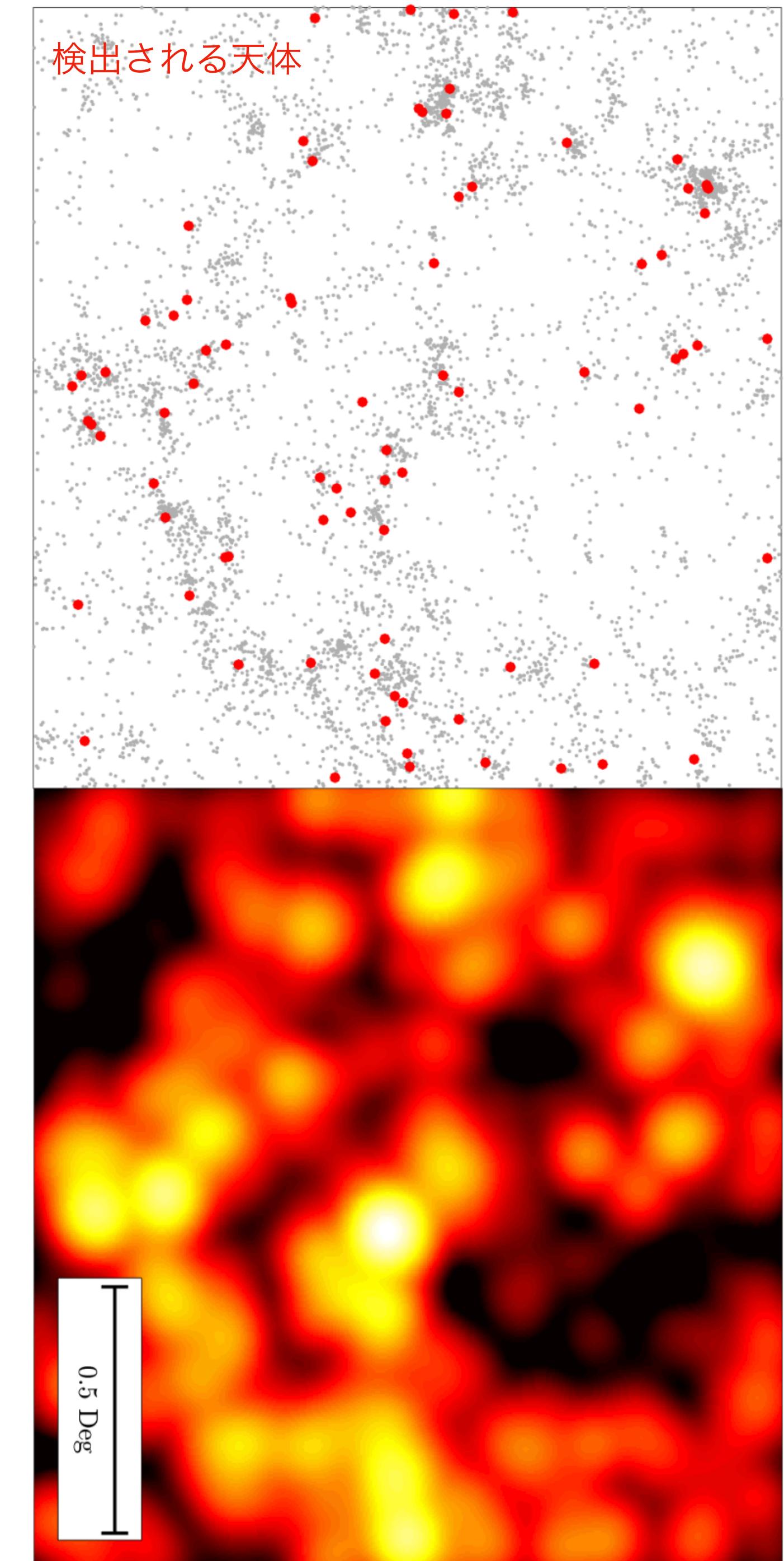
全物質のゆらぎ (暗黒物質含む)

- 複数の観測計画で主要なターゲットになっている (KiDs, HSC, DES, Roman, Rubin LSST, Euclid, ...)



Line Intensity mapping (LIM)

- Flux limit 以下のすべてのソースの輻射の足しあわせ
- 個別には検出できない暗い天体の研究に使われる
- 観測は特定の周波数ごとに集光
 - いろんな輝線の輻射があると, 違う赤方偏移の構造が重なって見える
- H α : 656.28 nm, OIII: 500.7 nm → 1000 nm の周波数での観測では, $z=0.5$ (H α) と $z=1$ (OIII)の構造が重なる



Modeling cross correlations

$$\langle \text{WL}(\vec{\theta}_1) \text{LIM}(\vec{\theta}_2) \rangle \rightarrow C_{\text{WL-LIM}}(\ell)$$

- 周波数 ν におけるIntensityの重ね合わせ $I_\nu(\theta) = \frac{1}{4\pi} \int \frac{d\chi}{1+z(\chi)} \epsilon(\chi \vec{\theta}, \chi, (1+z)\nu)$
 - $\epsilon(\vec{x}, \nu)$: Volume emissivity (放射エネルギー/単位時間/単位エネルギー幅/単位体積)
- ALPs 崩壊率: $\Gamma = \frac{g_{a\gamma\gamma}^2 m_a^3}{64\pi}$, rest frameでの光子の周波数 $\nu_0 = m_a/(2h)$
- 観測されるintensity mapの周波数幅 $\Delta\nu \gg$ 輝線幅, ALPs = 暗黒物質とすると
 - $\epsilon_{\text{ALP}}(\vec{x}, \nu) = \Gamma \rho_{\text{DM}}(\vec{x}) \delta_D(\nu - \nu_0)$
 - $\Gamma = 7.556 \times 10^{-26} \text{ sec}^{-1} (g_{a\gamma\gamma}/10^{-10} \text{ GeV}^{-1})^2 (m_a/1 \text{ eV})^3$
 - $\nu_0 = 1.21 \times 10^{14} \text{ Hz} (m_a/1 \text{ eV})$
- 典型的な周波数幅 $\Delta\nu/\nu \sim O(10)$, ビリアル速度分散による輝線幅 $\delta\nu/\nu \simeq \sigma_{\text{vir}}/c \sim O(10^{-3})$ at $10^{13} M_\odot$

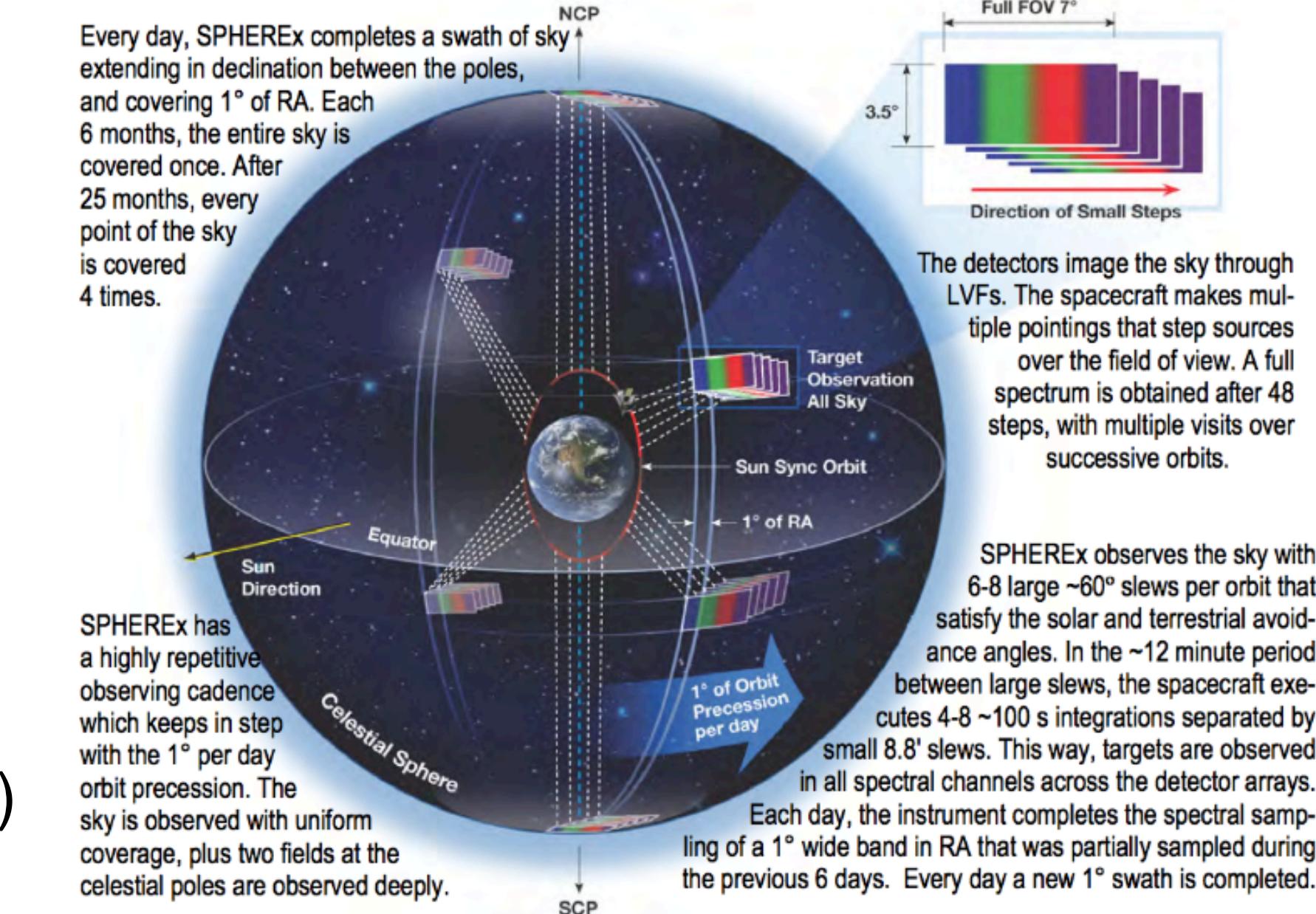
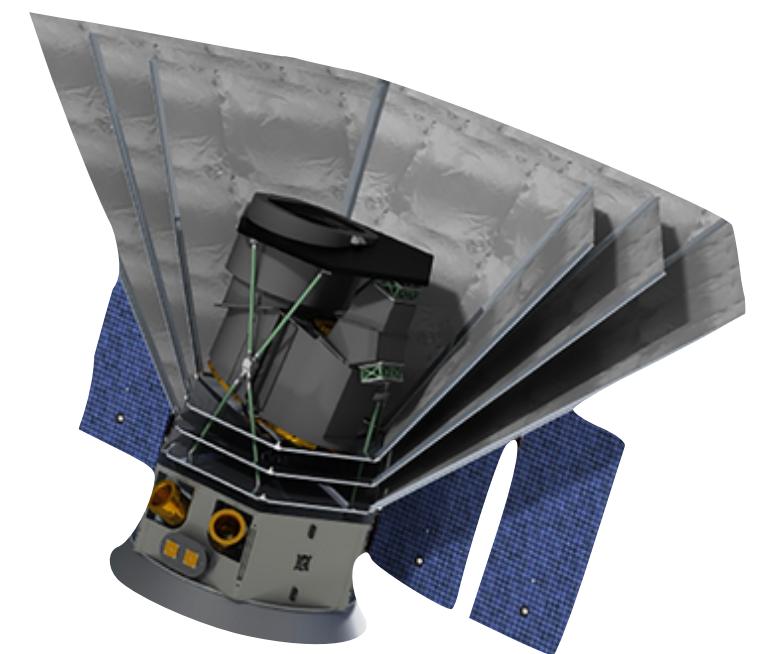
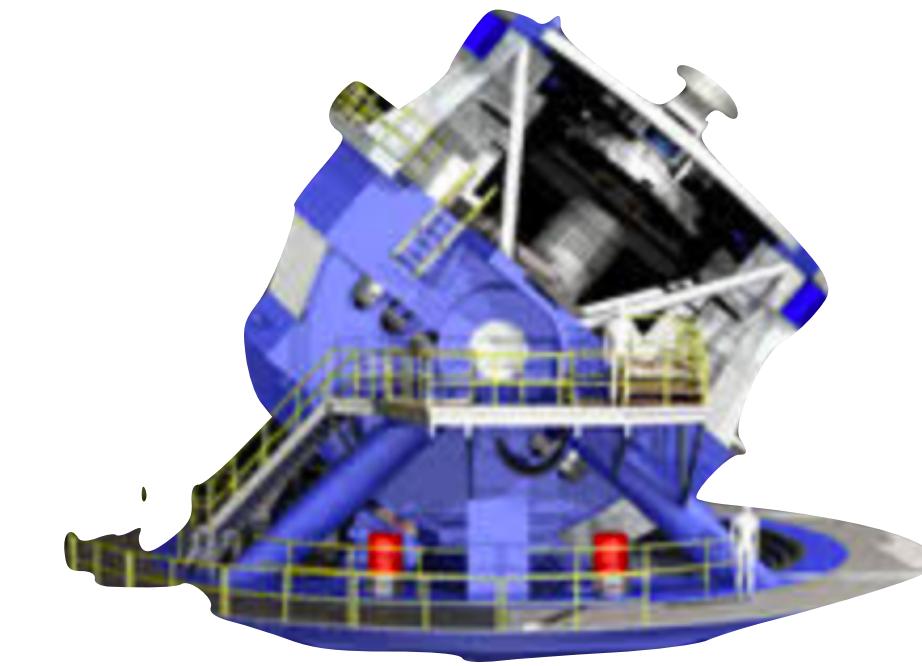
Modeling cross correlations

- 重力レンズ観測量 $\kappa(\vec{\theta}) = \int d\chi W_{\text{lens}}(\chi) \delta_m(\chi \vec{\theta}, \chi)$
 - 周波数 ν におけるALPs decayからくる寄与 $I_{\nu, \text{ALP}}(\theta) = \int d\chi W_{\text{ALP}}(\chi, \nu) \left(1 + \delta_{\text{DM}}(\chi \vec{\theta}, \chi) \right)$
 - $W_{\text{ALP}}(\chi, \nu) = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\Omega_{\text{DM}} \rho_{\text{crit},0}}{\nu_0 H(z)} \delta_D(\chi - \chi_0)$ where χ_0 = comoving distance to $z_0 = \nu_0/\nu - 1$
 - Limber近似により, cross power spectrum $\delta_{\text{DM}} \simeq f_{\text{DM}} \delta_m$ Dark matter fraction ~ 0.8
 - $C_{\text{ALP}-\kappa}(\ell) = \int d\chi \frac{W_{\text{ALP}}(\chi) W_{\text{lens}}(\chi)}{\chi^2} P_{\text{DM-m}}\left(\frac{\ell}{\chi}, z(\chi)\right) \simeq \frac{W_{\text{ALP}}(\chi_0) W_{\text{lens}}(\chi_0)}{\chi_0^2} f_{\text{DM}} P_m\left(\frac{\ell}{\chi_0}, z_0\right)$
- DMとtotal matterの3D cross power spectrum total matterの3D cross power spectrum

Future datasets

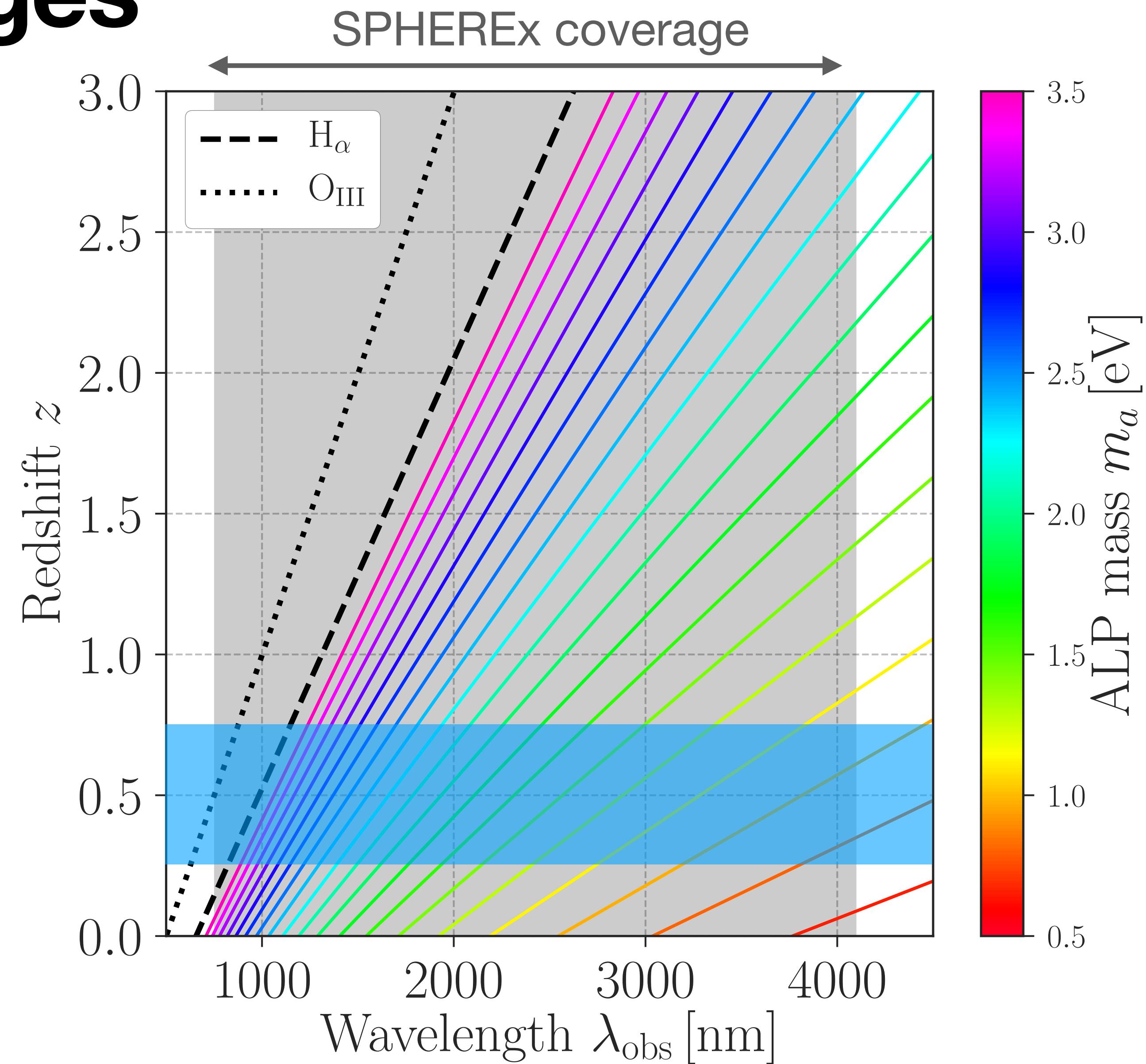
Vera Rubin LSST / SPHEREx

- LSST
 - 地上望遠鏡による銀河撮像観測
 - 18000 平方度をカバー, 銀河密度 $n_{\text{source}} = 26 \text{ arcmin}^{-2}$, 銀河楕円率分散 0.26
 - $p(z) \propto z^\alpha \exp \left[-\left(\frac{z}{z_m} \right)^\beta \right]$, where $\alpha = 1.27, \beta = 1.02, z_m = 0.50$
- SPHEREx
 - 宇宙望遠鏡による赤外線領域の狭バンド観測
 - $\lambda = 750 - 4100 \text{ nm}, \Delta\nu/\nu = (41.5)^{-1}$, 角度分解能 (ピクセルサイズ) = 6.2"
 - 全天モードを仮定 : limiting magnitude = 18.5 AB magnitude (5-sigma level)

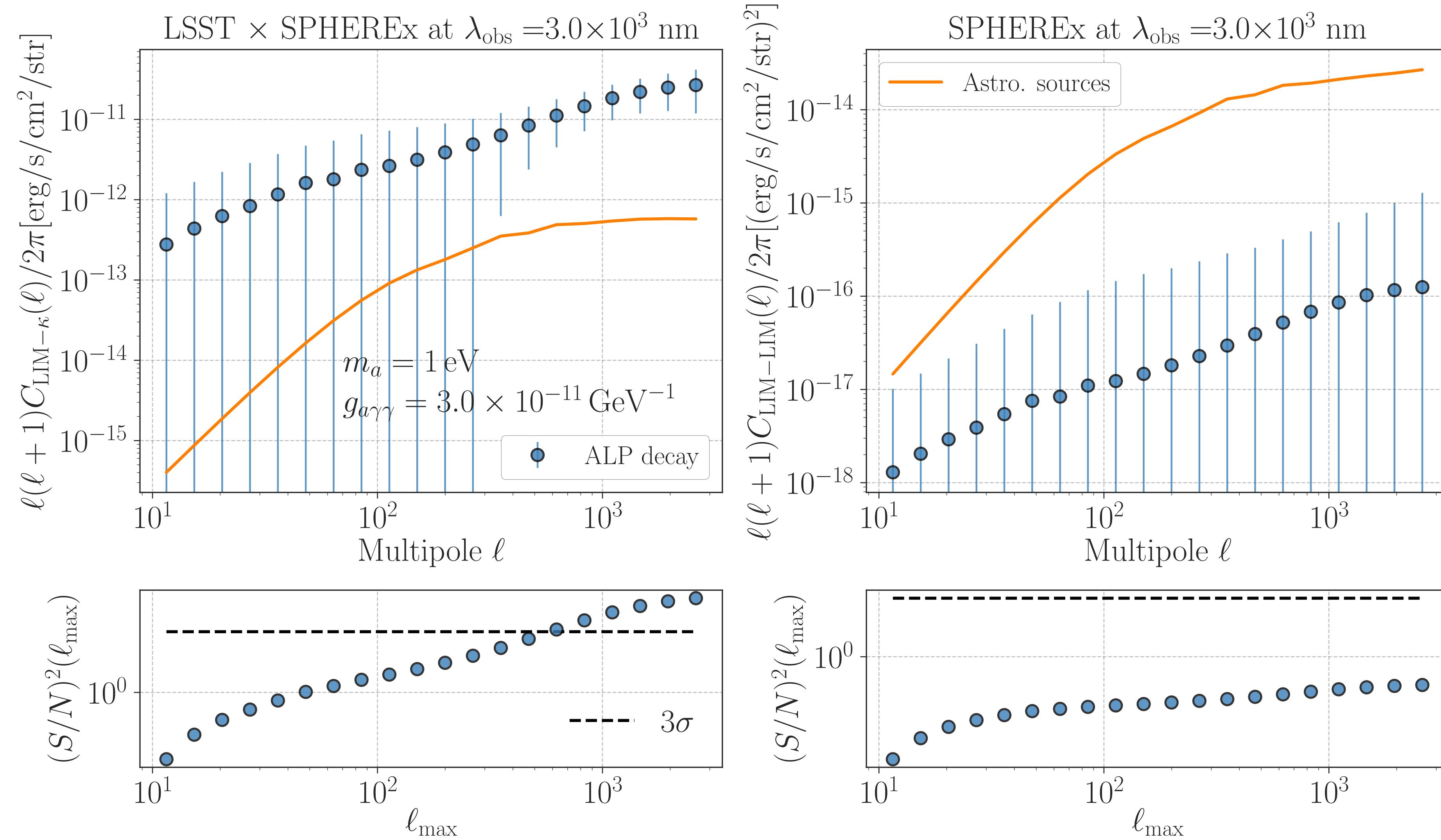


Relevant redshift ranges

- SPHERExでの主要な輝線 : H α : 656.28 nm, OIII: 500.7 nm
- 観測波長の範囲に入りそうなALPs
 $0.5 < m_a [\text{eV}] < 3.5$
- LSSTでの重力レンズ観測では、z=0.3-0.6くらいの大規模構造を見る
- 観測波長 2000 nmでは、H α (OIII)はz=2 (z=3)の構造を見る
- 波長 2000 nm とレンズの相関 → 1250 - 1538 nm の未知の輝線がある可能性



Power of cross correlations



Astro. source modeling
based on a halo model
+ estimates of mean
intensity
(arXiv:1711.09902)

LIMの自己相関では天体起源の信号が卓越 / LIM - LSS の相互相関は ALPs のサーチに最適

Expected signal-to-noise ratio (S/N)

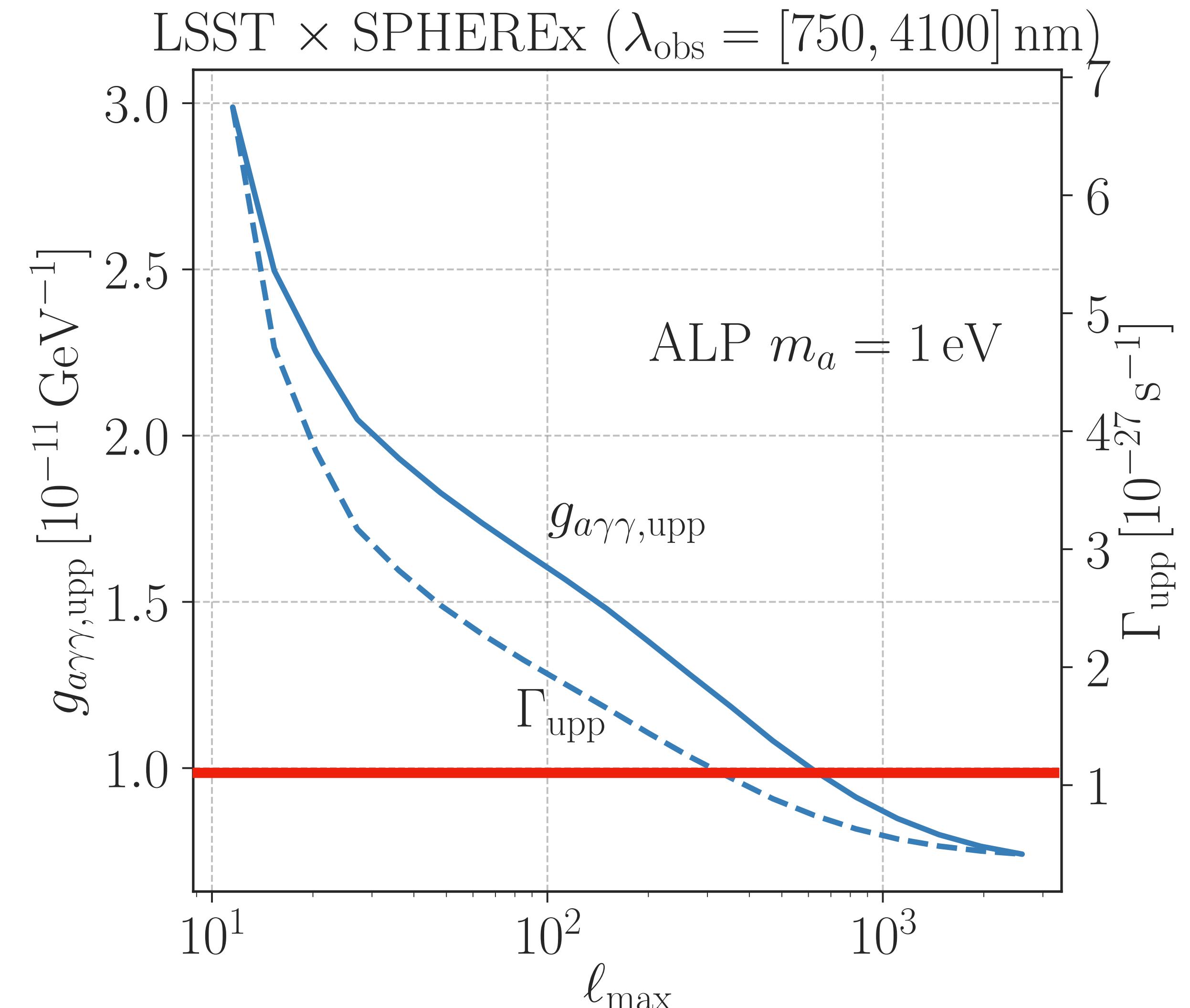
- $\nu_{\min} < \nu < \nu_{\max}$ での S/N

$$(S/N)^2 = \sum_{\nu, \nu'} C_{\text{ALP}-\kappa}(\ell_i | \nu) \text{cov}^{-1} C_{\text{ALP}-\kappa}(\ell_j | \nu')$$

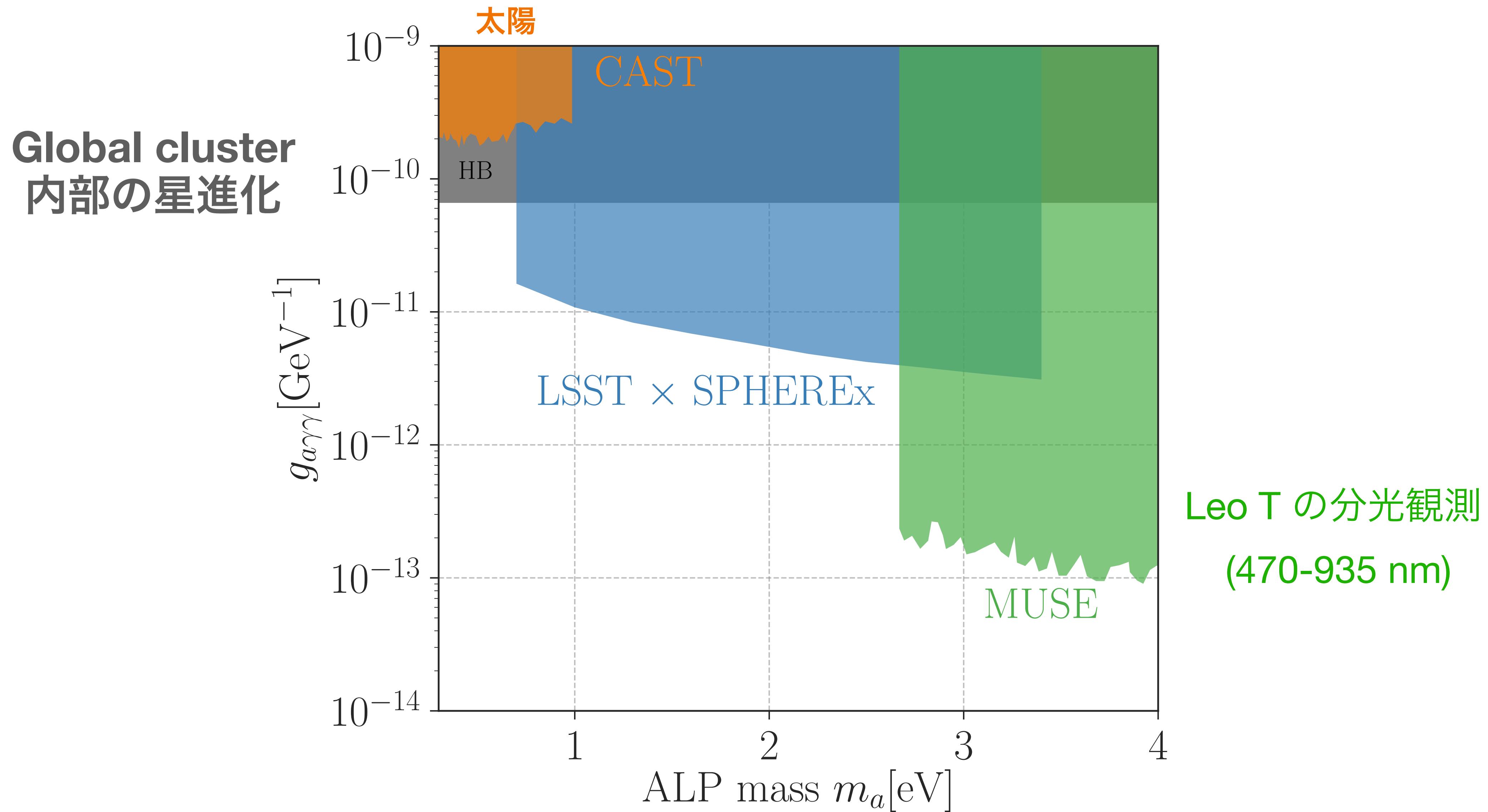
- $C_{\text{ALP}-\kappa} \propto \Gamma \propto g_{a\gamma\gamma}^2$ より

$$(S/N) = \left[\frac{\Gamma}{\Gamma_{\text{upp}}(\ell_{\max})} \right] = \left[\frac{g_{a\gamma\gamma}}{g_{a\gamma\gamma, \text{upp}}(\ell_{\max})} \right]^2$$

- 1 eV ALPs なら, $g_{a\gamma\gamma} \sim O(10^{-11}) \text{ GeV}^{-1}$ まで見えそう
- ALPs with 1 eV and $g_{a\gamma\gamma} \sim O(10^{-11}) \text{ GeV}^{-1}$ can explain the DM abundance and inflation (Daido+2018)



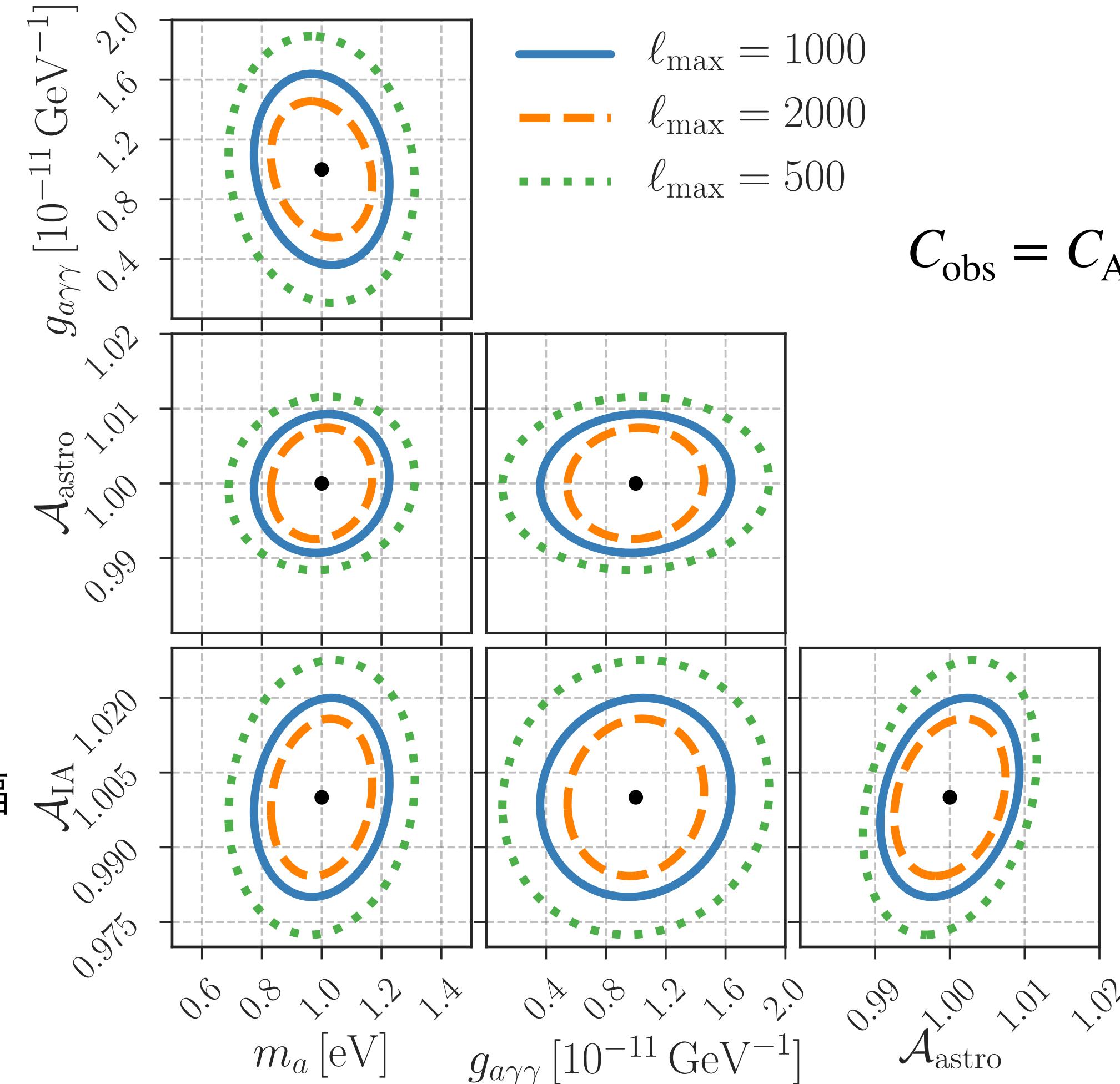
Expected upper limits of ALP decays



1-sigma Fisher circles

LSST × SPHEREx

18000 deg², $\lambda_{\text{obs}} = [750, 4100]$ nm



$$C_{\text{obs}} = C_{\text{ALP-lens}} + C_{\text{ALP-IA}} + C_{\text{astro-lens}} + C_{\text{astro-IA}}$$

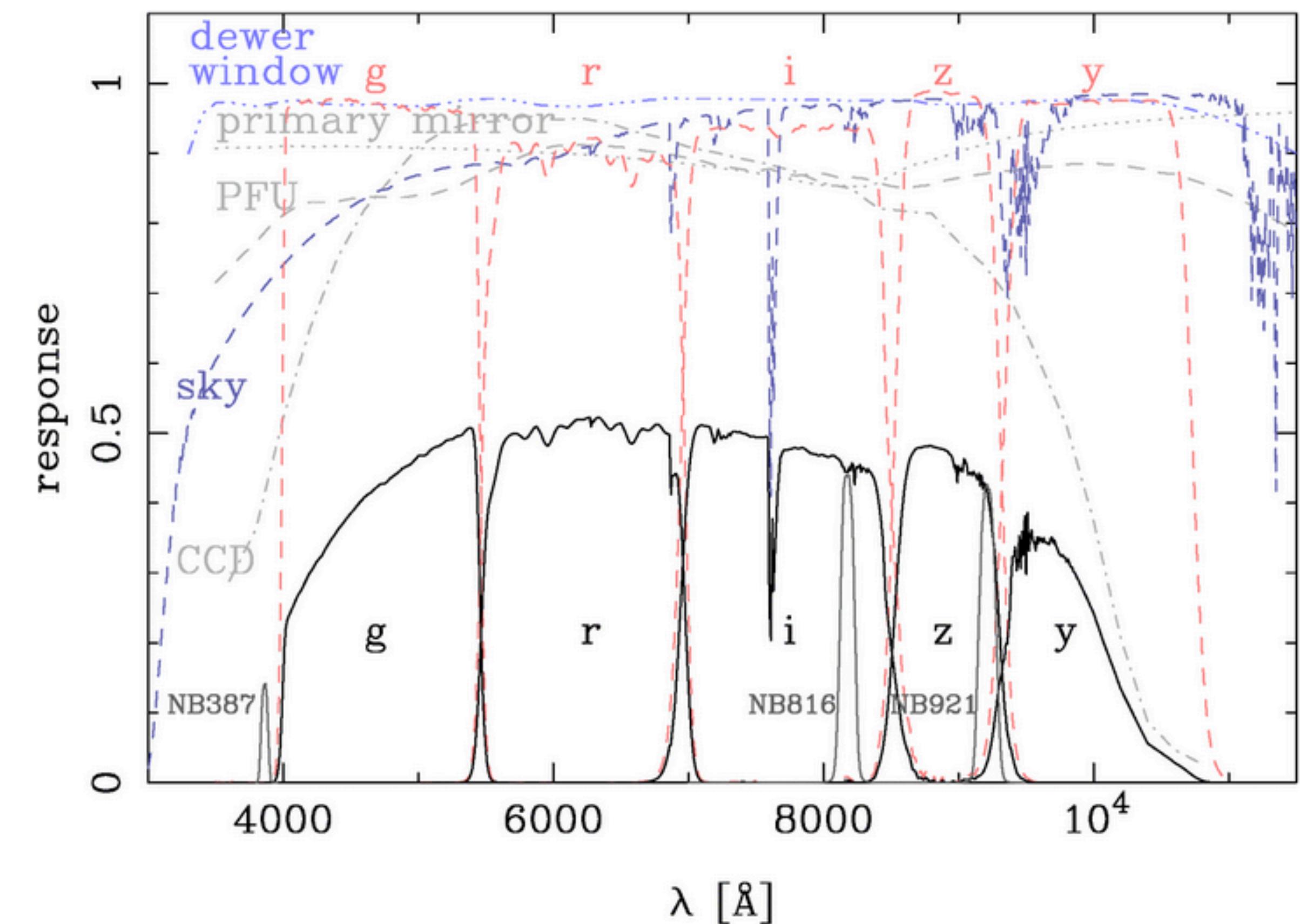
LSST × SPHERExで到達可能な制限

$$m_a = 1 \pm 0.2 \text{ eV}$$

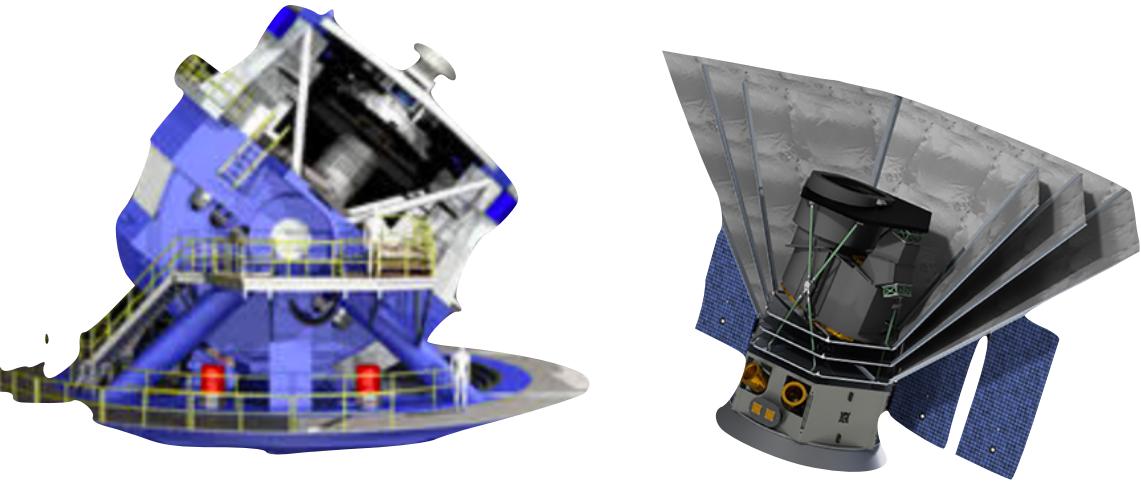
$$g_{a\gamma\gamma} = (1 \pm 0.5) \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$$

Can we apply this to Subaru HSC?

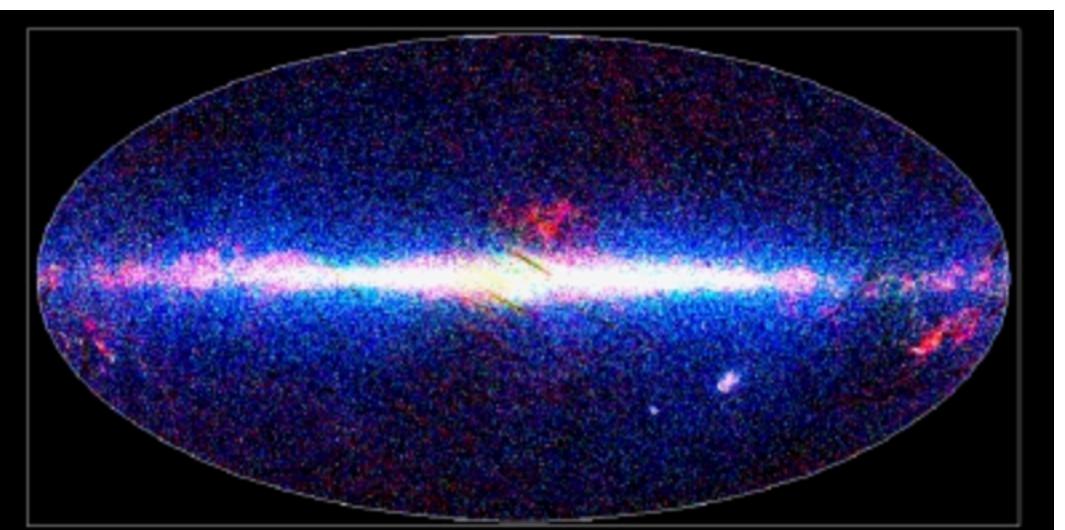
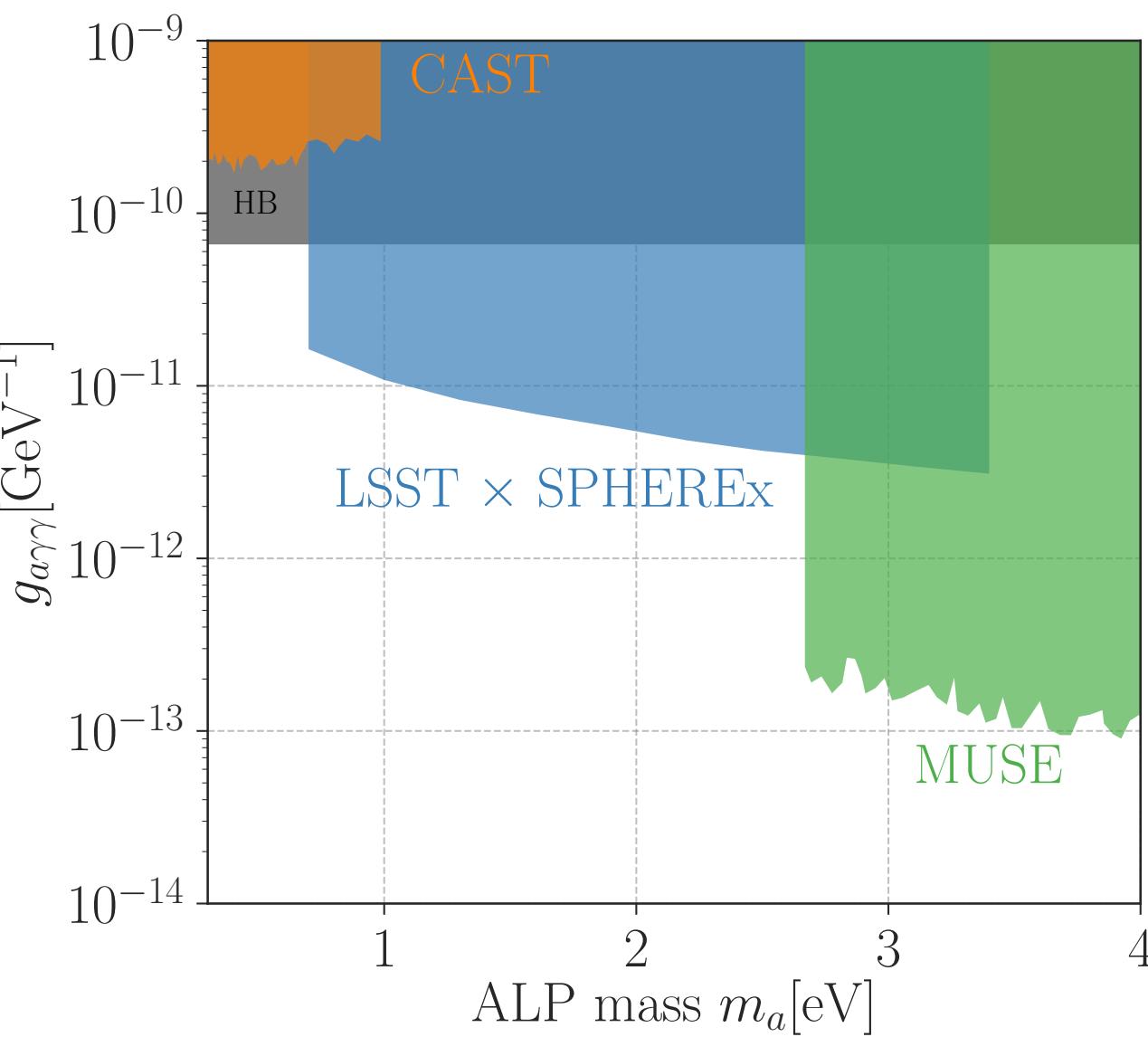
- NB921のデータは以下の質量に感度がある
 - $m_a \simeq 2.6 - 3 \text{ eV}$
 - ただし, H α 輝線が対応するredshift ~ 0.4
→ HSC cosmic shear x H α のほうが受かりそう?
 - 暗いH α 天体のhost halo massなど?
- narrow bandと撮像を両方やっているHSCの強み
- データはあるけど、時間がない (共同研究者募集中)



Summary and future prospect



- Axionlike particles (ALPs)は標準模型を超える物理で広く存在が予言
- eVスケールのALPsの探索手法として、銀河の弱重力レンズ効果と輝線強度マッピングの相互相関を提案
- LSST × SPHERExで以下の予言
 - Null detectionであれば, $g_{a\gamma\gamma} < 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$ for $0.5 < m_a [\text{eV}] < 3.5$
 - $m_a = 1 \text{ eV}, g_{a\gamma\gamma} = 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$ のALPsがいれば, $\Delta m_a = 0.2 \text{ eV}$ で制限可能
- HSC wide layer × deep layerで、この手法のデモンストレーションができそう
- cosmic shearにこだわる理由は特がない (利点はgalaxy biasがないくらい)
 - Galaxies at lower redshifts (e.g. 2MASS, SDSS)でもできる / 赤外領域の銀河中心からの放射でもできる (e.g. AKARI?)



Extra slides

Relevant astrophysical lines

- H α 輝線 (656.28 nm)が主, その他には OIII (500.7 nm), H β (486.1 nm)など
- Kennicutt-Schmidt則 (Schmidt 1959, Kennicutt 1998)より
 - $L_{H\alpha} = 1.26 \times 10^{41} \text{ erg/s (SFR/1 } M_\odot \text{ yr}^{-1})$
- Halo modelから, H α 輝線 光度密度

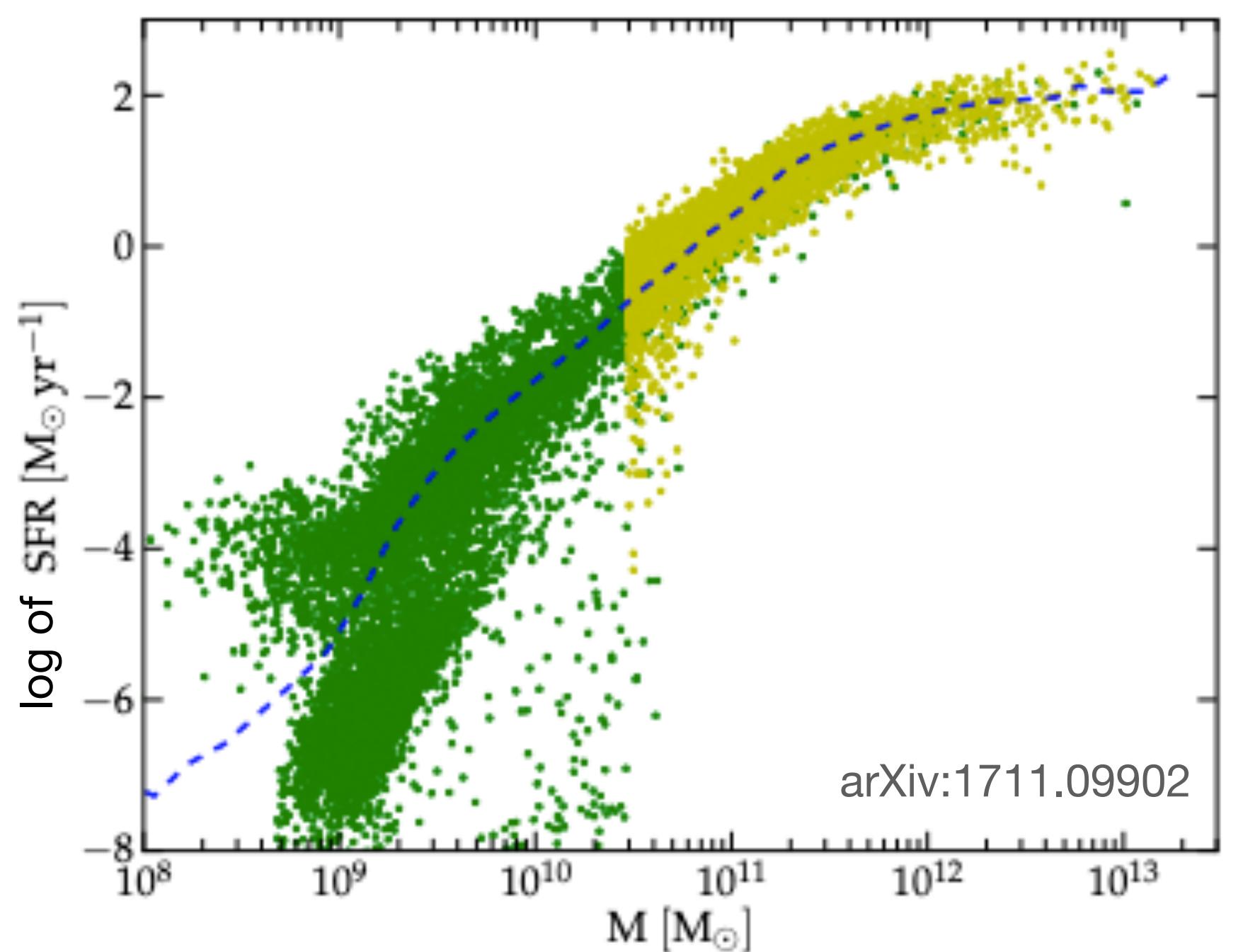
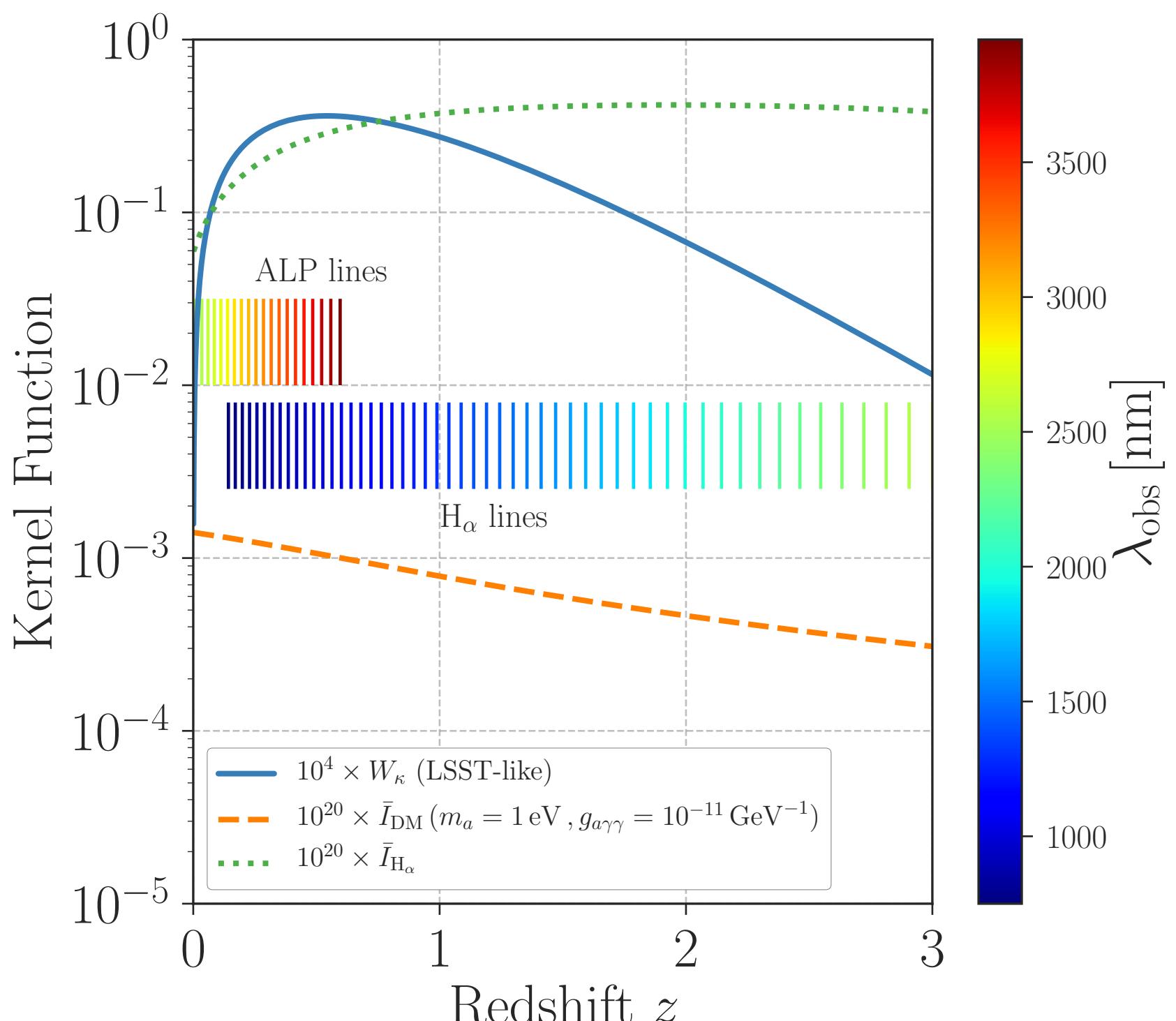
$$\bullet \rho_{H\alpha}(\vec{x}) = \sum_i L_{H\alpha}(M_i, z_i) \delta_D(\vec{x} - \vec{x}_i) \simeq \bar{\rho}_{H\alpha}(z) N^{-1}(z) \sum_i \text{SFR}(M_i, z_i) \delta_D(\vec{x} - \vec{x}_i)$$

• 規格化定数 $N(z)$ は $\langle \rho_{H\alpha} \rangle = \bar{\rho}_{H\alpha}(z)$ から決まる

• 平均光度 $\bar{\rho}_{H\alpha} = \int dL_{H\alpha} \frac{dn}{dL_{H\alpha}} L_{H\alpha}$ から決める (Silva+2017, arXiv:1711.09902)

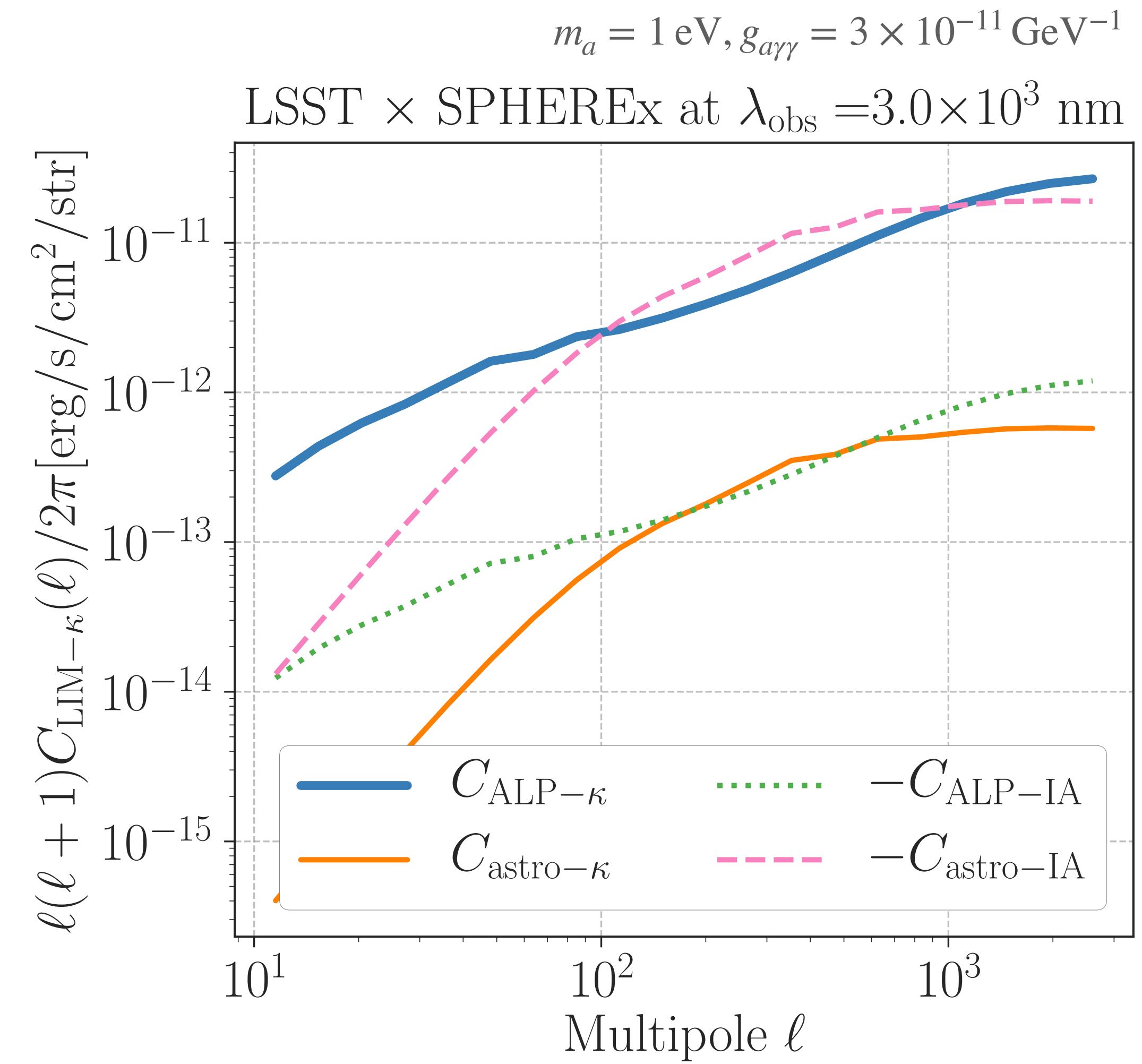
• SFRのmass, redshift依存性は, semi-analytic galaxy modelから引用 (Guo+2013; arXiv:1206.0052)

• Fisher解析では, mean intensityの振幅はnuisance parameterとして扱う



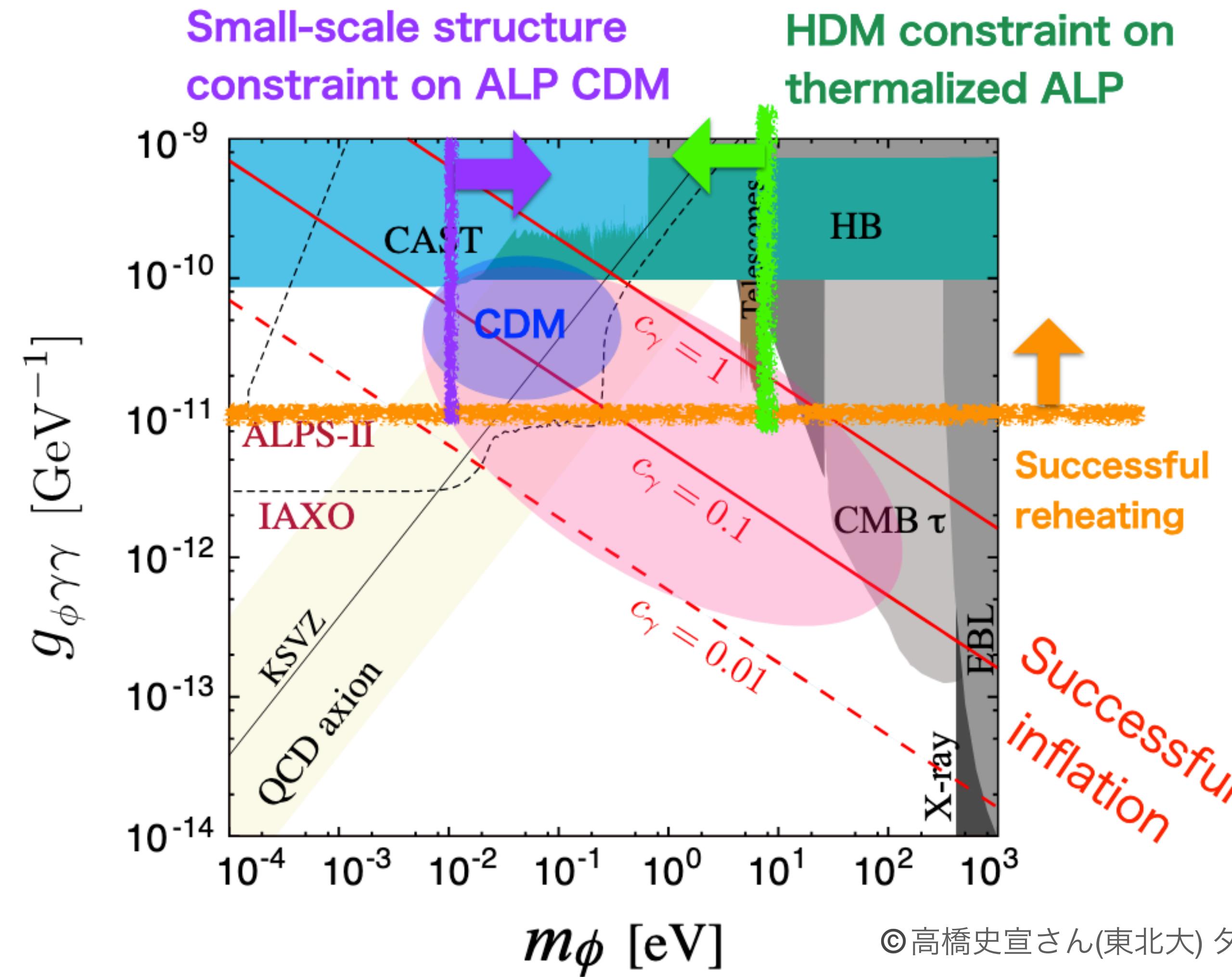
Impact of intrinsic alignments (IA)

- 銀河形状は潮汐力の影響で大規模構造に沿う
- 線形IAモデルを仮定 (Hirata & Seljak 2004)
 - shape $\propto (\nabla_x^2 - \nabla_y^2, 2\nabla_x \nabla_y) \nabla^{-2} \delta_m$
- 3000 nmのintensity mapを考えると
 - z=0.3-0.6にいるDM \rightarrow cosmic shear x ALPs
 - z=3.5にいるLSST銀河 \rightarrow IA x H α
- IAの寄与は、負の相関をうむことに注意
- IAの比例係数はよくわからない (LSSTでの銀河の選び方による)

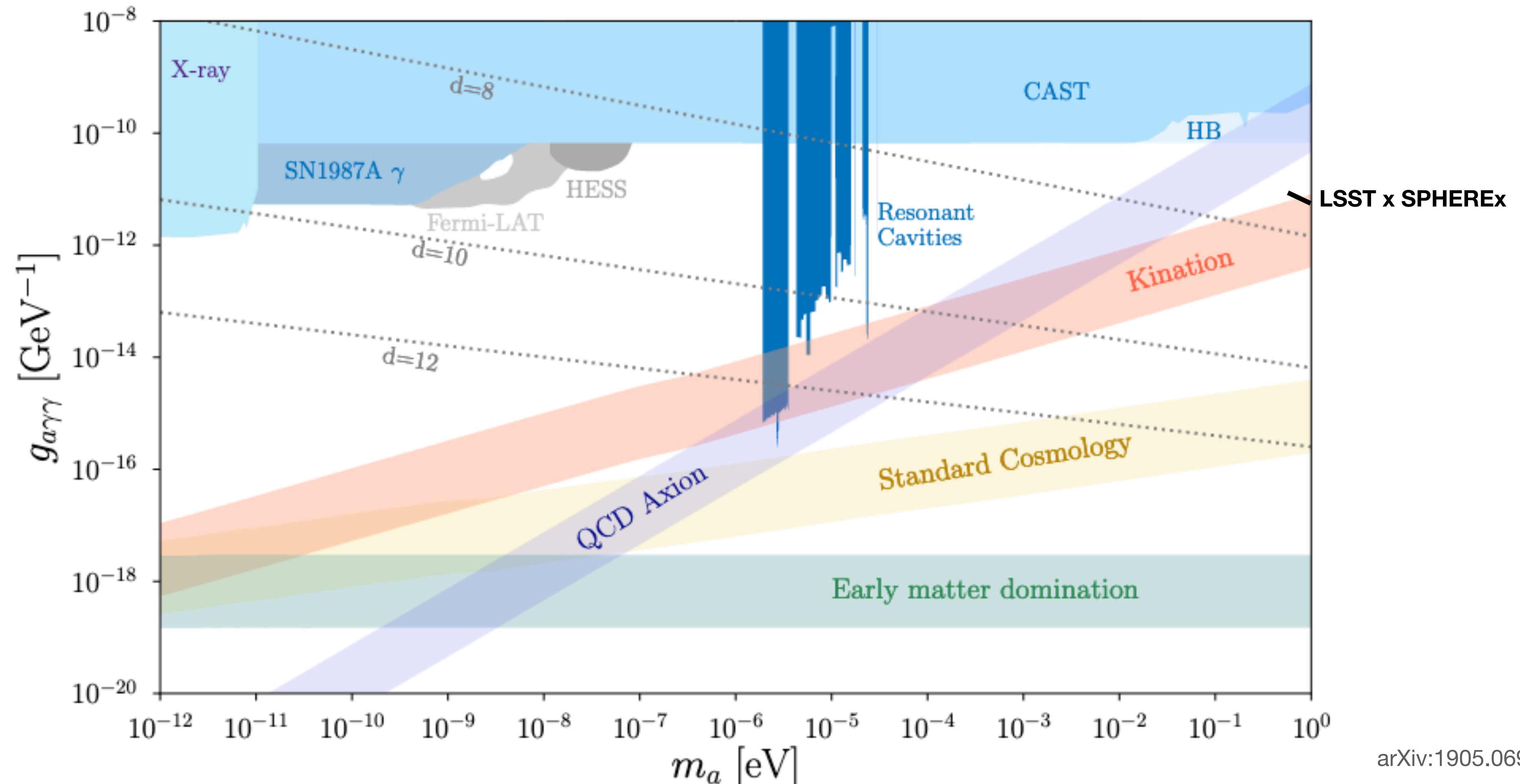


ALP miracle?

Daido+(2018), arXiv:1710.11107



Viable model of ALPs for dark matter



Constraints of lifetime of decaying DM

