（サブミリ波）輝線強度マッピング
― 理論的な観点から ―

森脇 可奈（東京大学RESCEU）

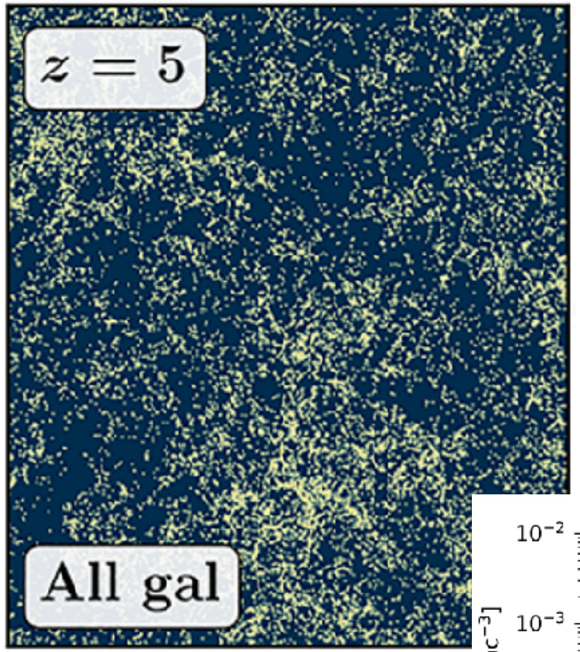
ASTE Science and Development Workshop 2024 @ 国立天文台
2024年12月27日

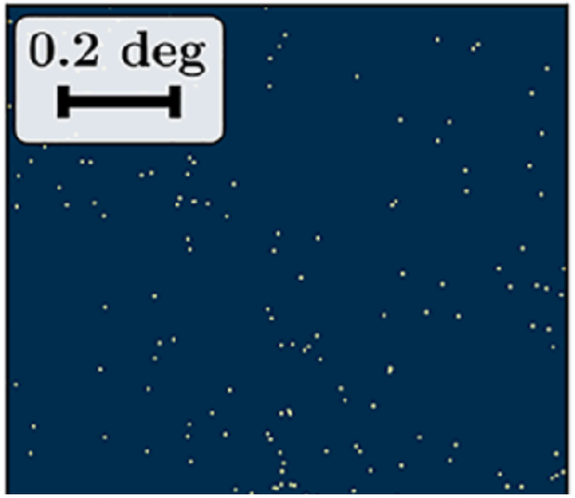
銀河の広領域分布 — どのように観測するか

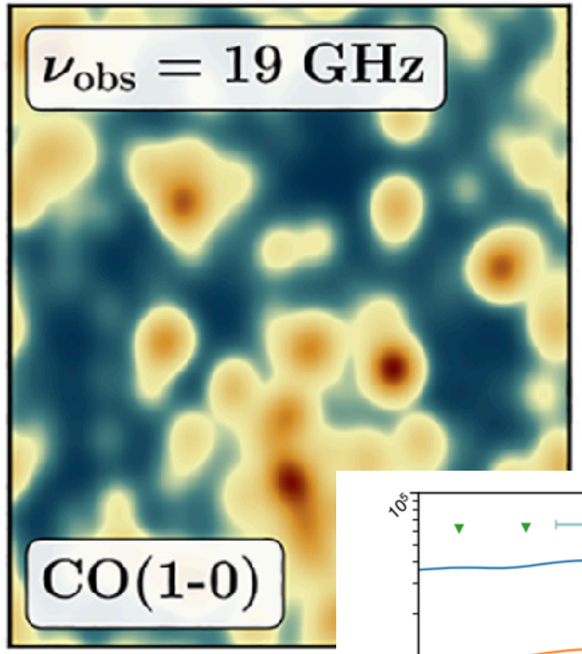
Bernal & Kovetz 2022

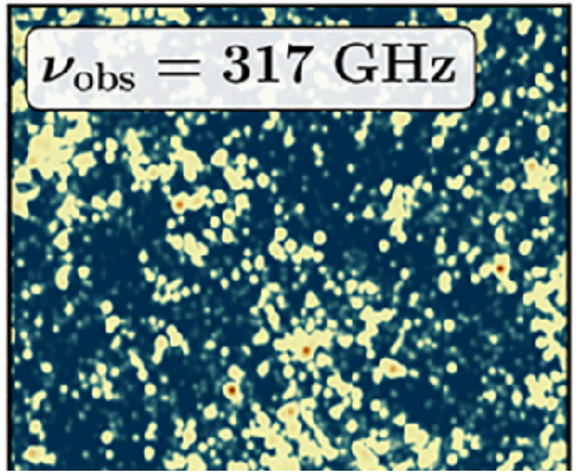
Conventional galaxy survey

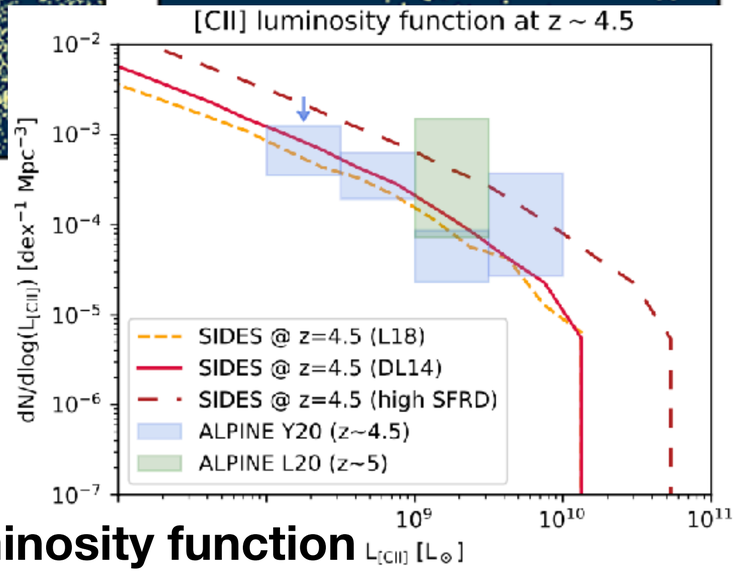
Line intensity mapping



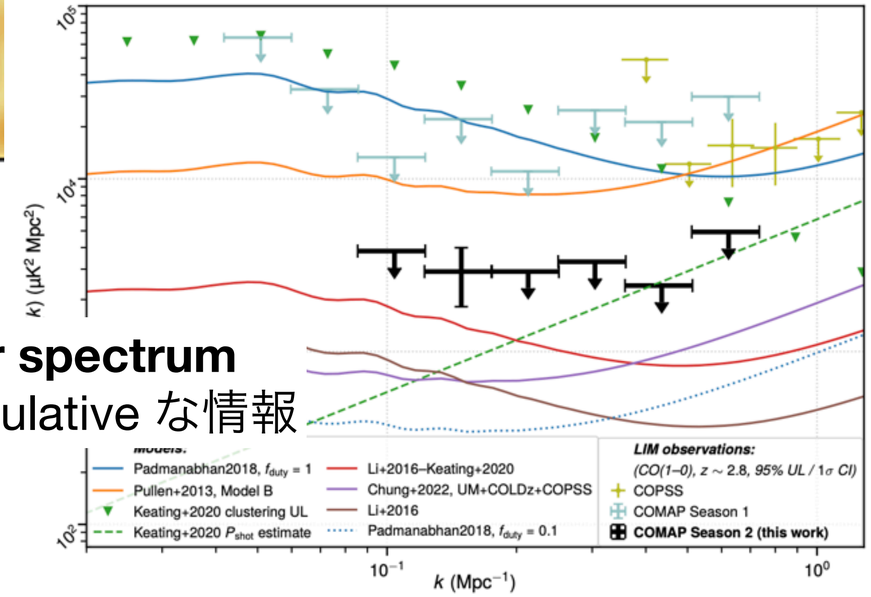






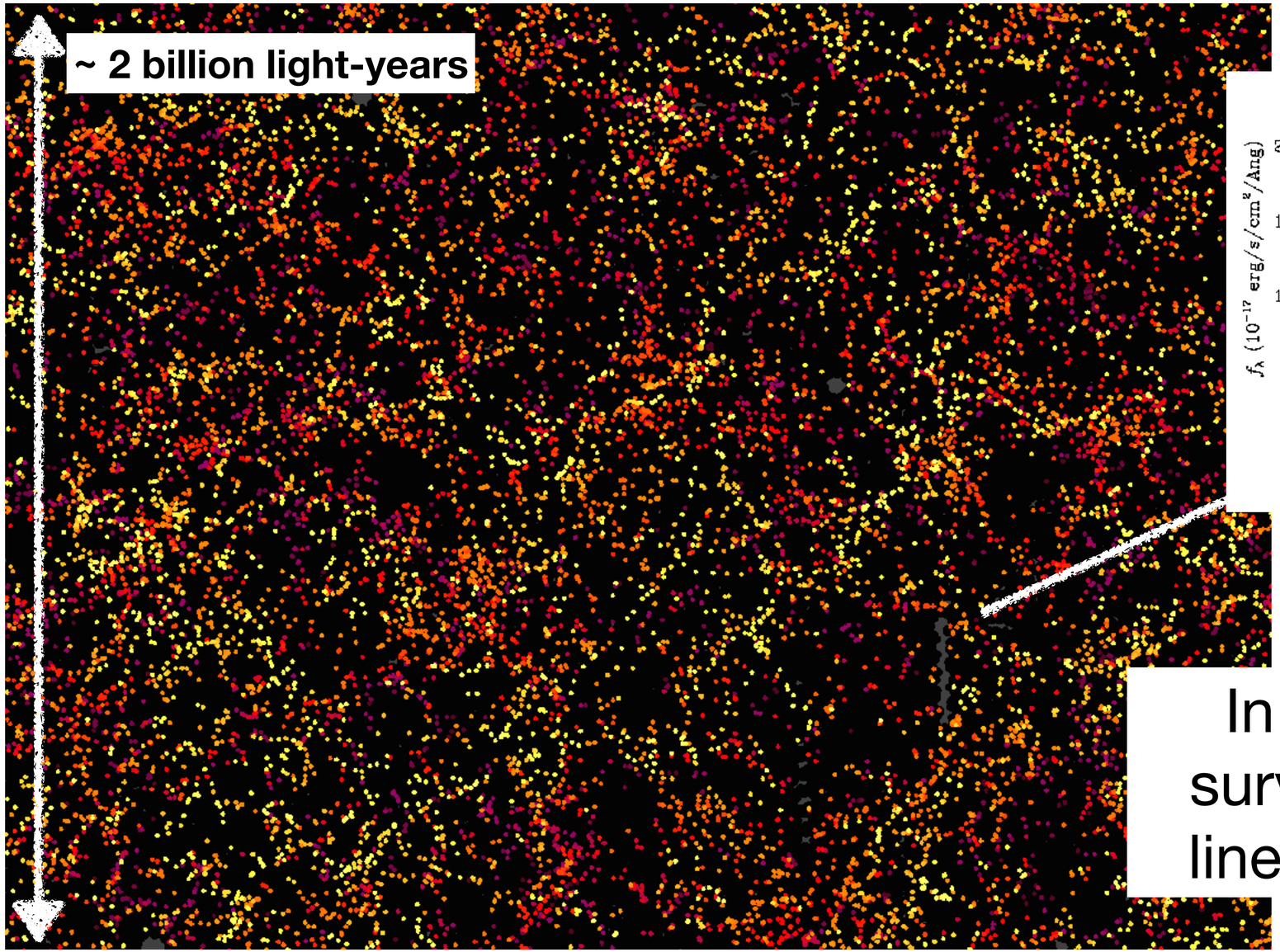


Luminosity function $L_{[CII]}$ [$L_\odot$]

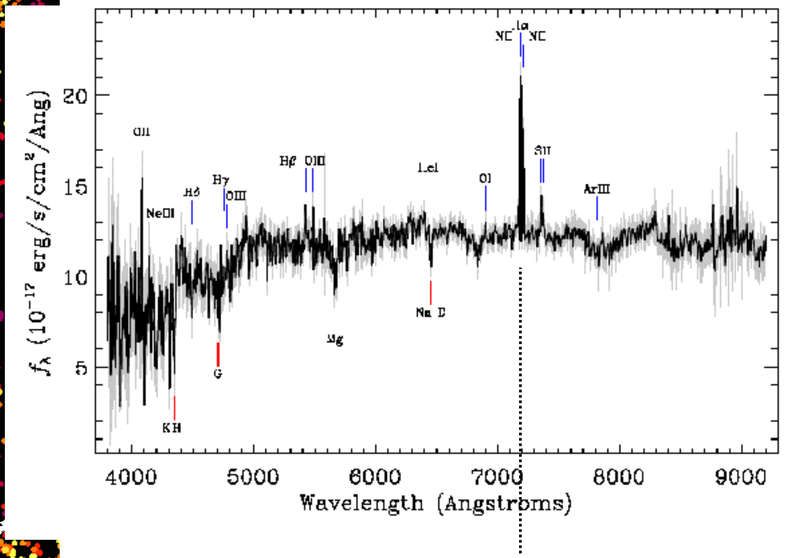


Power spectrum
より cumulative な情報

What is line intensity mapping?



Emission line detection!

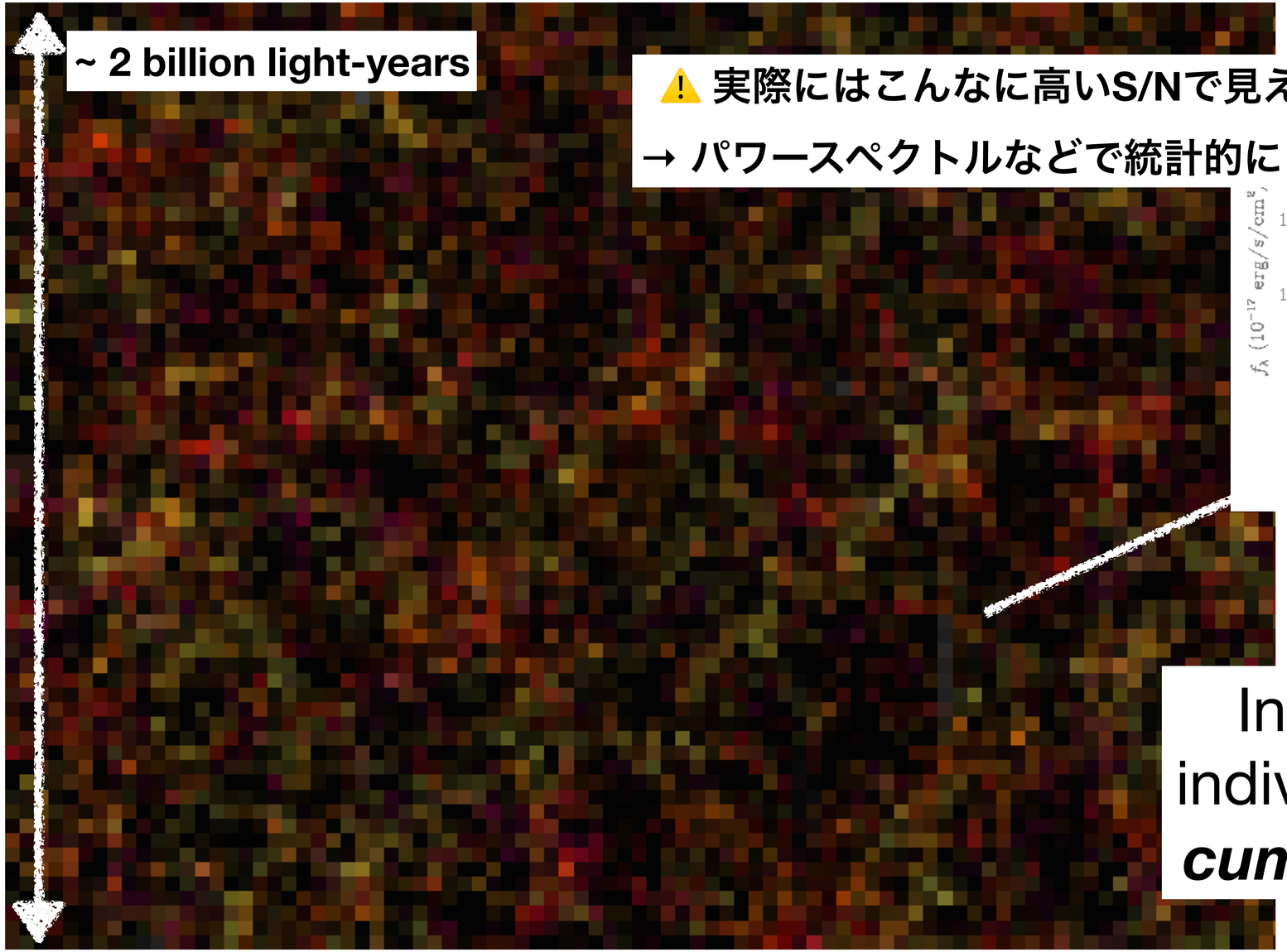


$\lambda_{obs} = \lambda_{rest} (1 + z)$

In ordinal galaxy redshift survey, we detect emission line(s) to determine redshift

Image credit:Daniel Eisenstein and the SDSS-III collaboration

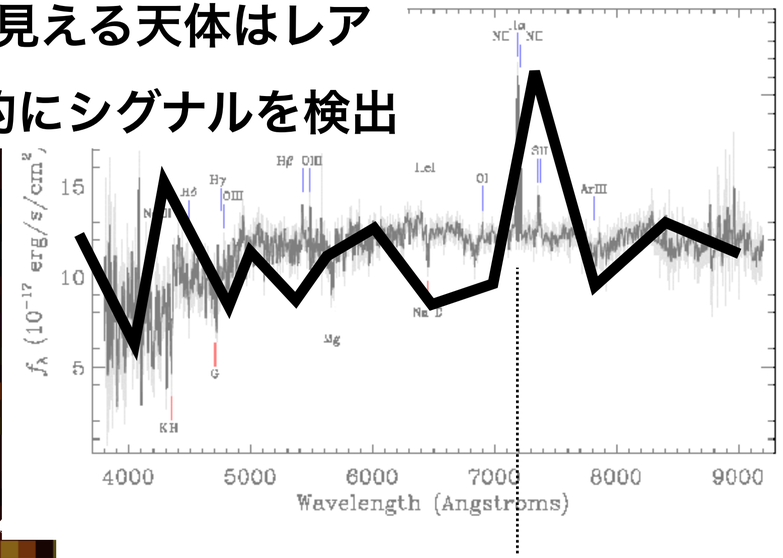
What is line intensity mapping?



⚠️ 実際にはこんなに高いS/Nで見える天体はレア

→ パワースペクトルなどで統計的にシグナルを検出

Emission line detection?

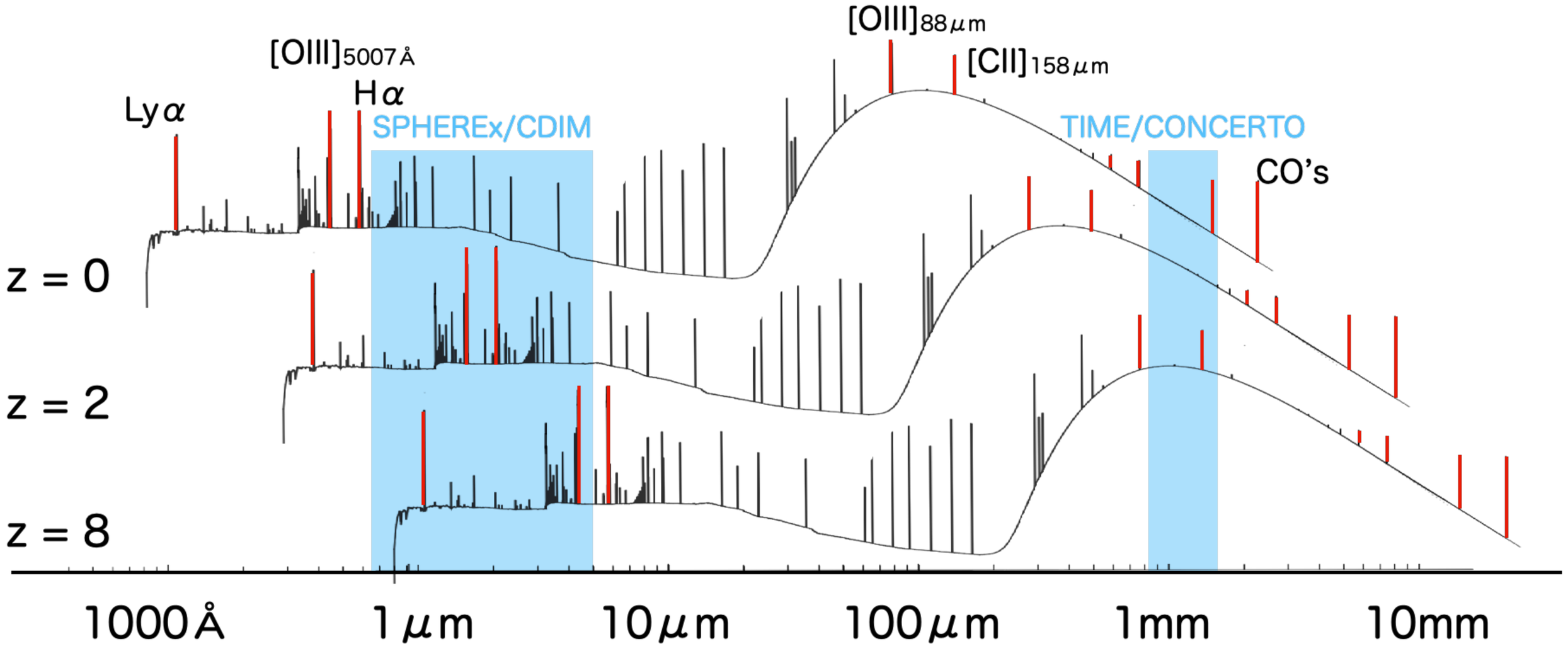


$\lambda_{obs} = \lambda_{rest} (1 + z)$

In LIM, we do not detect individual line(s) but measure ***cumulative line fluctuation***

Image credit:Daniel Eisenstein and the SDSS-III collaboration

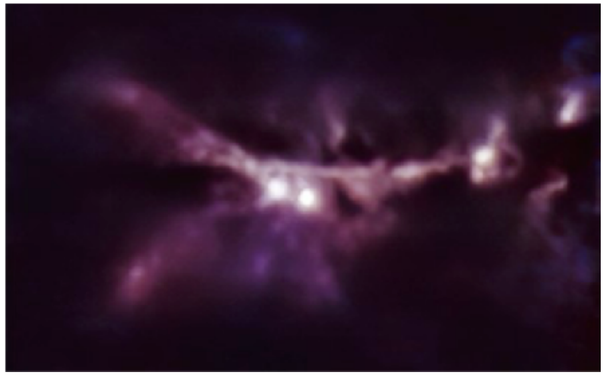
さまざまな波長における輝線強度マッピング観測



実行中・将来の輝線強度マッピング観測

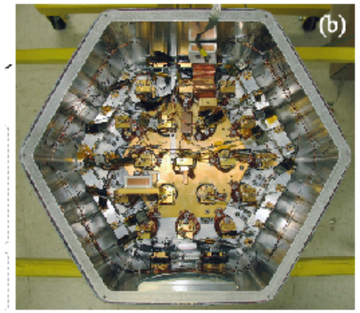
SKA (2028-)





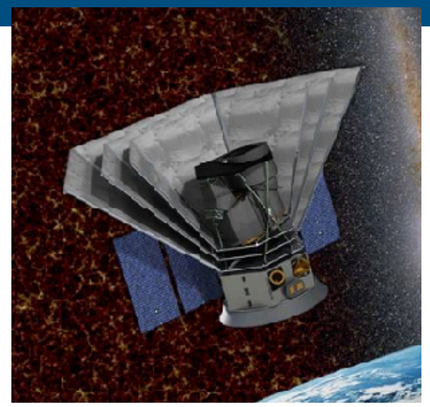
CONCERTO first light (2021)

https://www.eso.org/public/announcements/ann21010/

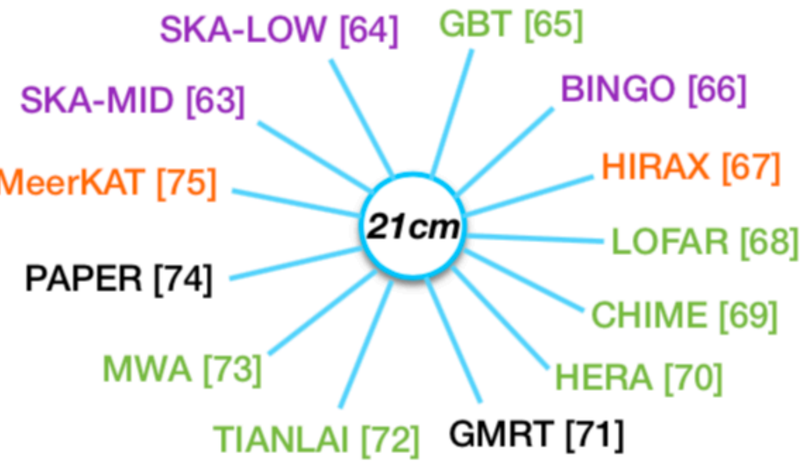


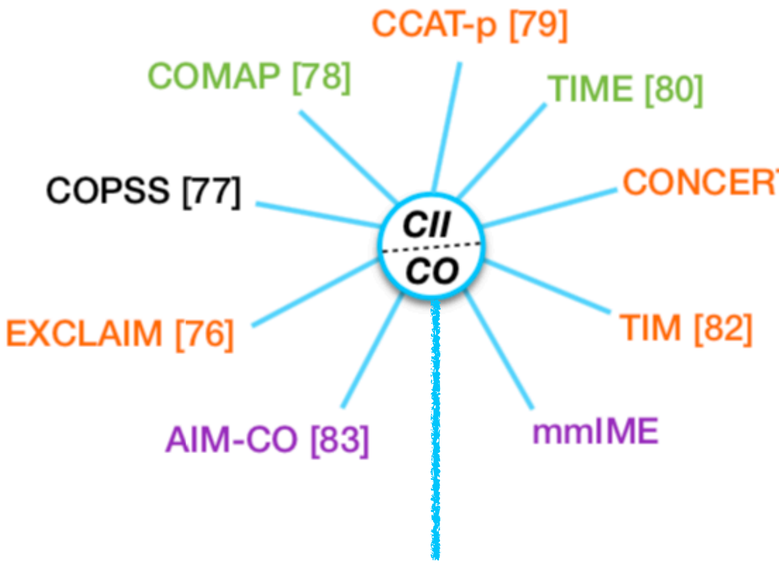


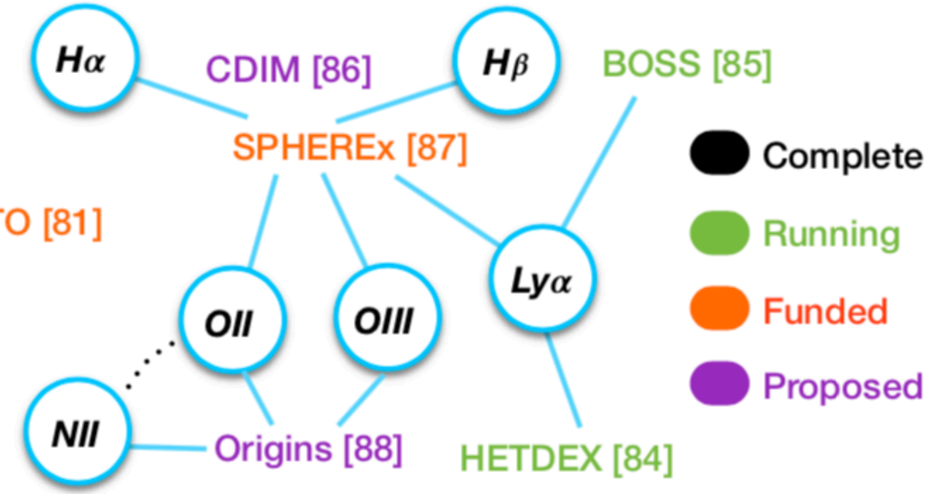
COMAP (2021-)



SPHEREx (2024-)



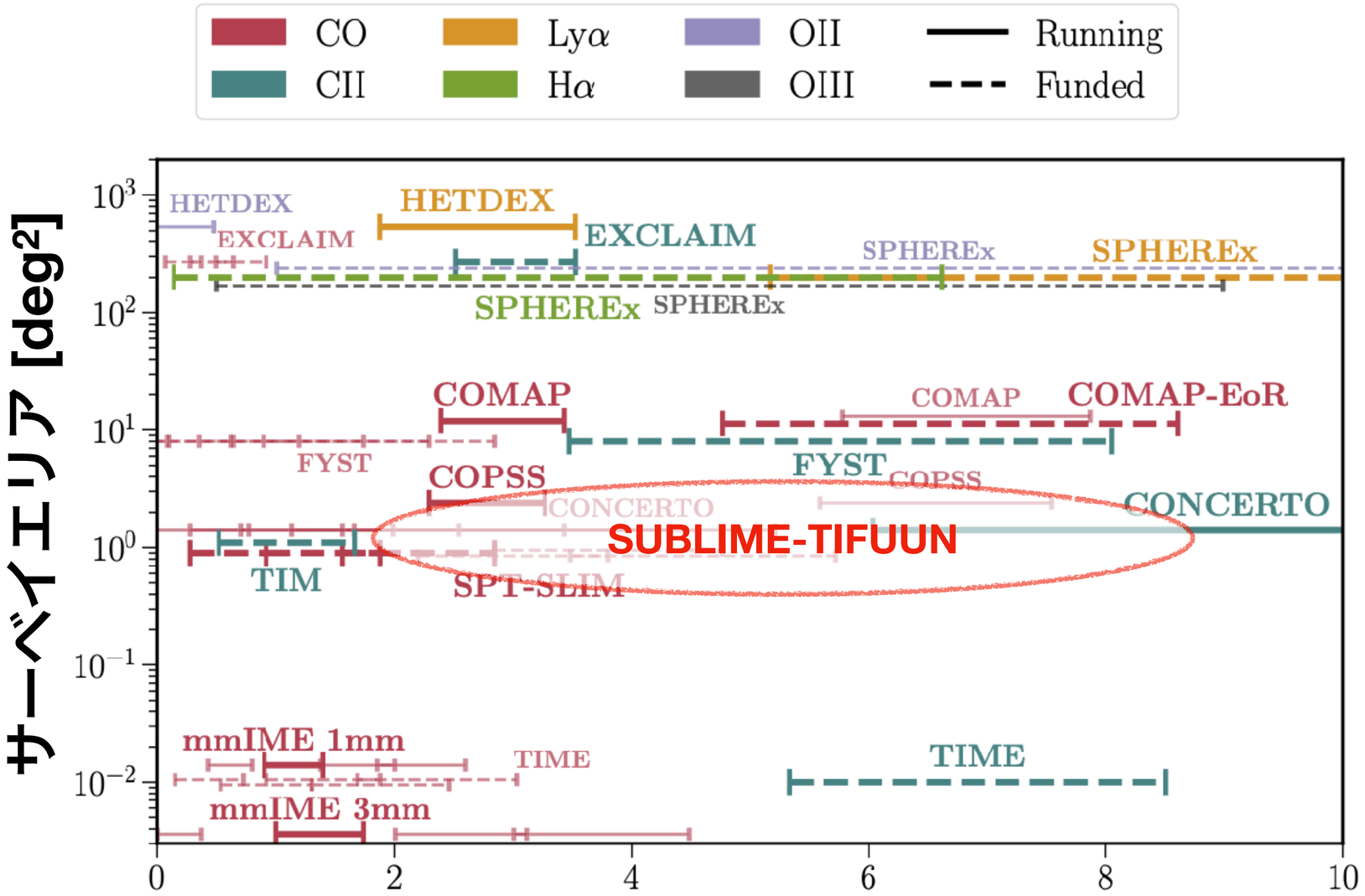




Kovetz+2019

SUBLIME-TIFUUN !!

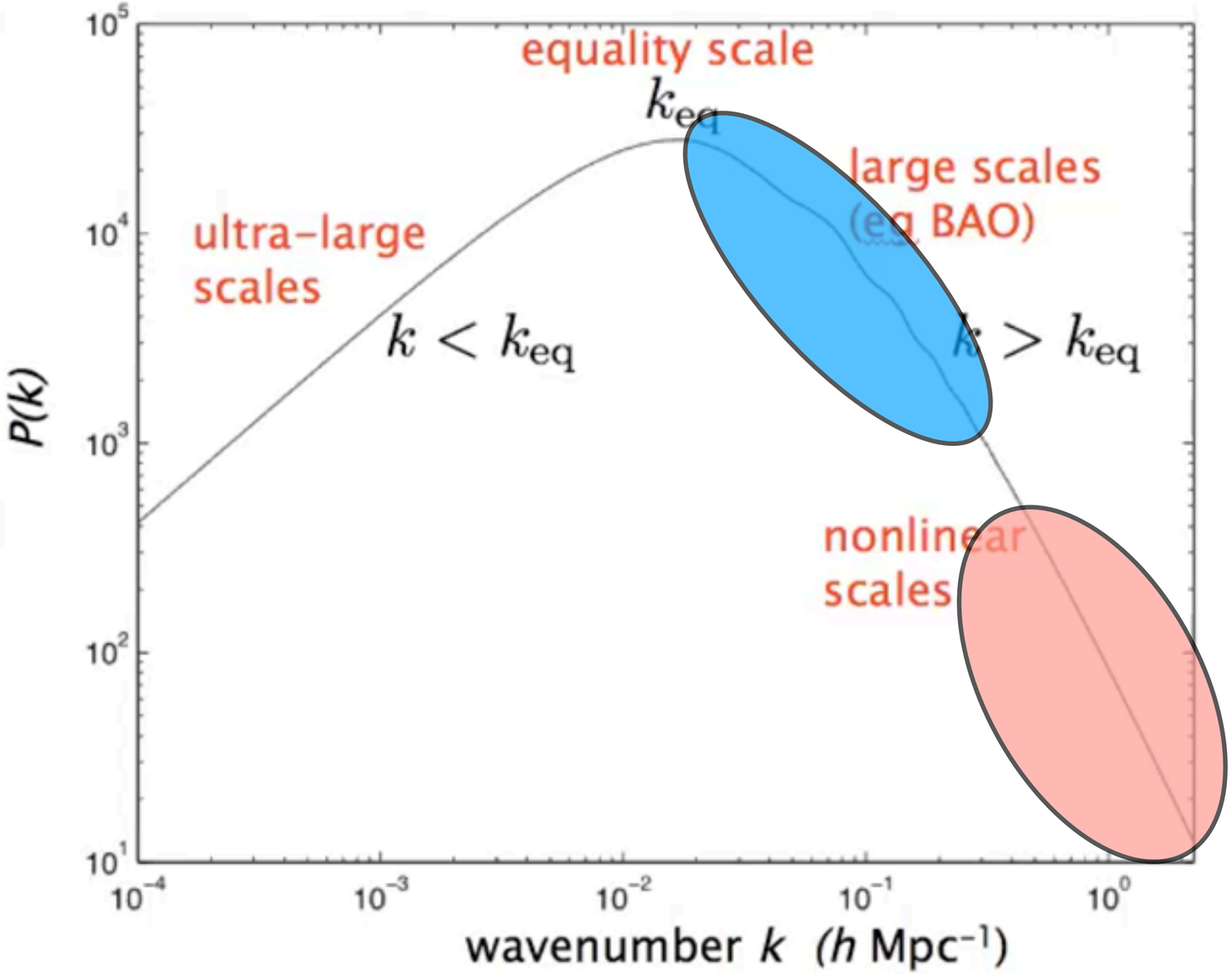
実行中・将来の輝線強度マッピング観測



Bernal & Kovetz 2022

将来的には
「より遠方/より広領域」
を目指す
→ 個別銀河サーベイに相補的に

主な観測統計量：パワースペクトル



$$P_{\rm line}^{\rm tot} = P_{\rm line}^{\rm clus} + P_{\rm line}^{\rm shot}$$

Cosmology

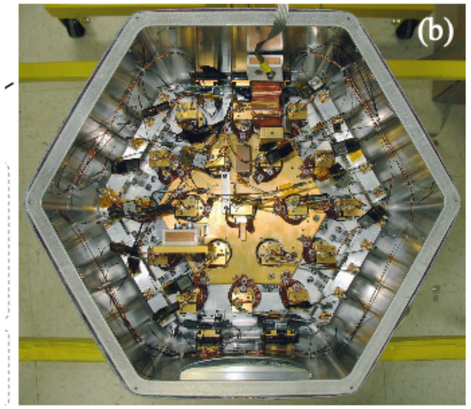
$$P_{\rm line}^{\rm clus}(k) = \bar{b}_{\rm line}^2 \bar{I}_{\rm line}^2 P_m(k)$$

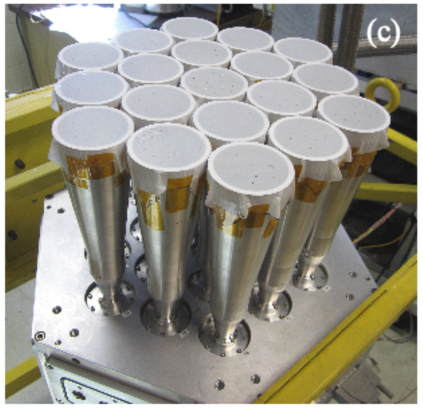
$$P_{\rm line}^{\rm shot} = \frac{\bar{I}_{\rm line}^2}{\bar{n}} \frac{\langle L^2 \rangle}{\langle L \rangle^2}$$

Galaxy

最新の LIM 観測： COMAP

Cleary+2021



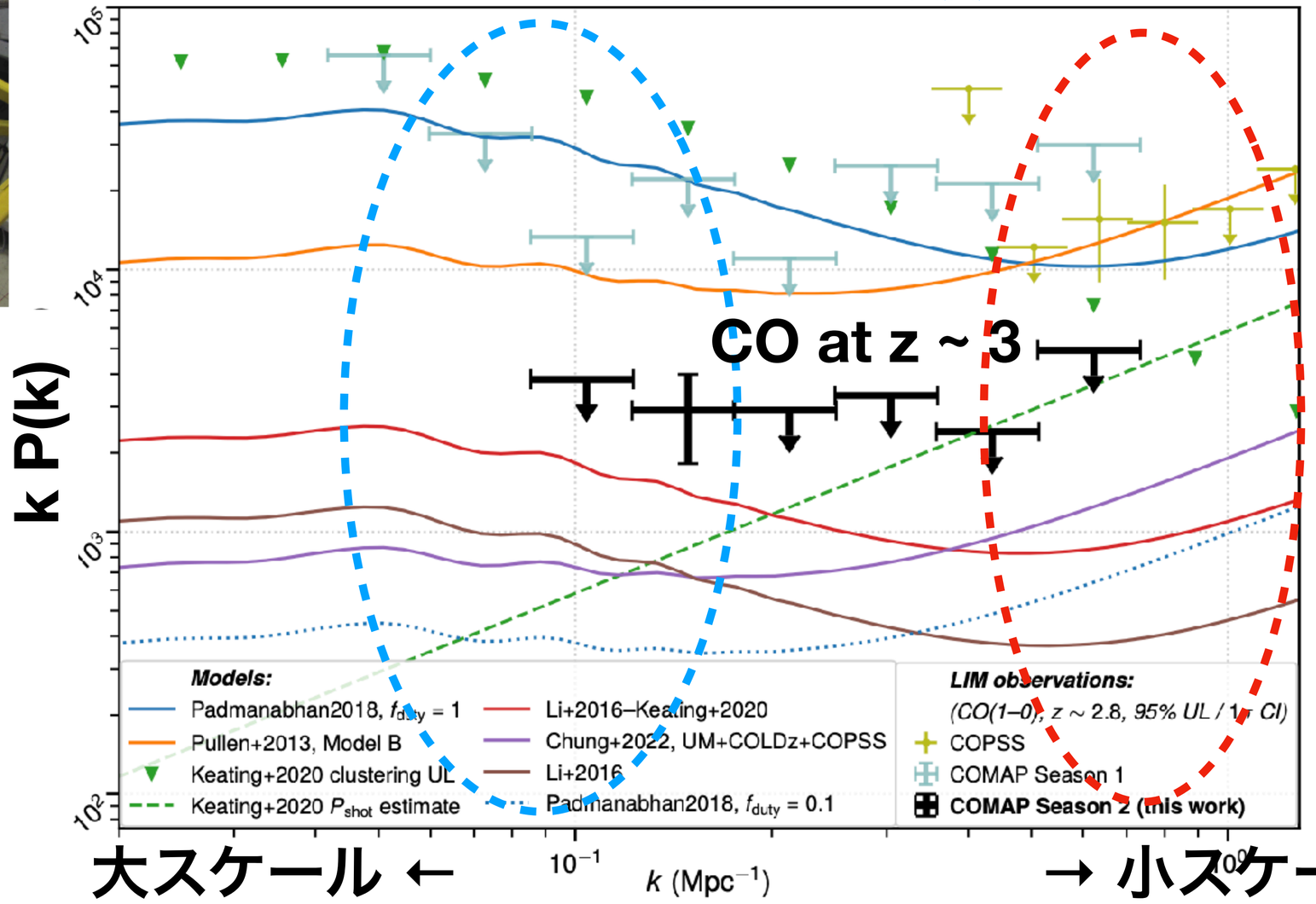




Chung+2024

BAO scales → 宇宙論 + 銀河の性質

Shot noise → 銀河の性質



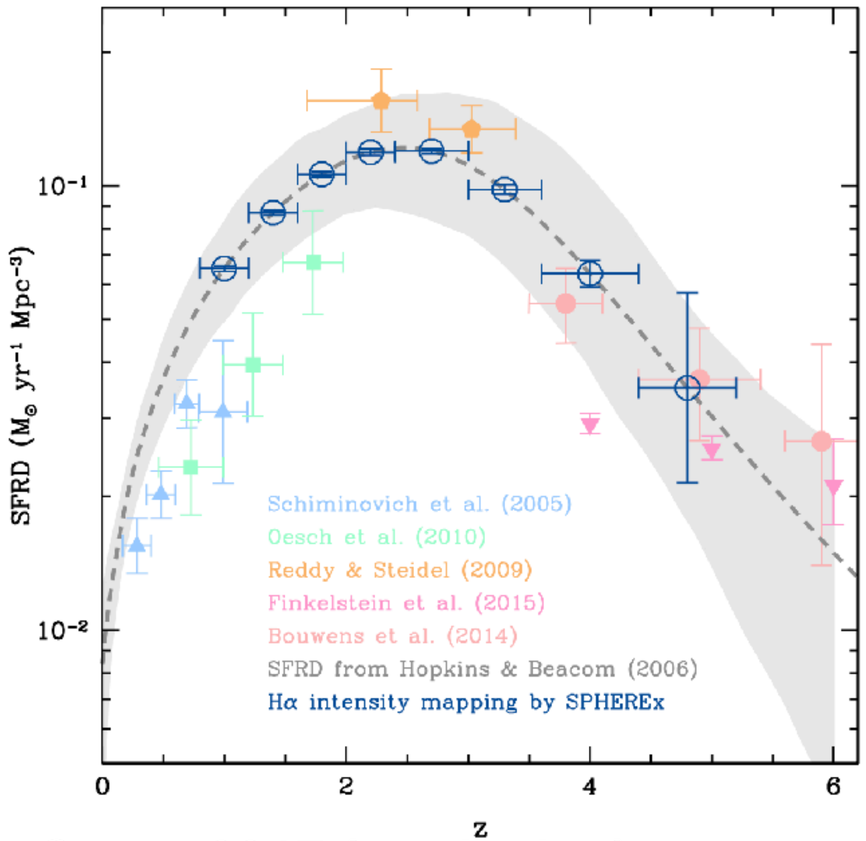
大スケール ←

→ 小スケール

LIM で何がわかる？：① 銀河形成史

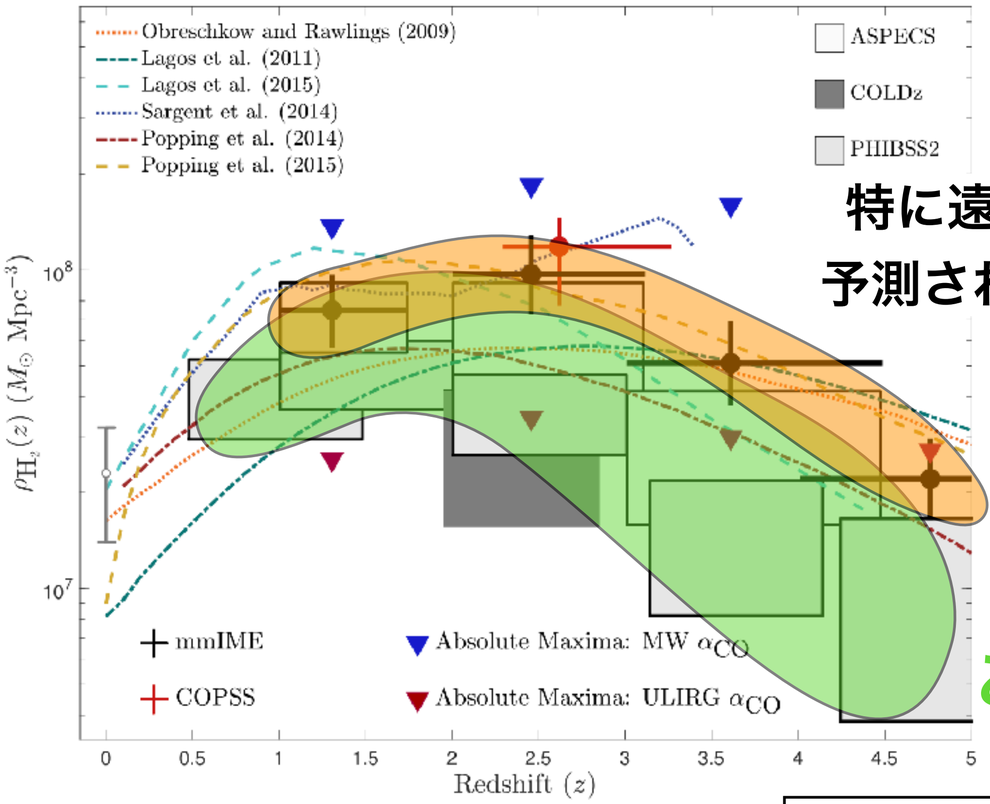
$$P_{\rm line}^{\rm clus}(k) = \bar{b}_{\rm line}^2 \bar{I}_{\rm line}^2 P_m(k) \qquad P_{\rm line}^{\rm shot} = \frac{\bar{I}_{\rm line}^2}{\bar{n}} \frac{\langle L^2 \rangle}{\langle L \rangle^2}$$

Star formation rate density



Gong+2017 (prediction)

Mean molecular hydrogen density



特に遠方では銀河サーベイから
予測されるよりも多くの分子雲？

LIM?

これまでの銀河探査

Keeting+2020 (mmIME)

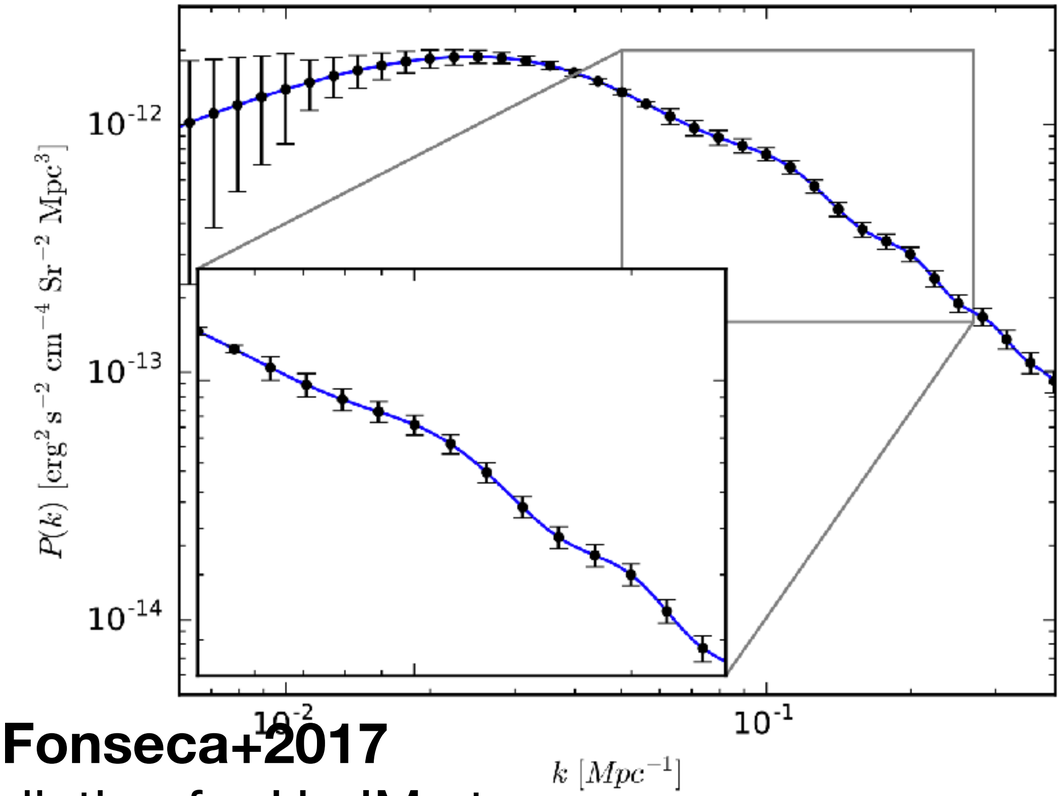
$$L_{\rm CO}(M) = A_{\rm CO}\frac{M^2}{M_0};\ M \leqslant M_0$$
$$L_{\rm CO}(M) = A_{\rm CO}M_0;\ M \geqslant M_0.$$

LIM で何がわかる？：② 宇宙論

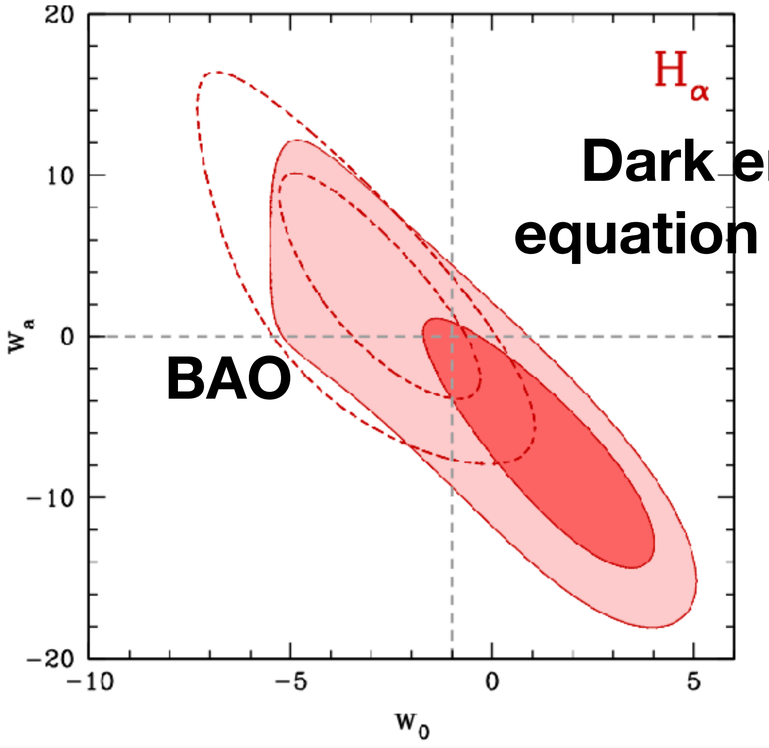
Cosmological parameters

$$P_{\rm line}^{\rm clus}(k) = \bar{b}_{\rm line}^2 \bar{I}_{\rm line}^2 P_m(k)$$

$$P_{\rm line}^{\rm shot} = \frac{\bar{I}_{\rm line}^2}{\bar{n}} \frac{\langle L^2 \rangle}{\langle L \rangle^2}$$



Fonseca+2017
(prediction for Hα IM at z = 1.9 with SPHEREx)

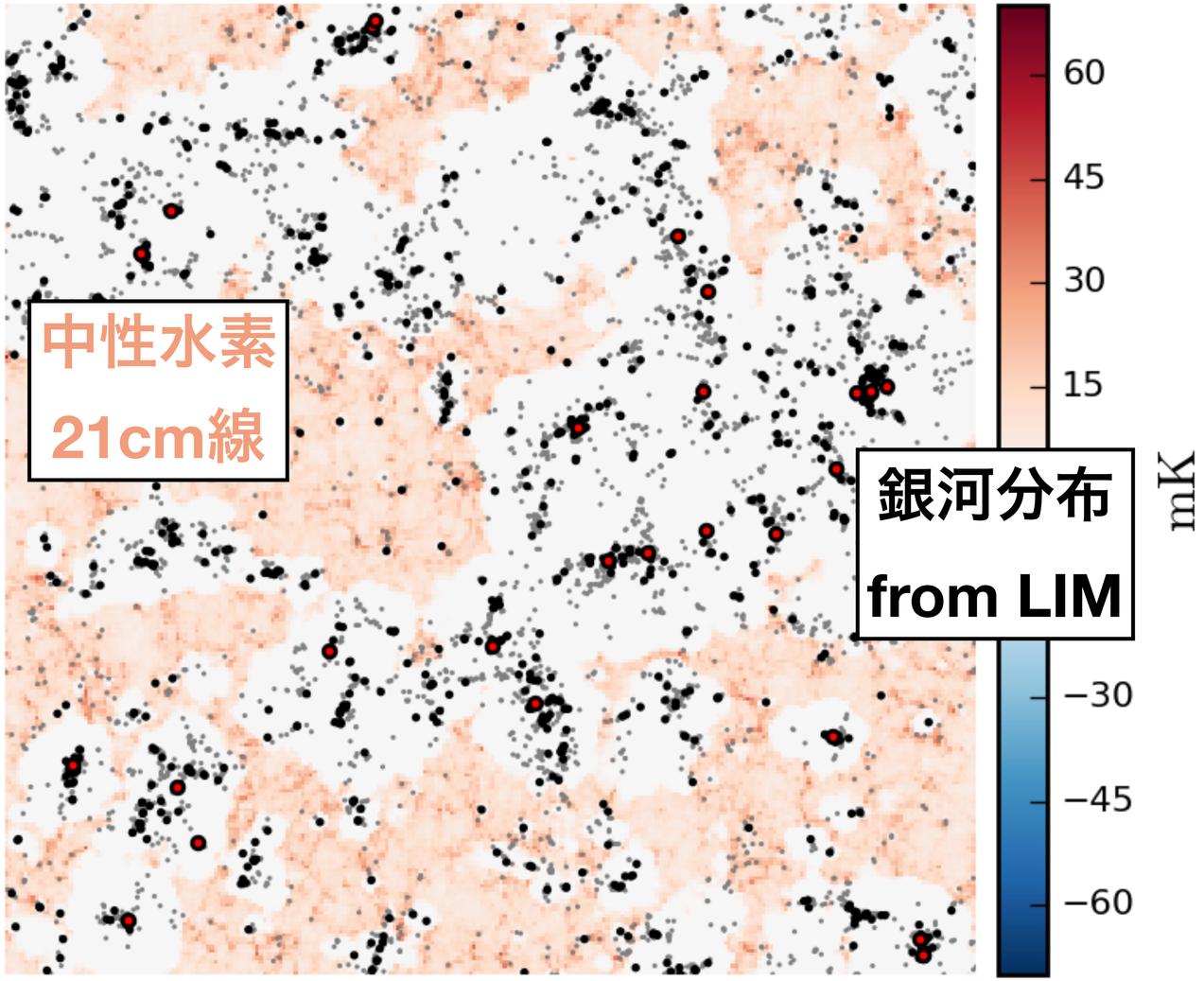


Dark energy equation of state

→ Observations at z > 1 are important.

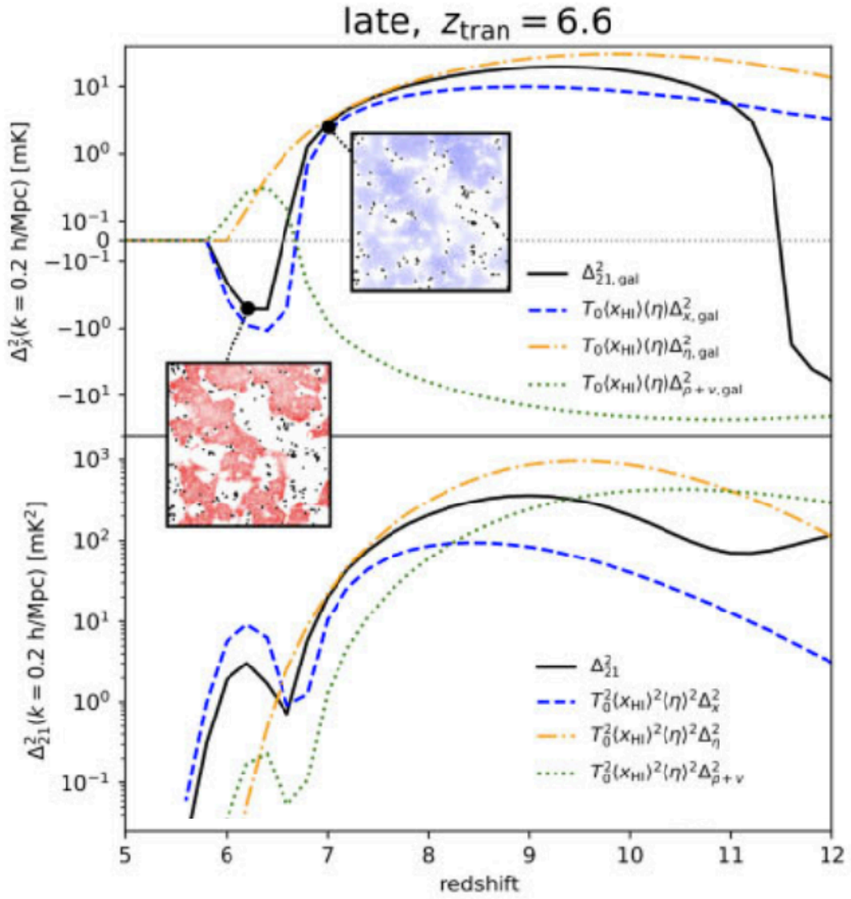
LIM で何がわかる？：③ 宇宙再電離

Cosmic Reionization



EoR 21cm × LIM
相互相関パワースペクトル

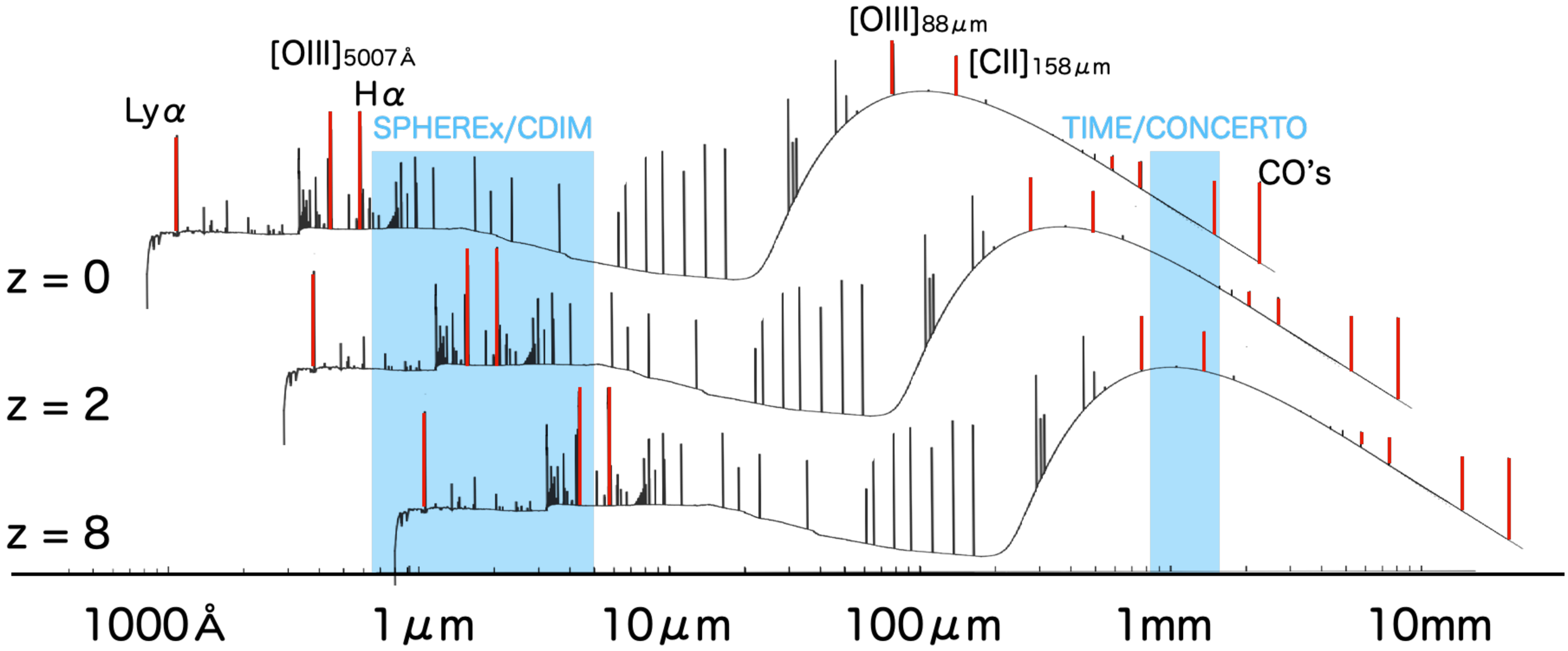
→ いつ再電離が始まったか？



KM, Beane, Lidz 2024

輝線強度マッピングにおける課題
① 前景除去

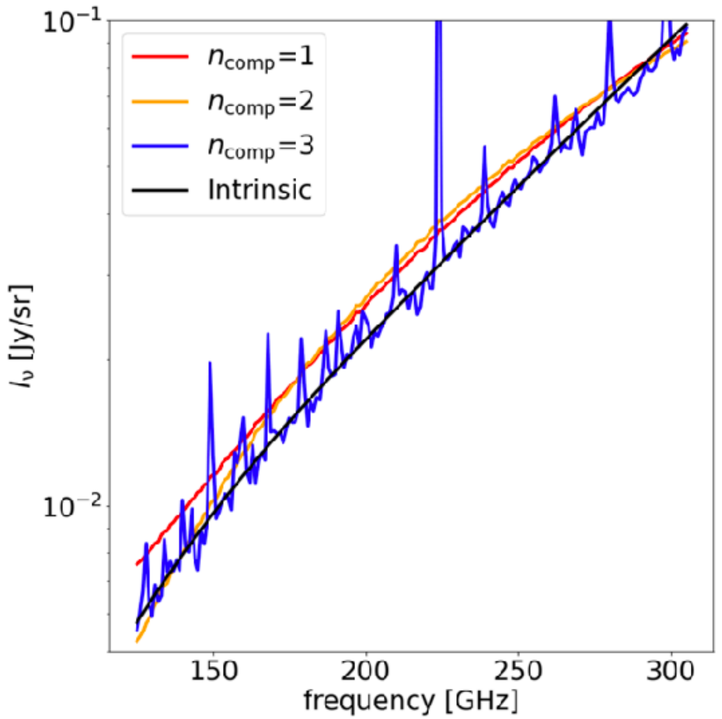
連続波や他の輝線がノイズとなる



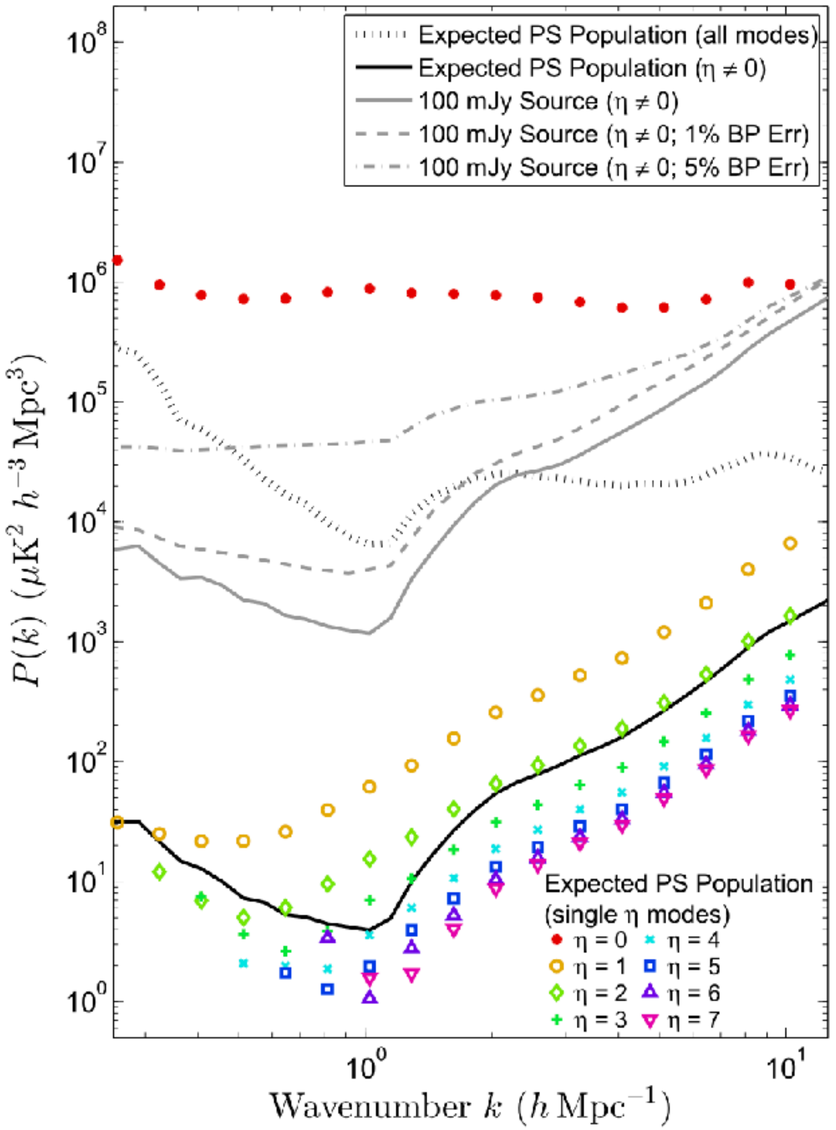
連続波をどのように取り除くか？

解決策

- $k_{\parallel} \sim 0$ 成分を取り除く（e.g., Keating+15）
- PCA や arPLS などのベースライン補正アルゴリズムを活用する（e.g., Van Cuyck+23）



Van Cuyck+2023
(CONCERTO collaboration)



Keating+2015
(COPSS I)

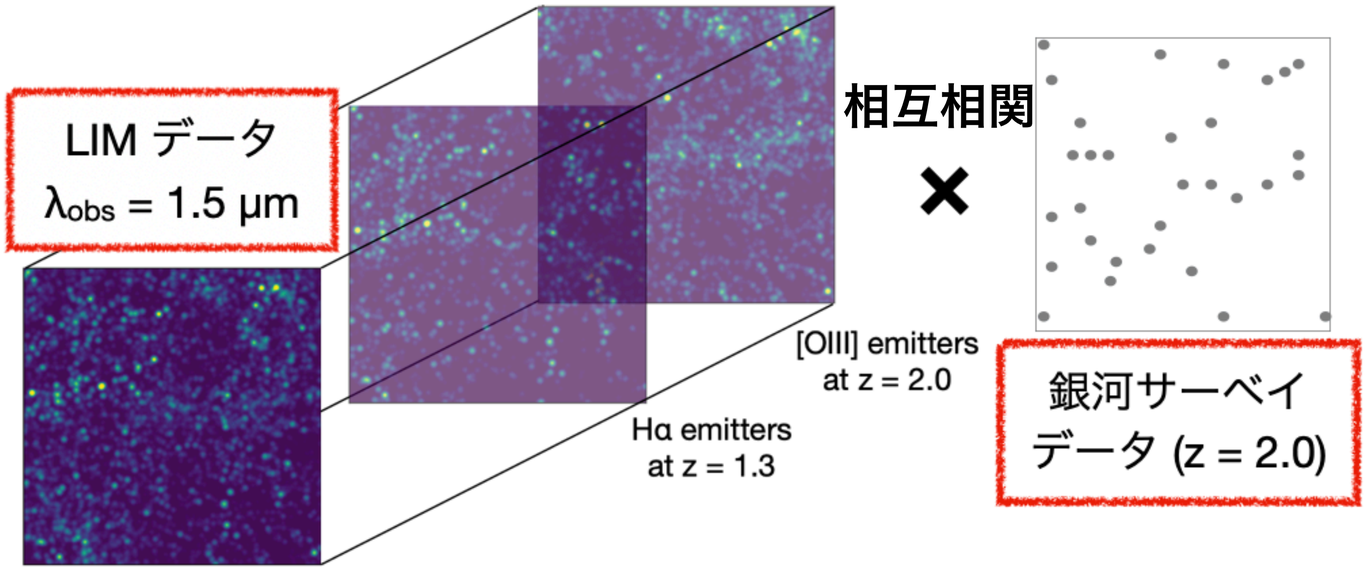
← total

← η = 0 mode subtracted

輝線の混在問題への解決策

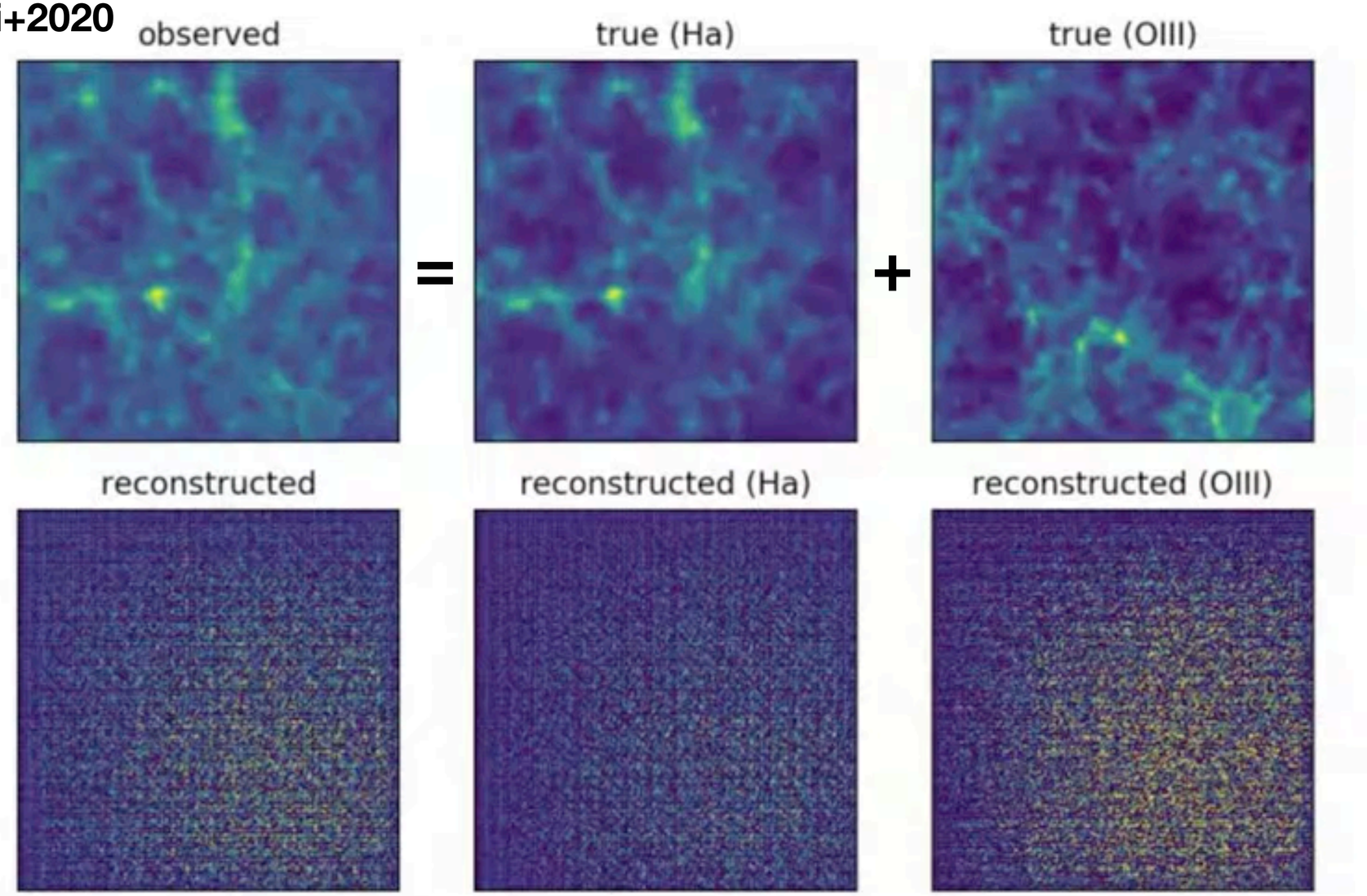
解決策

- 相互相関解析・スタック解析（e.g., Visbal&Loeb2010）
- マスキング（→ 成田さんトーク）
- パワースペクトルの非等方性（e.g., Gong+14）
- 機械学習を用いた手法（e.g., Moriwaki+20）



機械学習による輝線分離

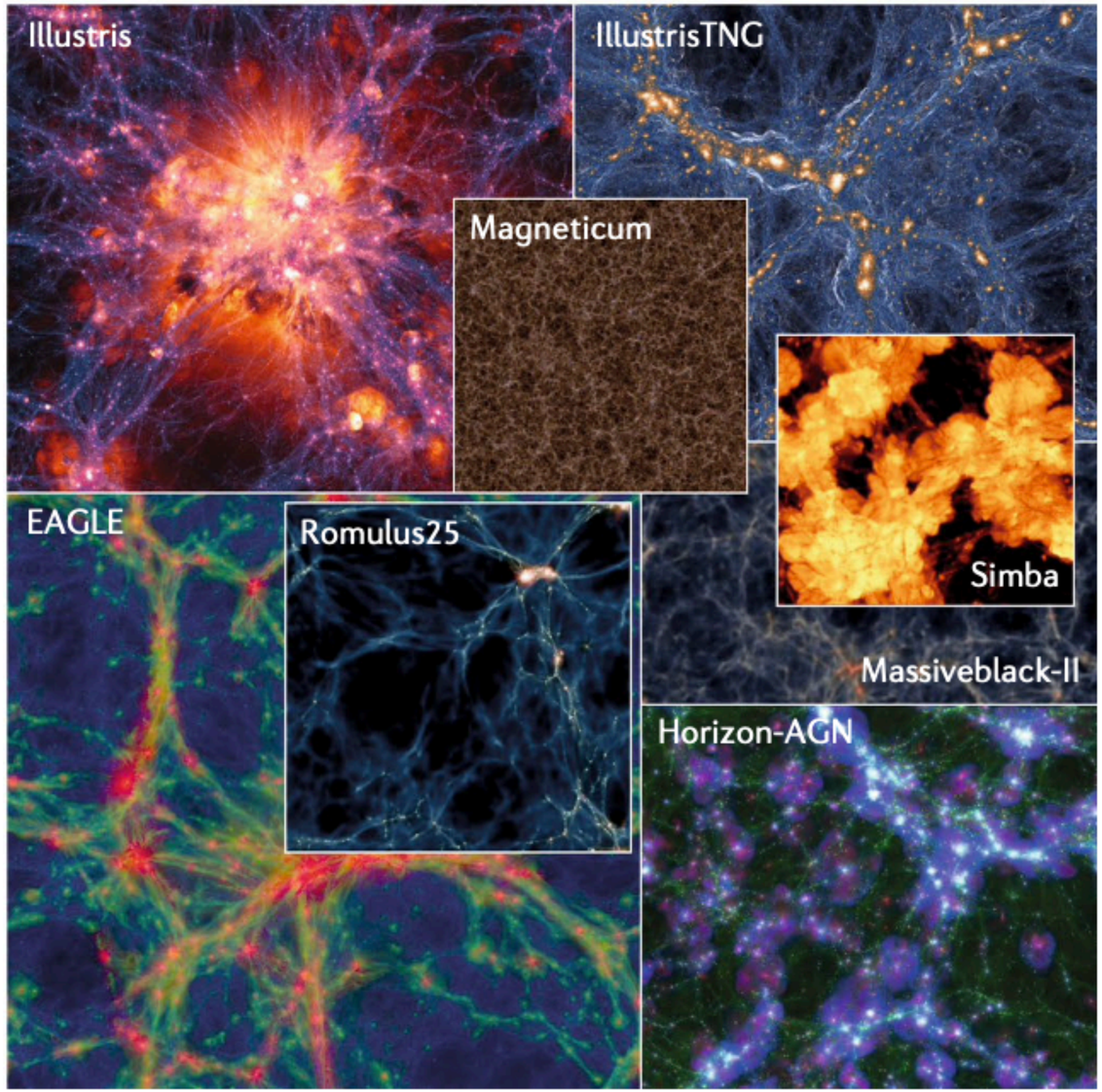
Moriwaki+2020



輝線の強度が同程度かつ波長がある程度離れていればうまくいきそう

輝線強度マッピングにおける課題
② 理論予言・観測解釈

宇宙論的流体シミュレーションによる理論予言



宇宙論的流体シミュレーション：

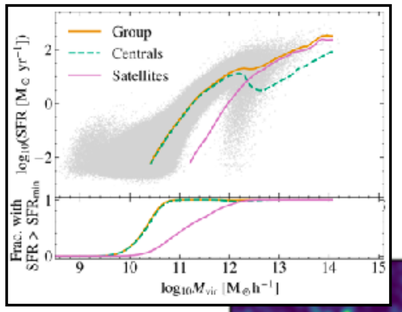
- **大規模構造の進化と銀河形成（星形成、フィードバック）を同時に捉えることが可能**
- **高コストだが最も信頼できる手法の一つ**
- **シグナル検出確率の検討に向いている**

→ cf. 成田さんトーク

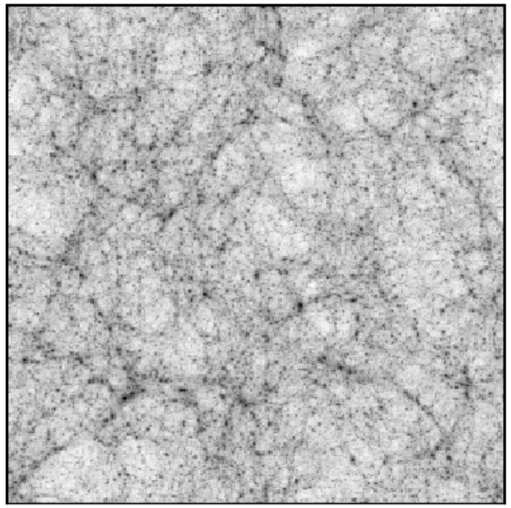
一方、観測データを解釈して銀河形成や宇宙論に関する情報を得るには、より扱いやすいモデルが必要

よりシンプルなモデルを用いた理論解釈

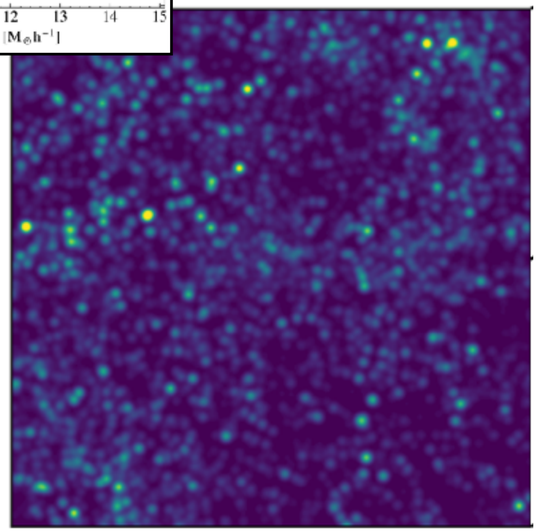
e.g., M_{halo}-SFR relation



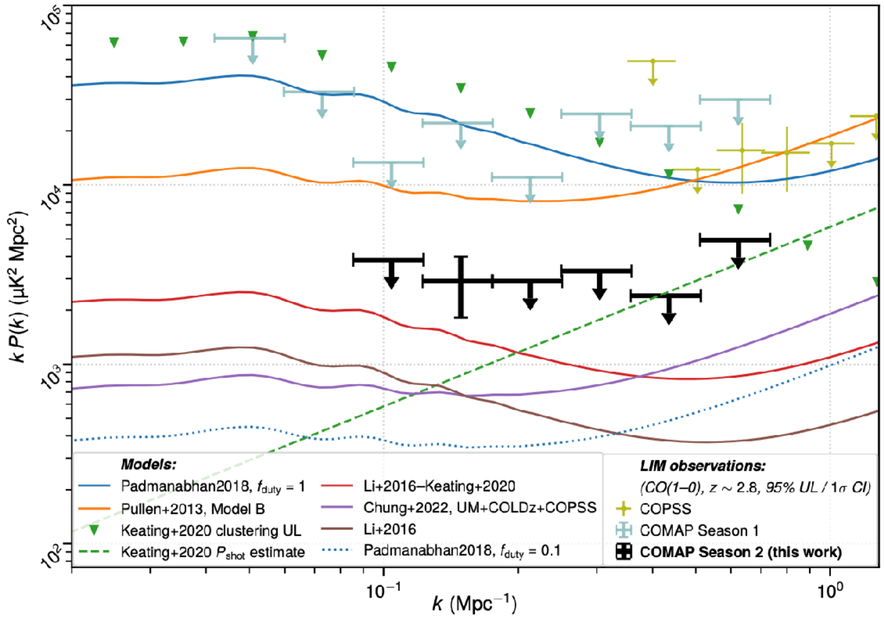
Dark matter distribution (fast simulation)



Line intensity map



Power spectrum

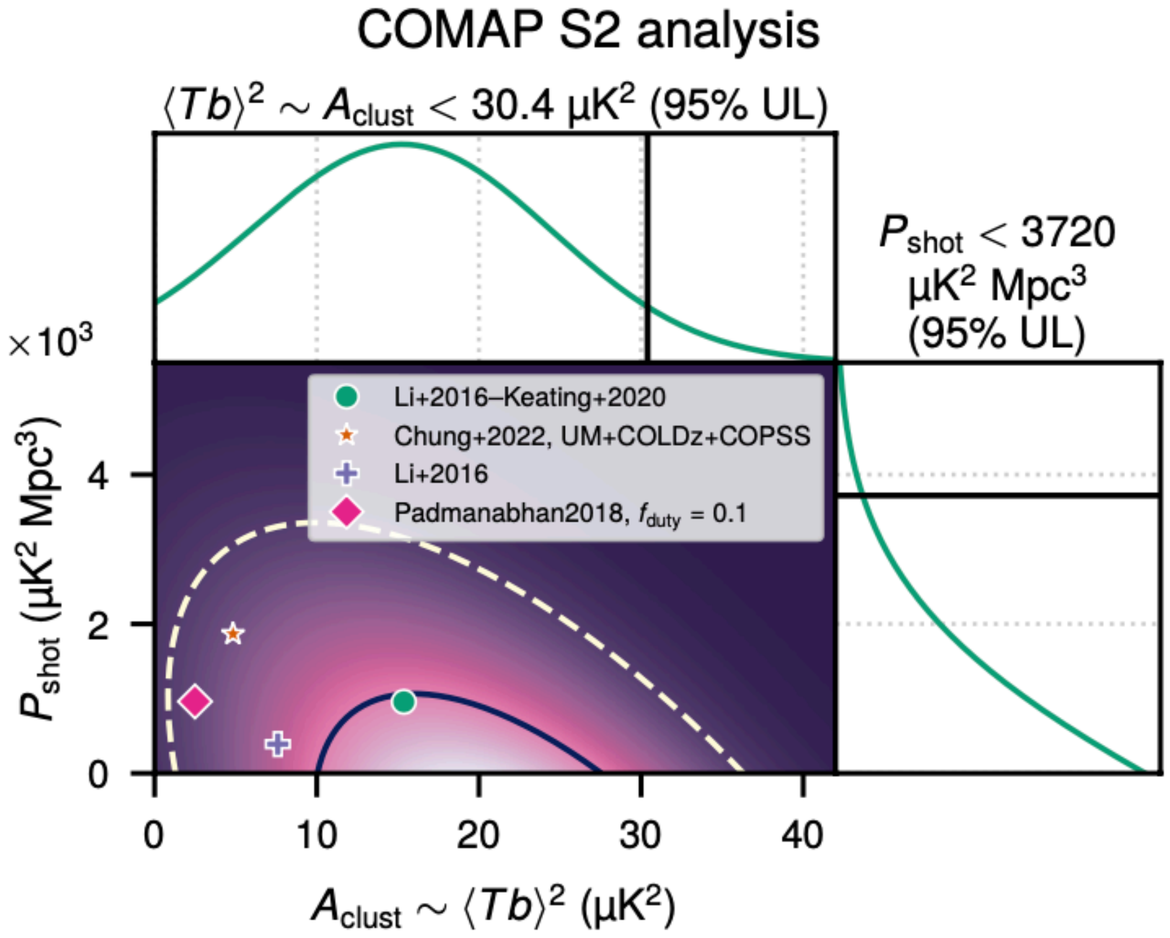


モデルがいくつかのパラメータ（e.g., SFR/M_{halo}, Ω_m, σ_8, …）によって記述できれば
フィッティングにより銀河形成・宇宙論を理解することができる

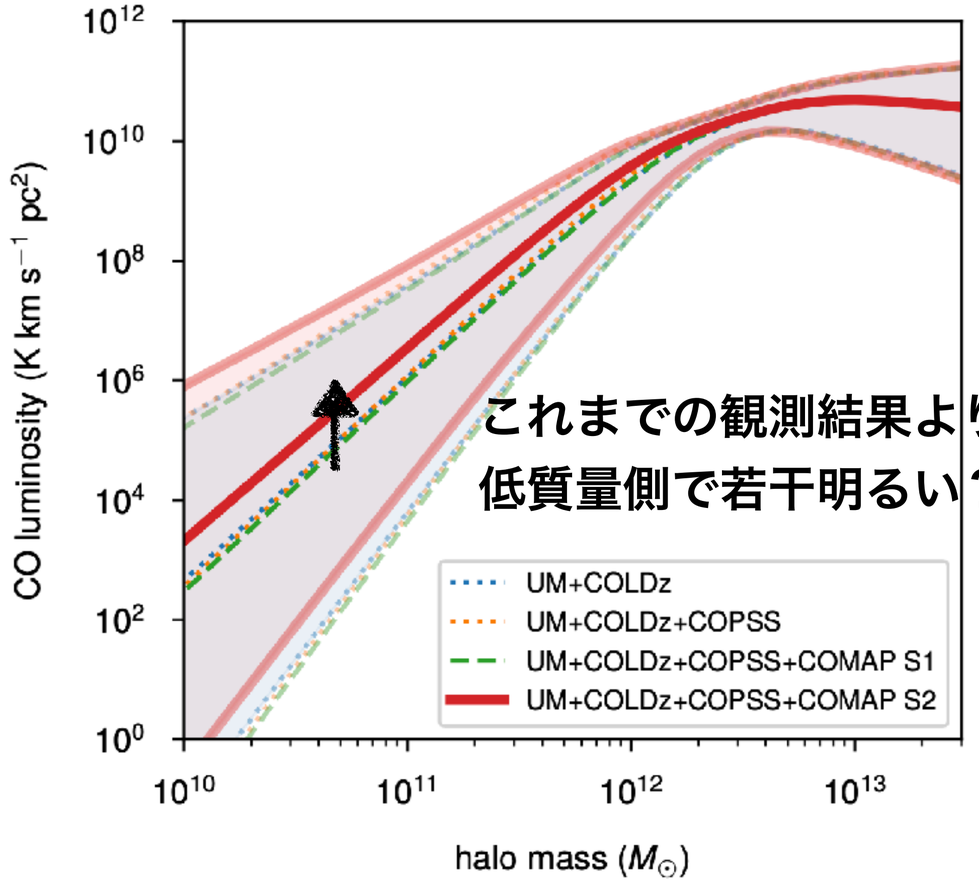
COMAP における解析

Chung+2024

MCMC fitting

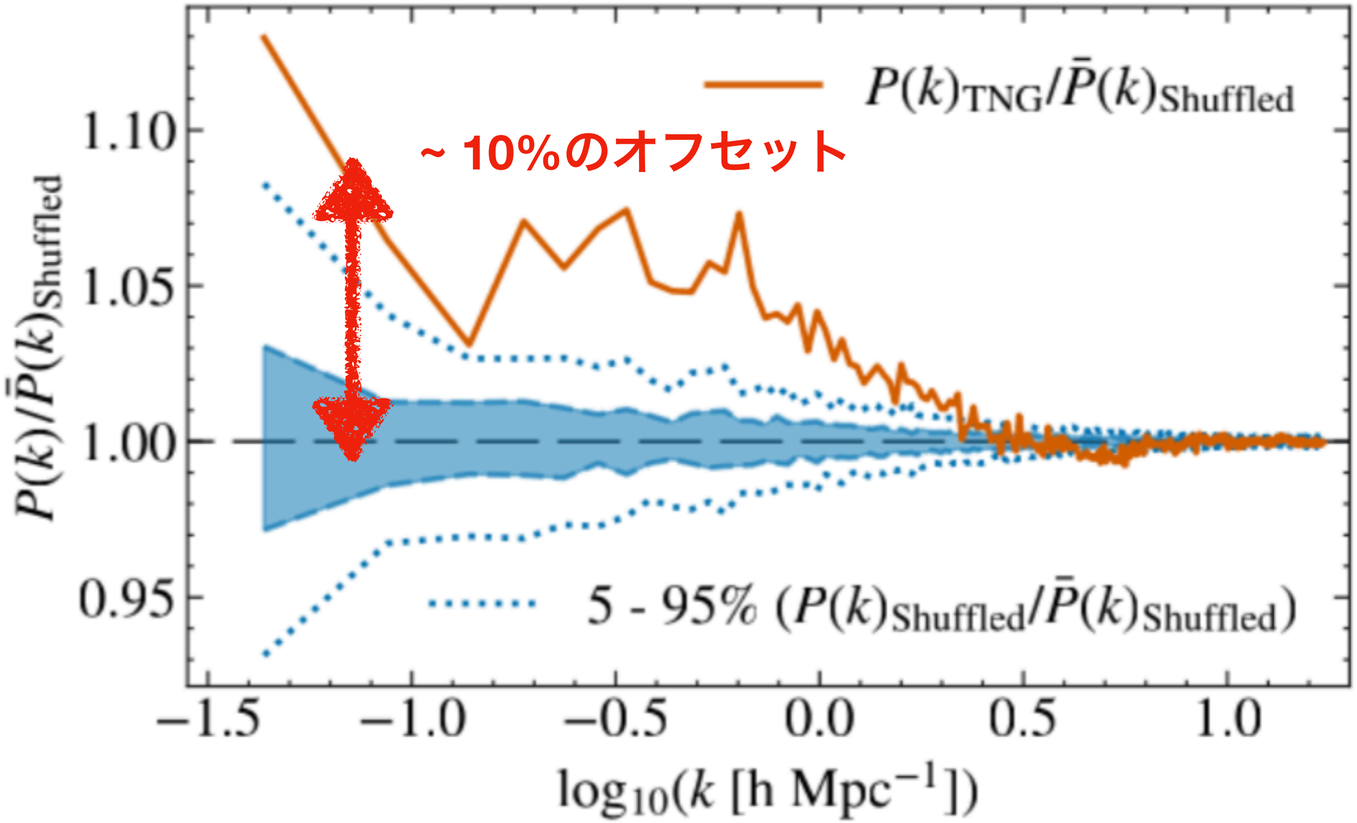


$M_{\rm halo}$-$L_{\rm CO}$ relation を推定



これまでの観測結果より
低質量側で若干明るい？

stochastic な SFR と DM ハローの関係はモデルが難しい

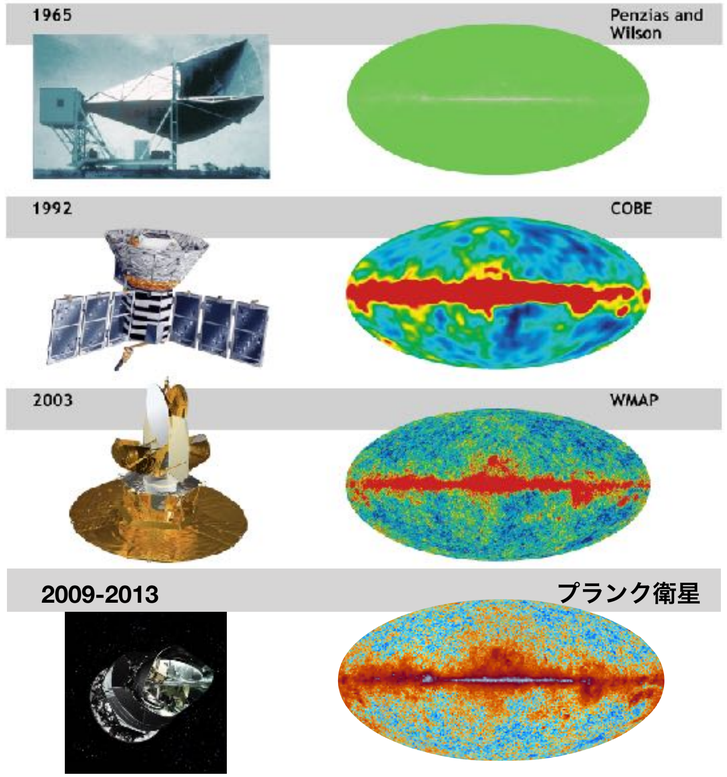


Jun, KM+ in prep.

- 単純なモデルを用いた場合 ~10% 程度の系統誤差が出てきうる（e.g., Jun, KM+ in prep.）
- こうしたバイアスによる観測への影響を正しく理解することが今後の理論面での一つの課題

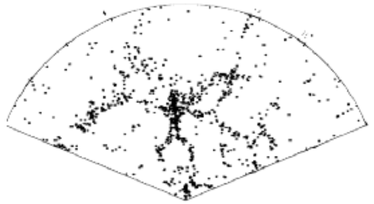
おわりに：これまで・これからの観測

宇宙マイクロ波背景放射

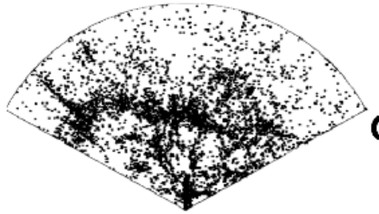


⋮

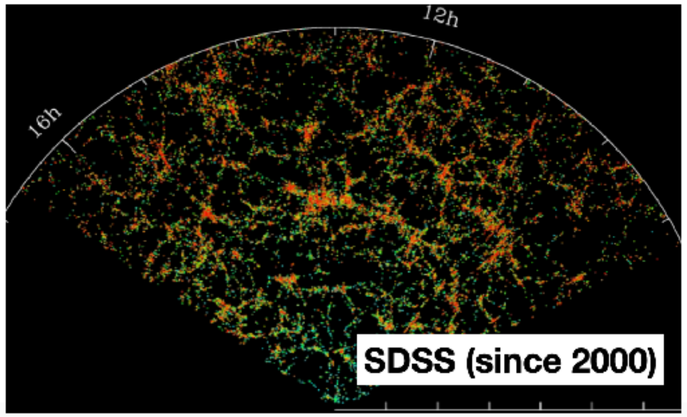
銀河赤方偏移探査



CfA 銀河探査
(1977-1982)



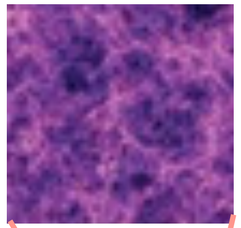
CfA2 銀河探査
(1984-1995)



⋮

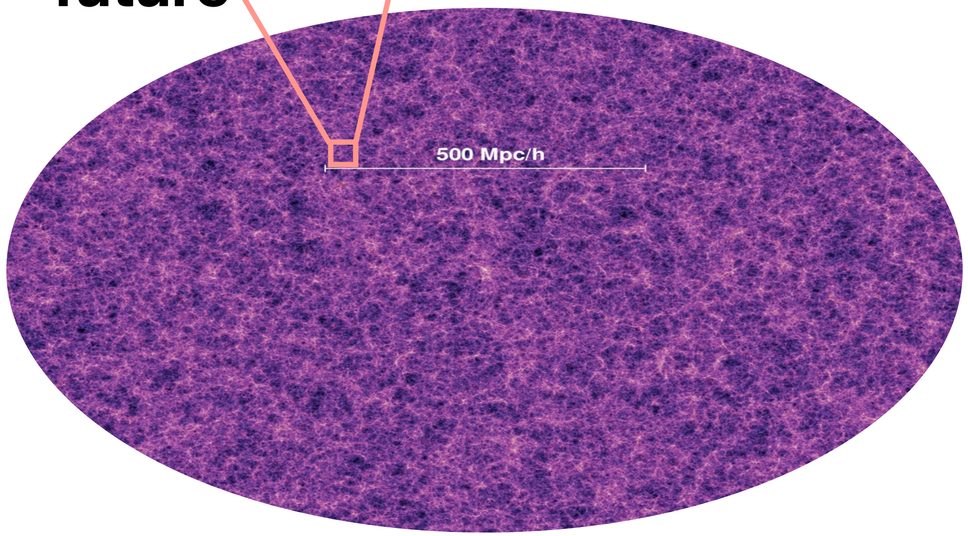
輝線強度マッピング

2020s -





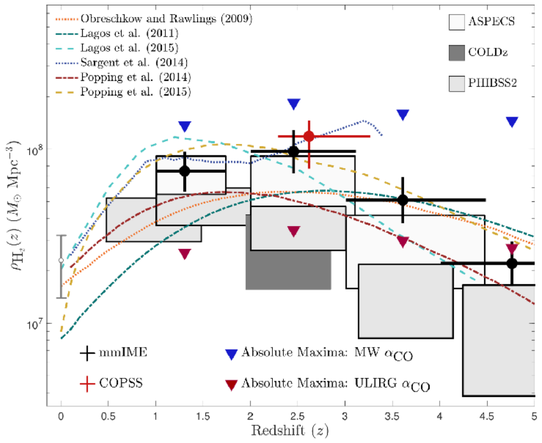
future

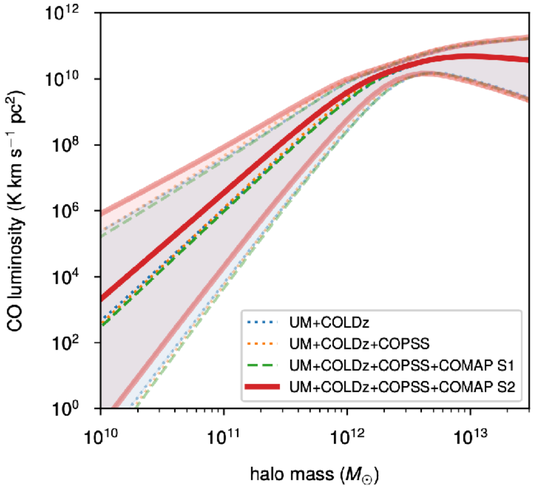


より強力な制限が得られる

まとめ

- 輝線強度マッピングで何がわかるか？
  - 銀河形成史（e.g., 分子雲密度進化、星形成率密度進化）
  - 宇宙論
  - 宇宙再電離（特に21cmとの相互相関）





- 輝線強度マッピング観測における課題
  - 前景ノイズ等
    - 連続波除去 → $k_{||}$ 除去、arPLS法など
    - 他の輝線除去 → masking、パワースペクトルの非等方性、機械学習など
  - 理論予言・解釈
    - SFR - M_{halo} などのパラメータ化が必要

- 将来的により広領域・より遠方へ → より強力に銀河論・宇宙論を制限