

宇宙大規模構造

東京大学理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センター

助教 森脇可奈

東京女子大学 理論物理研究室セミナー 2024年7月26日

今日話す内容

- **宇宙大規模構造とは**
- **何がわかるか：暗黒物質・暗黒エネルギー・初期状態**
- **いかに効率よく宇宙大規模構造を観測するか？**
- **シミュレーションとデータ科学の手法を用いた大規模構造の研究**

天の川銀河

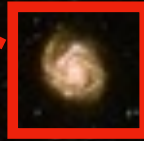
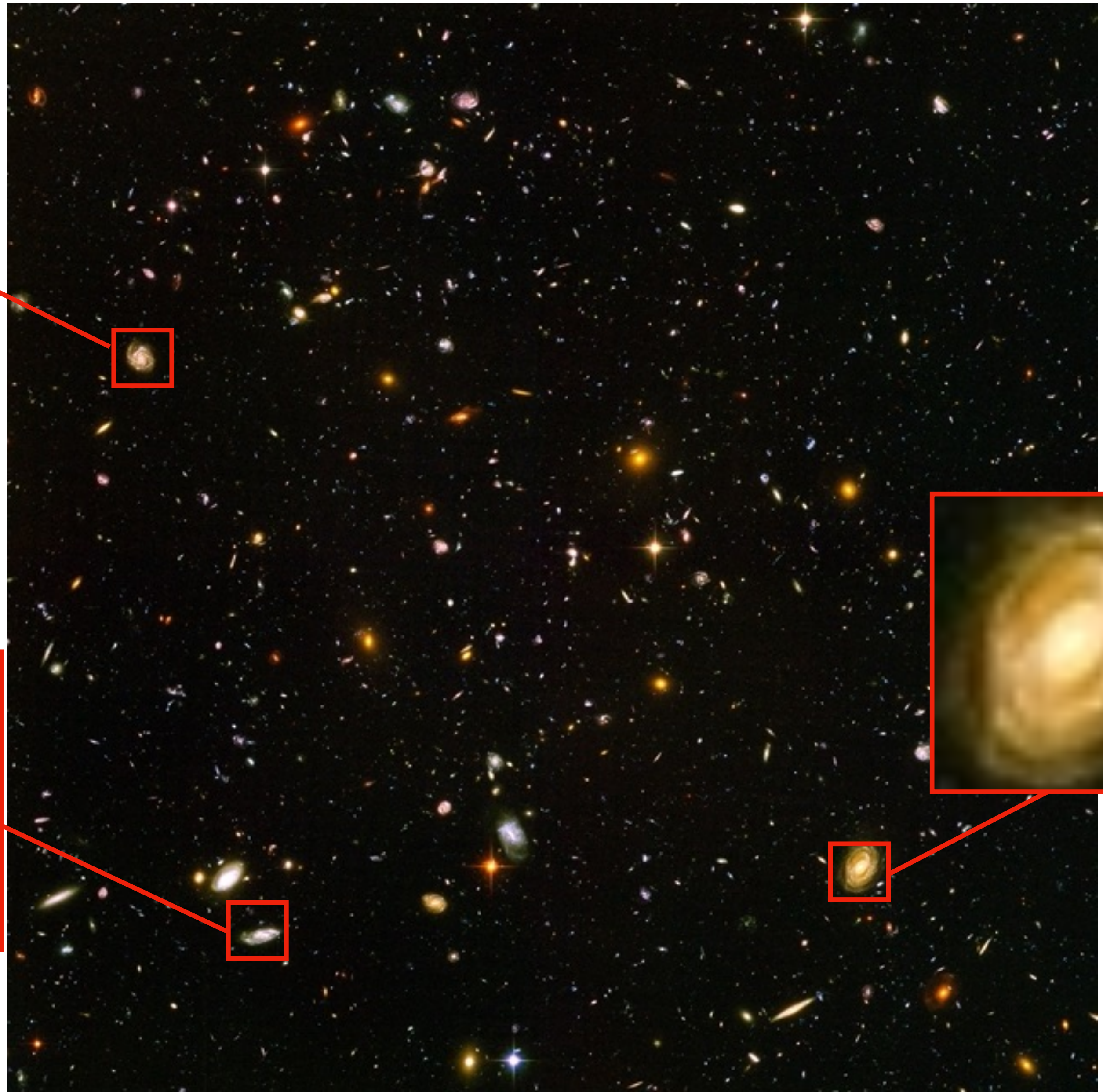
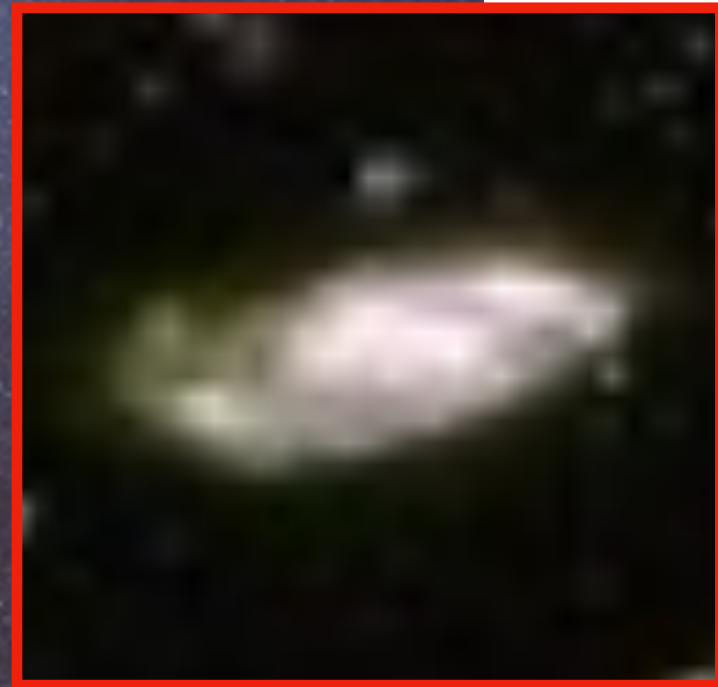


Image credit: 国立天文台

Image credit: NASA, ESA, and S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

銀河の分布のみに注目



宇宙の大規模構造

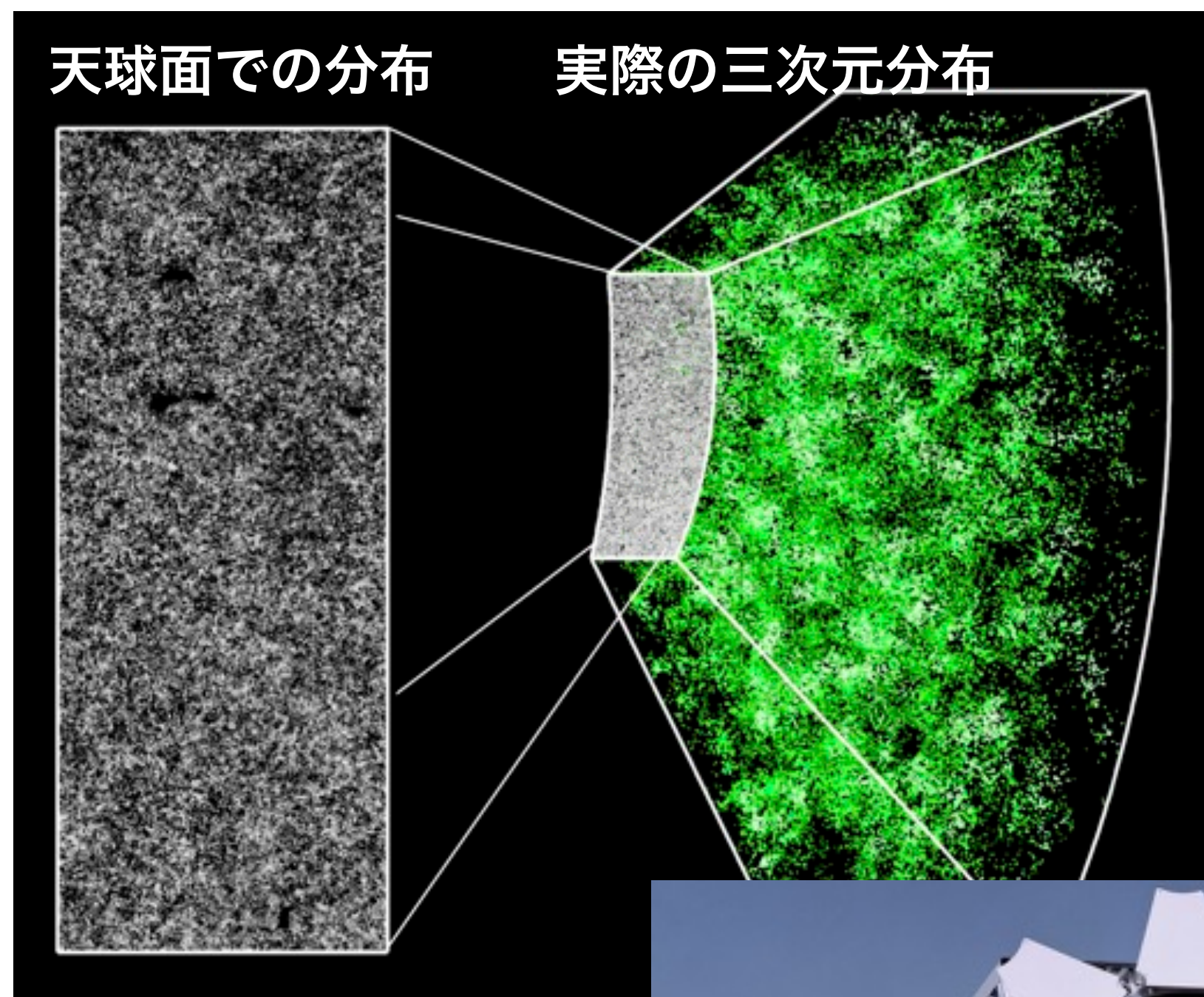


Image credit: Jeremy Tinker and the SDSS-III

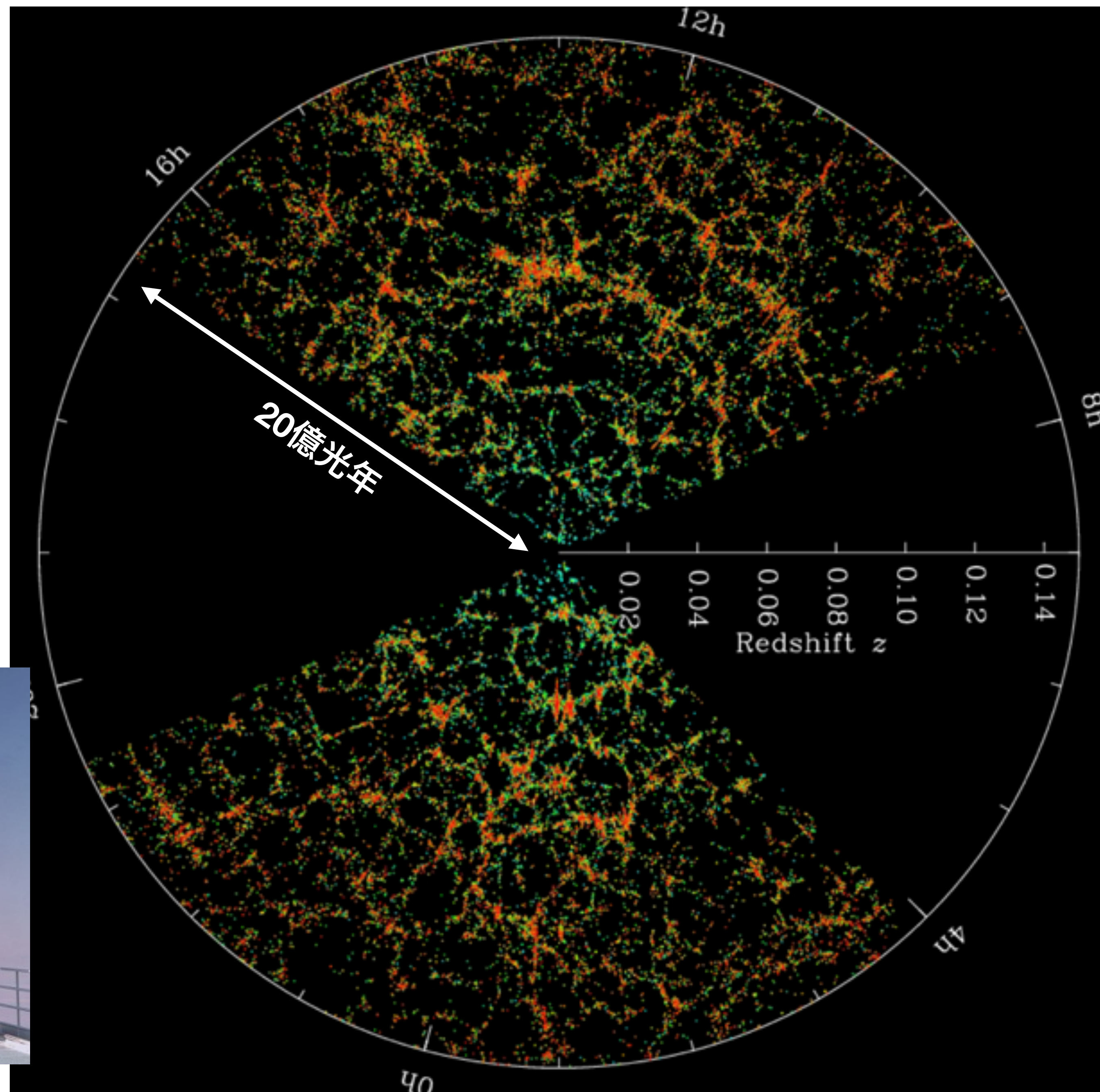
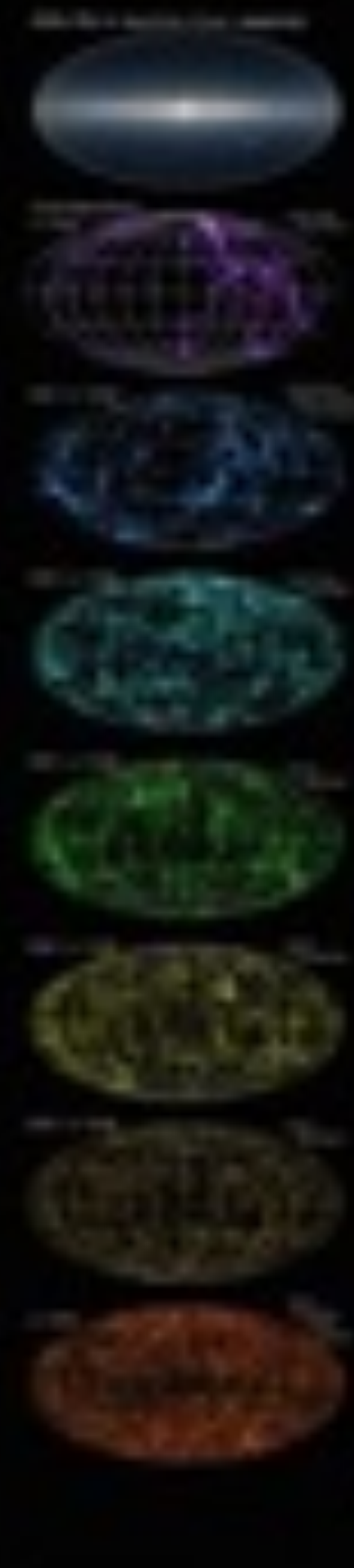
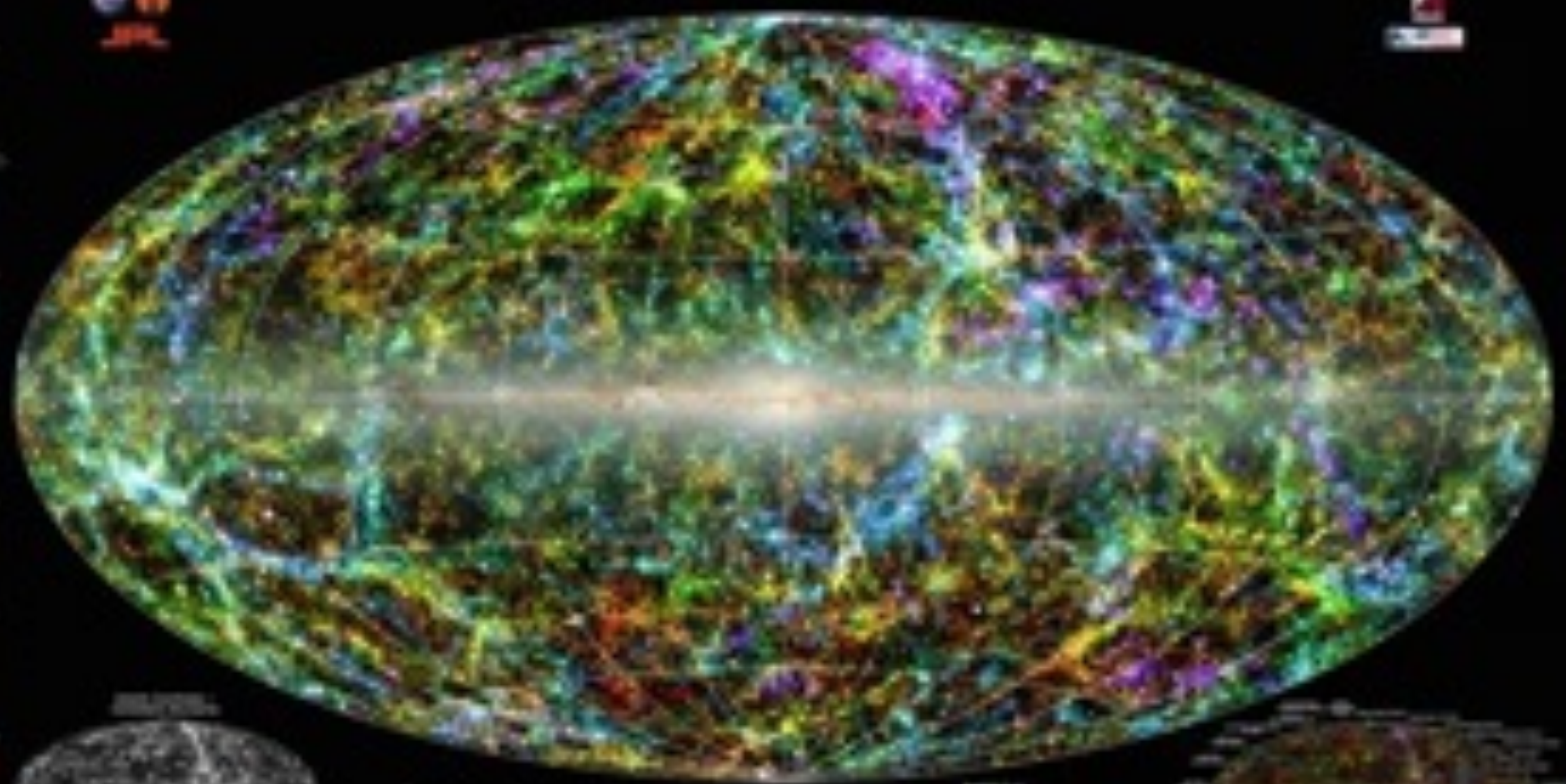


Image credit: M. Blanton and SDSS

Local Universe

100
10
1

100
10
1



Parameters of the Local Universe
The Local Universe is defined as the region around the Milky Way that is gravitationally bound to it. It includes the Milky Way, the Andromeda Galaxy, and the Local Group of galaxies. The Local Universe is a complex system of galaxy clusters and filaments, with a total mass of approximately 10^{15} solar masses. The Local Universe is expanding, with galaxies moving away from the Milky Way at a rate of approximately 100 km/s per Mpc.

Color scale for redshift
The color scale represents the redshift of the galaxies, ranging from blue (low redshift) to red (high redshift). The color scale is based on the Ly-alpha forest transmission function, which is a measure of the amount of Ly-alpha radiation that is transmitted through the intergalactic medium. The color scale is used to identify regions of high and low galaxy density, and to study the evolution of the universe over time.



宇宙の構造形成 シミュレーション

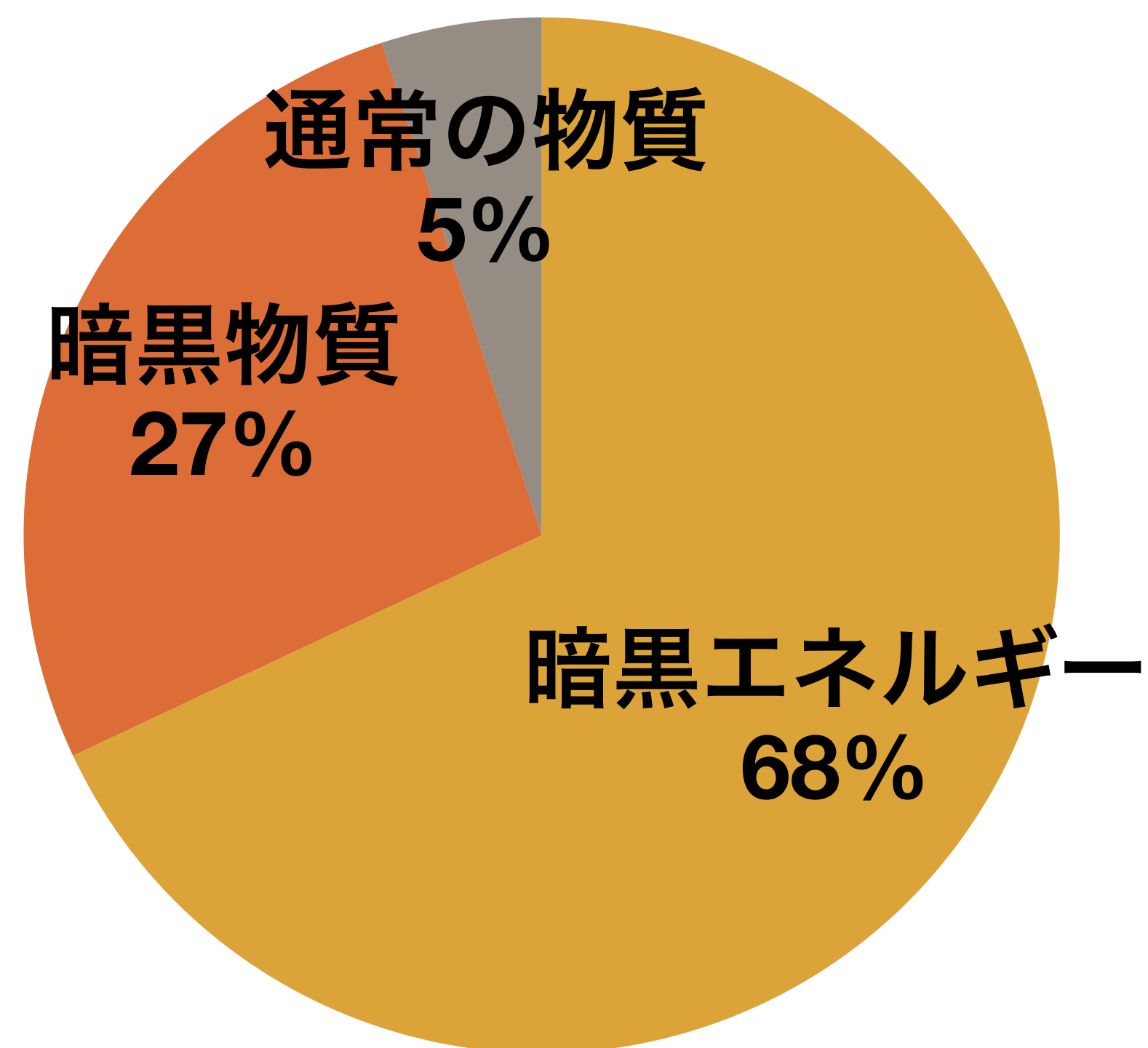
重力によって物質が引かれあい、
高密度・低密度領域ができる。

密度の高いところで銀河が生まれる。

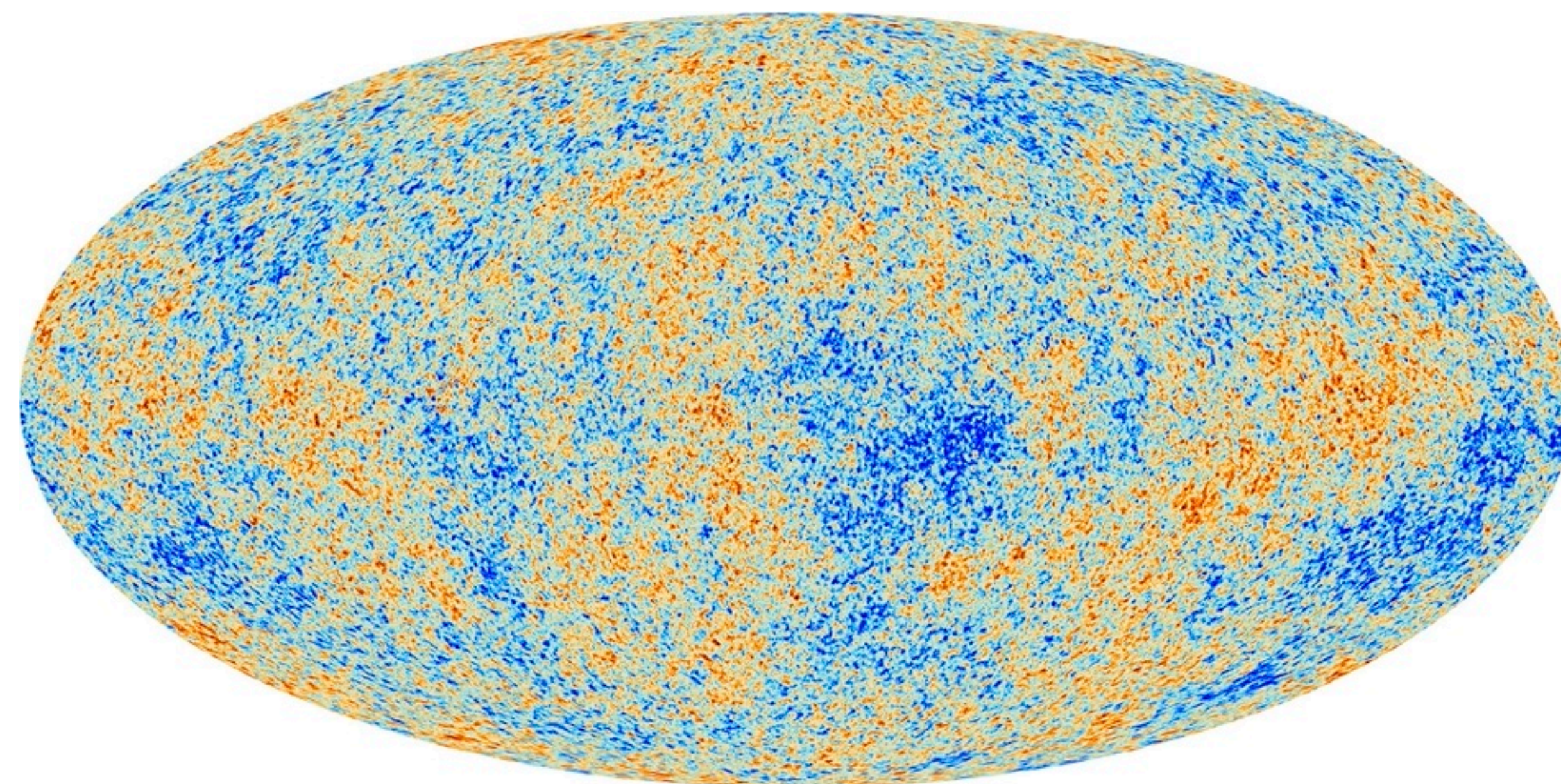
**宇宙の構成要素・初期条件を適切に
設定すれば、観測される大規模構造
を再現できる**

宇宙の構成要素と初期状態

宇宙大規模構造は、その構成要素と初期状態と密接に関わっている



宇宙の構成要素



電波観測によって明らかになった
ビッグバンの約40万年後の宇宙の姿：
ほぼ均一で、ごく微小の密度「ゆらぎ」が存在

宇宙を満たす物質 「暗黒物質」

種々の観測から、宇宙に目に見えない（光らない）物質が大量に存在することがわかった。その量は通常物質の5倍近く

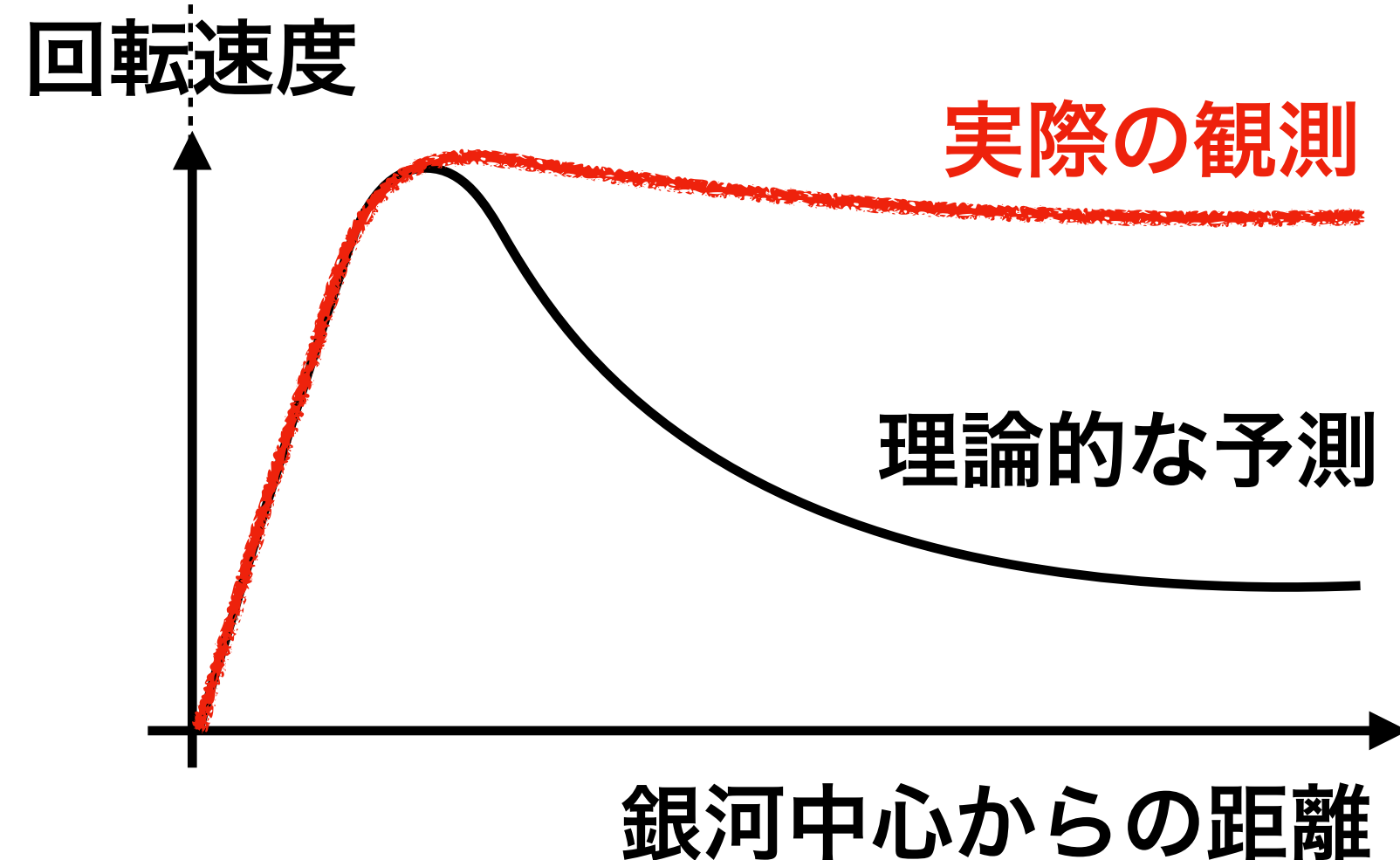
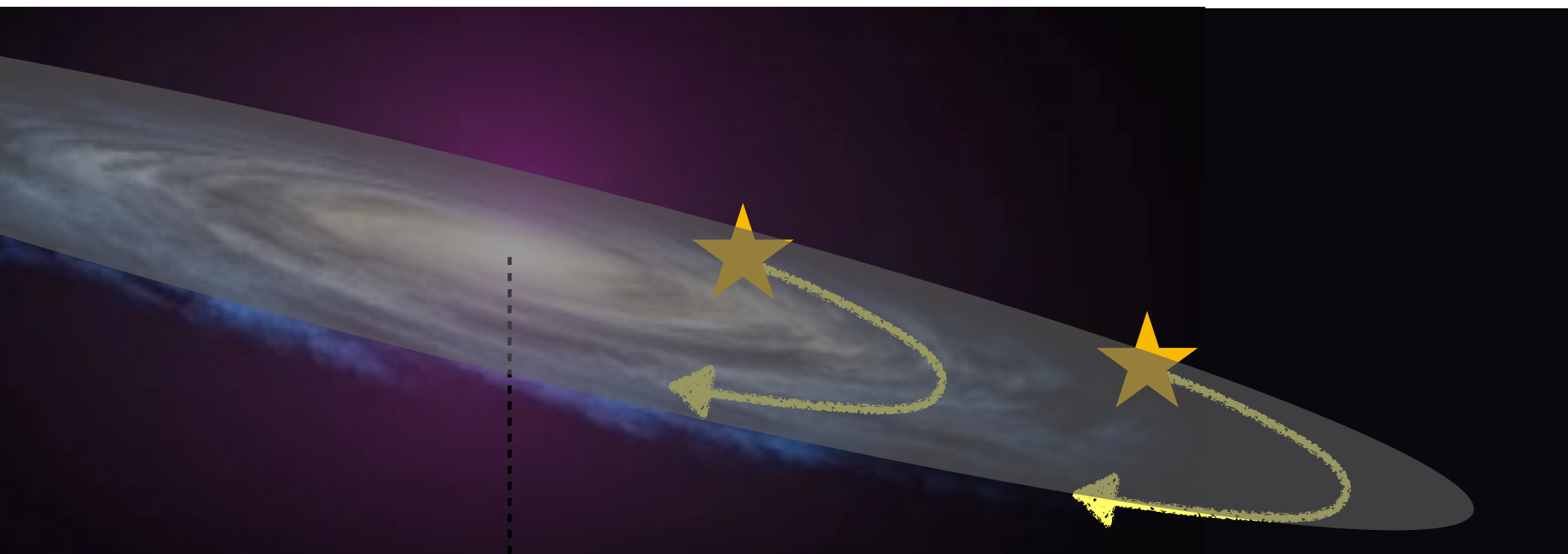


NASA, SCScl, and ESA



クレジット：国立天文台・ハワイ観測所

銀河の回転速度



ケプラーの法則

重力 遠心力

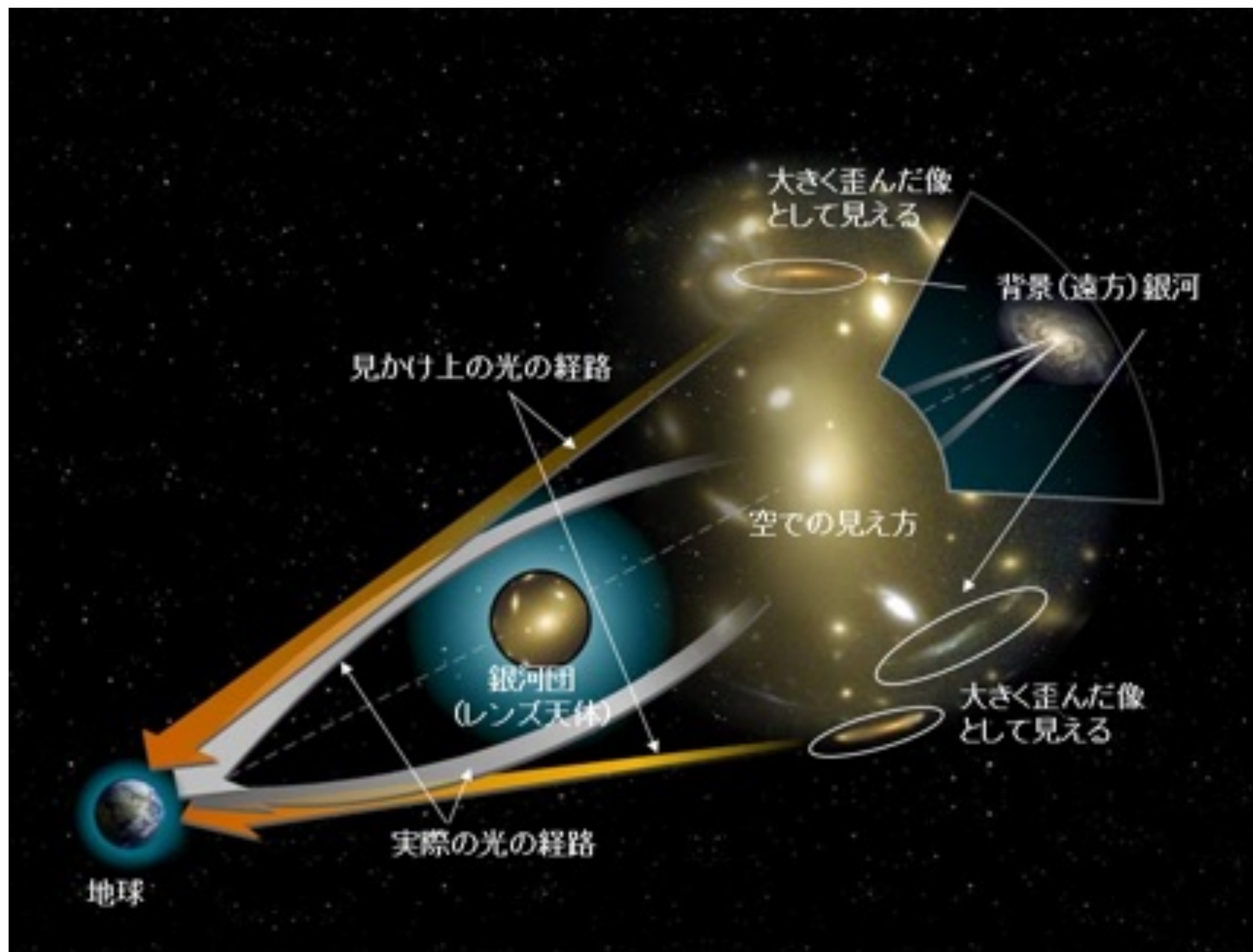
$$\frac{GM}{r^2} = \frac{v^2}{r} \implies v^2 = \frac{GM}{r}$$

光っている物質（星・ガス・ダスト）は中心に分布しているため、中心から遠いところではケプラーの法則に従い速度が小さくなっているはずである。

観測では速度がほぼ一定。

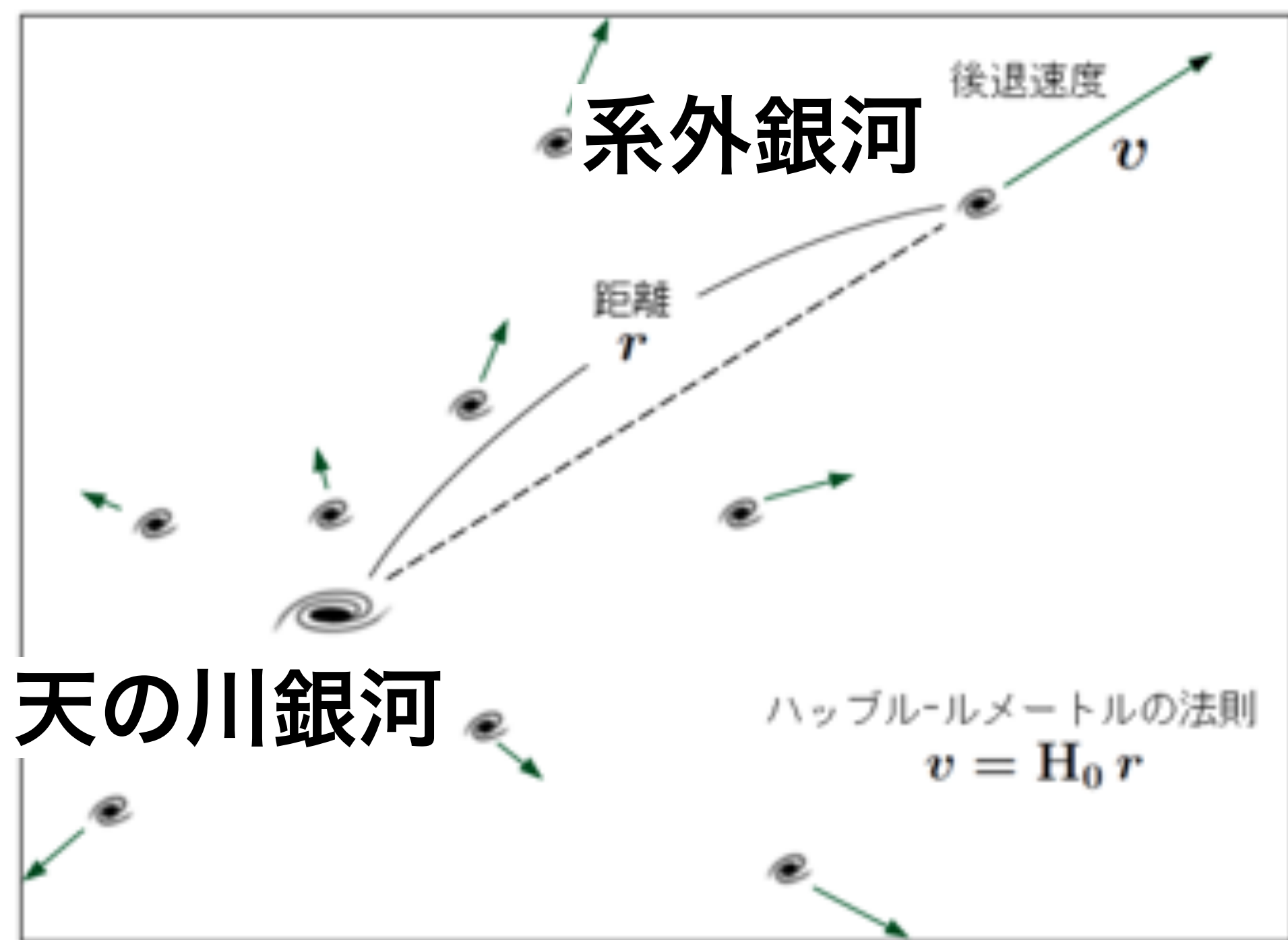
→ 光を発さない、なんらかの物質 = 「暗黒物質」が銀河の周りに広がっていると考えられる

重力レンズ効果

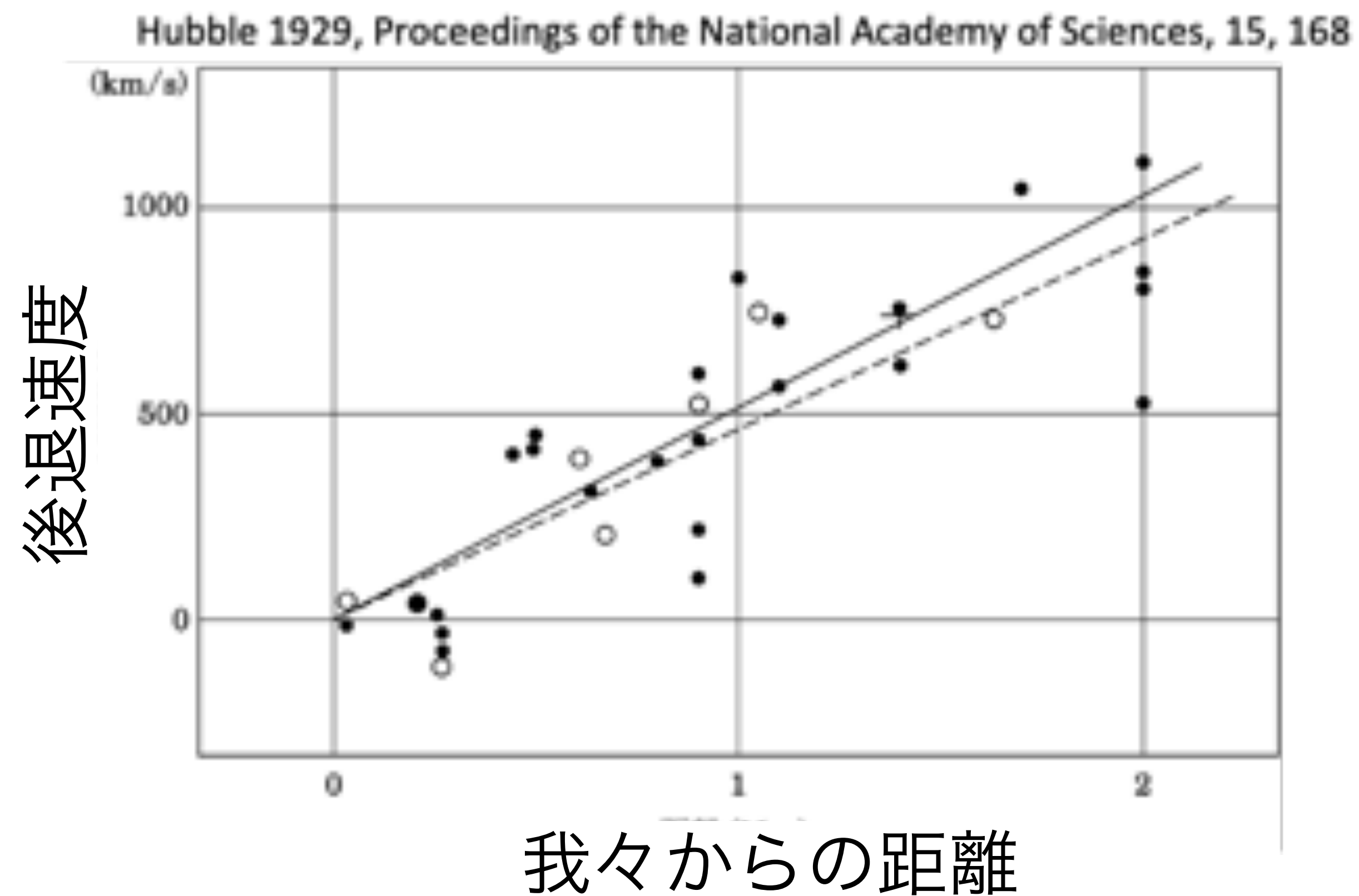


アインシュタインの一般相対性理論では、重い物体の周りでは空間が歪む。これによって遠くの銀河からの光の進行方向が曲げられ、銀河が歪んで見えることがある。

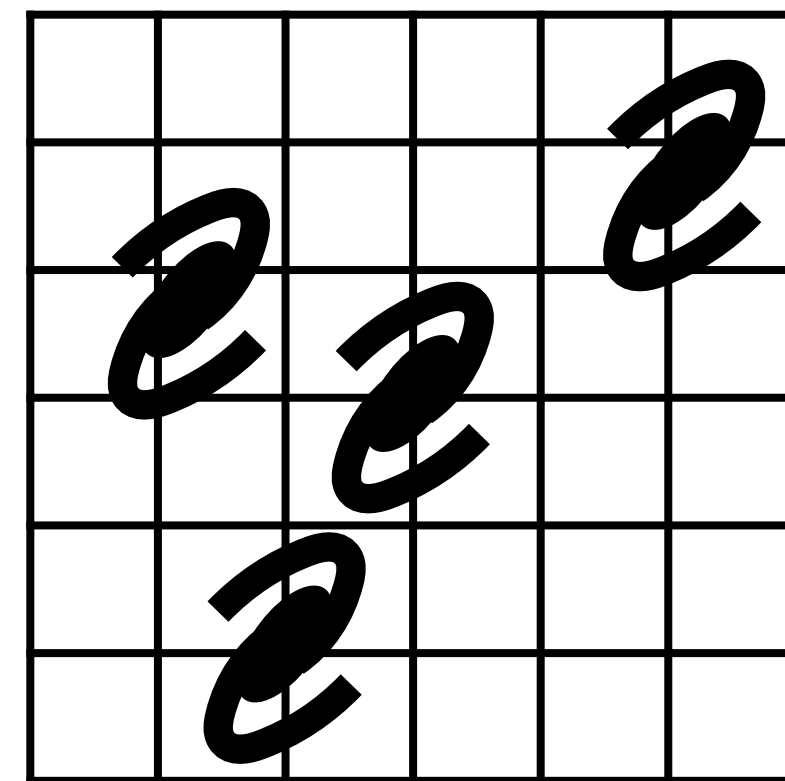
ハッブル・ルメートルの法則



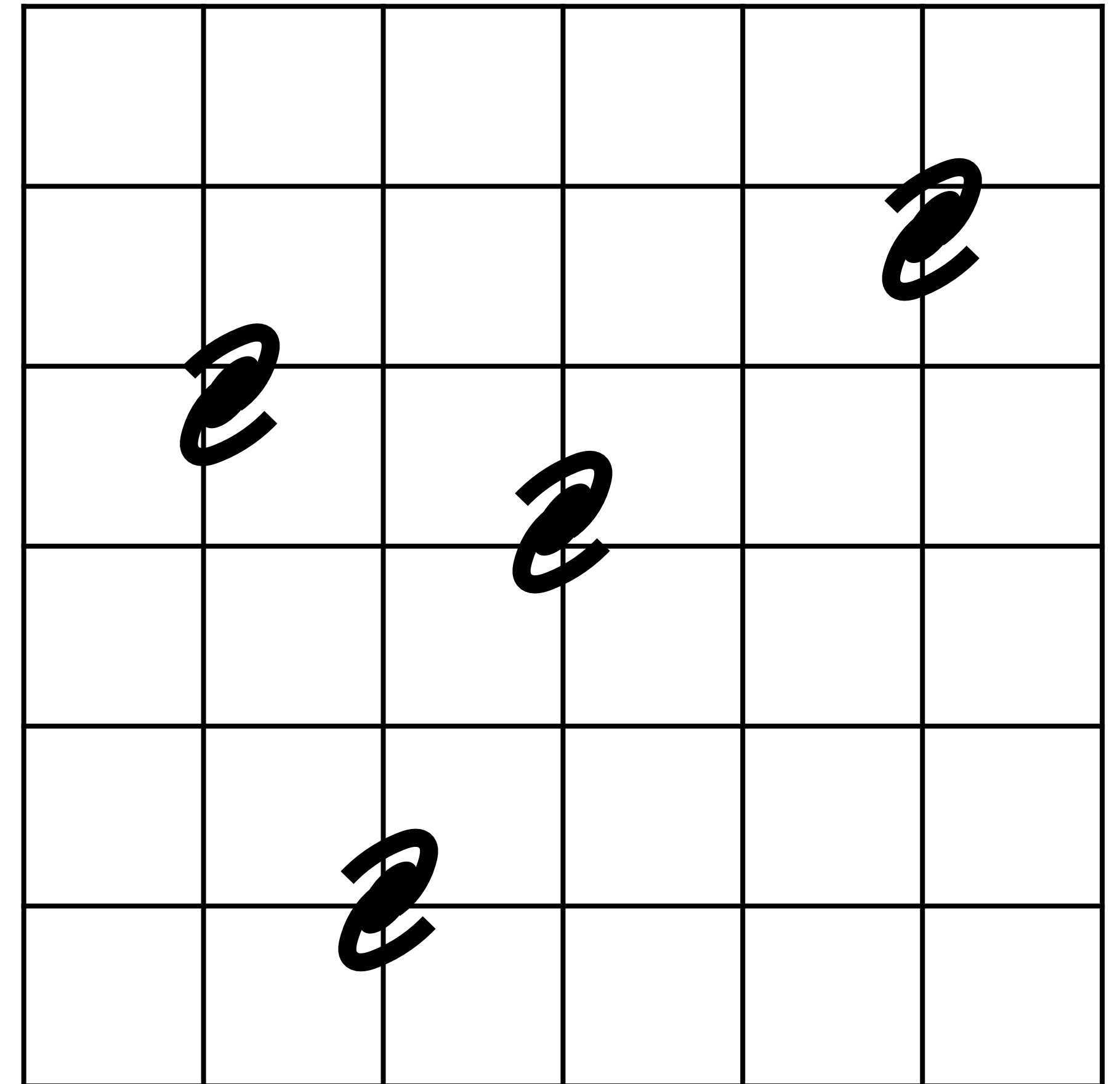
出典：天文学辞典（日本天文学会）



宇宙膨張と暗黒エネルギー



宇宙膨張



具体的に何が膨張を引き起こしているのかわからないが、例えば空間の膨張を記述するアインシュタイン方程式で、状態方程式

$$p = -\rho \quad (\text{より具体的には } p < -(1/3)\rho \text{ であればOK})$$

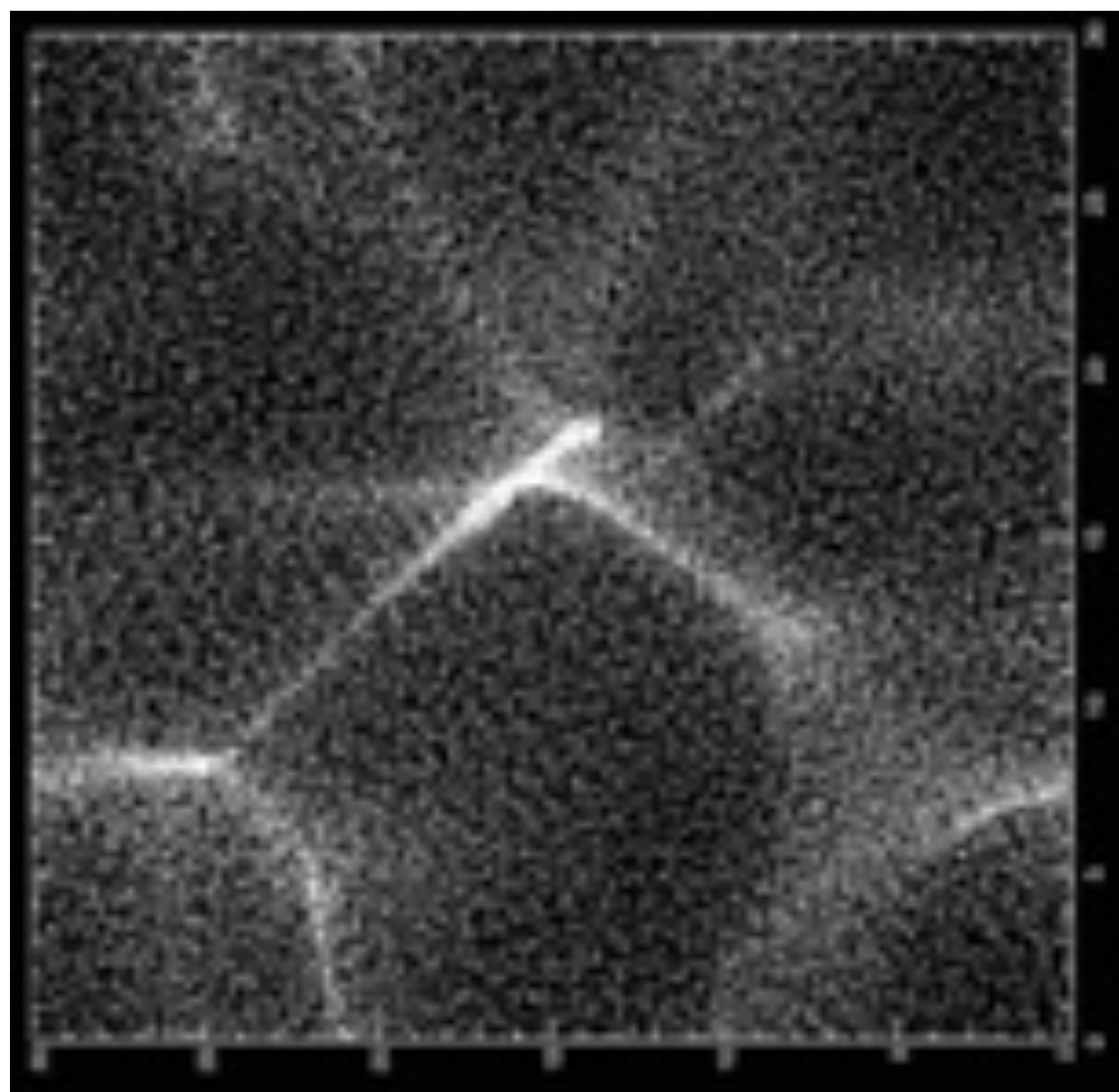
を満たすような「流体」を仮定すると説明がつく

→ このようなものを「暗黒エネルギー」と呼ぶ

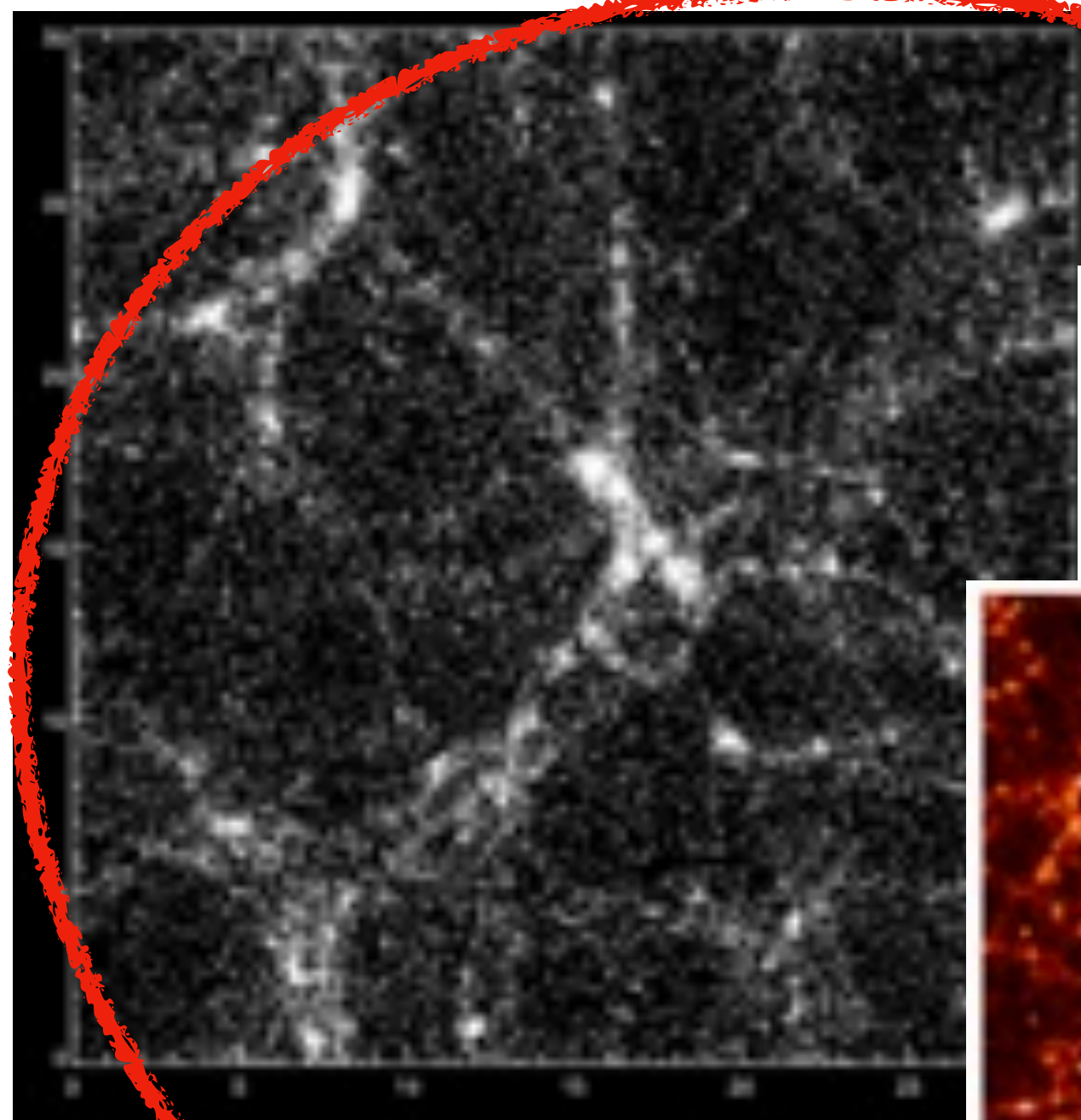
暗黒成分の構造形成への影響

暗黒物質の性質や暗黒エネルギーの有無によって、異なる銀河の統計量（数・分布）が予言される

「温かい」暗黒物質



「冷たい」暗黒物質

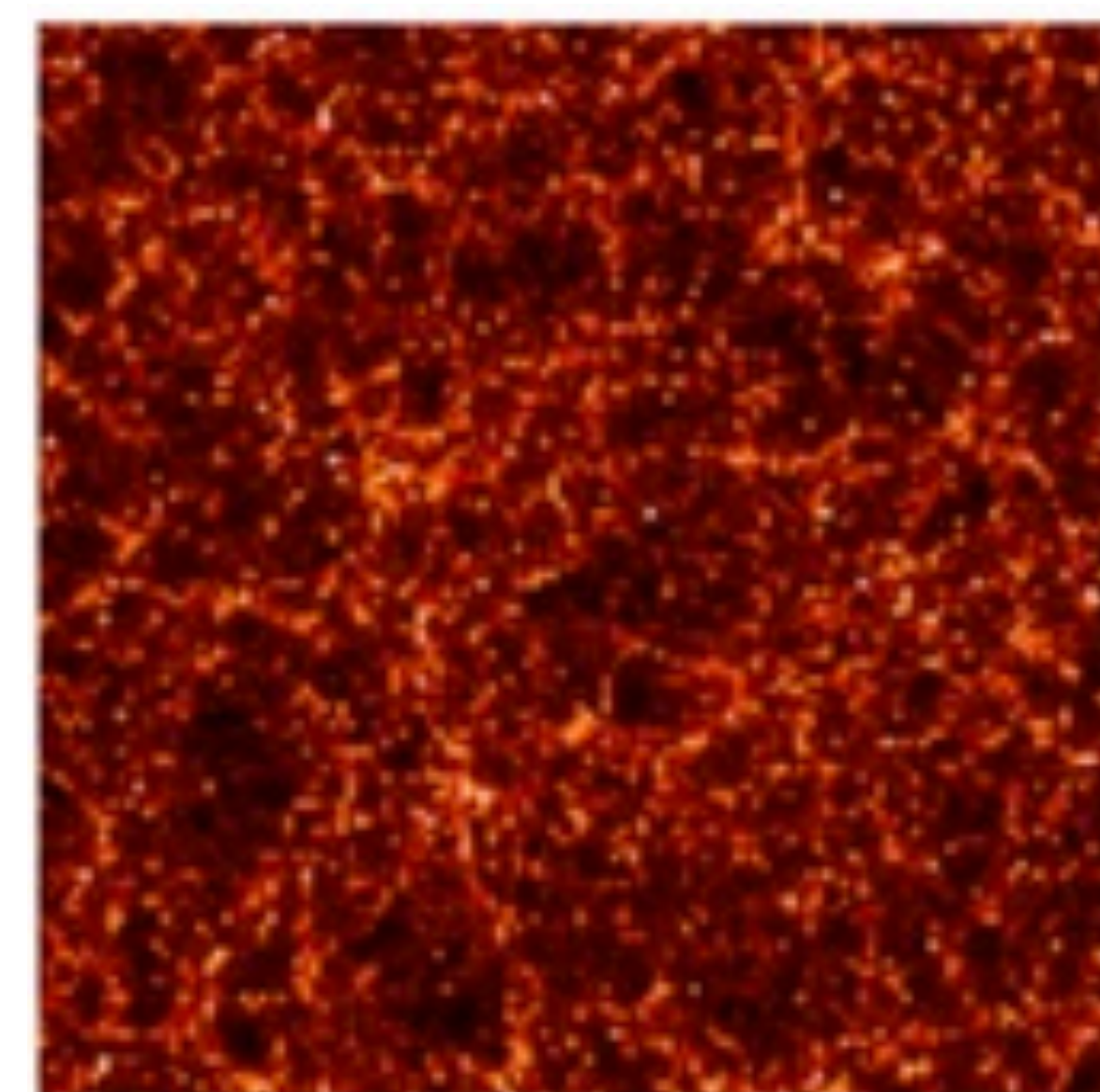
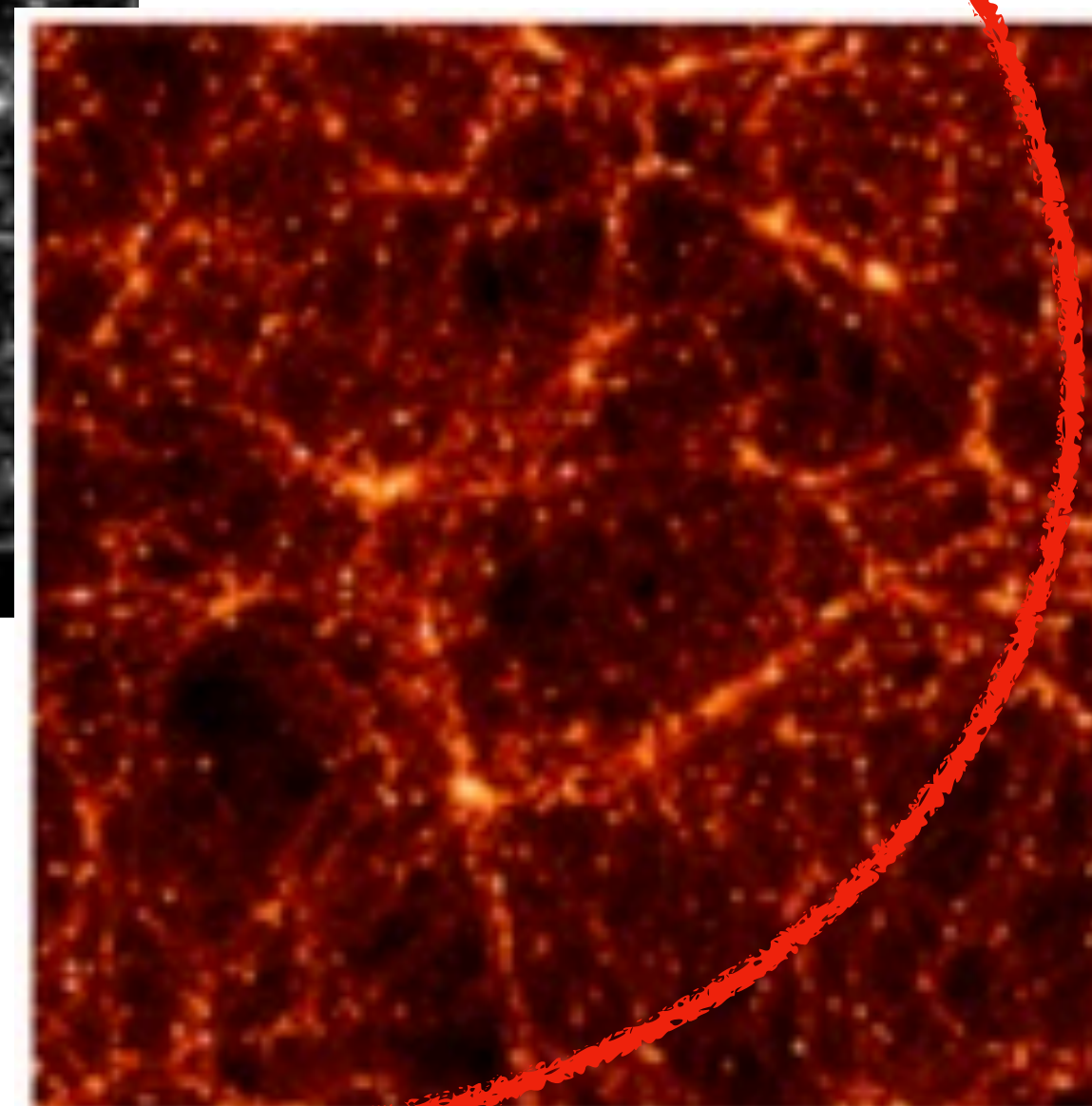


観測と無矛盾
→ 標準モデル

物質 30%

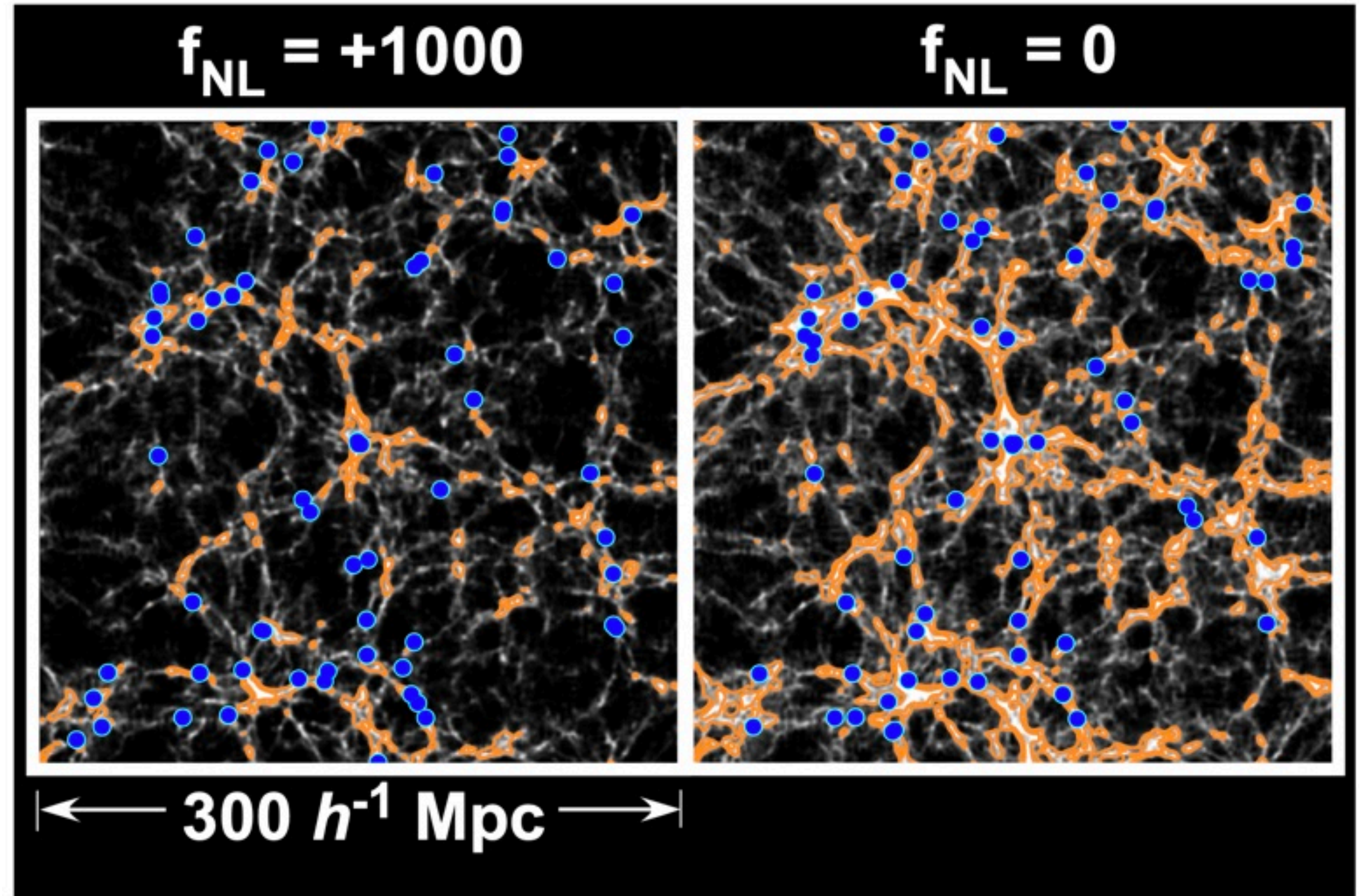
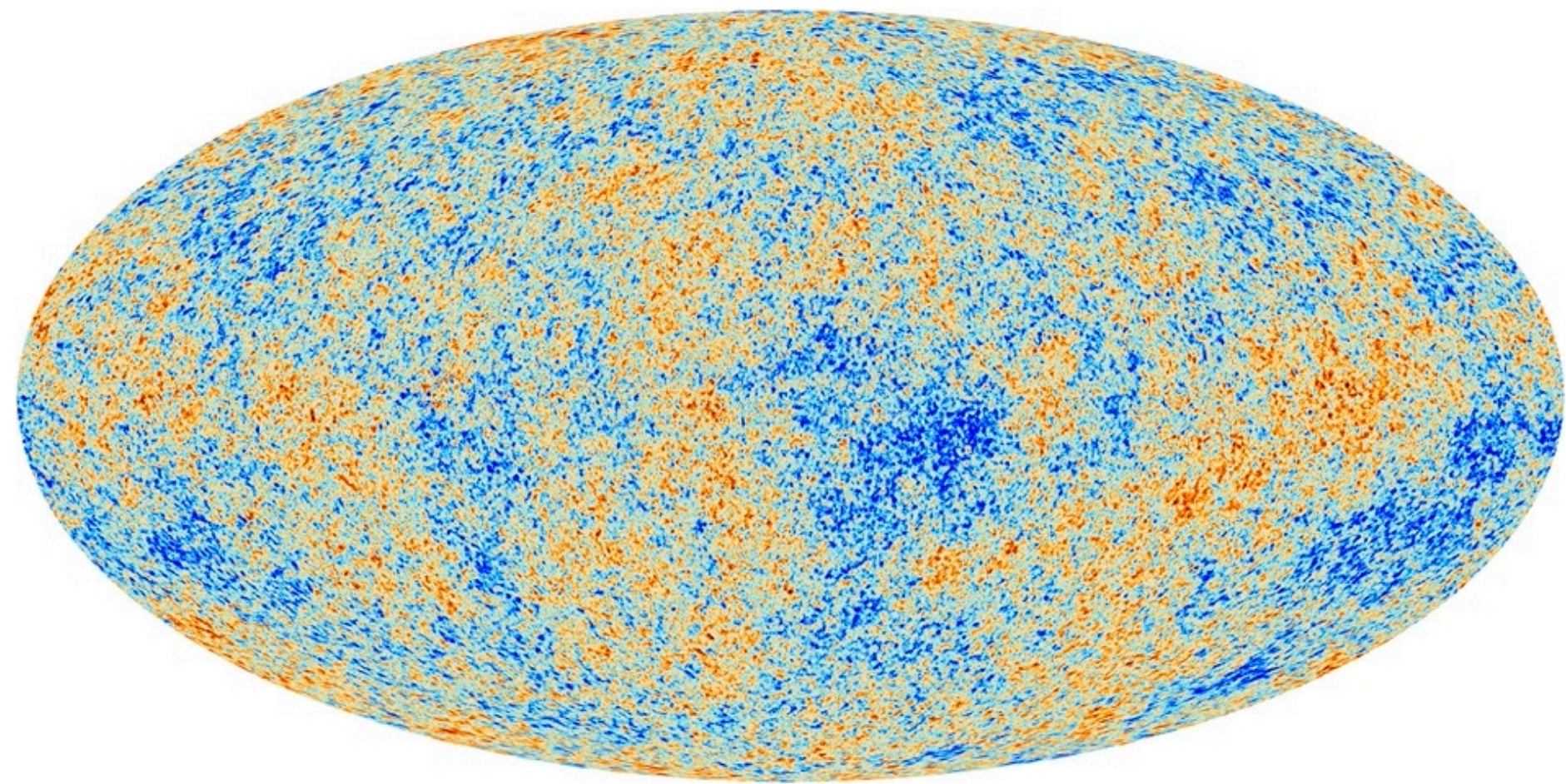
暗黒エネルギー 70%

物質 100%



宇宙初期に存在する

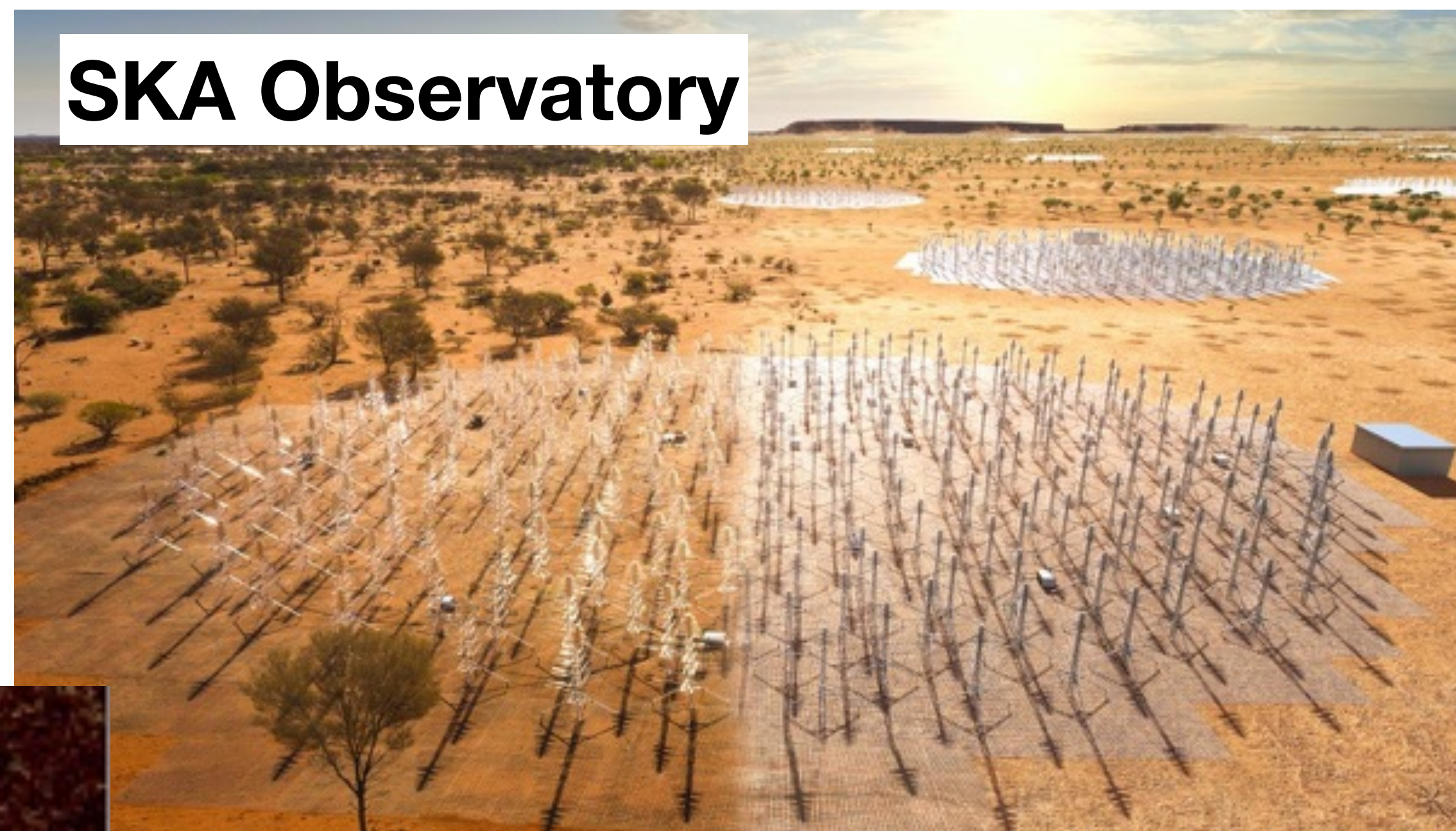
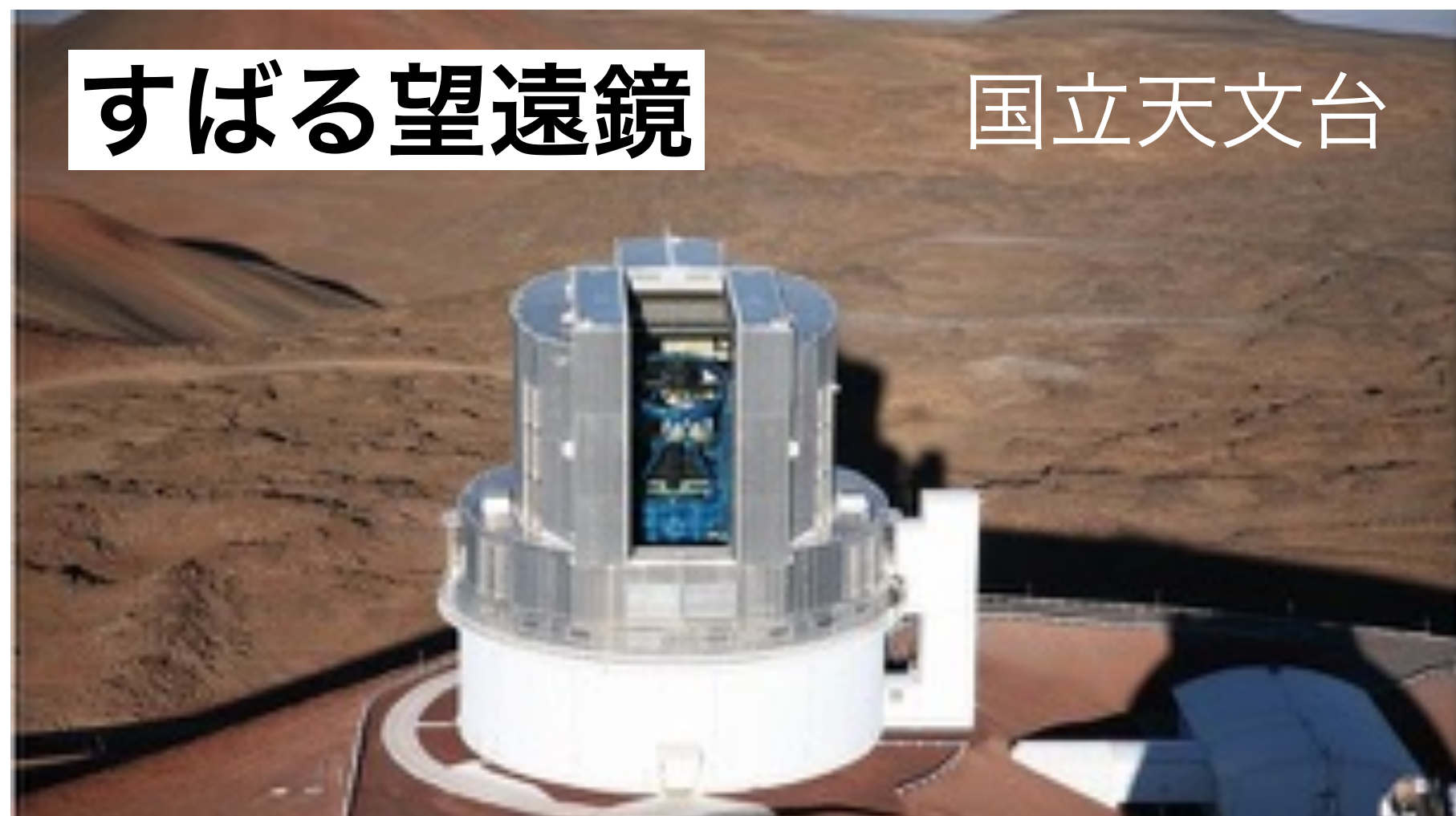
初期密度ゆらぎはほぼ正規分布で、
現在の観測では正規分布からのずれは
見られていない ($f_{\text{NL}} = -0.9 \pm 5.1$)



しかし、特定のインフレーションモデル
では正規分布からずれた状態を生み出す

こうしたことを探るには、これまで以上に
広い領域の探査が必要となる

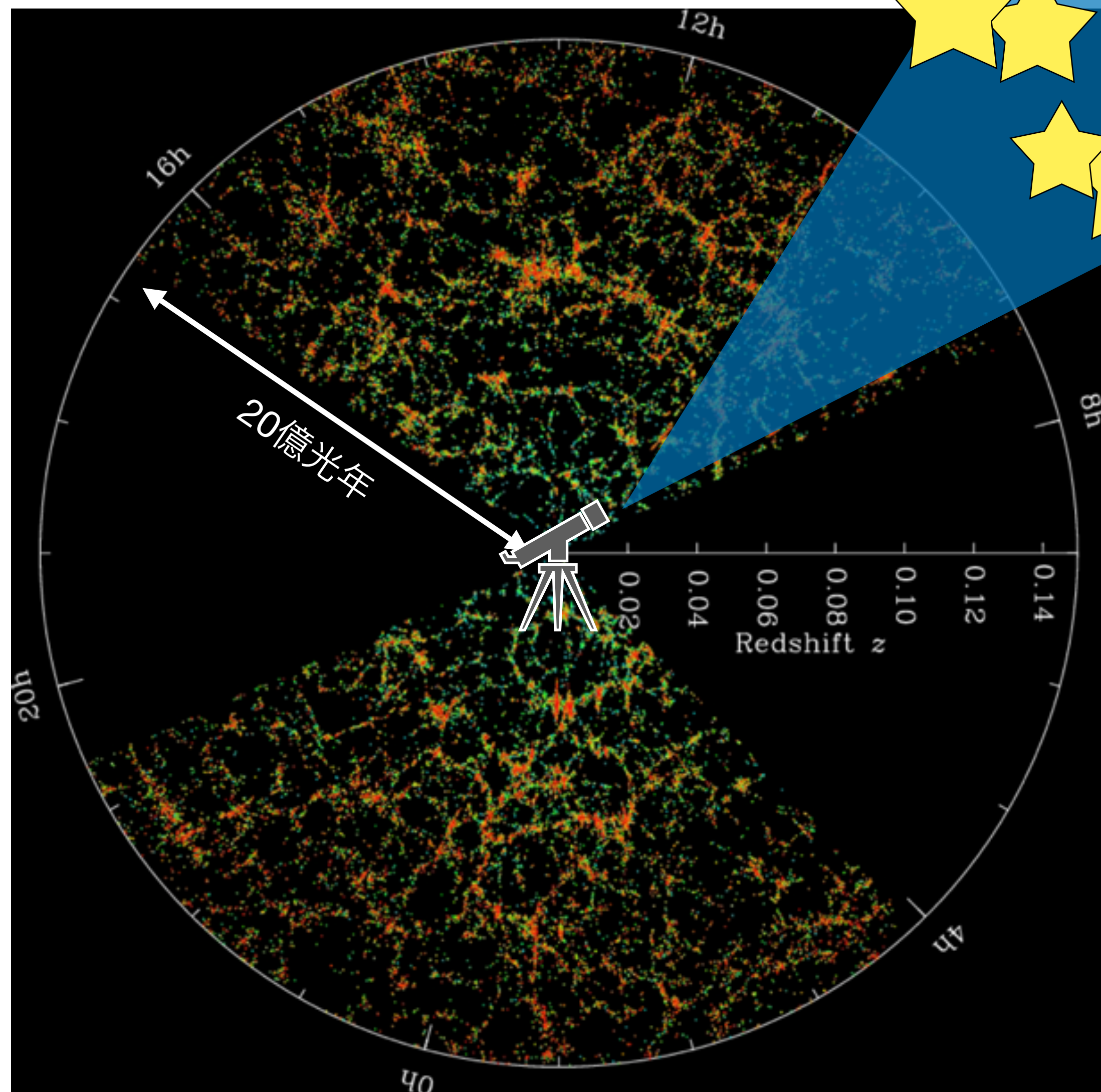
今後の銀河・大規模構造観測



より精密な宇宙論
新しい発見が期待される

いかに効率良く大規模構造を
観測するか？

宇宙の大規模構造



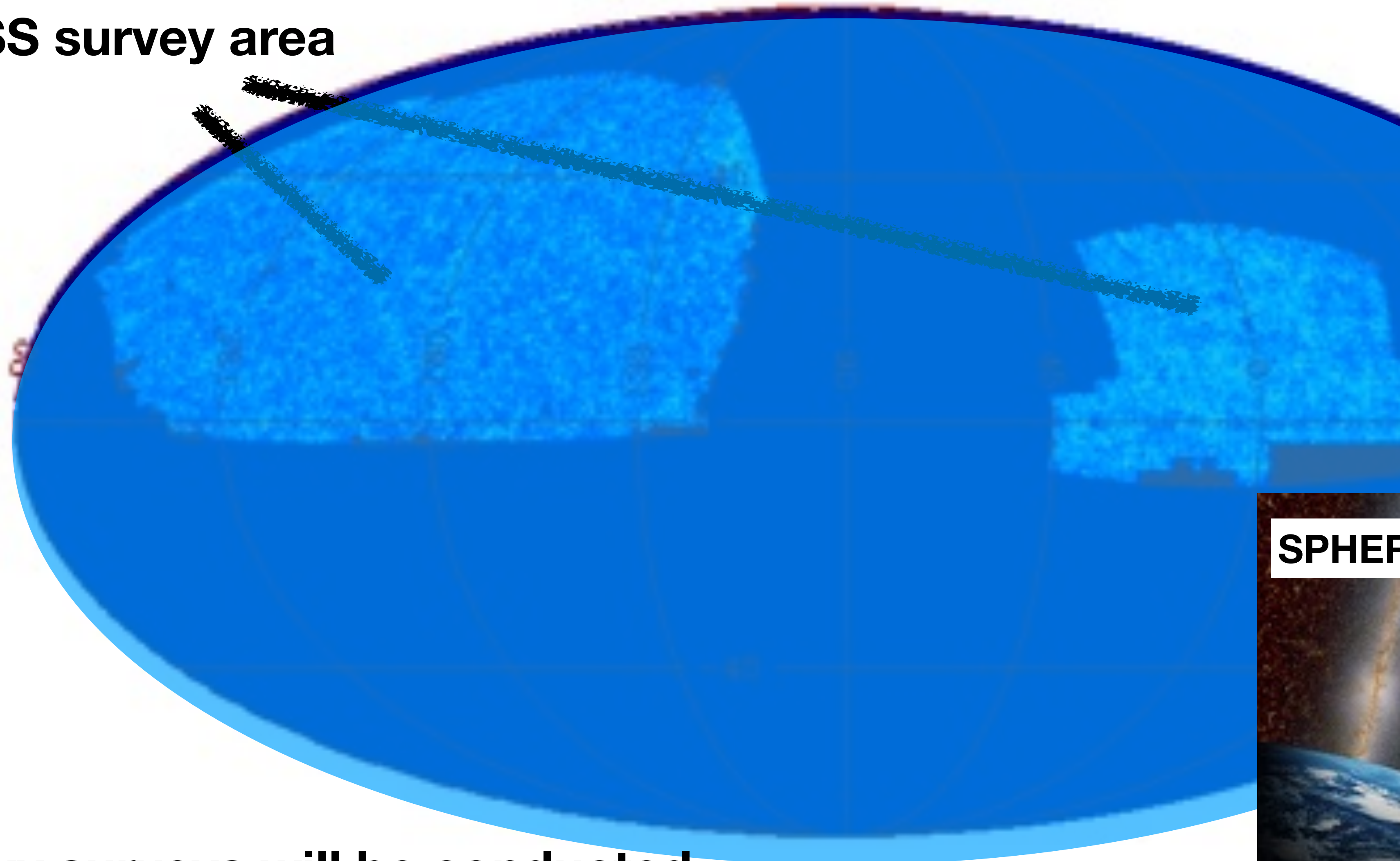
より遠方 = 過去の銀河分布を
見ることが重要

Image credit: M. Blanton and SDSS

大規模構造の観測

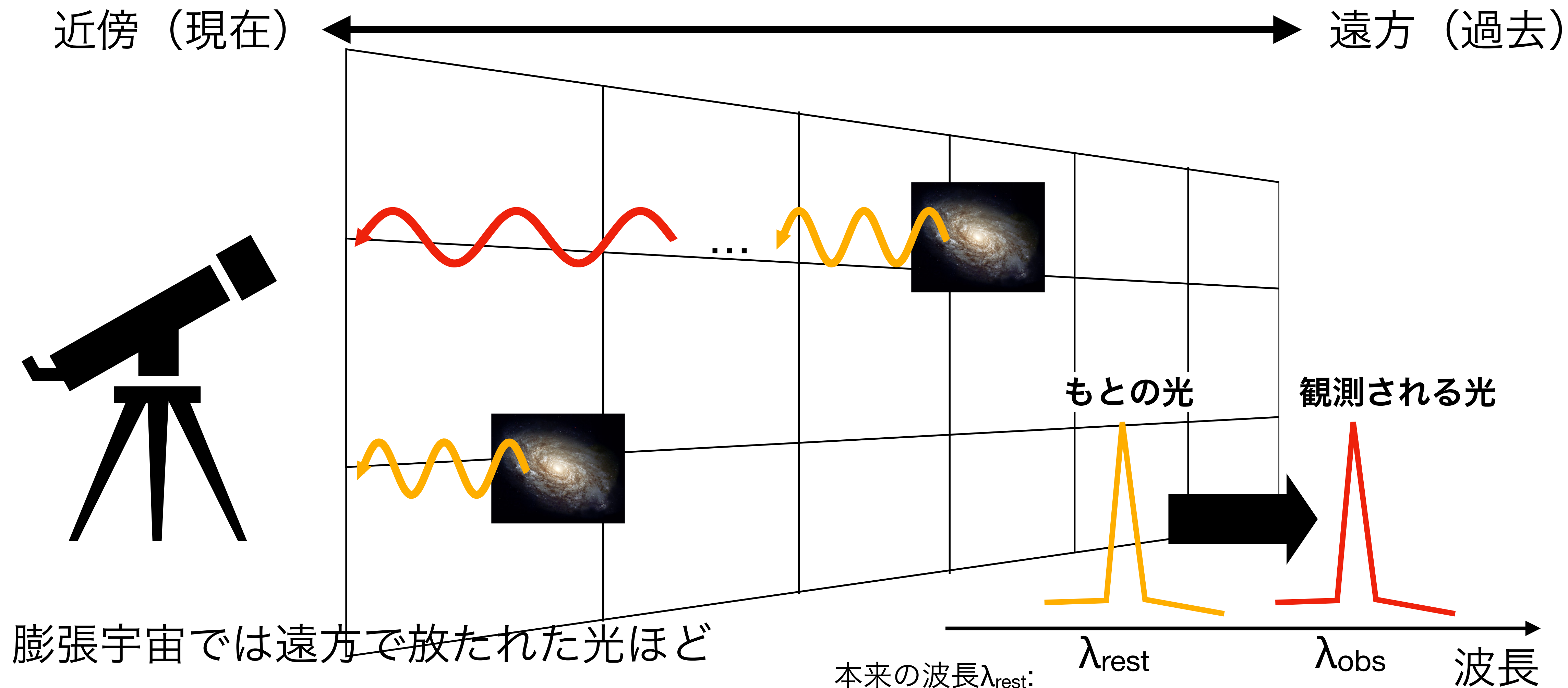
DR12

SDSS survey area



All-sky surveys will be conducted.

三次元分布を測るには：赤方偏移

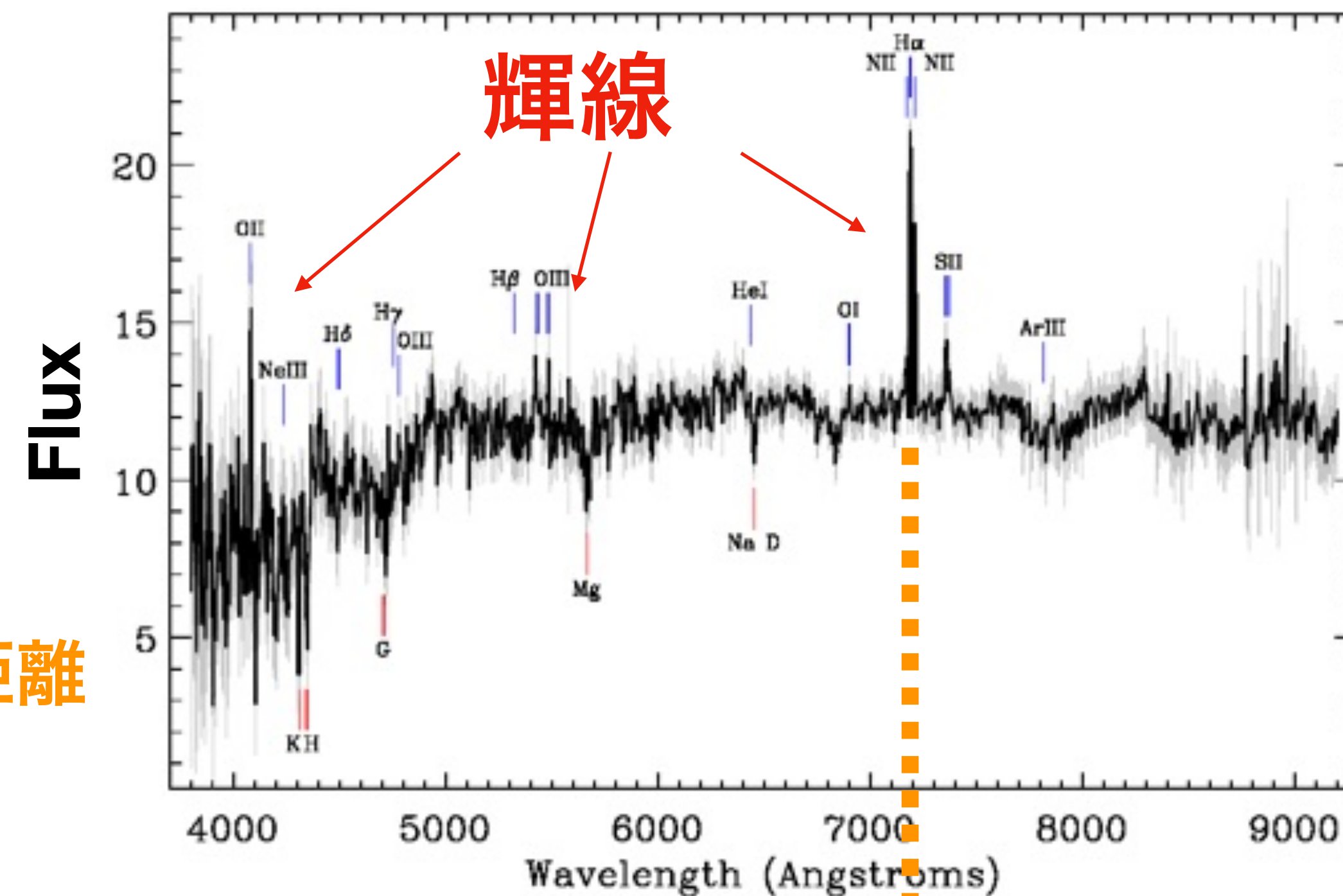
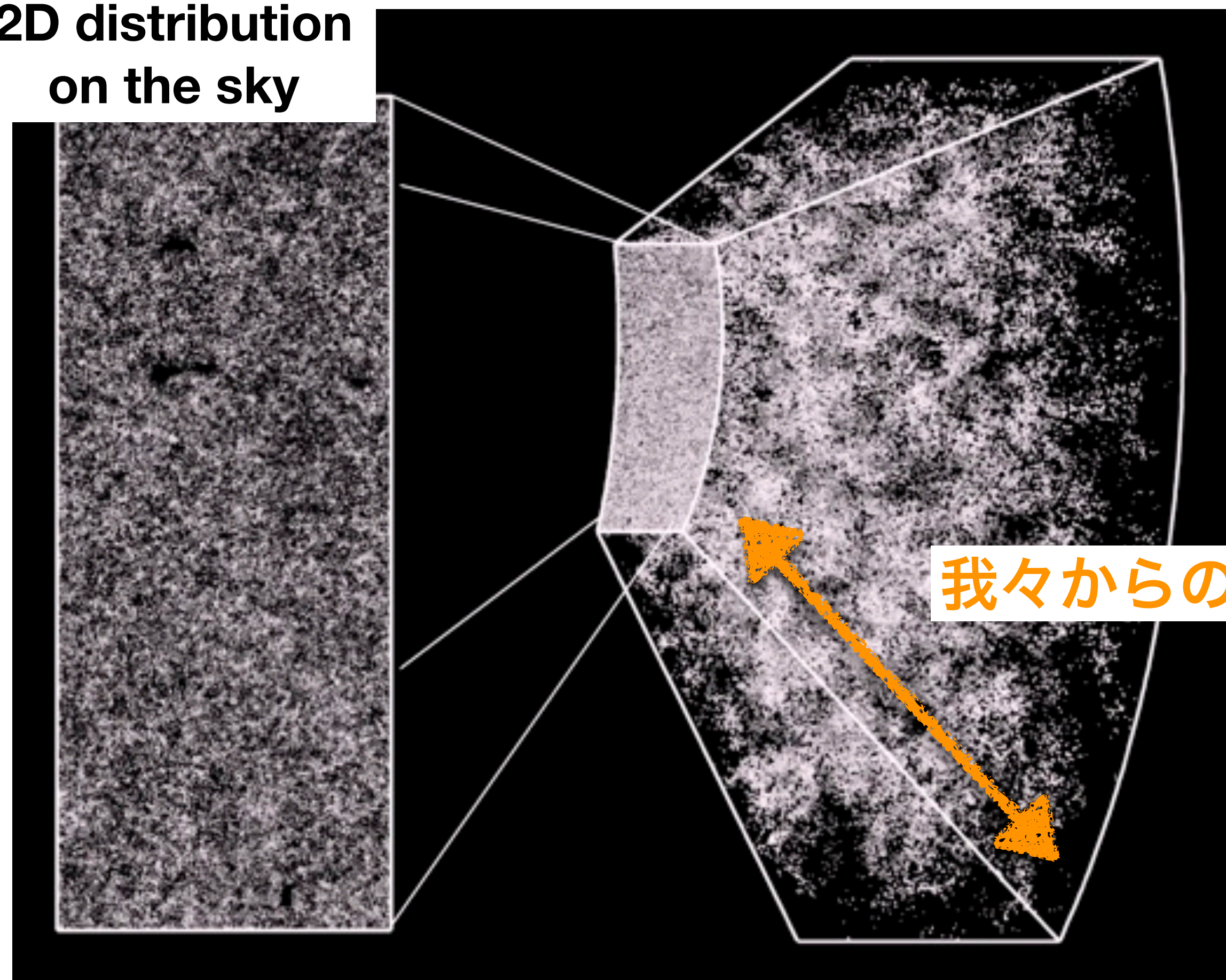


膨張宇宙では遠方で放たれた光ほど
波長が長く（赤っぽく）観測される

本来の波長 λ_{rest} :
例えば水素輝線H α なら 6563Å、
酸素輝線[OIII]なら 5007Å など

三次元分布を測るには：赤方偏移

2D distribution
on the sky



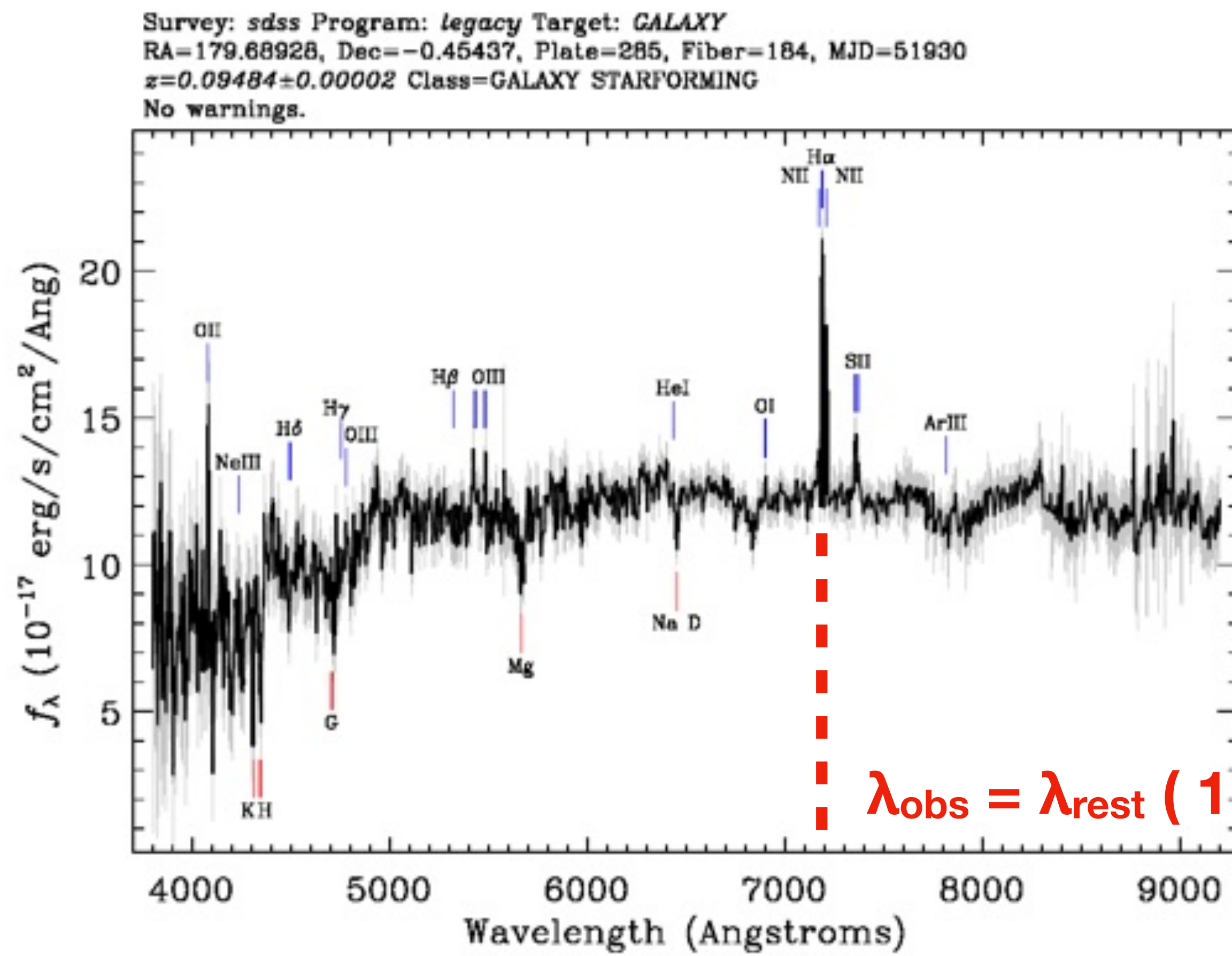
$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\text{rest}} (1 + z)$$

赤方偏移測定には詳細な分光観測が必要

<http://skyserver.sdss.org/dr16/en/tools/chart/navi.aspx>

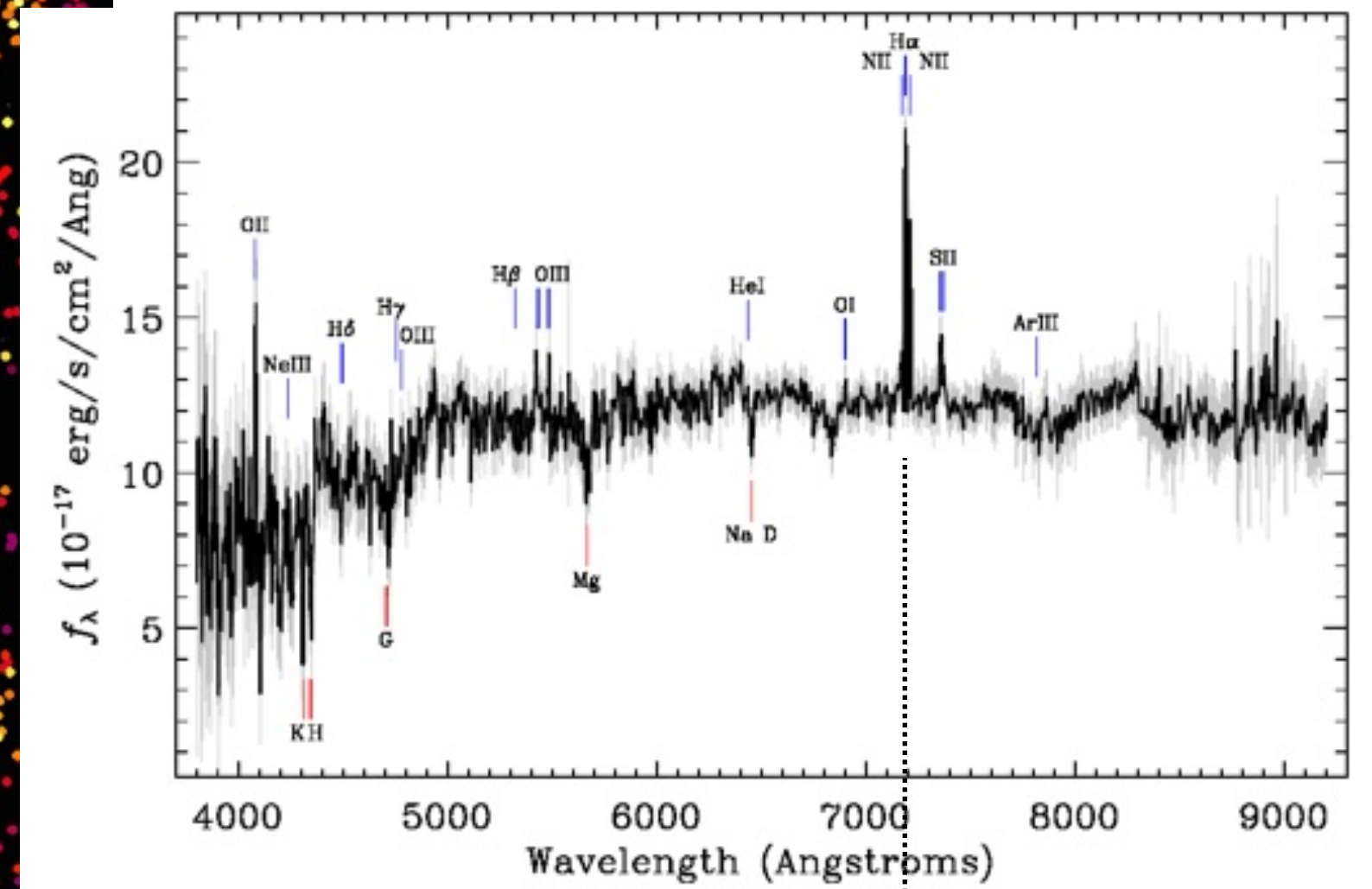
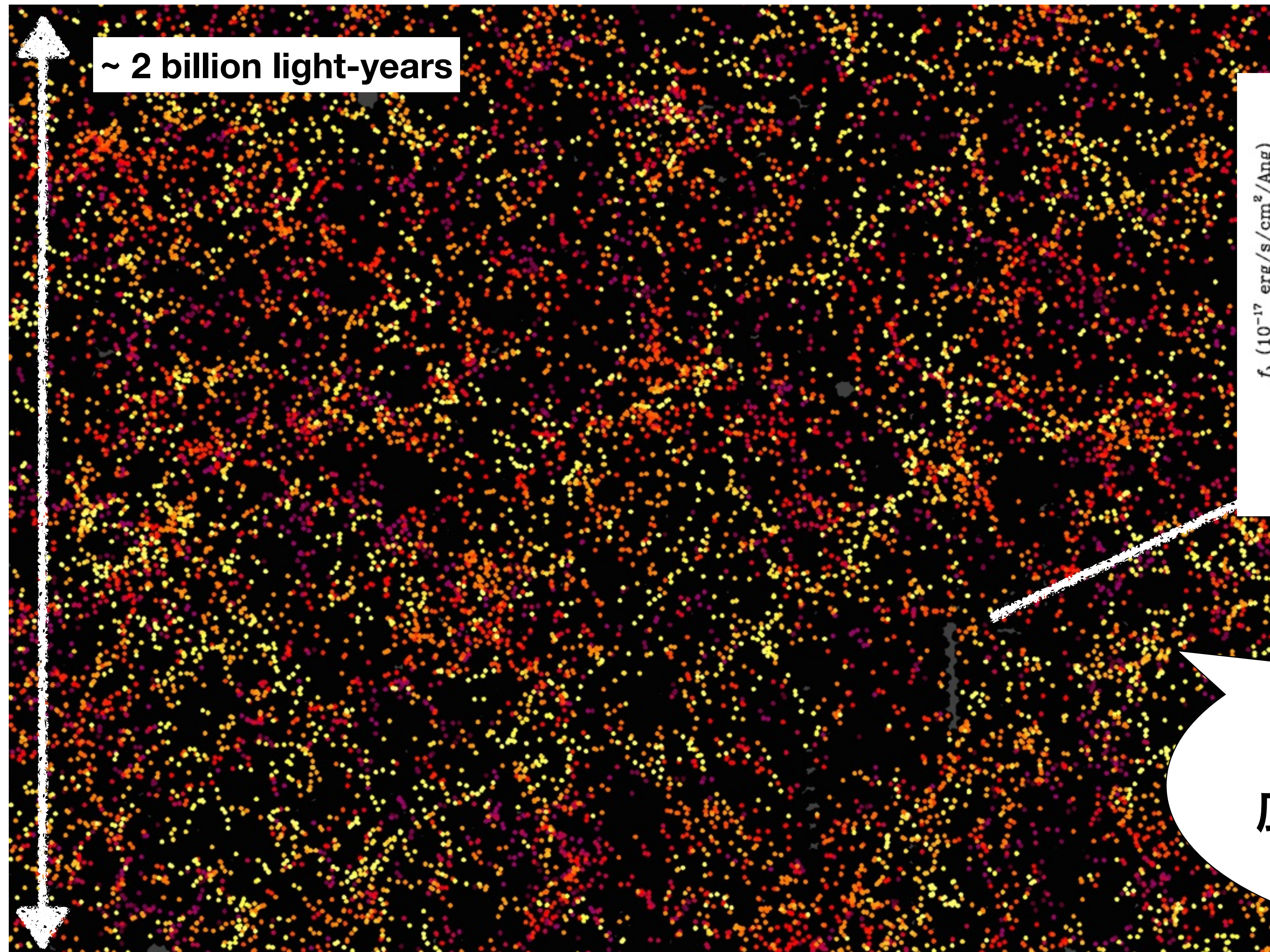


ex) SDSS galaxy



基本的に分光観測は非常に時間がかかる

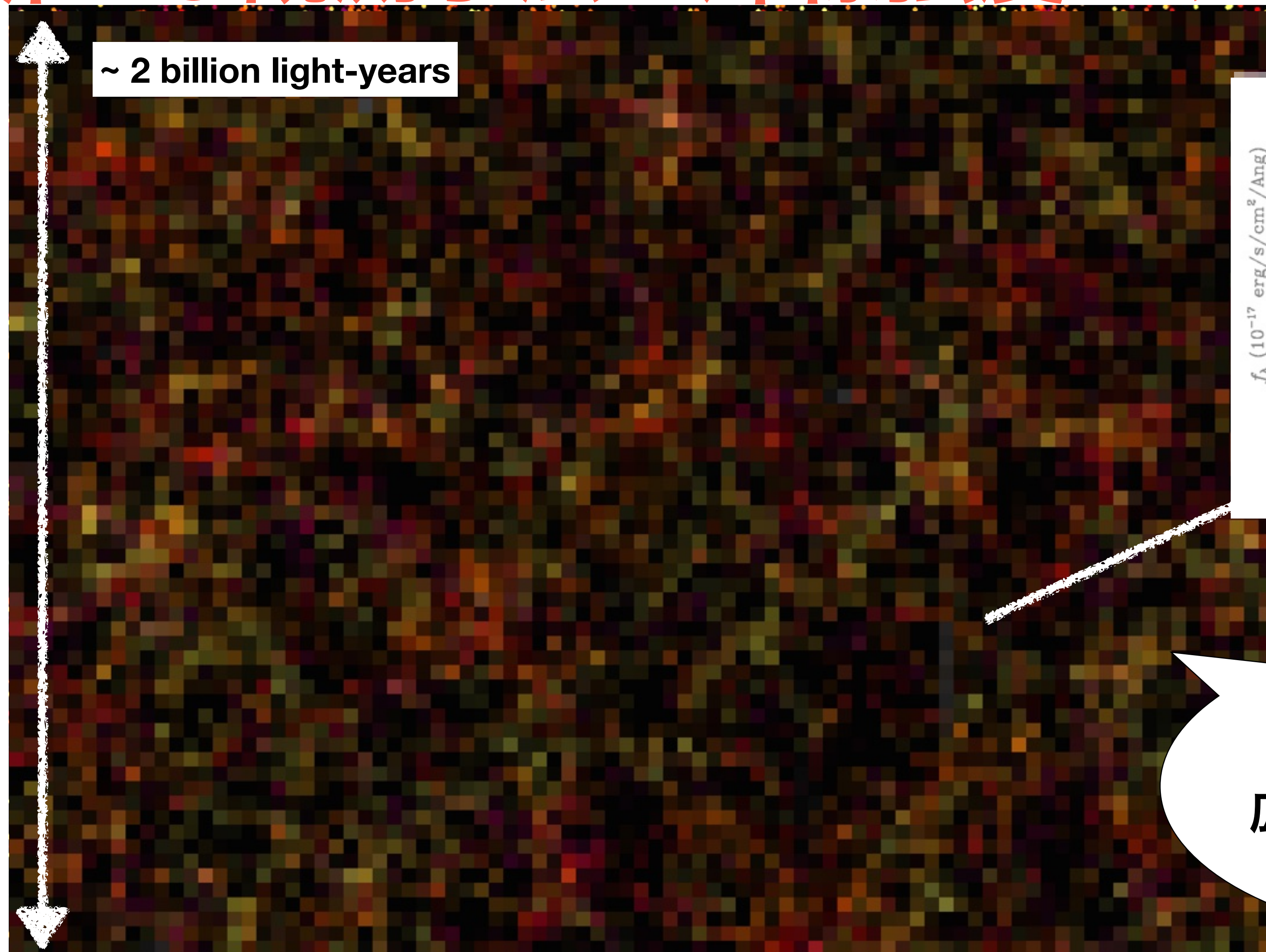
これまでの手法：詳細な分光観測



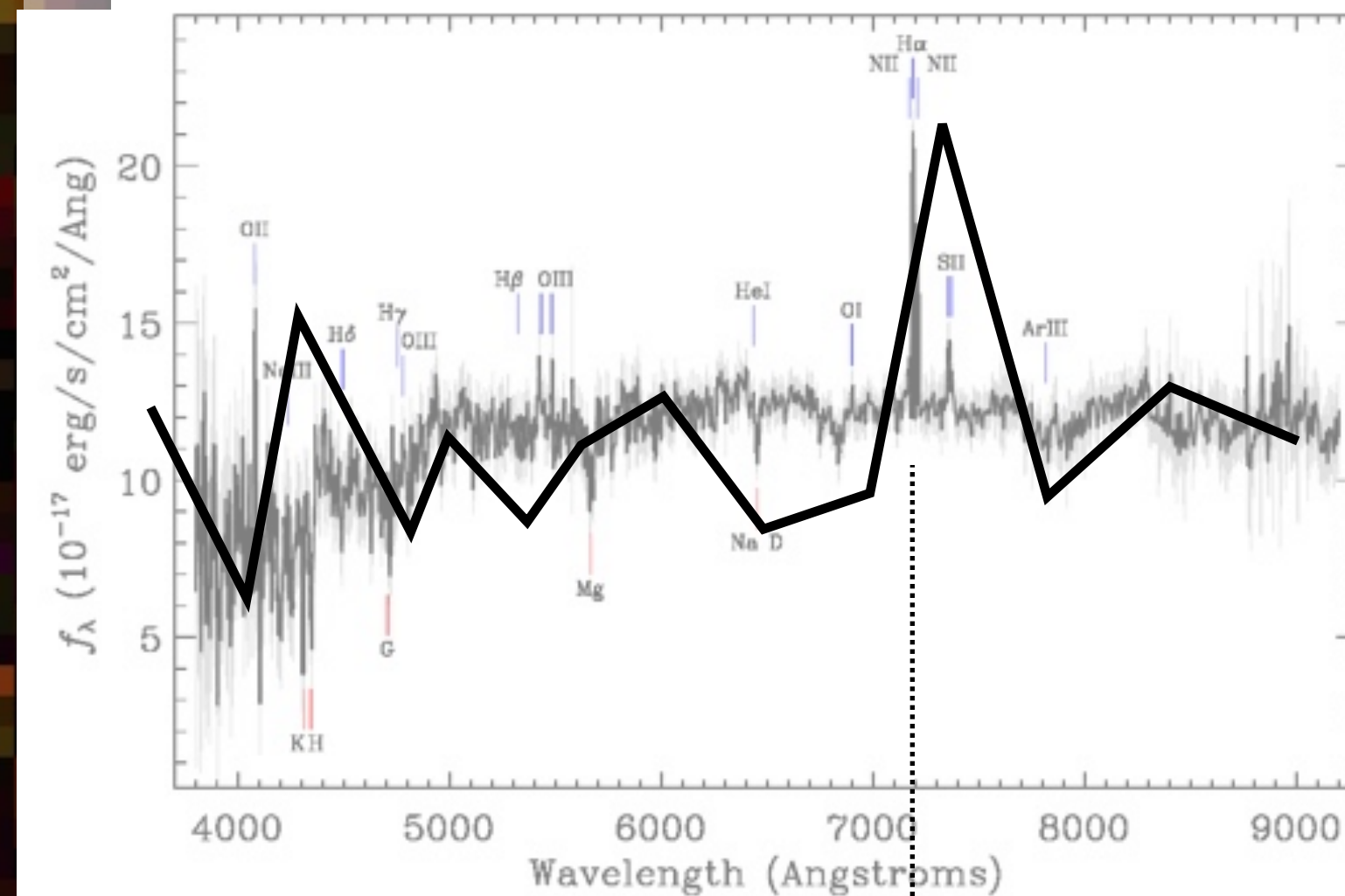
$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\text{rest}} (1 + z)$$

いかにより高速に
広領域をはけるか？

新たな観測手法：輝線強度マッピング観測



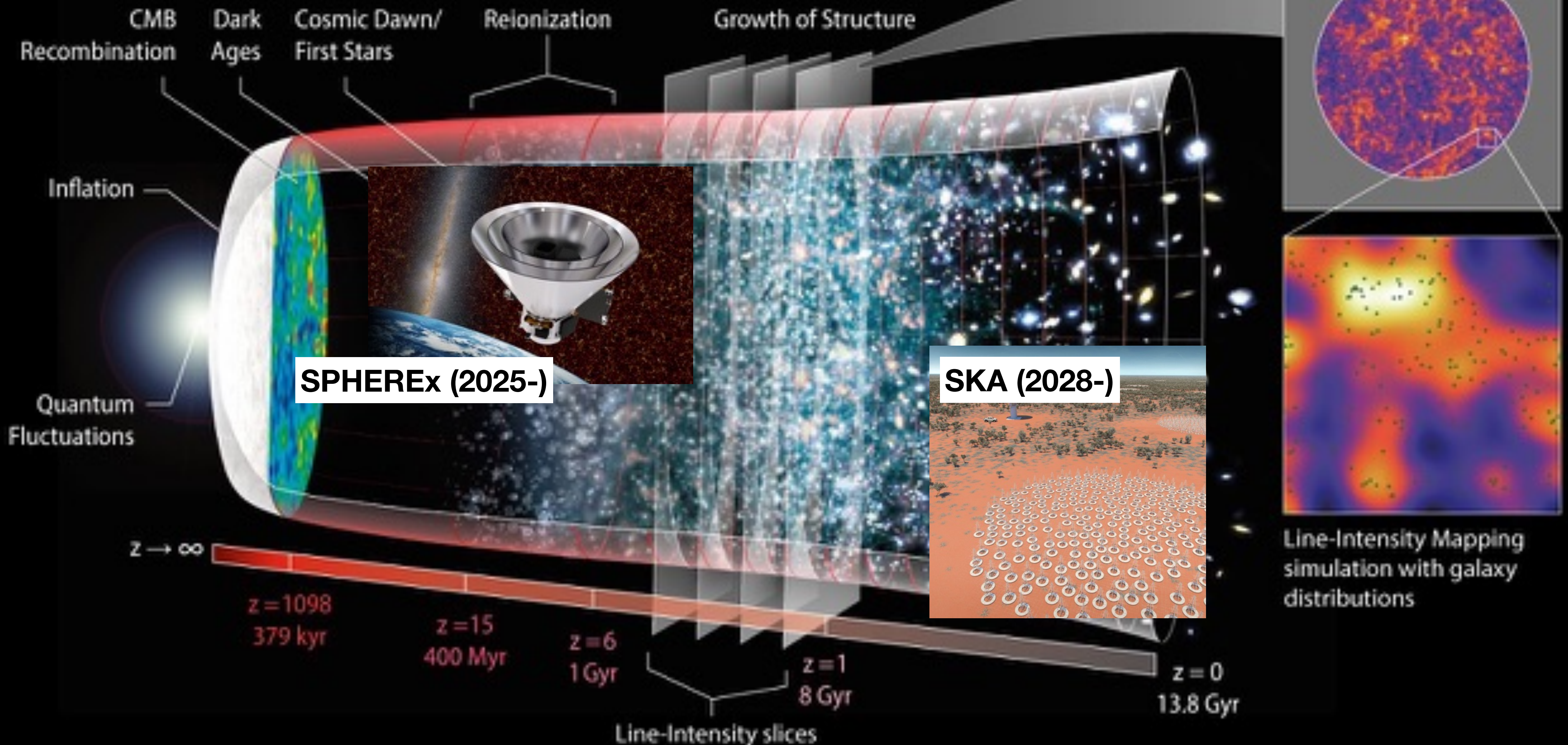
~ 2 billion light-years



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

いかにより高速に
広領域をはけるか？

Line Intensity Mapping (LIM)

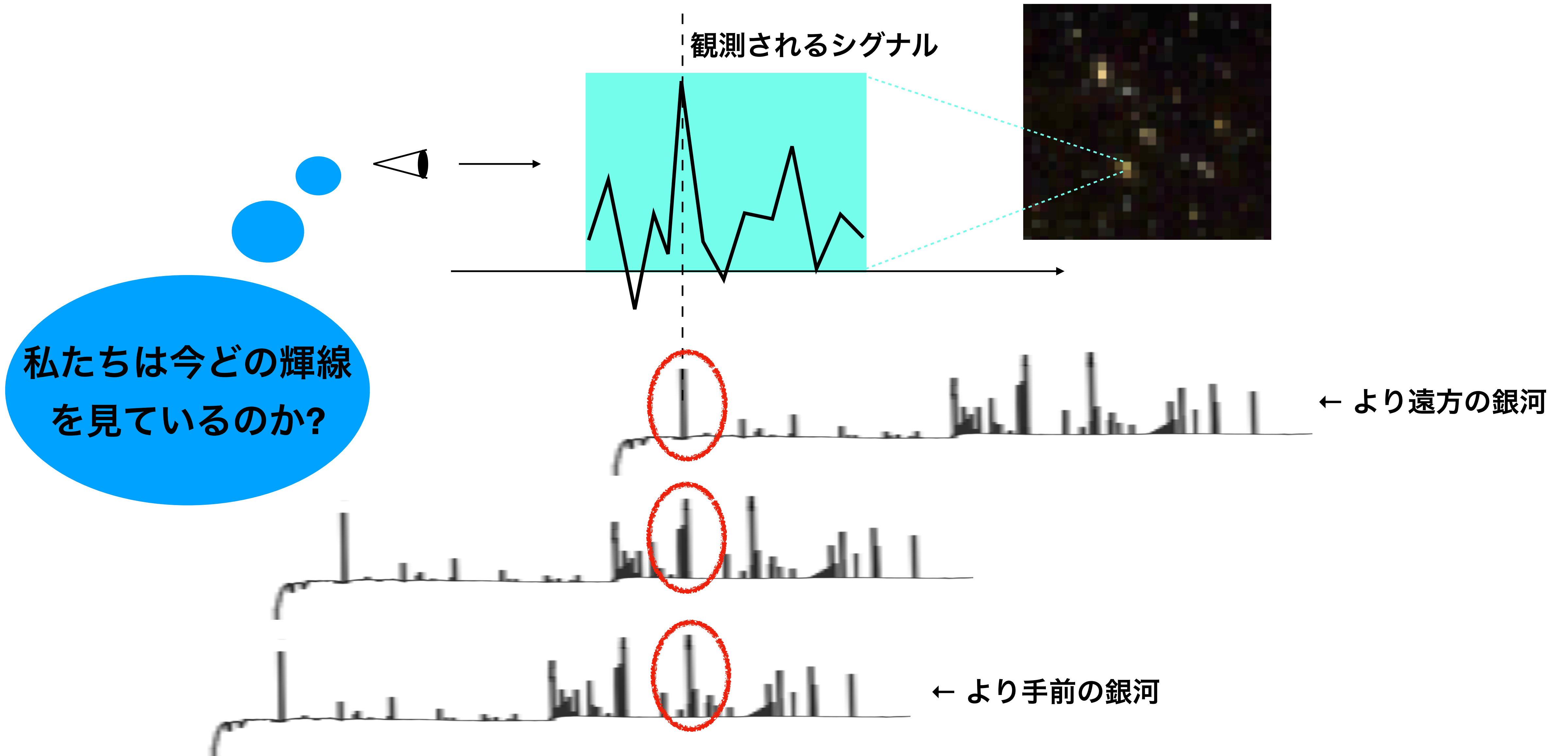


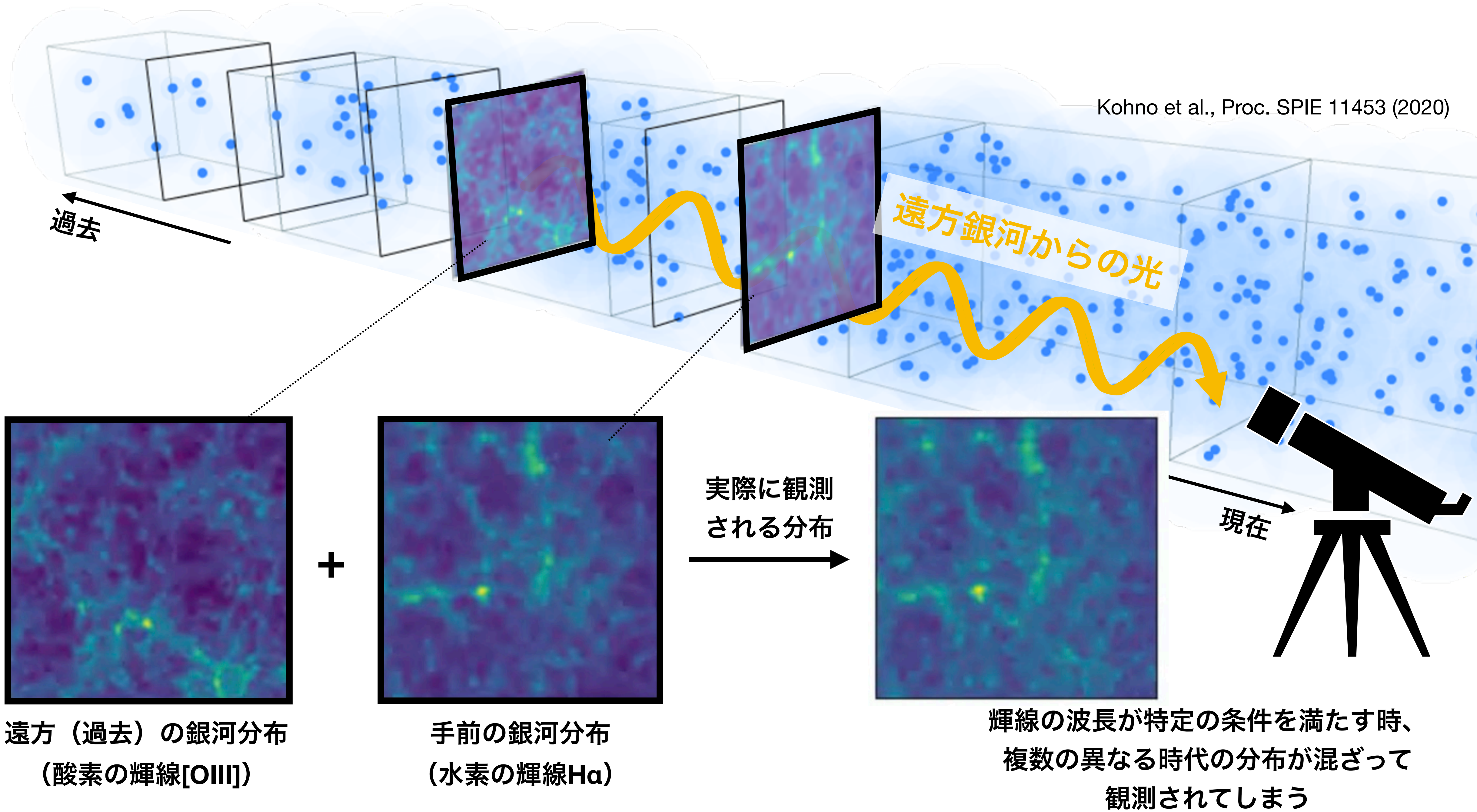
観測データマッピング

Image Credit: NASA / LAMBDA Archive Team

データ科学的手法を用いた 大規模構造観測データの解析

輝線強度マッピング観測の課題：輝線の混在





過去

遠方銀河からの光

現在

実際に観測される分布

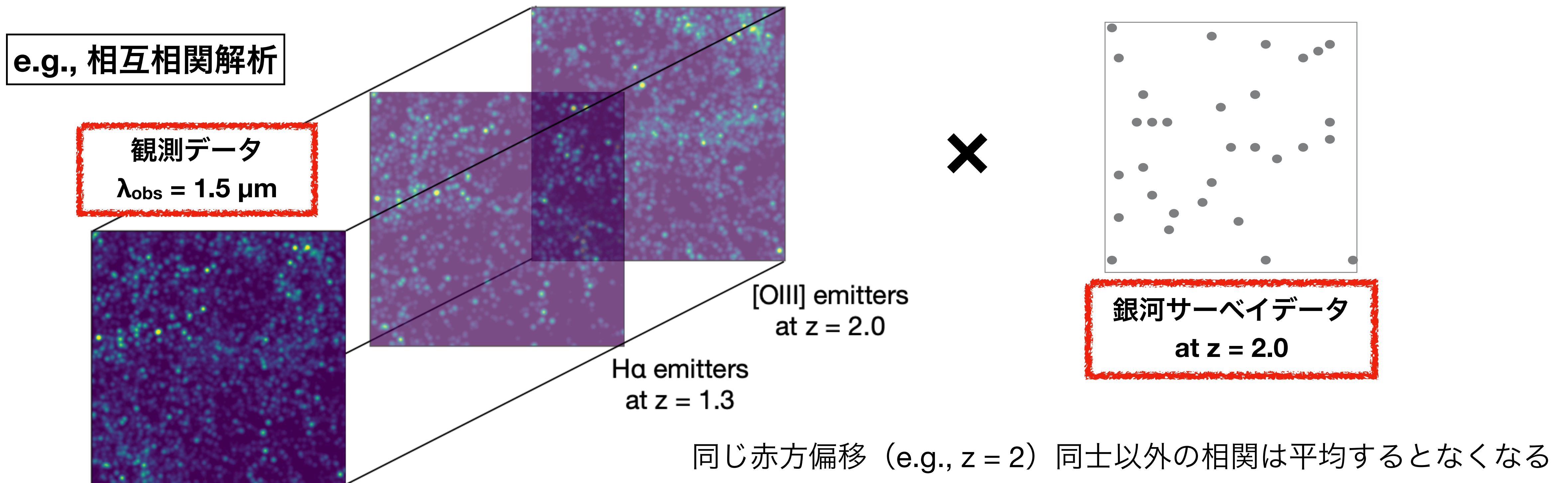
遠方 (過去) の銀河分布
(酸素の輝線[OIII])

手前の銀河分布
(水素の輝線Hα)

輝線の波長が特定の条件を満たす時、
複数の異なる時代の分布が混ざって
観測されてしまう

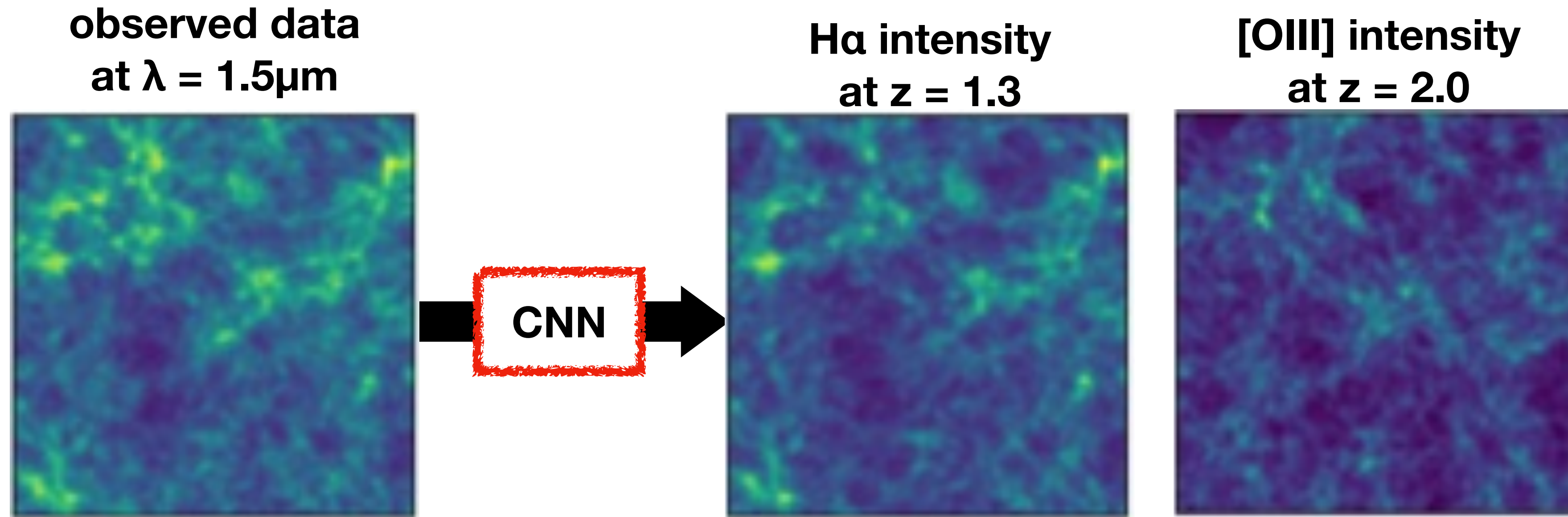
これまでに考えられてきた解決策

- 相互相関解析 (e.g., Visbal & Loeb 2010)
- パワースペクトルの非等方性を用いた解析 (Cheng et al. 2016)
- 明るいピクセルのマスキングによる背景シグナルの統計的な検出 (e.g., Gong et al. 2014)
- etc.

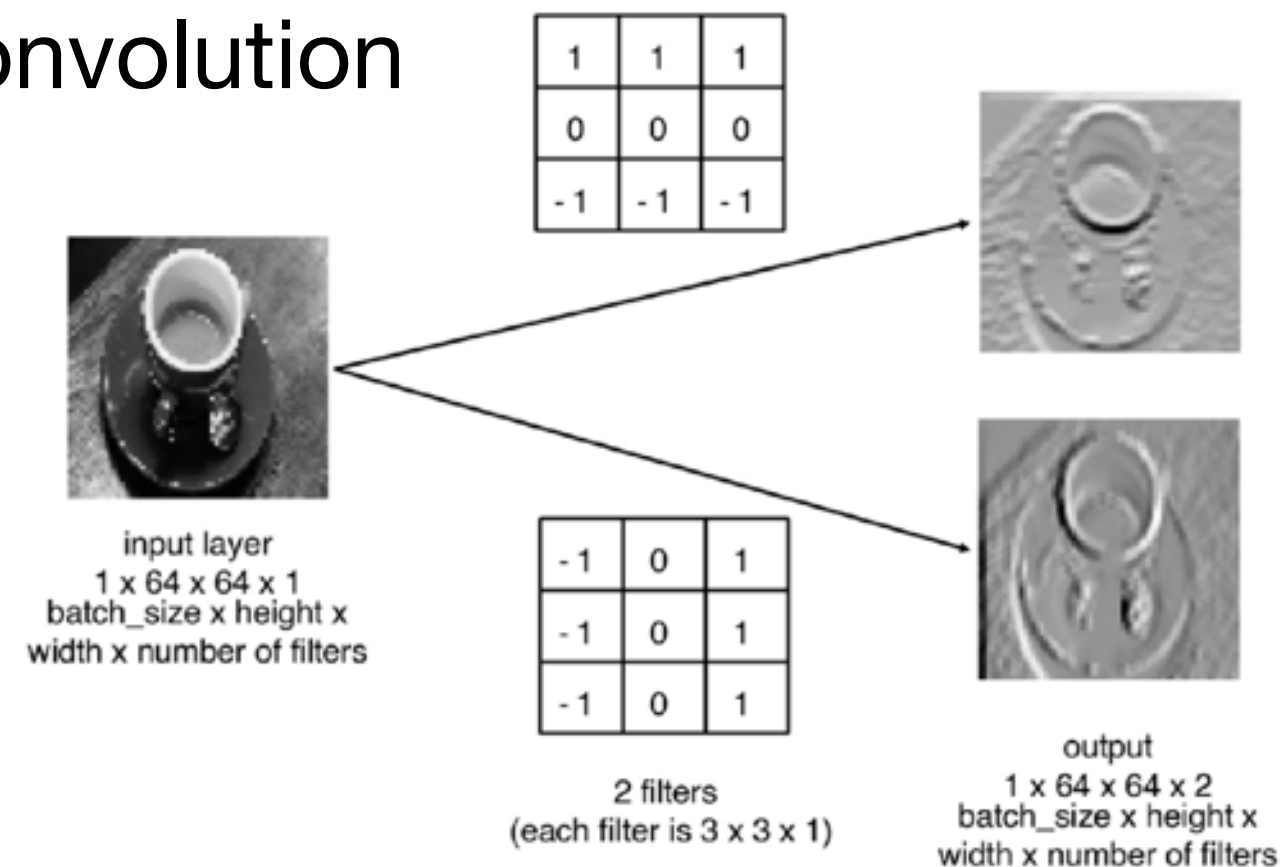


$$\delta_{\text{obs}} \delta_{\text{gal}, z=2} = \delta_{z=2} \delta_{\text{gal}, z=2} + \delta_{z \neq 2} \delta_{\text{gal}, z=2}$$

機械学習によってシグナルを分離できないか？



cf.) convolution



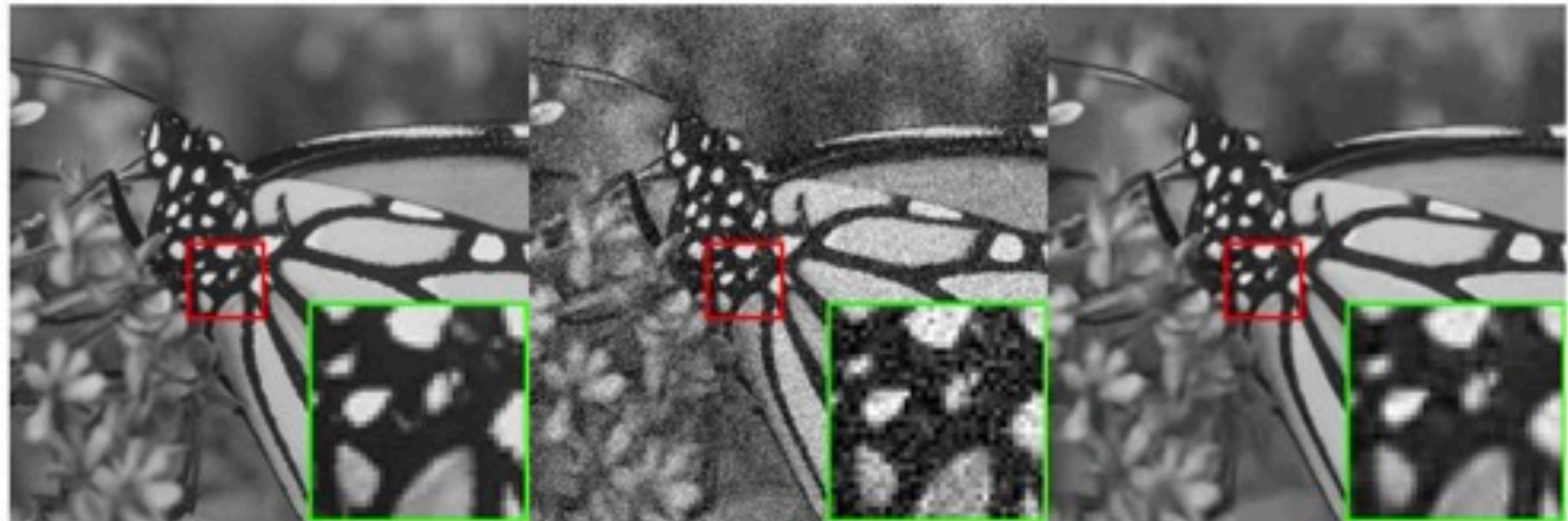
機械学習を用いた一般的な画像におけるノイズ除去

Tian+2020

実際の画像

ノイズを加えた画像

機械学習による
ノイズ除去



「ノイズ」がランダムでない場合

Observation



Skyscraper,
room

Conditional
Image
Generation

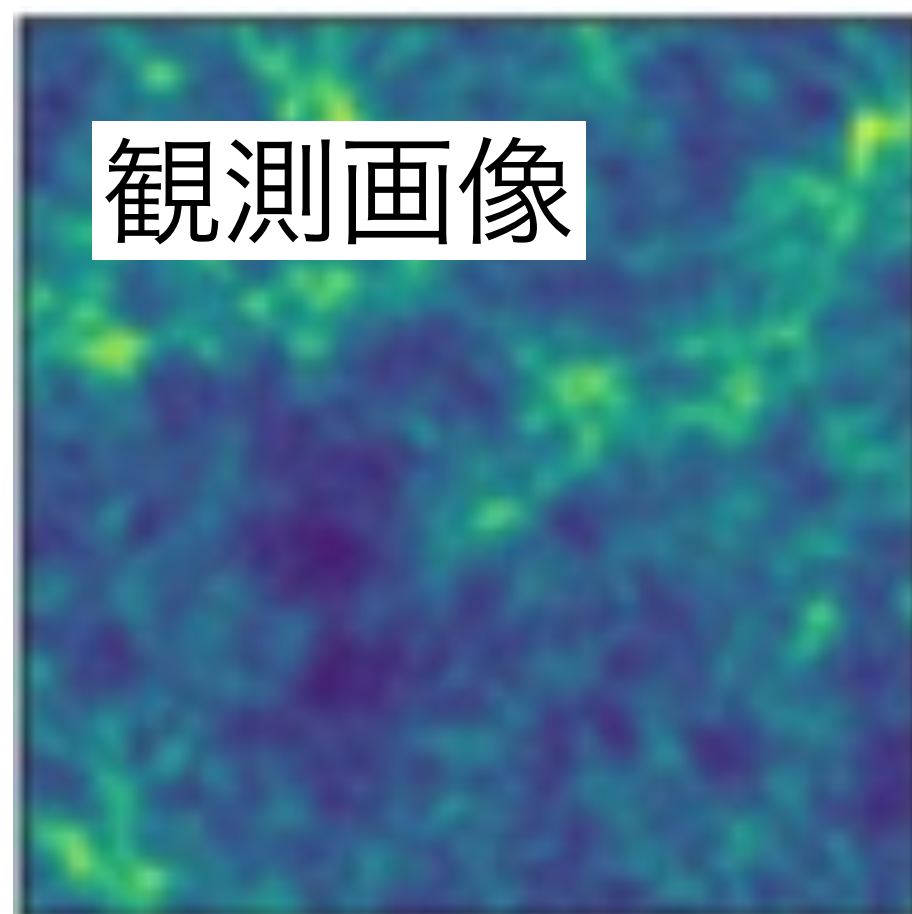
Transmitted scene



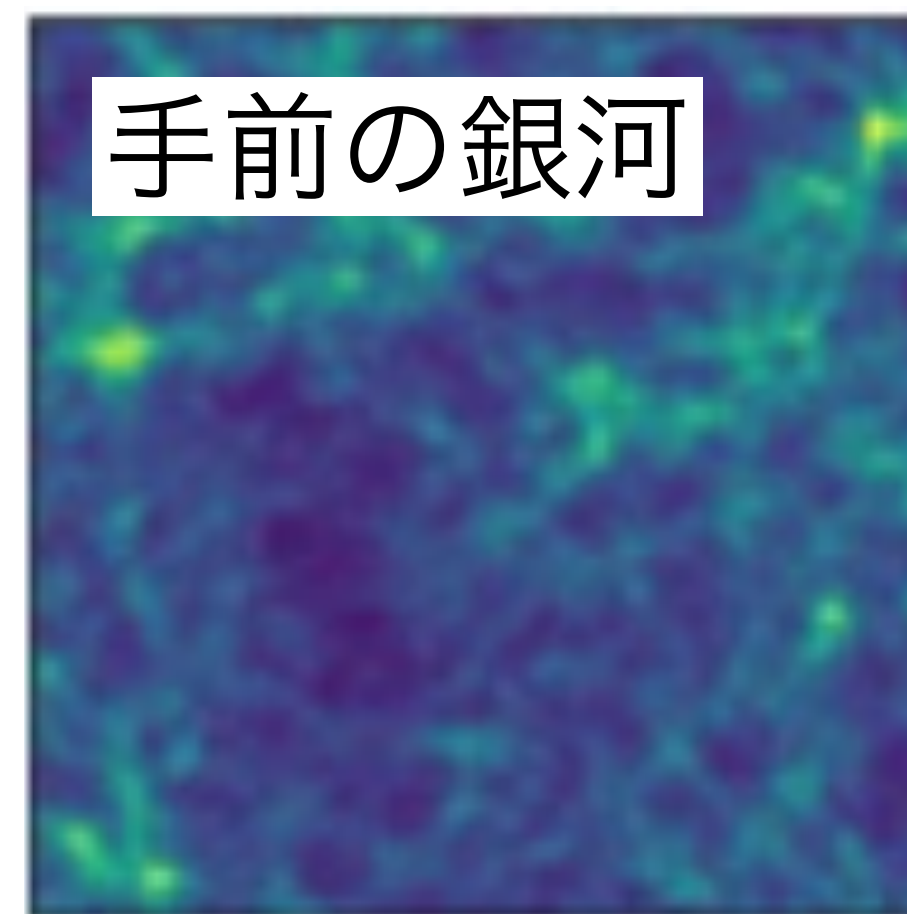
Reflected scene



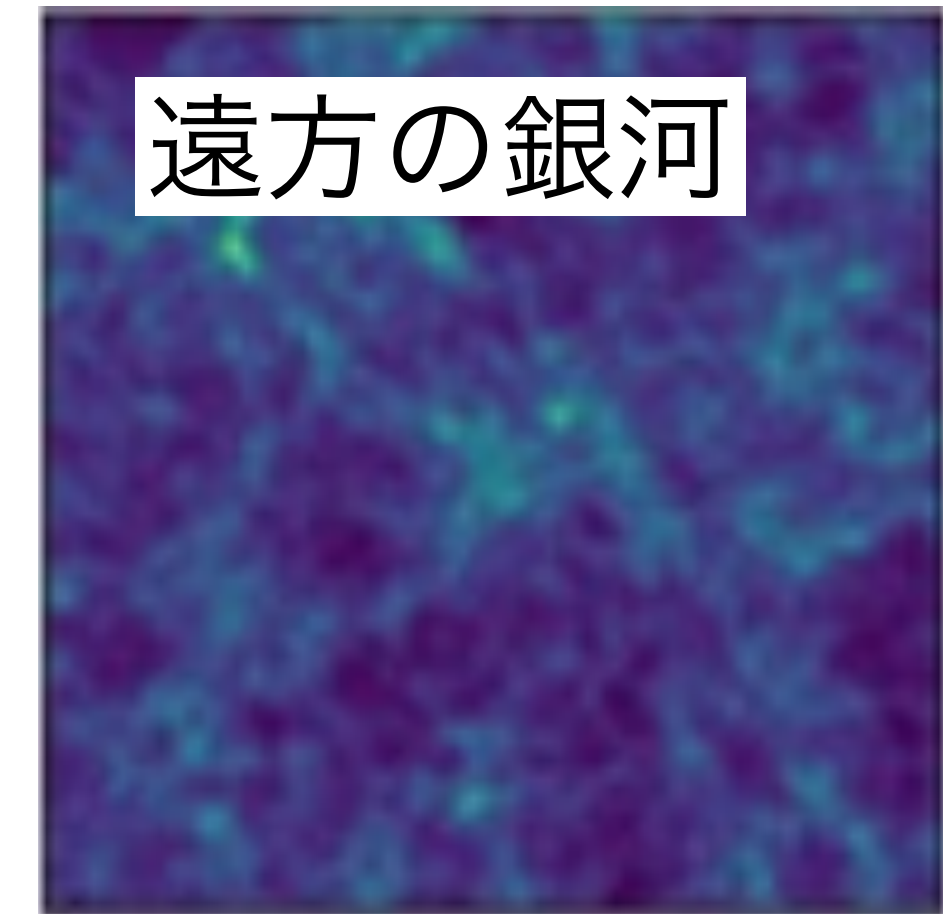
Lee et al. (2018)



観測画像



手前の銀河

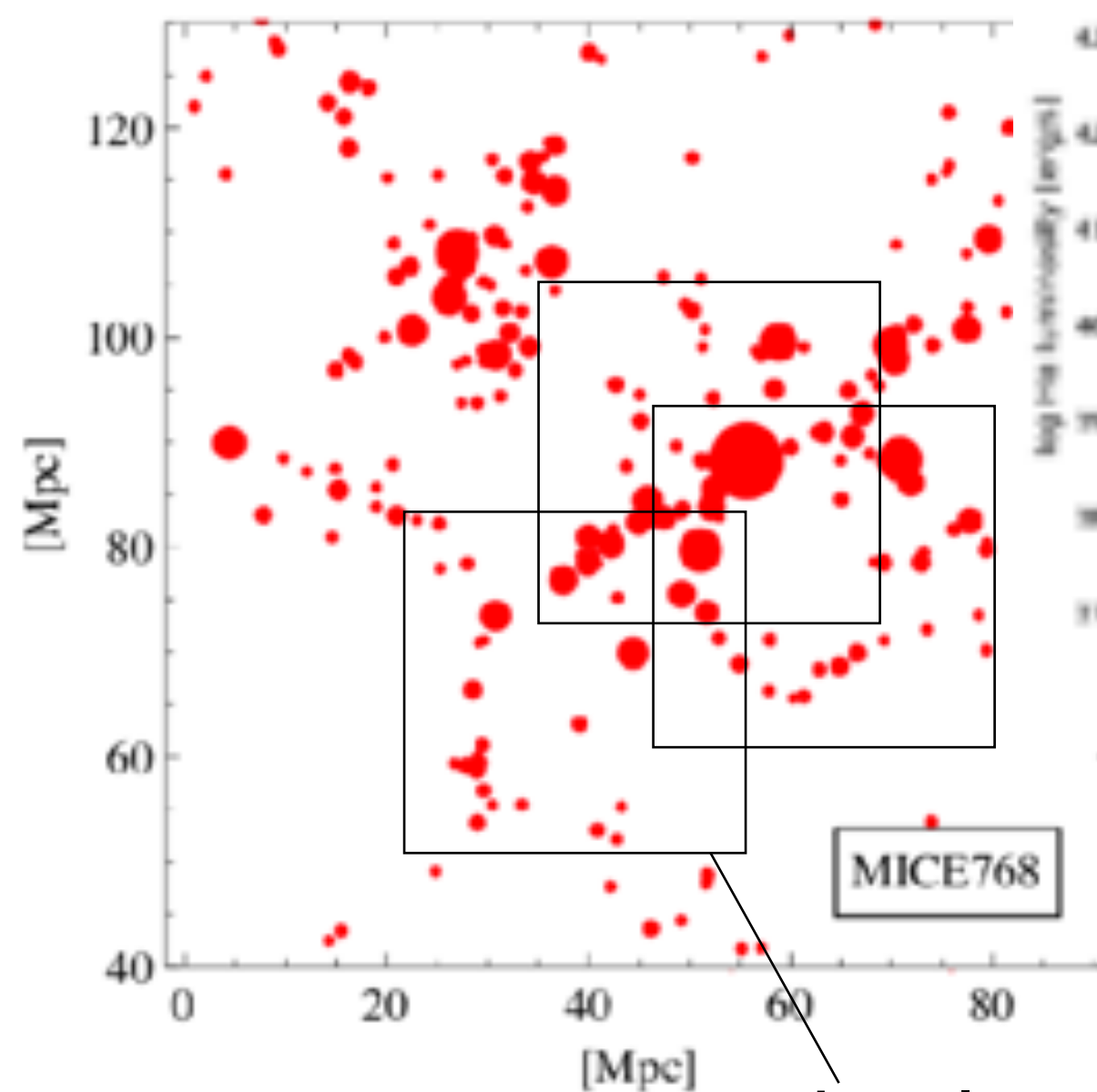


遠方の銀河

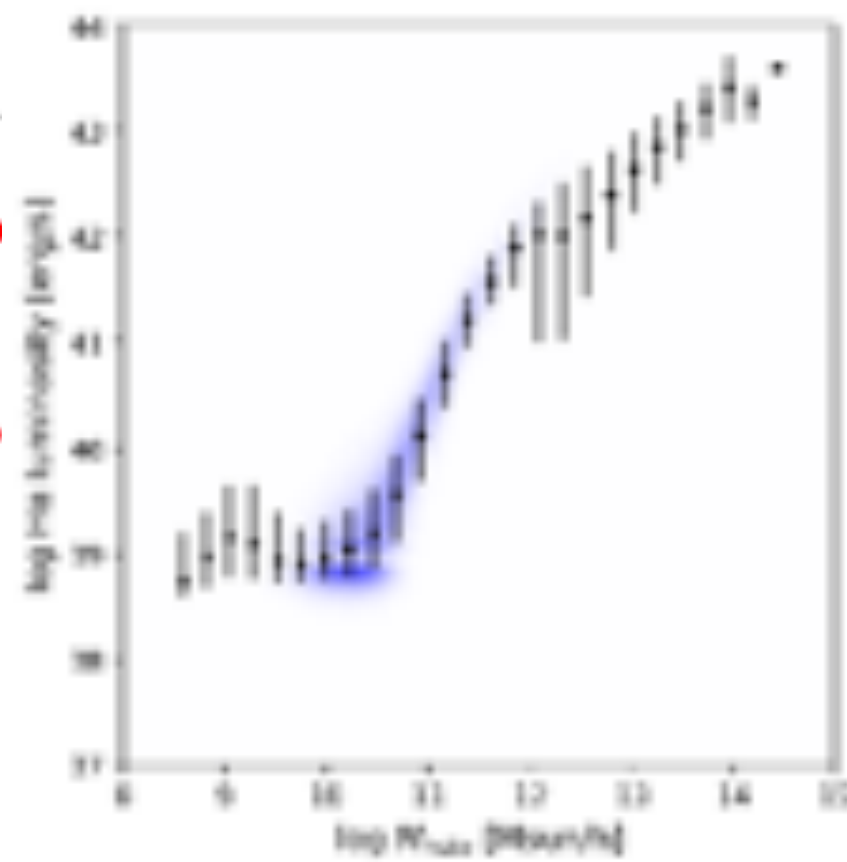
学習・検証用データ

- 高速ハローカタログ生成コード Pinocchio (Monaco et al. 2013) を用いる
- 宇宙論的流体シミュレーション IllustrisTNG (Nelson et al. 2019) に基づいて輝線強度モデルを構築
- SPHEREx (2024-) による観測を想定して計 30,000 個の模擬観測データを生成

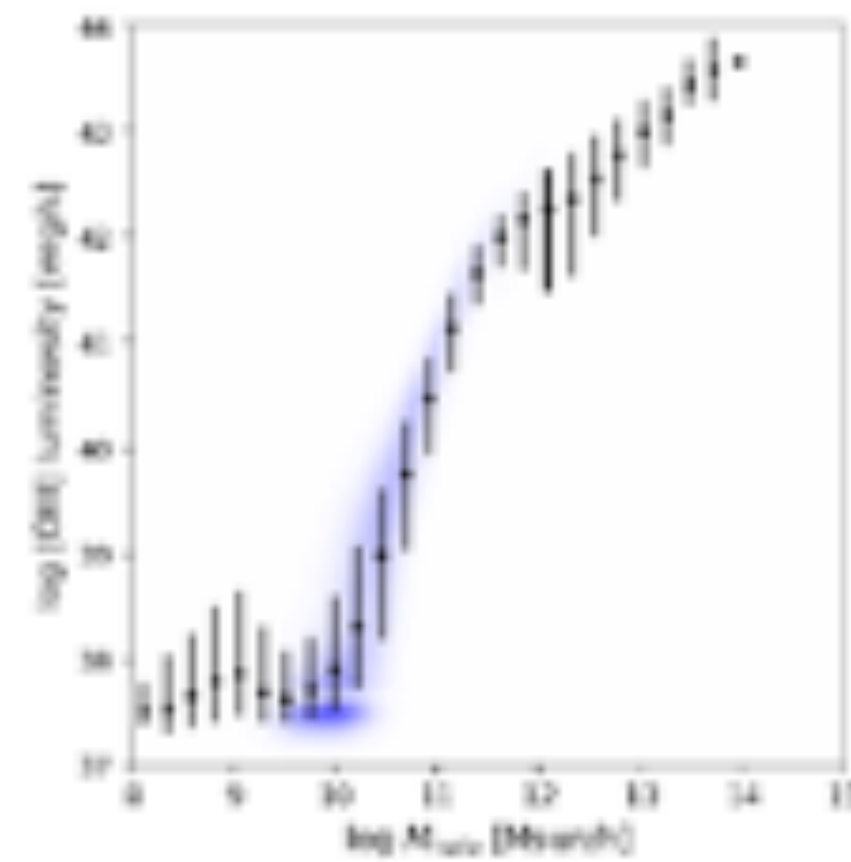
Pinocchio catalog



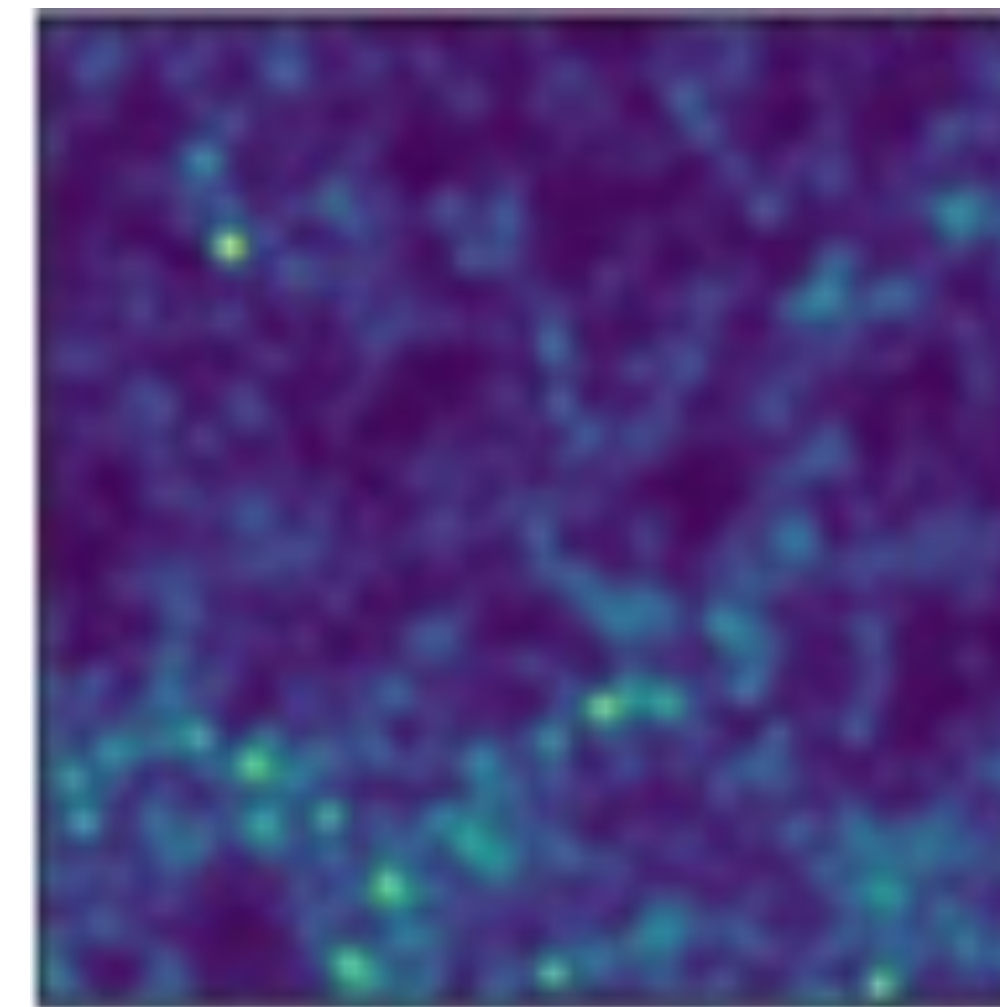
水素輝線 H α



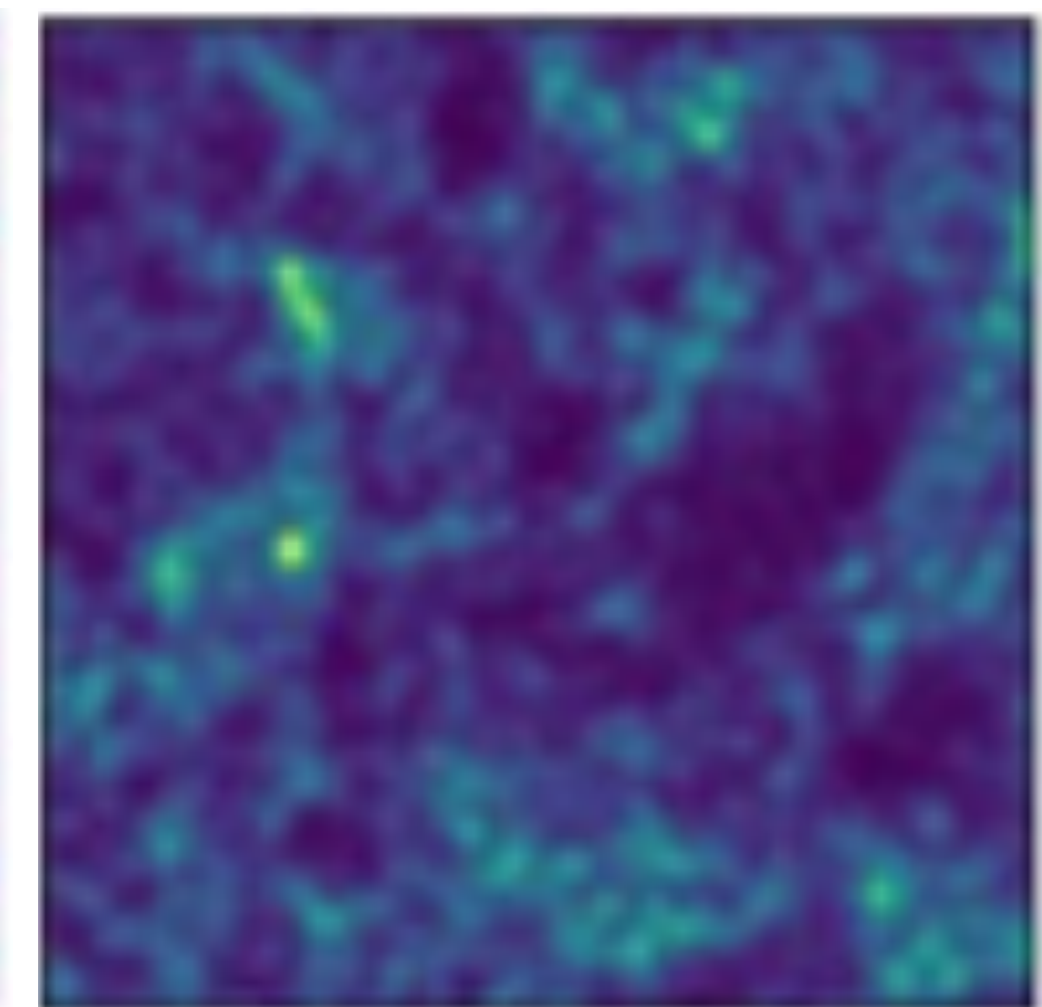
酸素輝線 [OIII]



H α maps (z = 1.3)



[OIII] maps (z = 2.0)

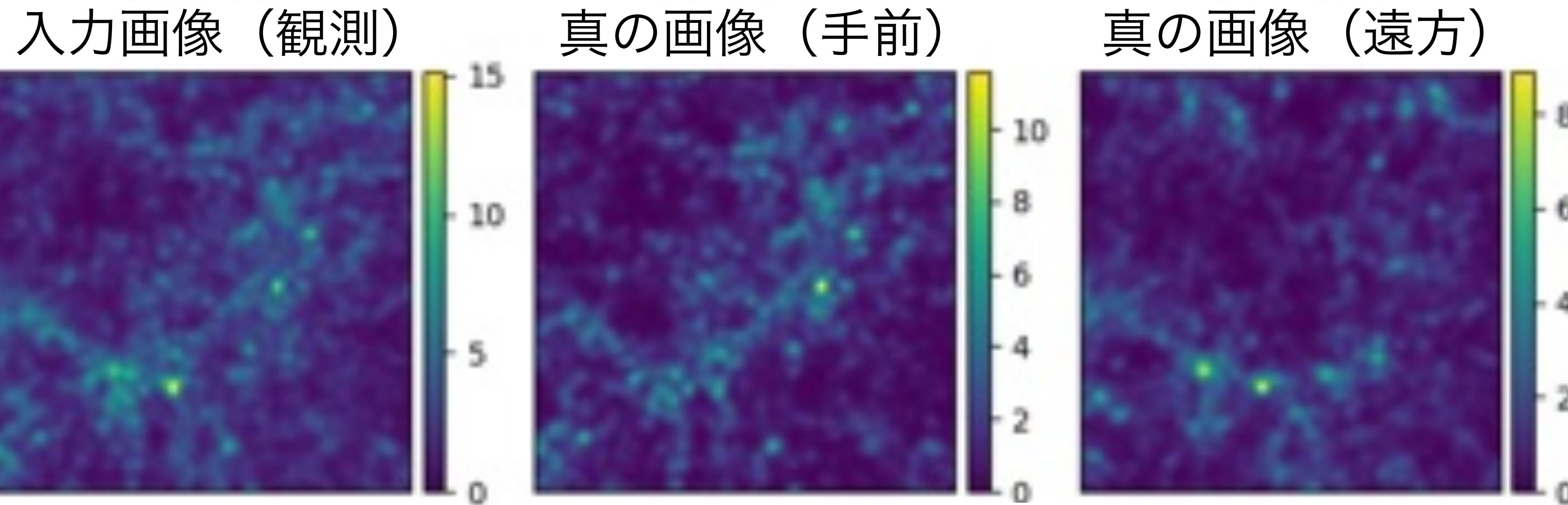


**M_{halo}-L_{line} relation
from IllustrisTNG**

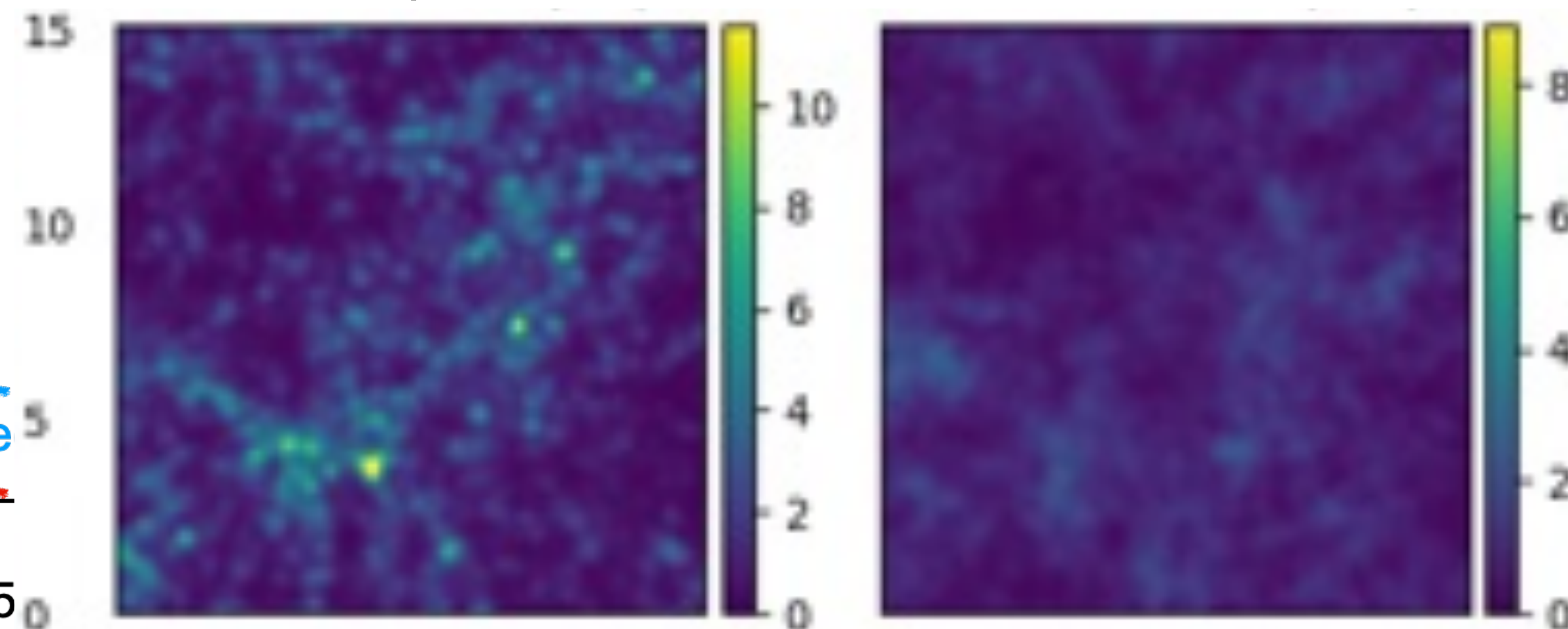
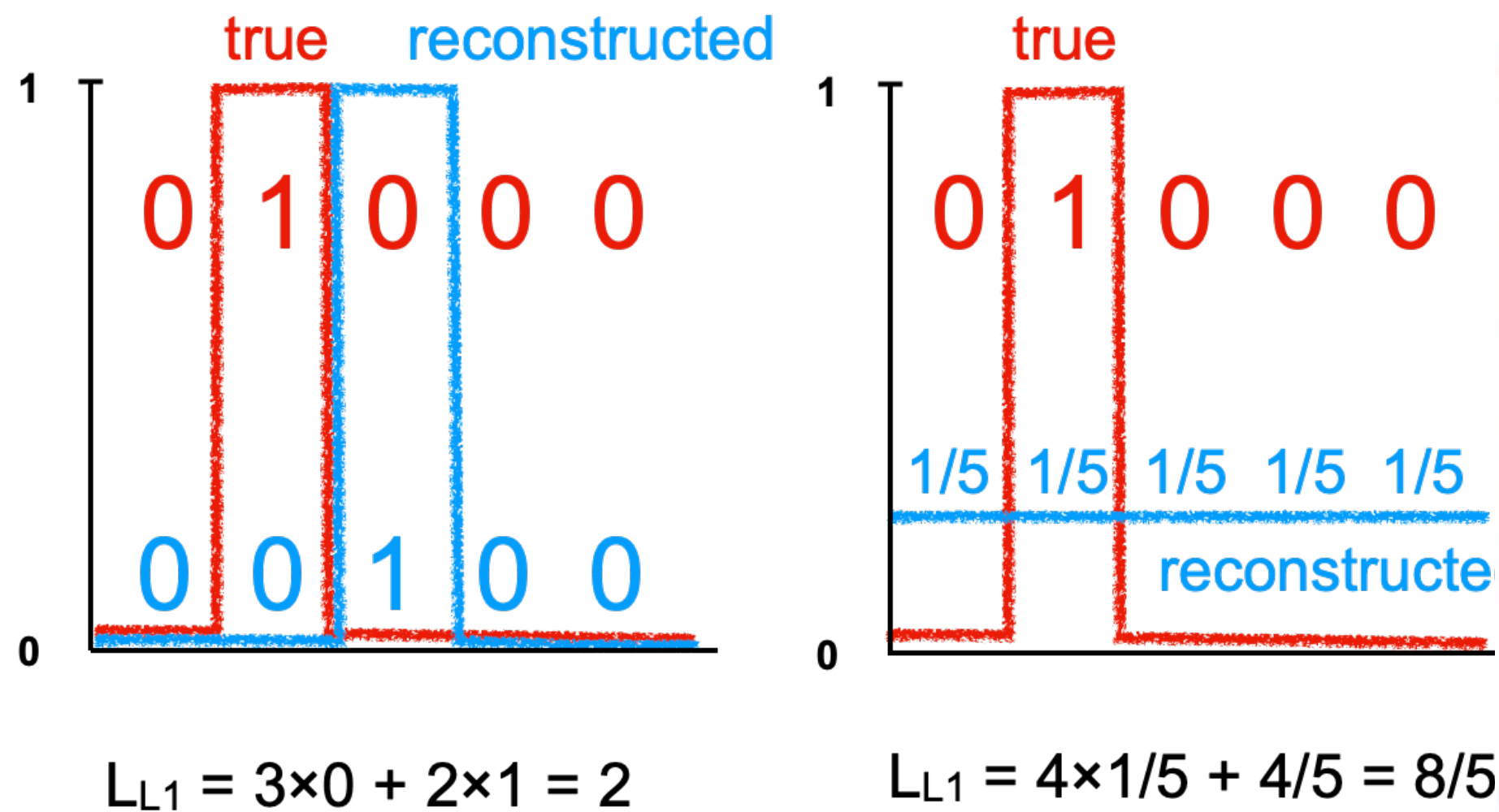
randomly subtraction

学習の結果

機械の予測画像と真の画像の差の絶対値を小さくするように学習を行なった

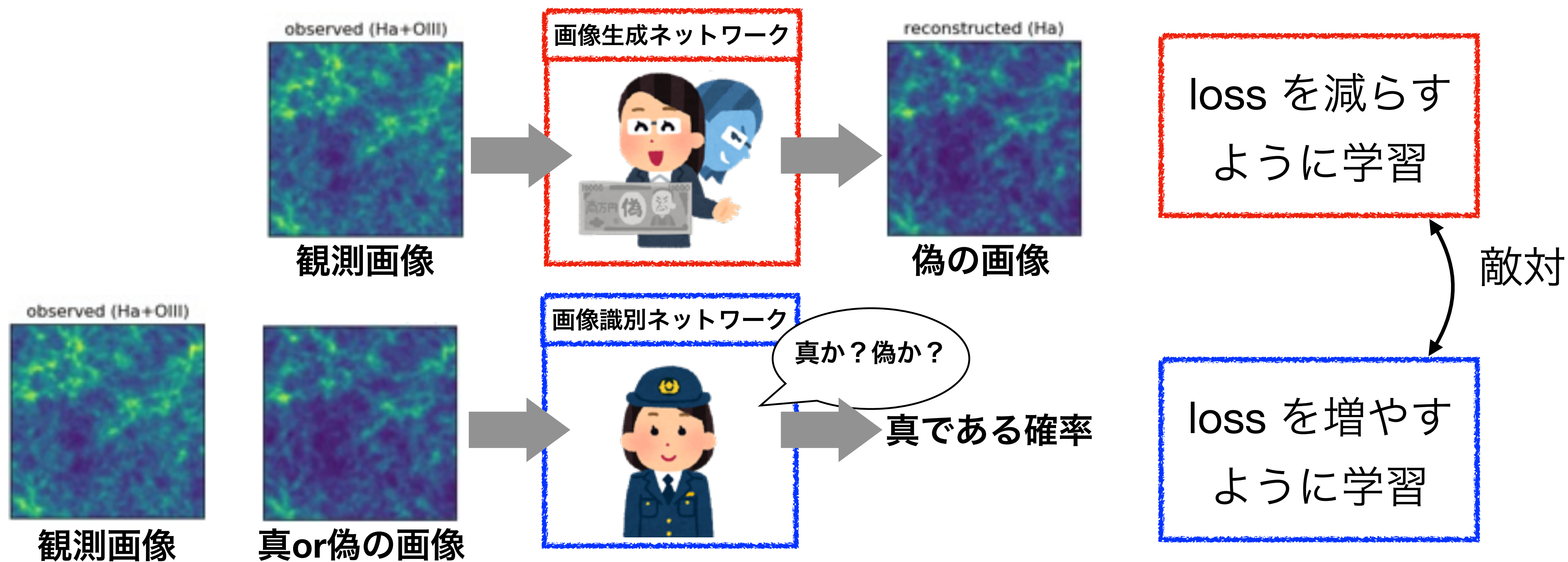


機械学習による分離結果



敵対的生成ネットワーク

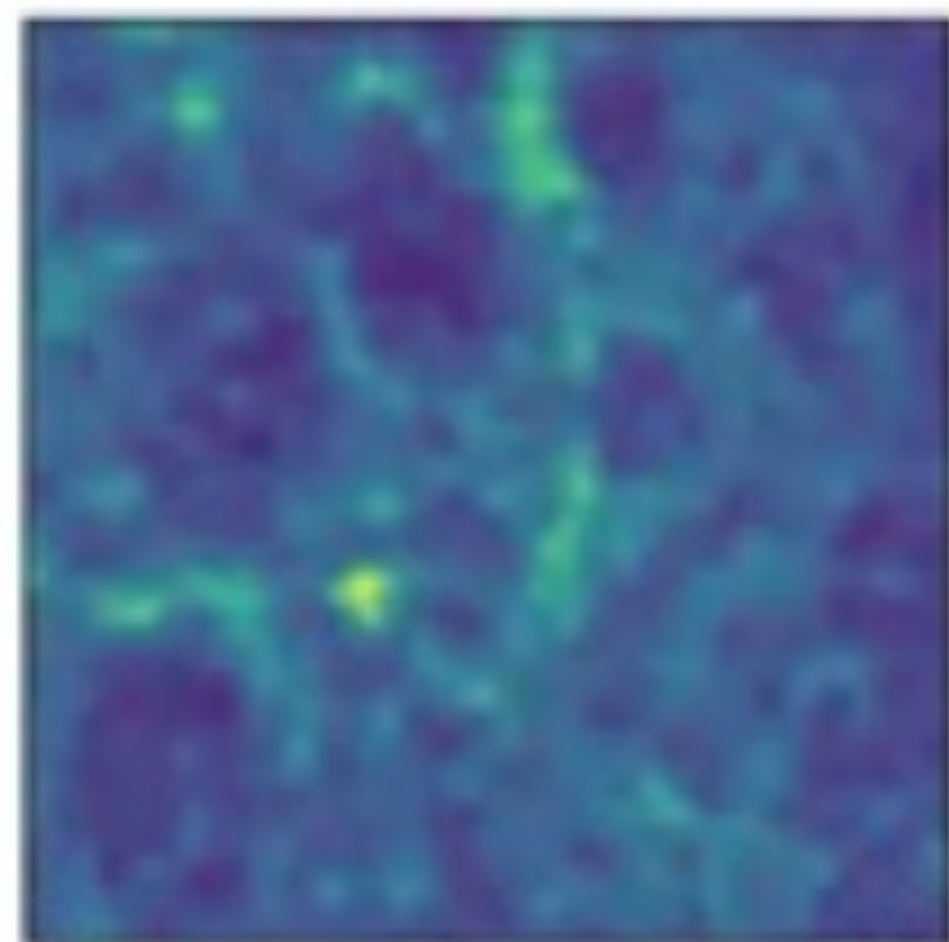
Generative Adversarial Network (GAN)



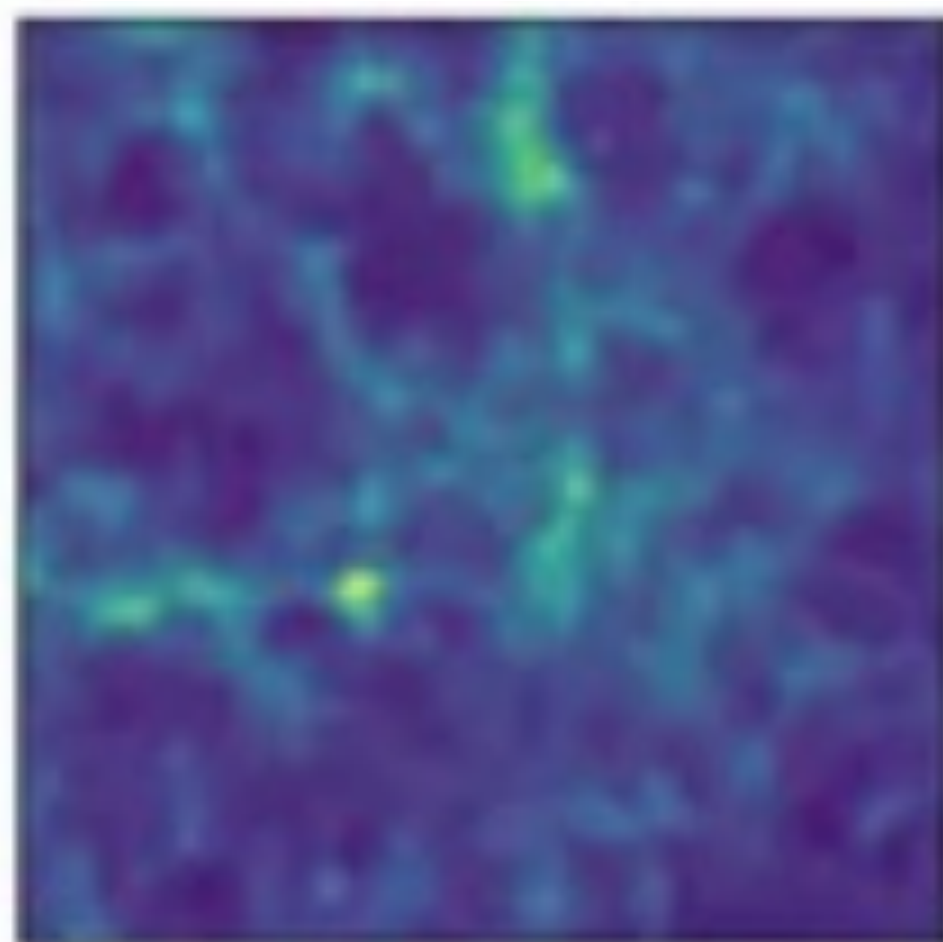
Loss function:
$$L[G, D] = \log D(X_{\text{obs}}, X_{\text{true}}) + \log[1 - D(X_{\text{obs}}, G(X_{\text{obs}}))] + \lambda \langle |X_{\text{true}} - G(X_{\text{obs}})| \rangle$$

敵対的生成ネットワークを用いたシグナル分離

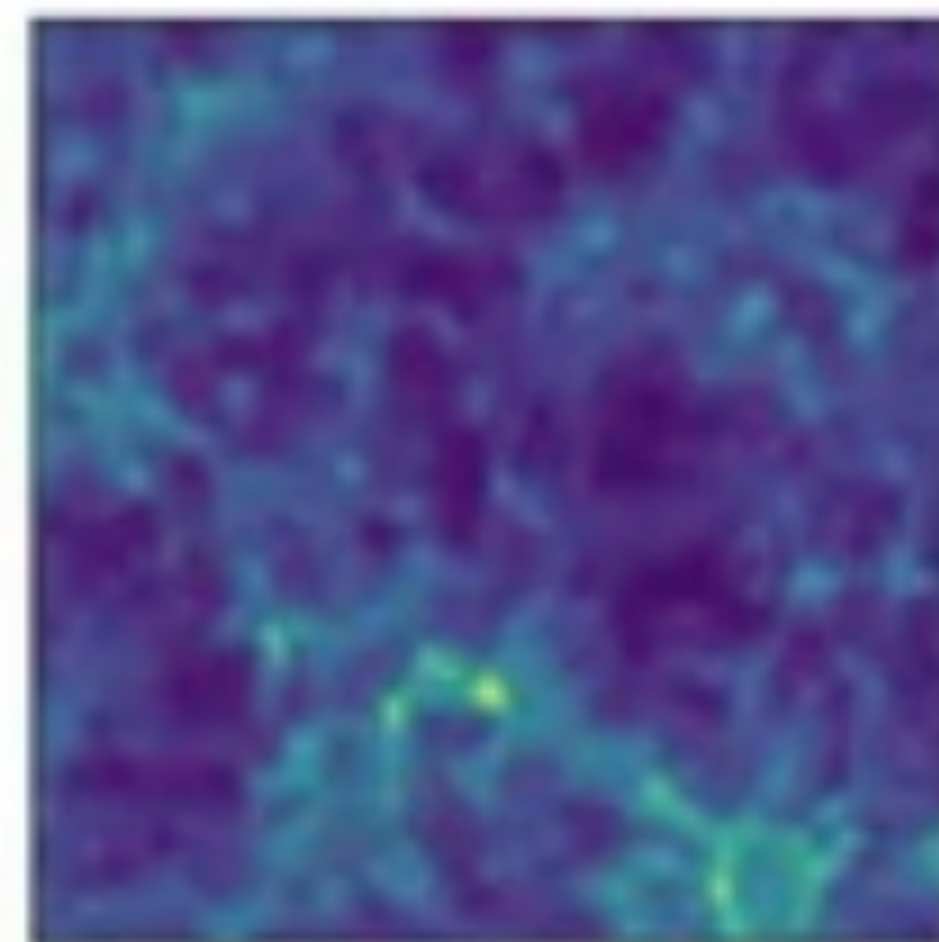
入力画像 (観測)



真の画像 (手前)



真の画像 (遠方)

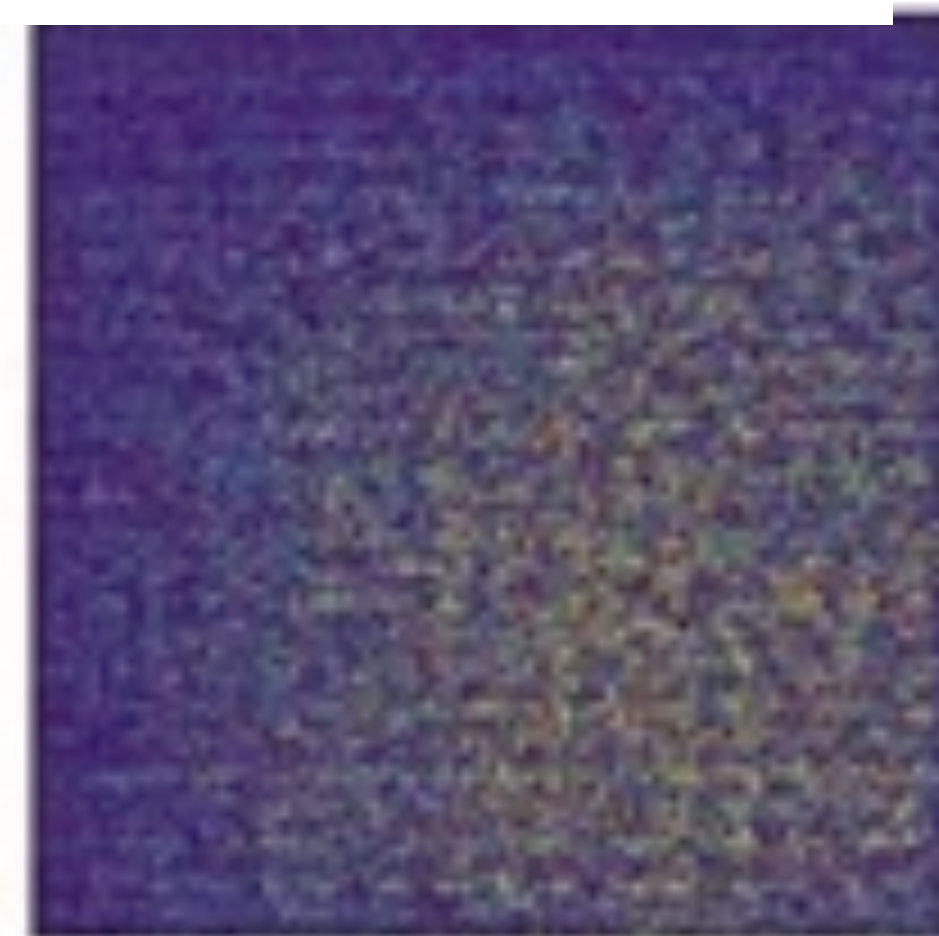
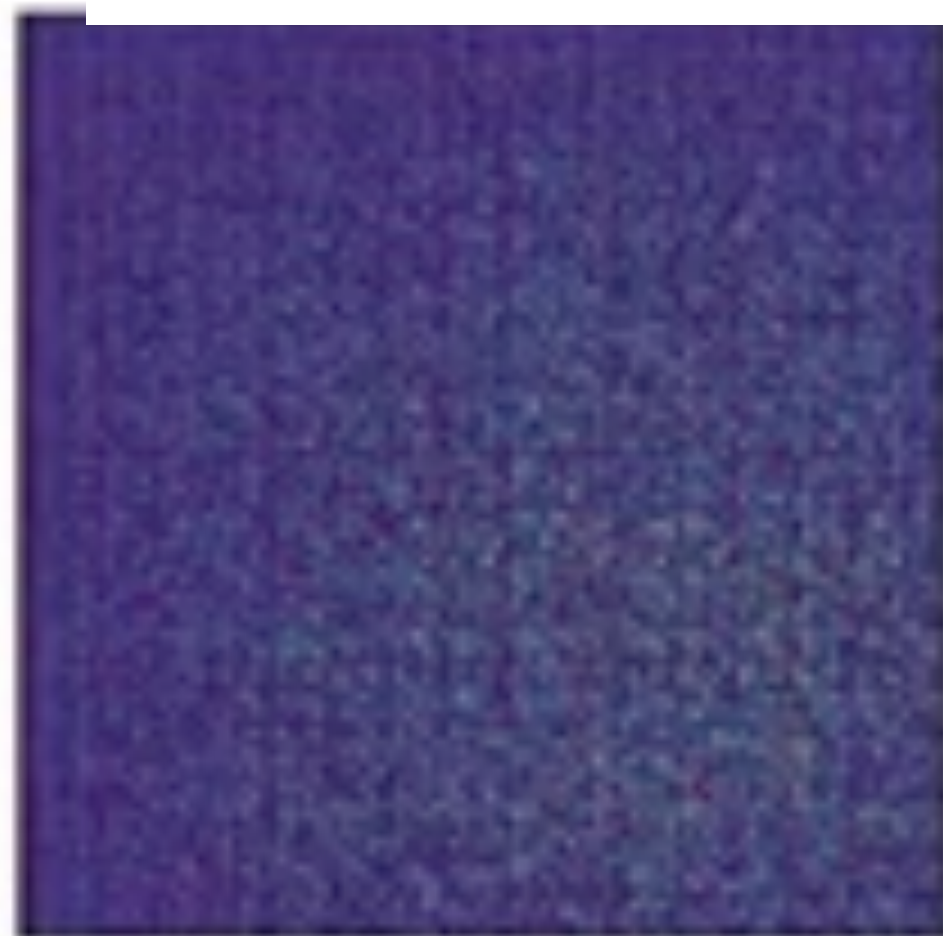


=

+

機械学習による分離結果

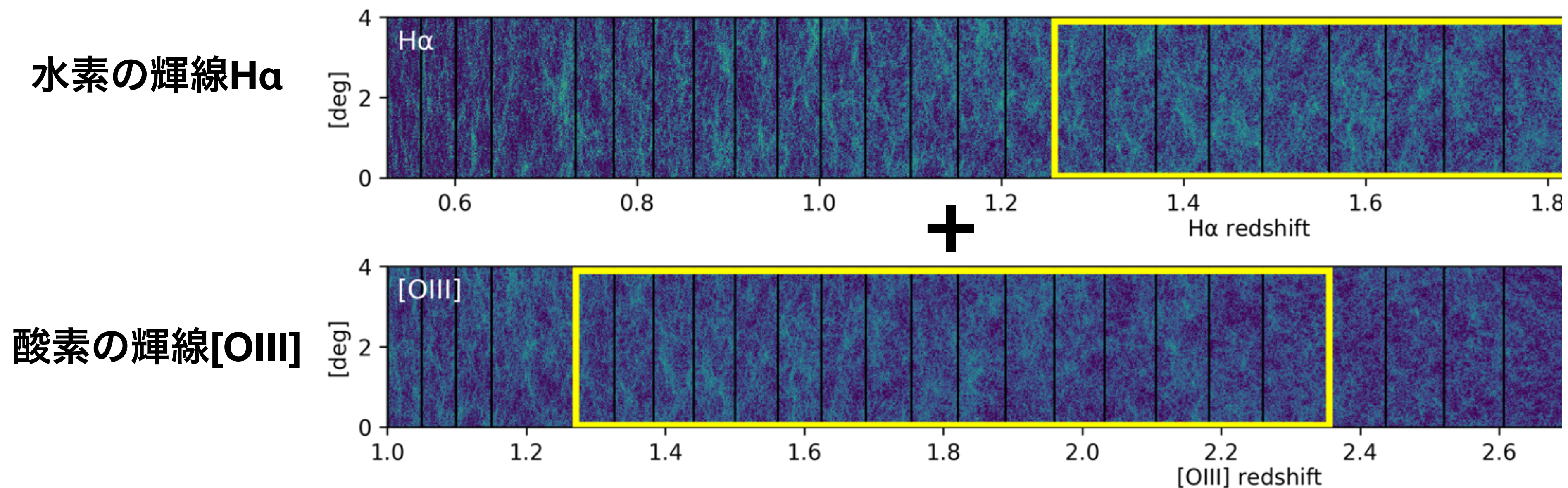
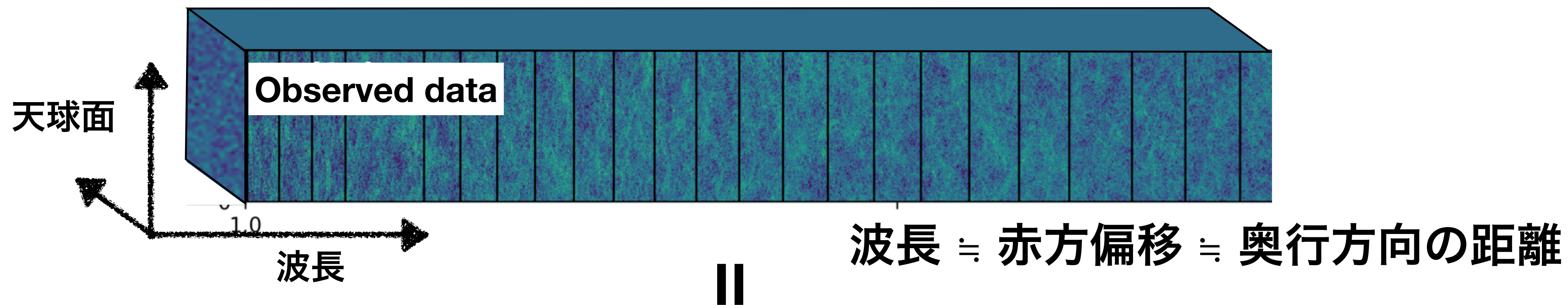
CNN



Moriwaki et al., (2020), MNRAS, 496, L54

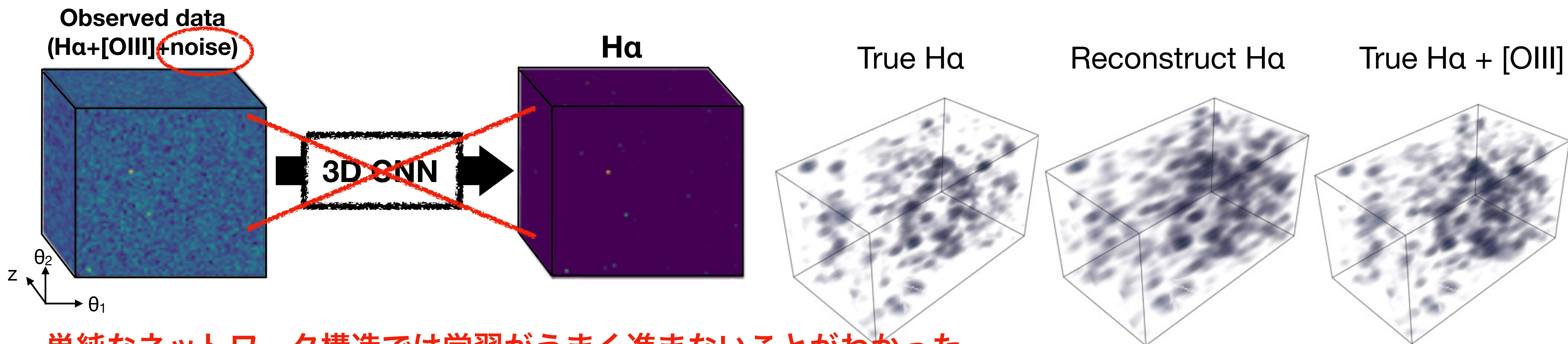
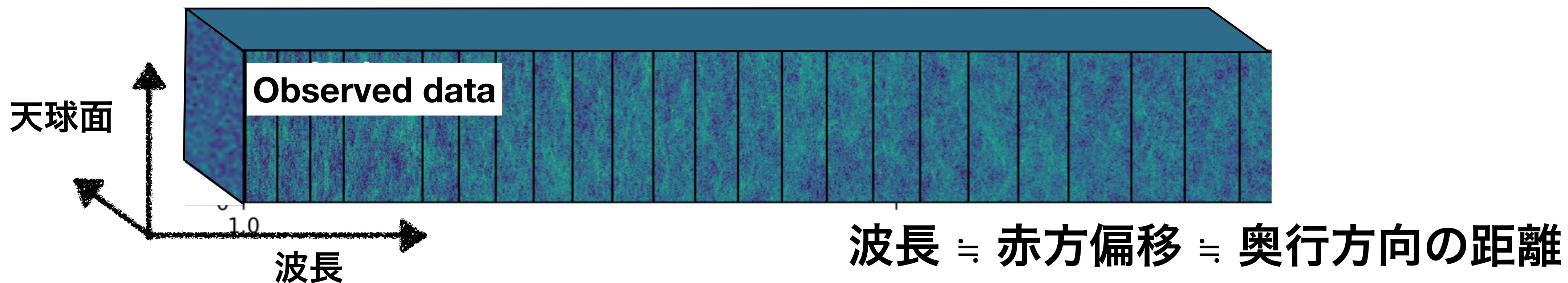
敵対的生成ネットワークを用いたシグナル分離

三次元（角度×波長）データを用いることもできる



敵対的生成ネットワークを用いたシグナル分離

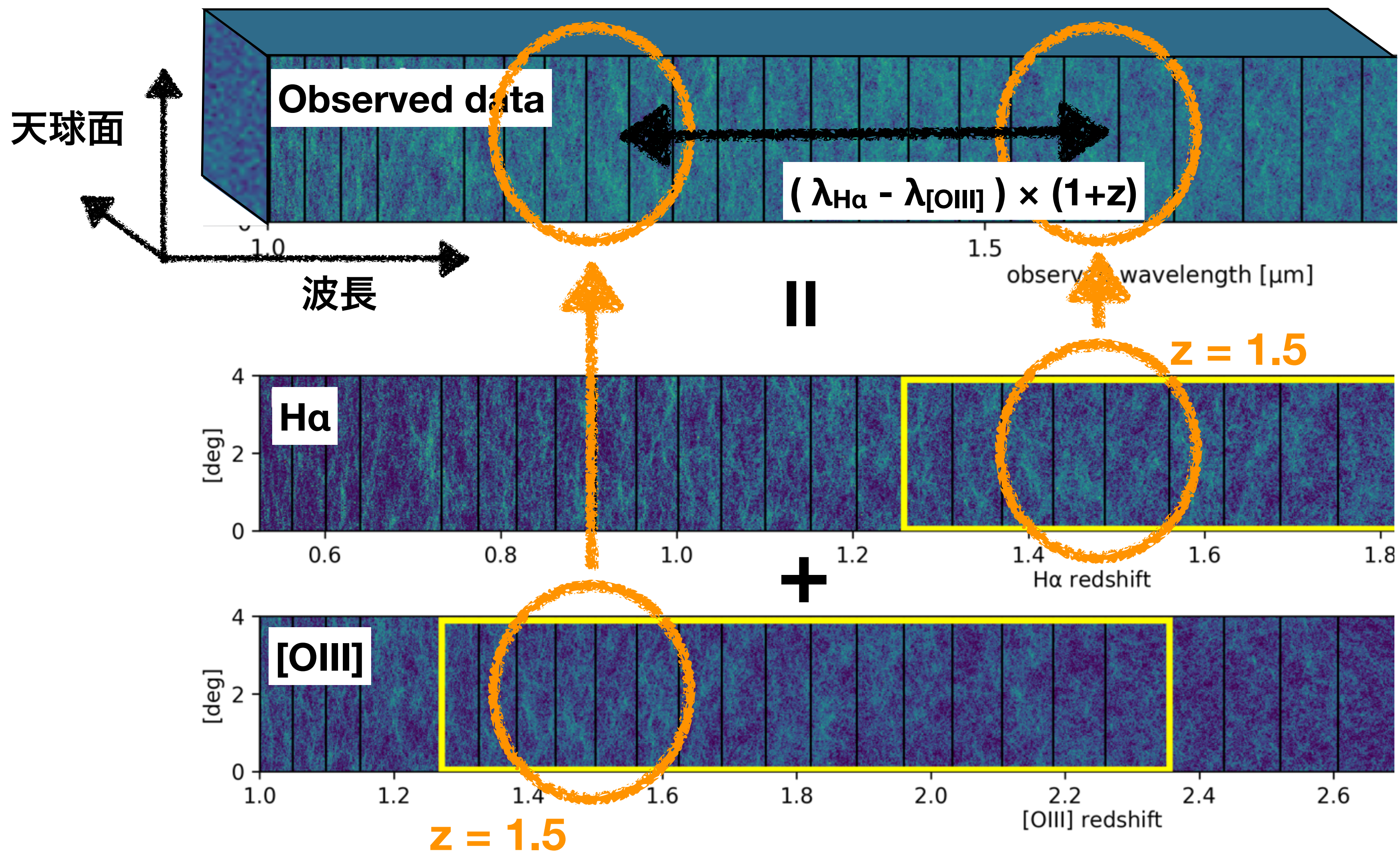
三次元（角度×波長）データを用いることもできる



単純なネットワーク構造では学習がうまく進まないことがわかった

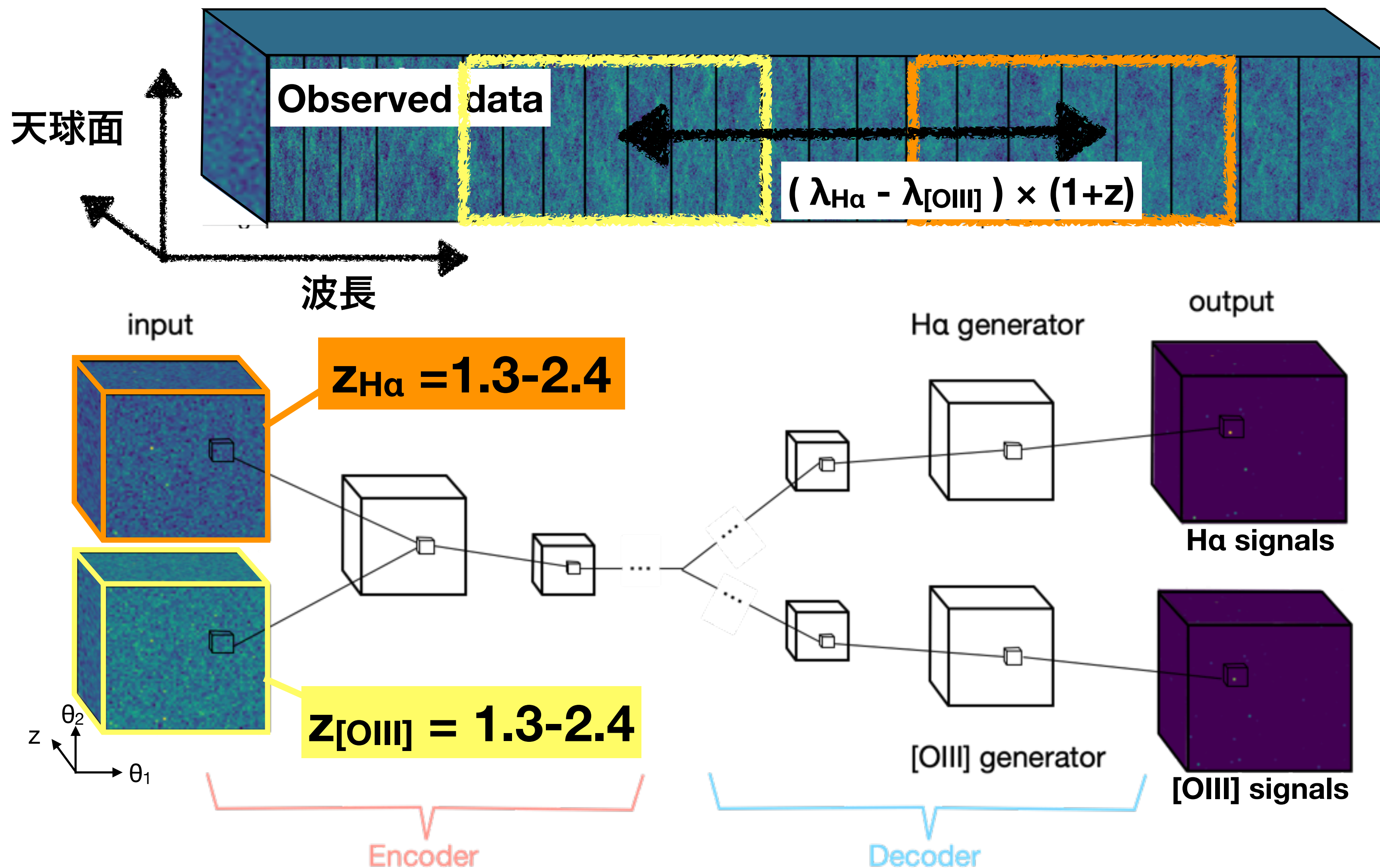
敵対的生成ネットワークを用いたシグナル分離

物理的な情報を”教える”ことで精度を上げることはできないか？

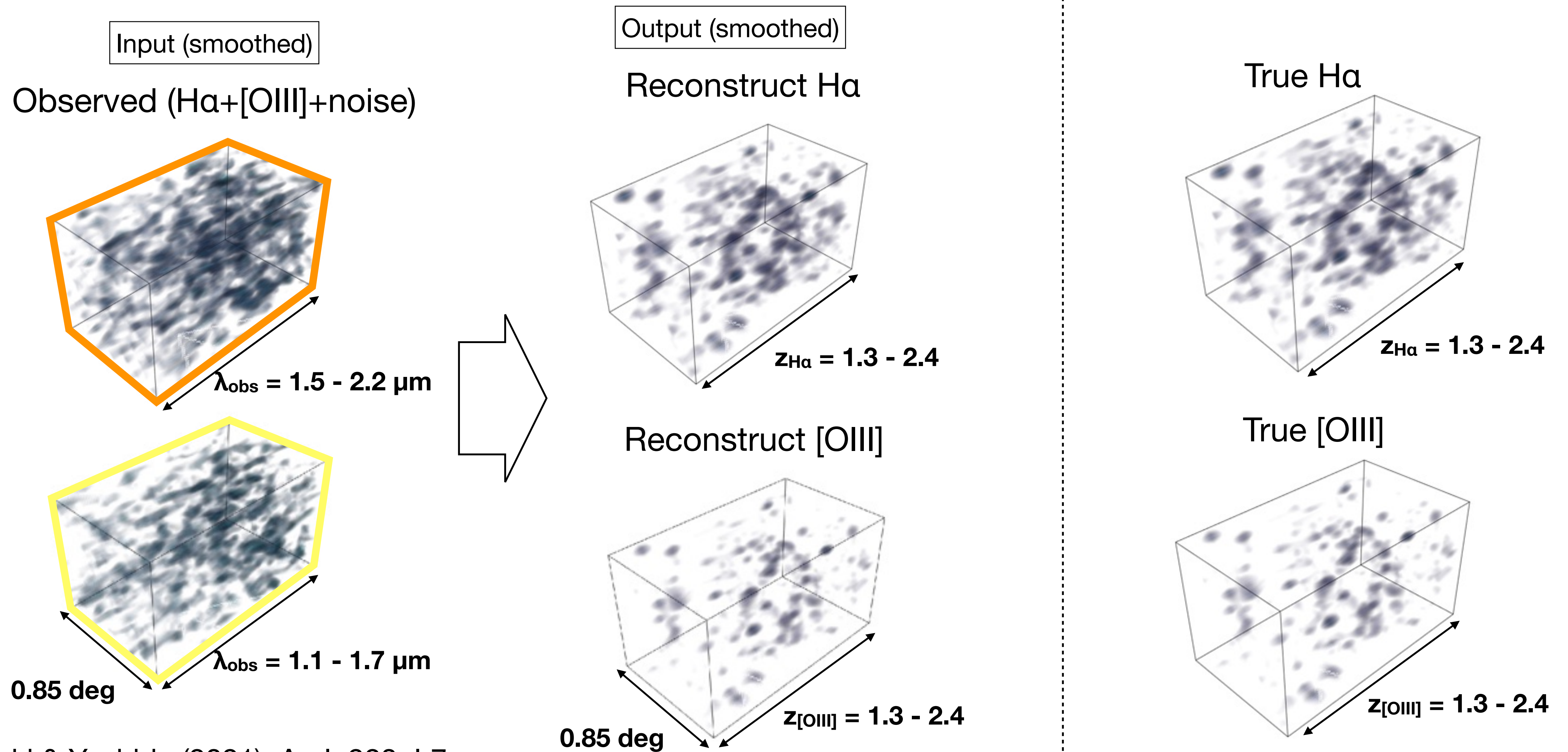


敵対的生成ネットワークを用いたシグナル分離

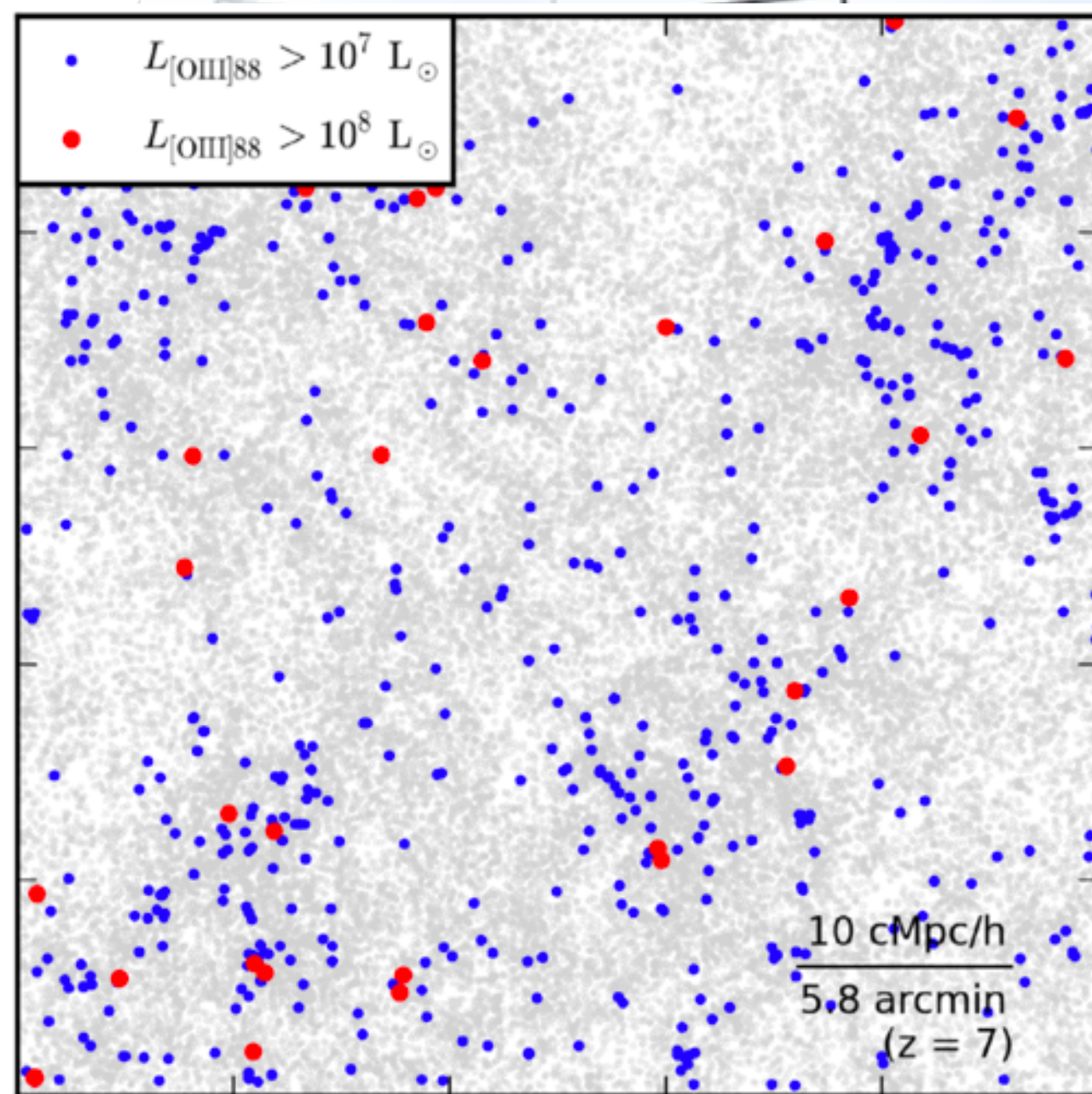
物理的な情報を”教える”ことで精度を上げることはできないか？



敵対的生成ネットワークを用いたシグナル分離



酸素イオンからの輝線放射で明るく輝く遠方銀河の分布 (Moriwaki et al. MNRAS 481, L84)

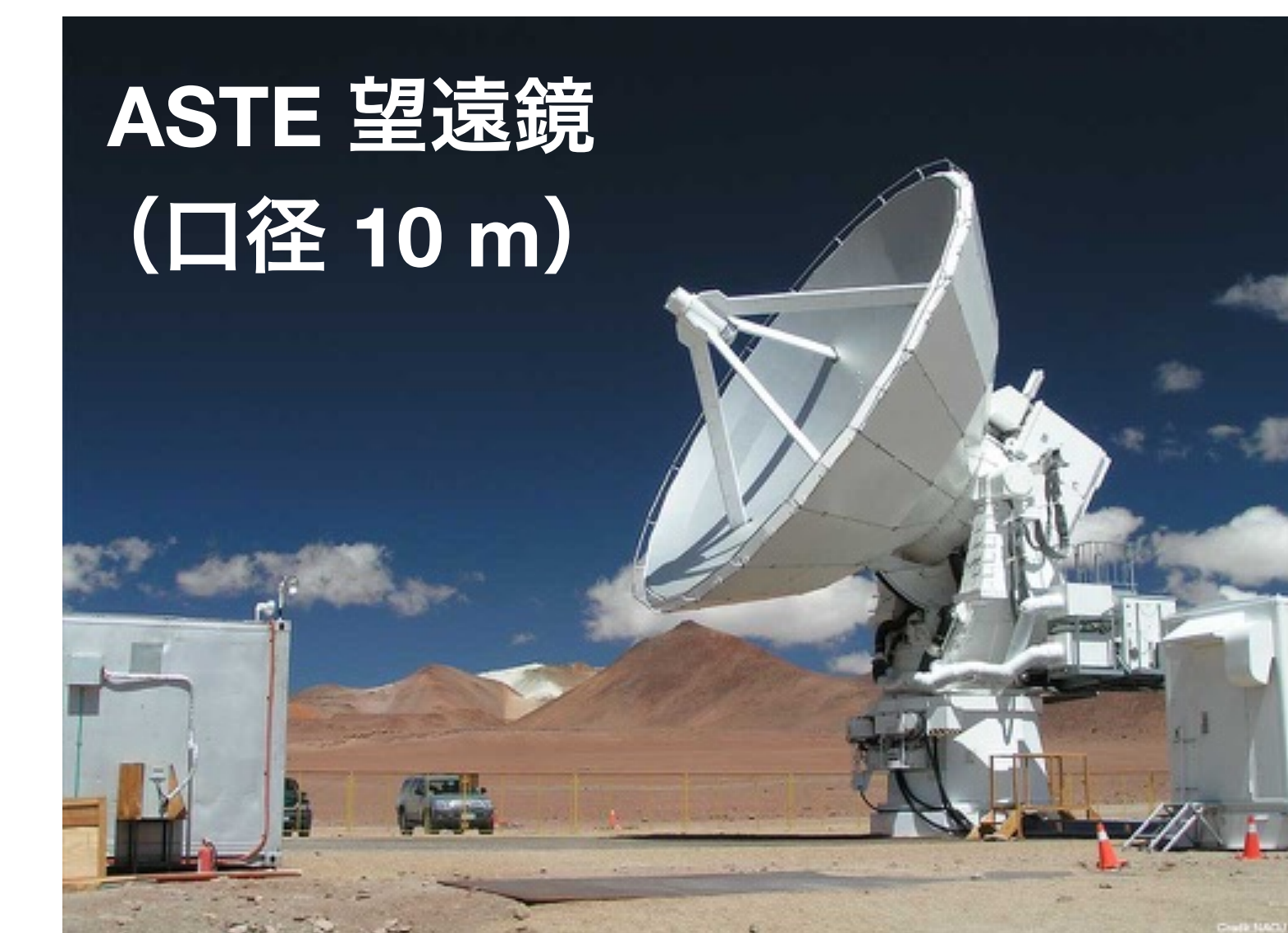


遠方（過去）の銀河の三次元分布を効率よく検出するための観測装置開発

Kohno et al. P. SPIE 11453 (2020)

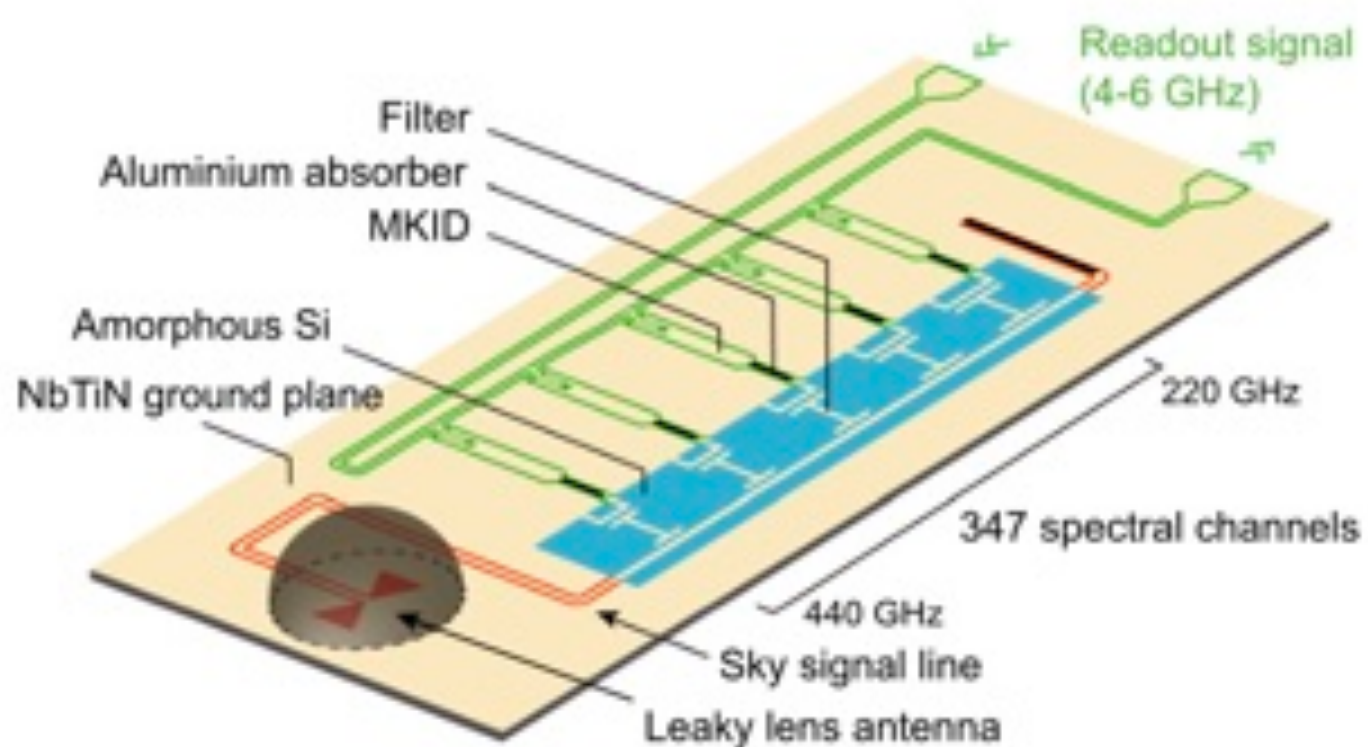
酸素や炭素イオンからの光に注目！

遠方銀河からの光



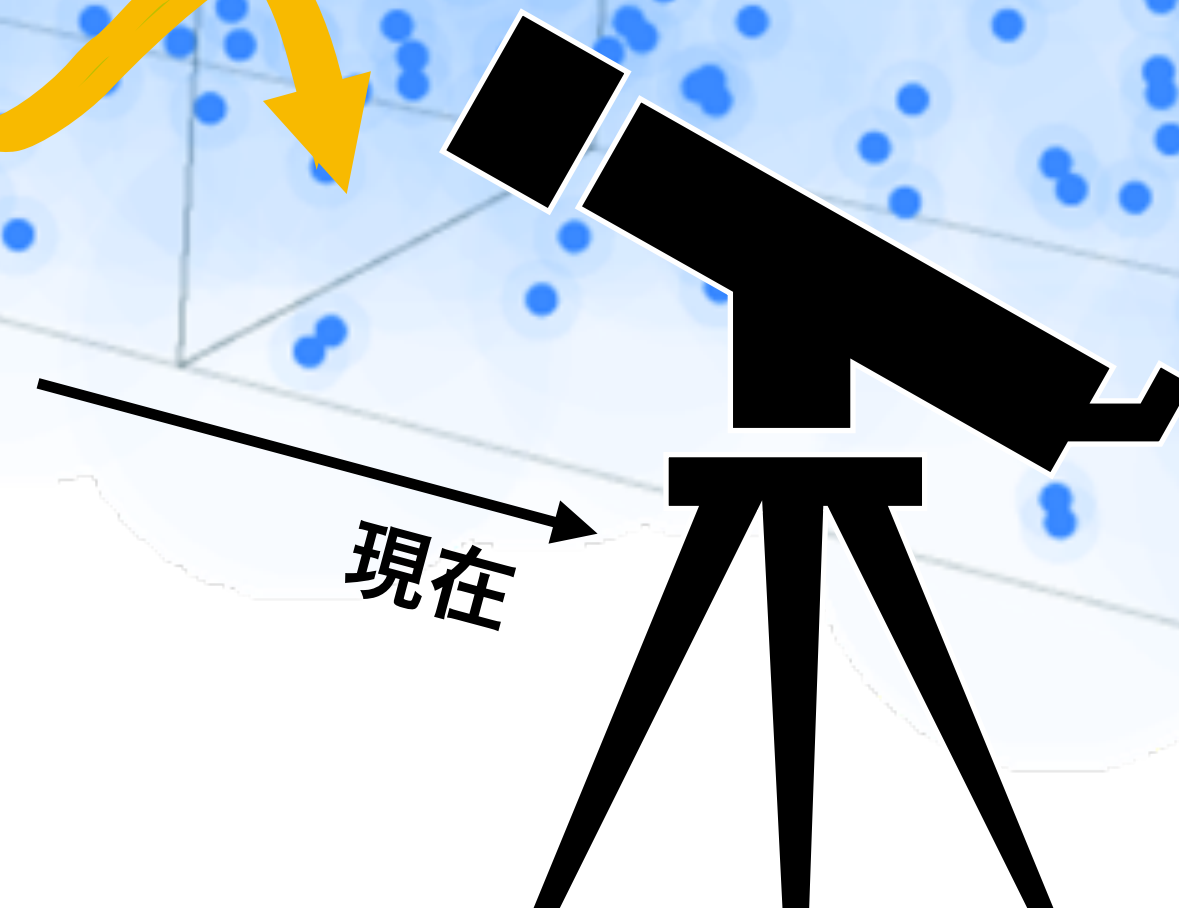
ASTE 望遠鏡
(口径 10 m)

集積超伝導分光器



DESHIMA 2.0

Taniguchi et al., J. Low Temp. Phys. (2022)

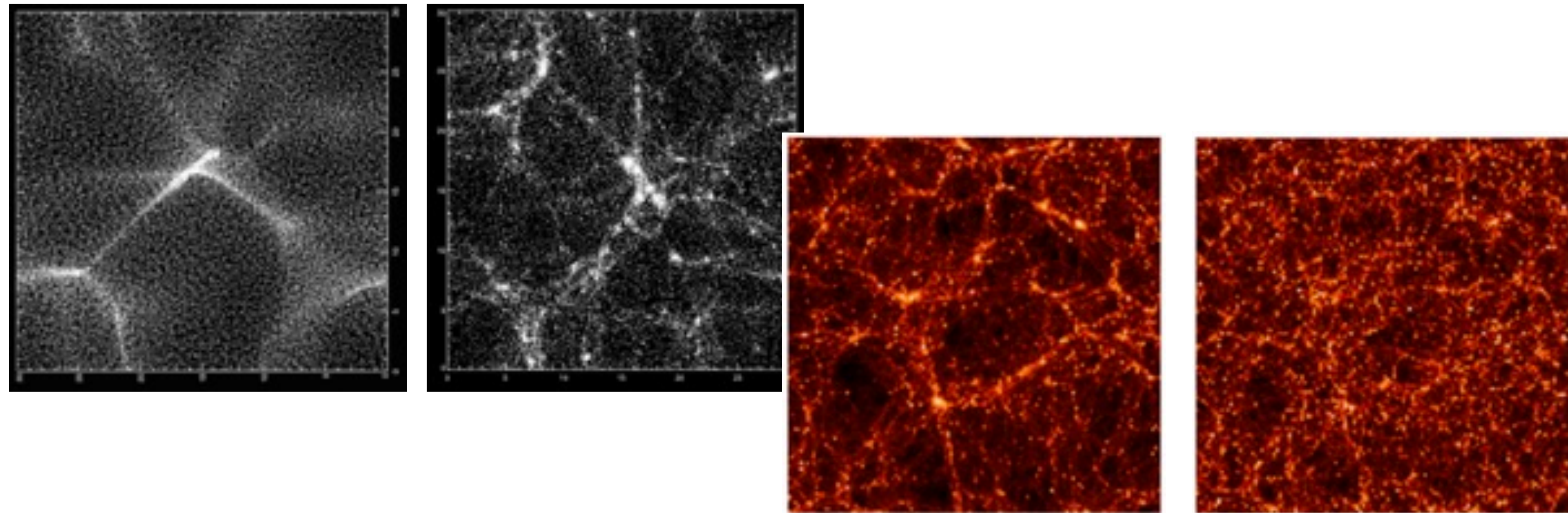


国際先導研究

「超伝導工学・大規模数値計算・データ科学で解明する宇宙最初期の重元素生成過程」

(PI: 河野孝太郎/東大天文センター)

今日話した内容



- 宇宙大規模構造とは
- 何がわかるか：暗黒物質・暗黒エネルギー・初期状態
- いかに効率よく宇宙大規模構造を観測するか？
- シミュレーションとデータ科学の手法を用いた大規模構造の研究

