すばるHSCとSDSSを用いた極重元素量欠乏銀河(EMPG)の探索

杉森加奈子　天羽将也　駒木彩乃
大和義英　水越翔一郎

イントロダクション

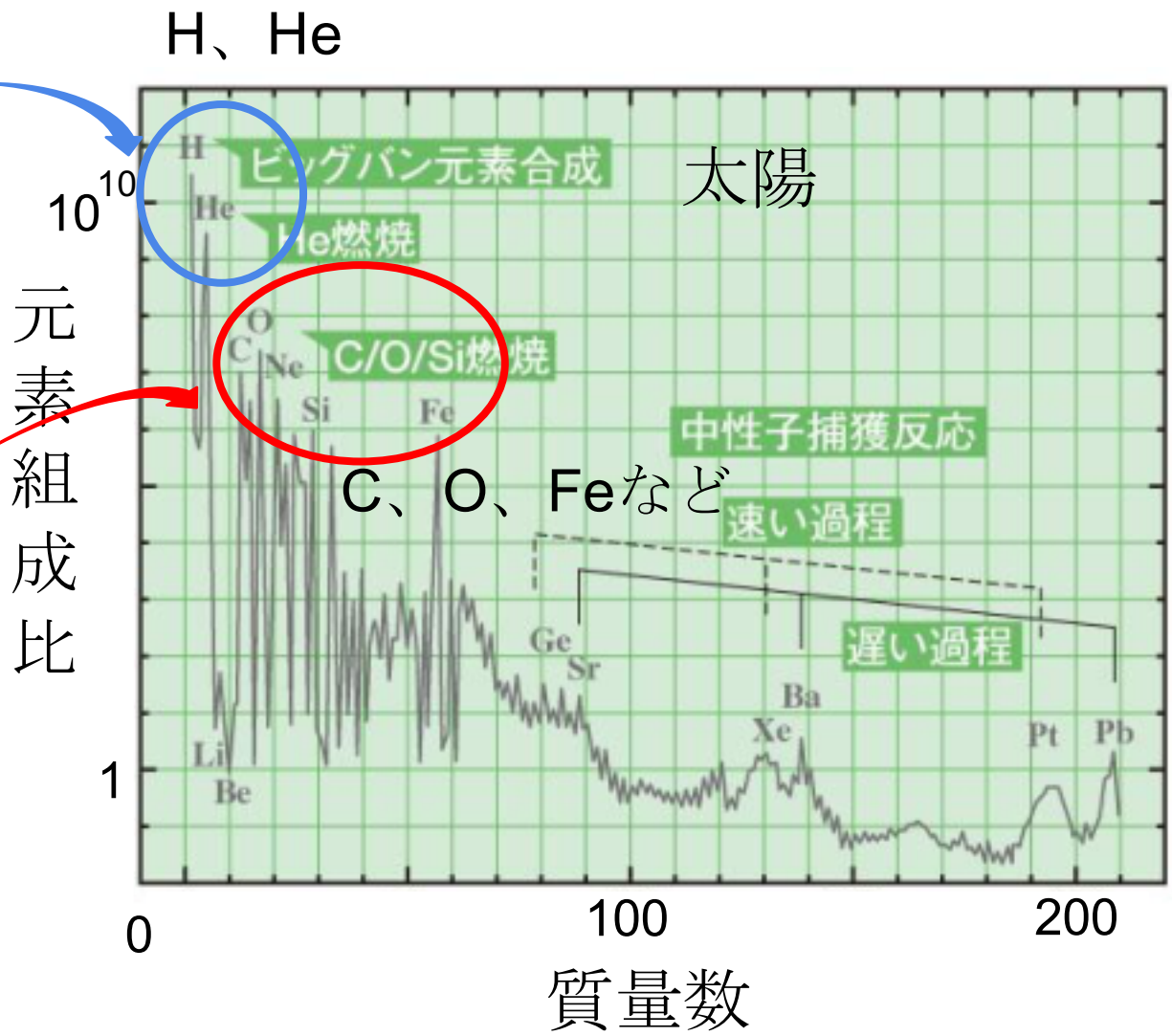
宇宙の中の元素

1.ビッグバン元素合成
（初期宇宙）

⇨軽元素（H、He）

2.恒星内部の核融合反応
（現在の宇宙）

⇨重元素（B以降）



銀河形成

- 理論予想

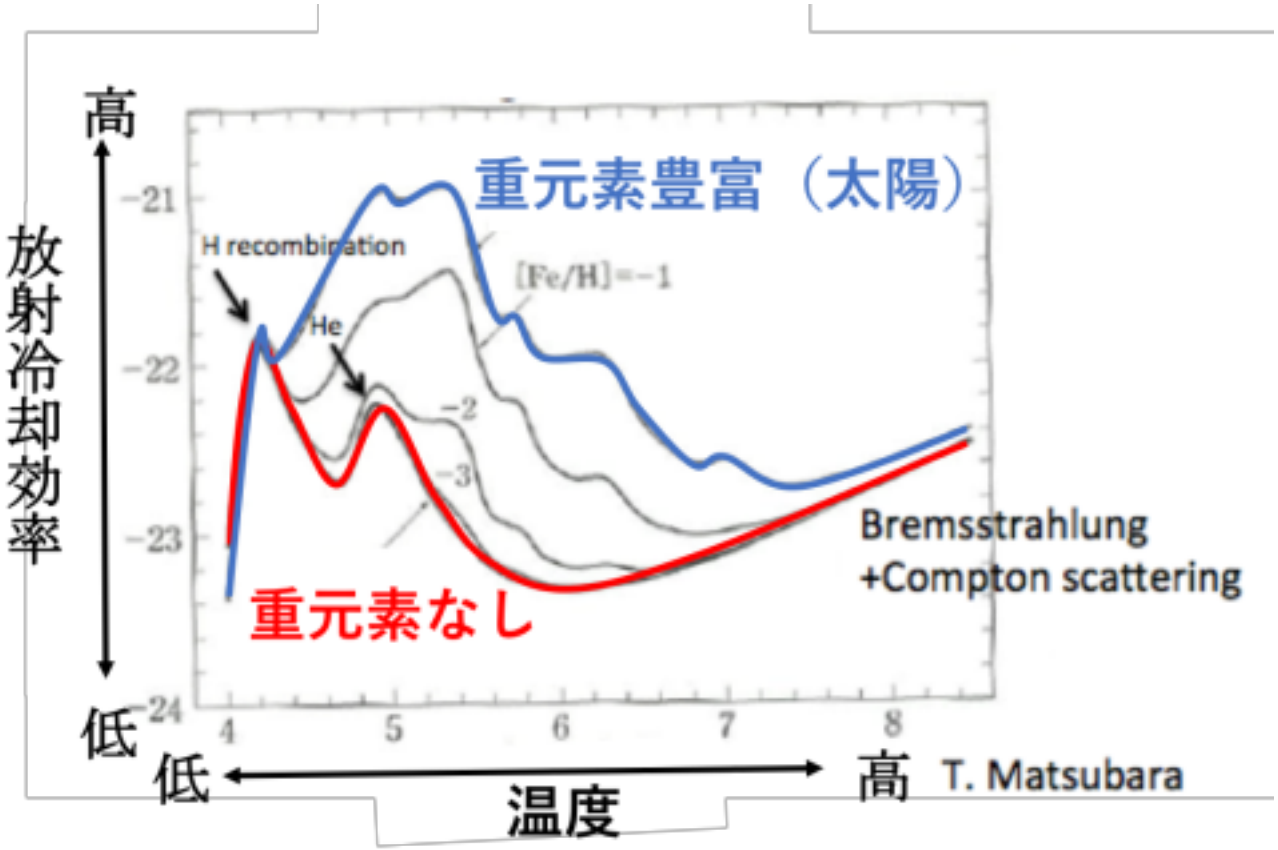
  初期宇宙の密度揺らぎ

  ⇨ガスとダークマター

  のハロー

  ⇨ガスが放射冷却

  ⇨星の形成



重元素ない⇨放射冷却が難しい

⇨初期宇宙の銀河 (初期銀河) の形成

未解明

初期銀河の観測?

初期宇宙

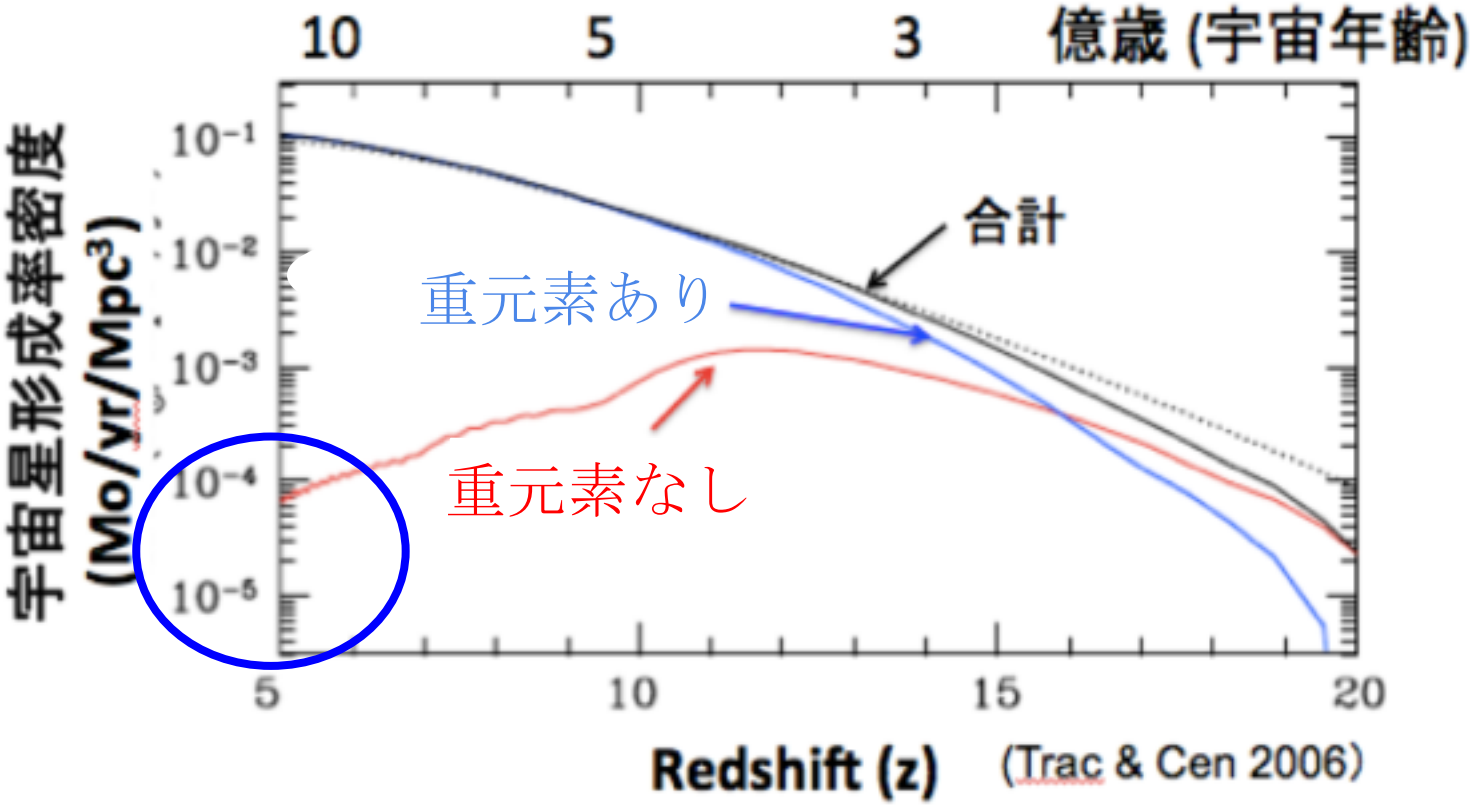
⇨遠く暗い

観測は現状不可能

理論予想

⇨近傍で存在

(珍しい)



近 ⟷ 遠

初期銀河に似た近傍銀河

極重元素量欠乏銀河（EMPG）

太陽重元素量の20%以下

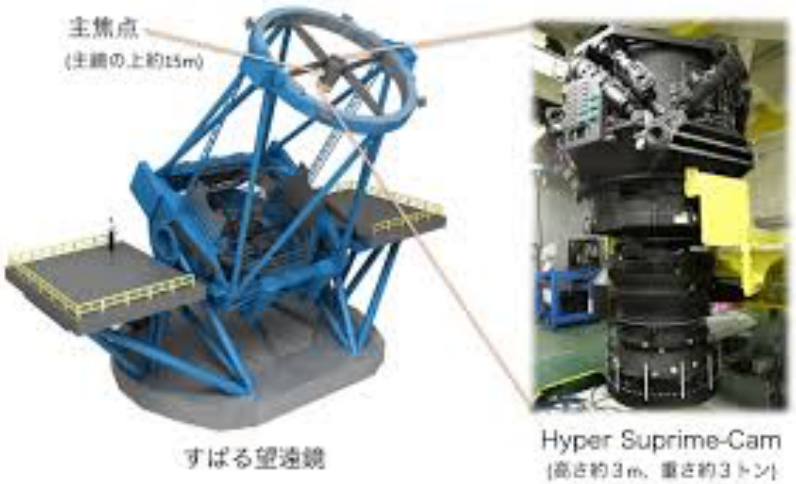
目標：EMPGを探索し、性質を明らかにする

データと解析

広領域可視光 撮像・分光データ

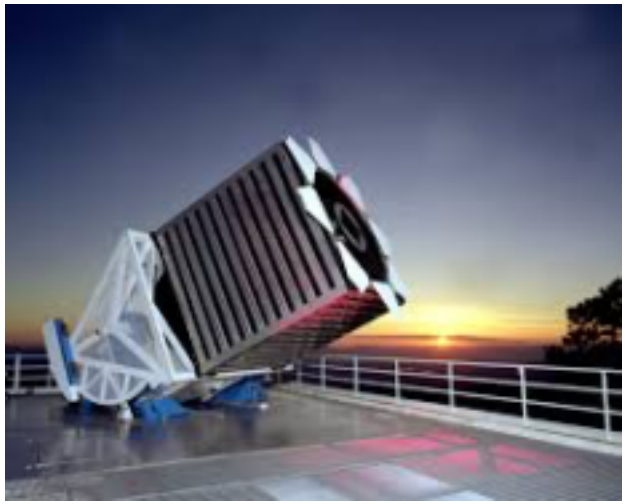
すばるHyper Suprime-Cam (HSC)

- 暗い銀河まで(限界等級:26等級)
- 可視光撮像探査(～100平方度)



Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

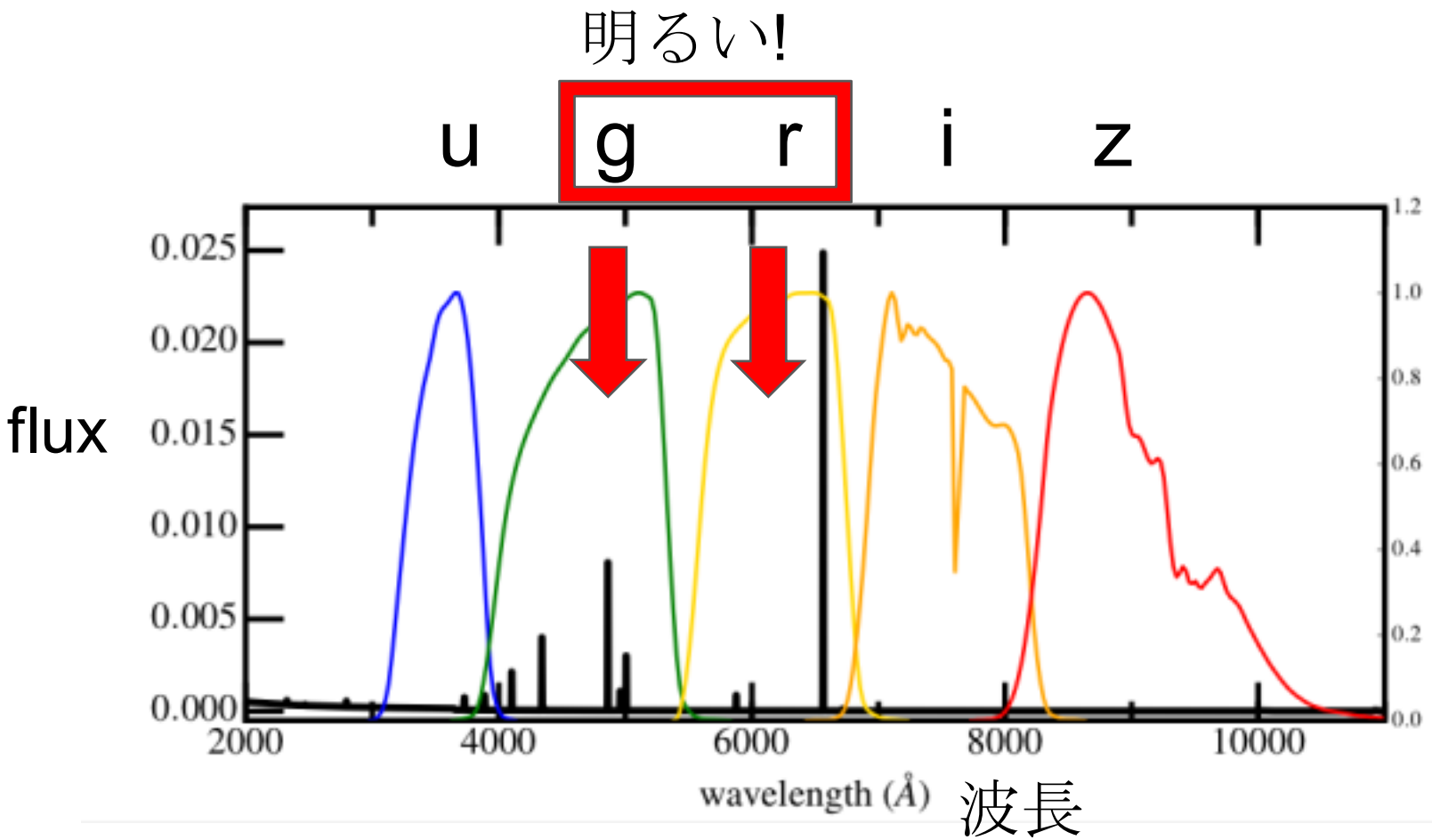
- 明るい銀河のみ(限界等級:21等級)
- 広い範囲(全天の1/4)



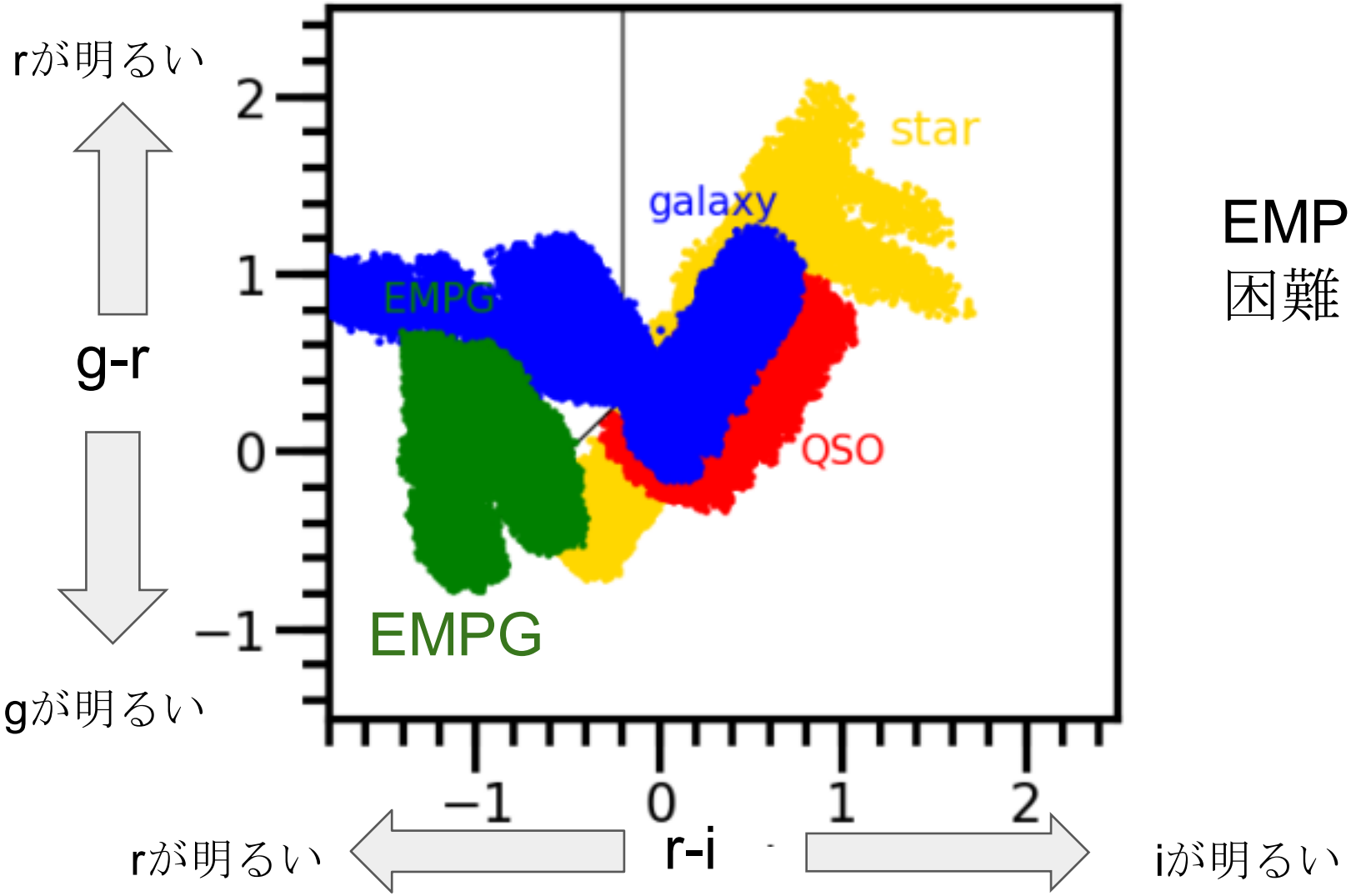
- 検出された全天体
  100万個(SDSS)、1億個(HSC)の天体

モデルと深層学習を使って効率的にEMPGを探す

EMPGの特徴(理論モデルより)

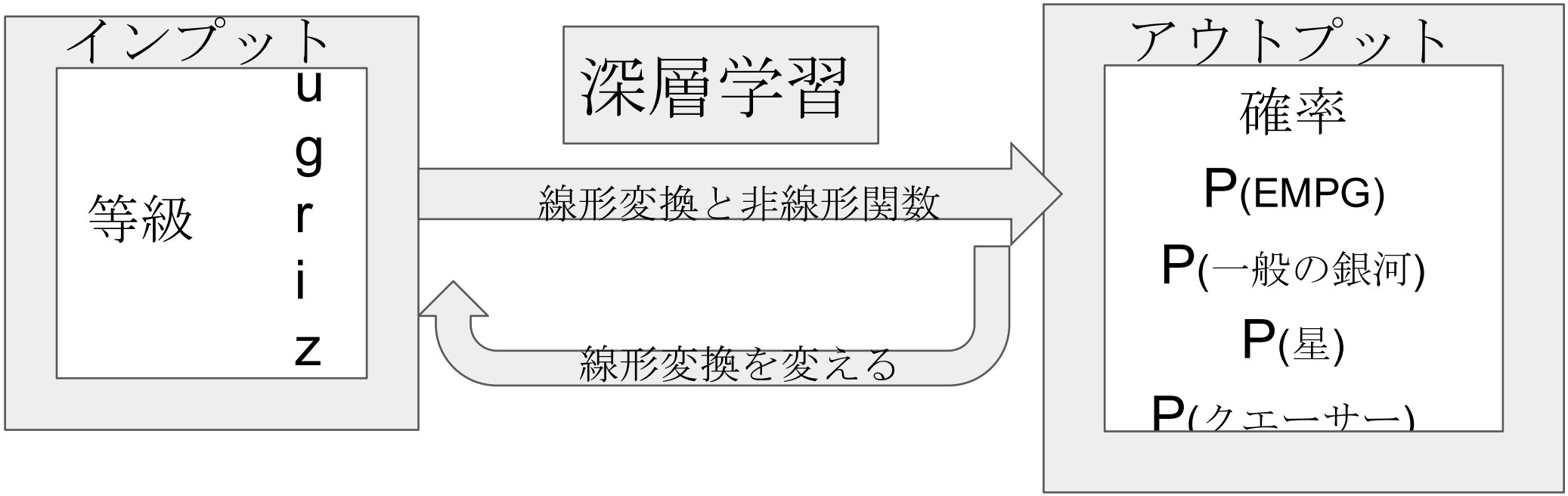


理論モデル予想



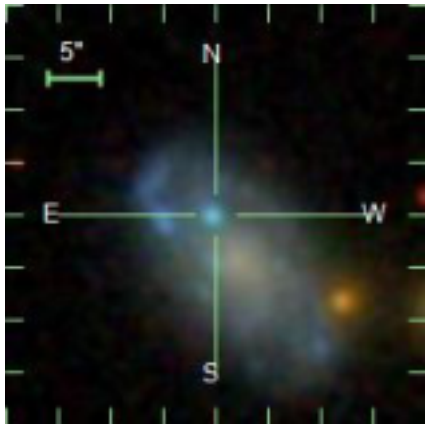
EMPGの選択が困難

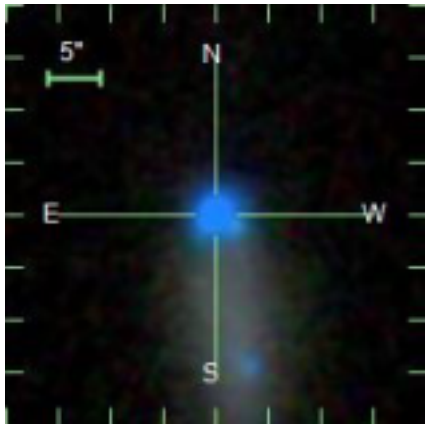
深層学習を用いた分類方法



学習データ(理論モデル)→3万個×4のモデルデータ
学習(80%のモデルデータ)→分類器の作成
テスト(20%のモデルデータ)　正解率99%

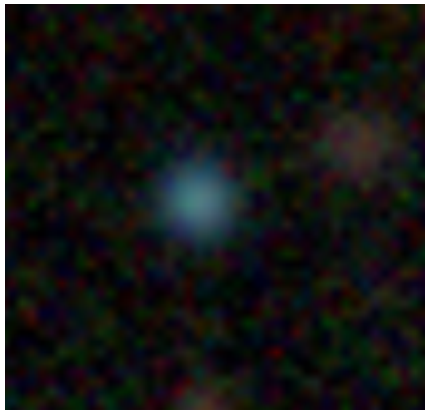
その結果、、、

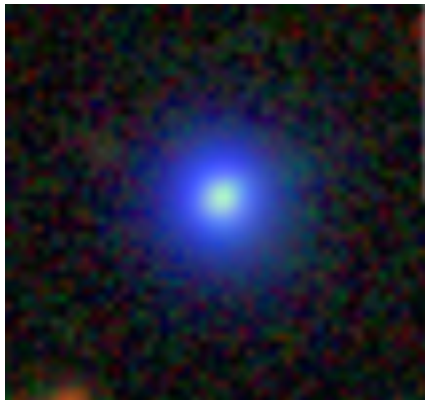




SDSSから28個
HSCから19個

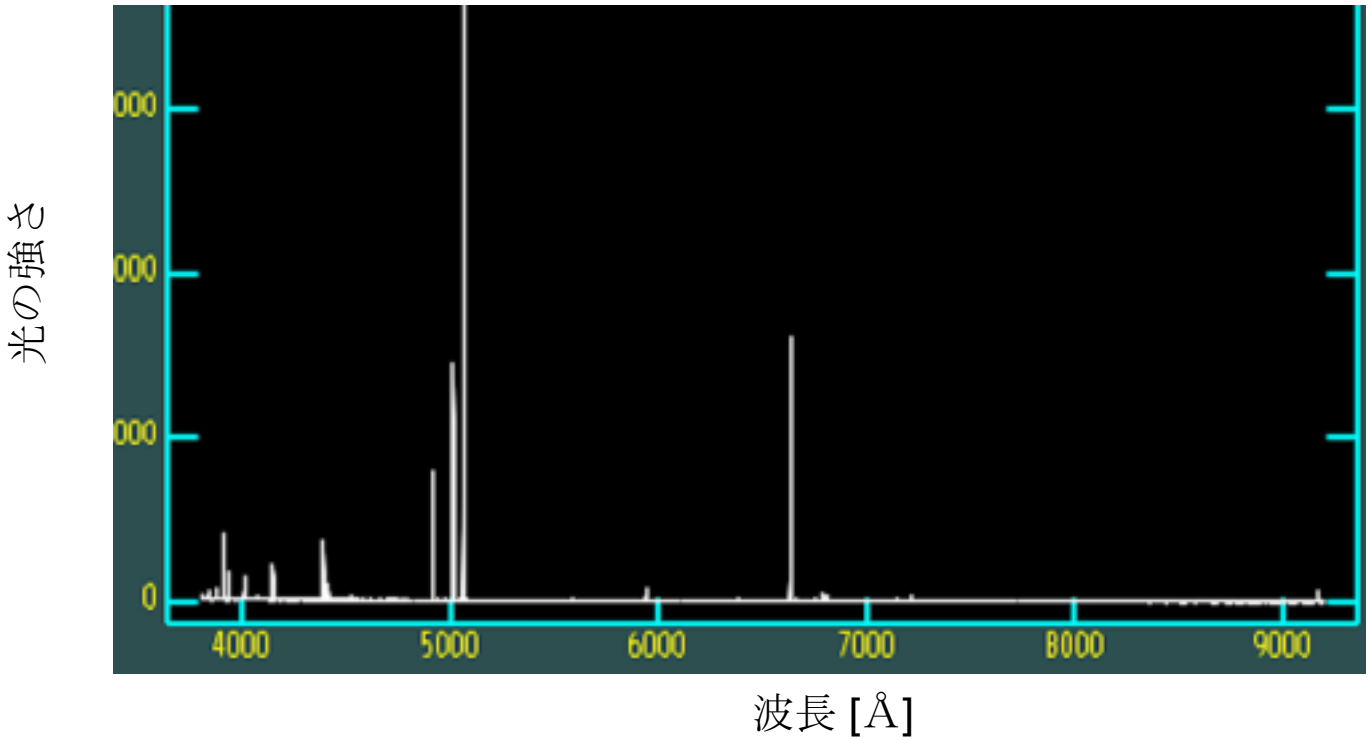
のEMPG候補天体





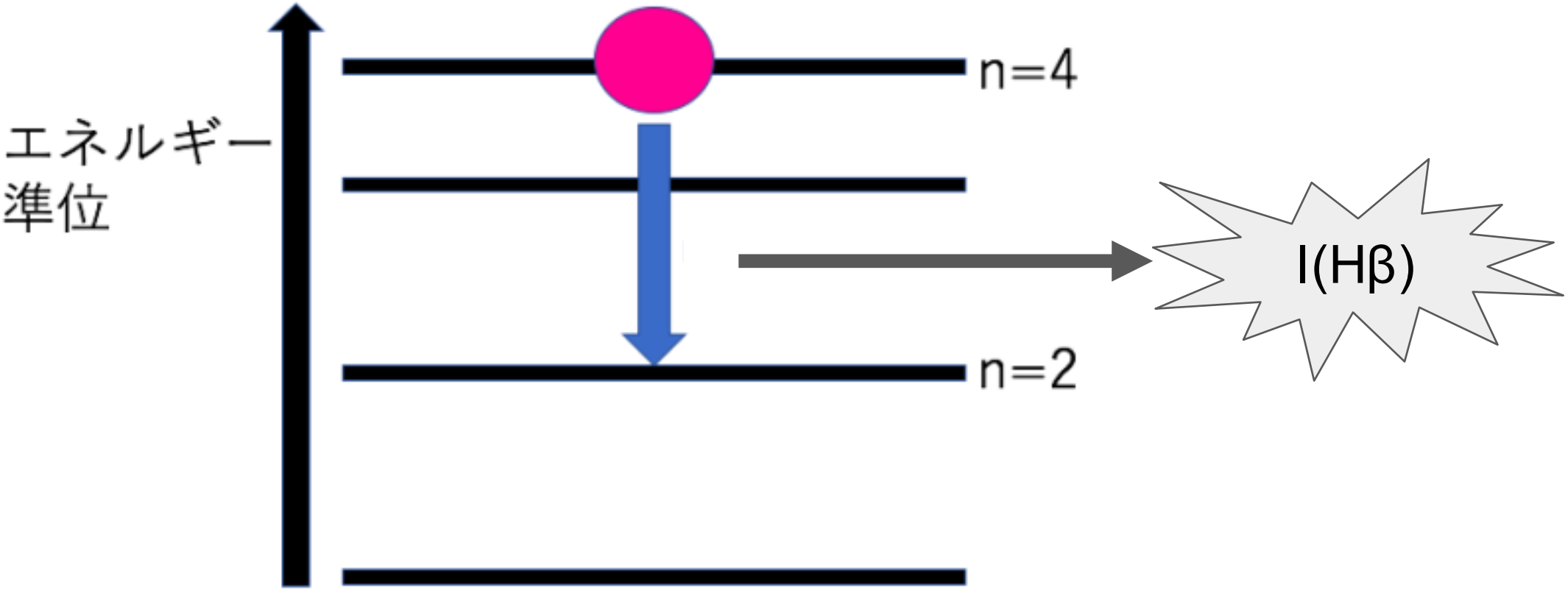
EMPG候補天体は本当に重元素欠乏か？

分光データベース確認
SDSS：２天体
（全２８天体中）
HSC：２天体
（全１９天体中）



EMPG候補の分光データ(例)

輝線から重元素量を知る



水素(Hβ輝線)

重元素量の導出①

$$O/H = I([OIII])/I(H\beta) \times (T_e\text{の関数})$$

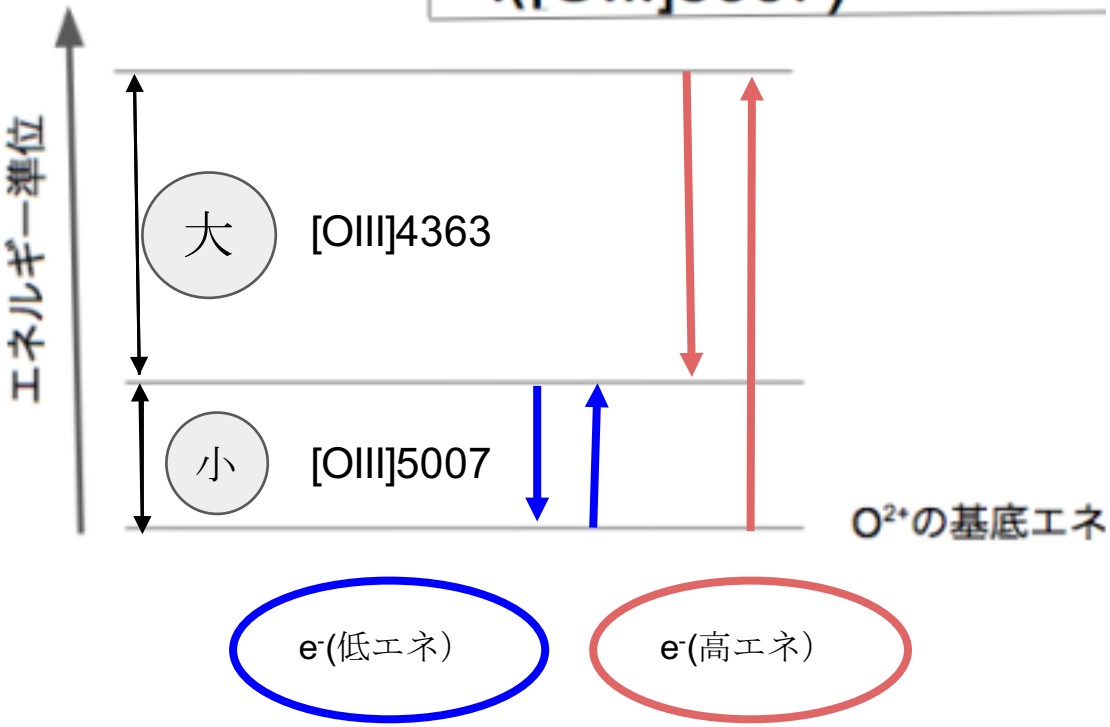
O/H・・・重元素量
I([OIII])・・・輝線[OIII]5007の強さ
I(Hβ)・・・Hβの強さ
Hβ・・・水素の主量子数4から2に遷移する時に放出

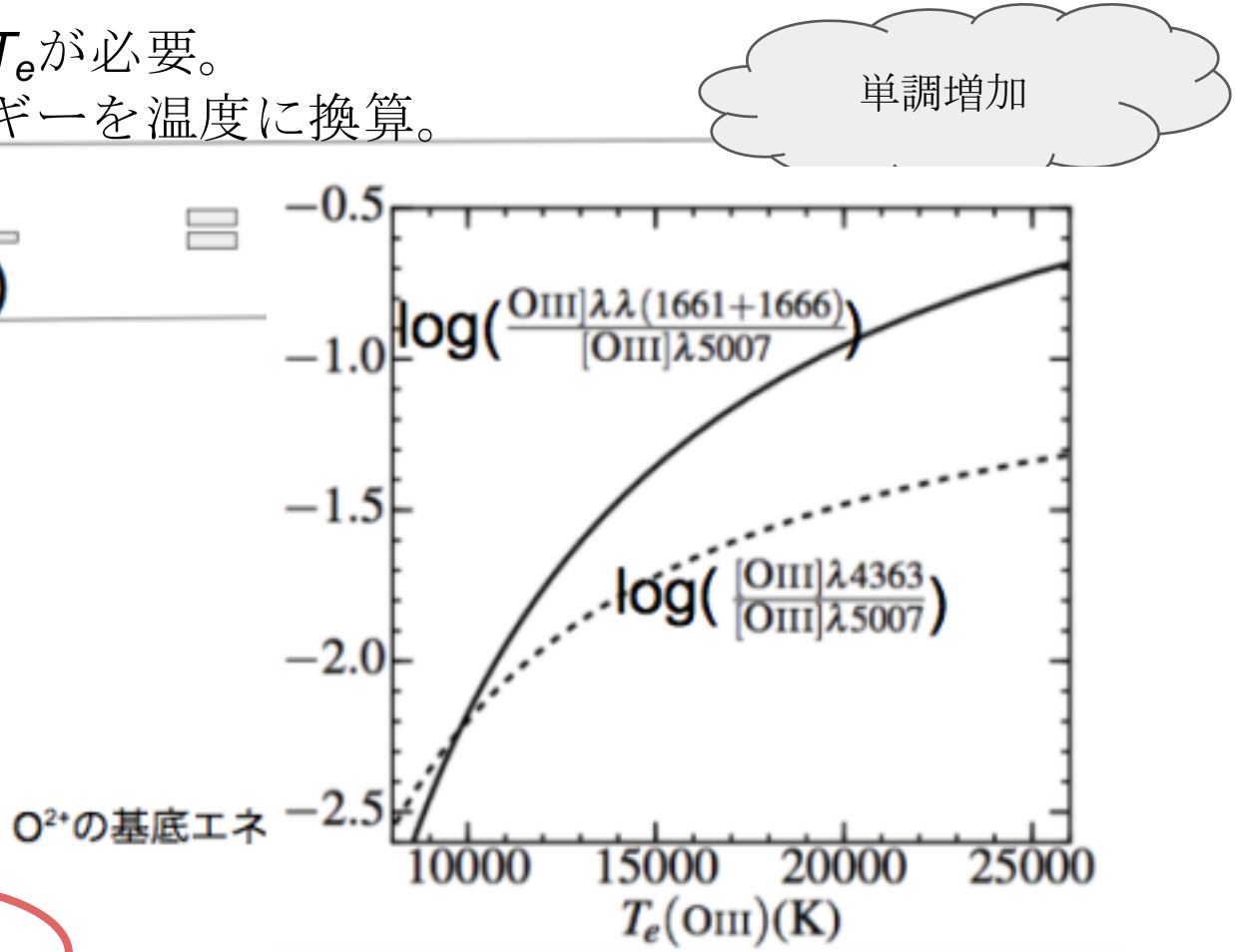
重元素量の導出②

重元素量の導出→電子温度T_eが必要。
銀河内の電子の運動エネルギーを温度に換算。

OIII輝線比

$$\frac{I([OIII]4363)}{I([OIII]5007)} =$$





輝線比とT_eの関係

重元素量の導出③

$$\mathrm{O/H} = I([\mathrm{OIII}])/I(\mathrm{H}\beta) \times (T_e\text{の関数})$$

→ O/Hが分かる

重元素量： $Z \equiv \mathrm{O/H}$

太陽の重元素量： $Z_\odot \equiv (\mathrm{O/H})_\odot$

⊙：太陽の物理量

星質量の導出

星質量 $M_\star$ ：銀河内の星の総質量

連続光：銀河内の星が発する光に起因

連続光の明るさ $\propto$ 星質量

星質量

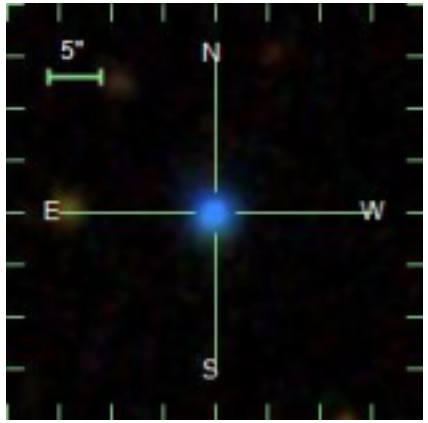
$$\log(M_\star/M_\odot) = -0.4\underline{M_{\rm u}} + 0.8$$

u-band絶対等級

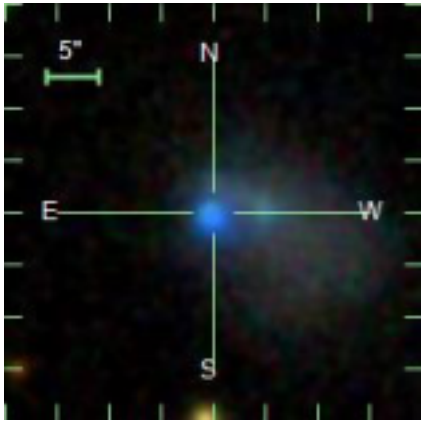
結果 1

EMPGの選択

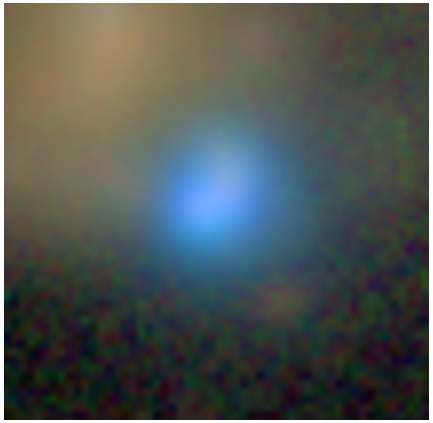
4つのEMPG



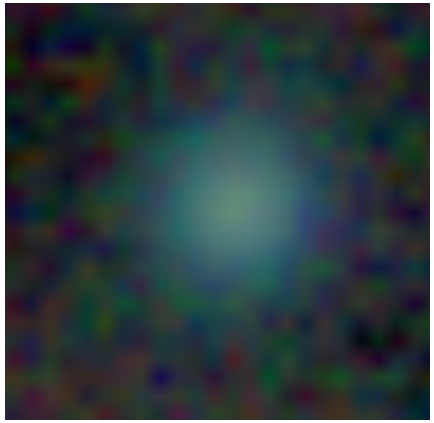
EMPG-SDSS1



EMPG-SDSS2

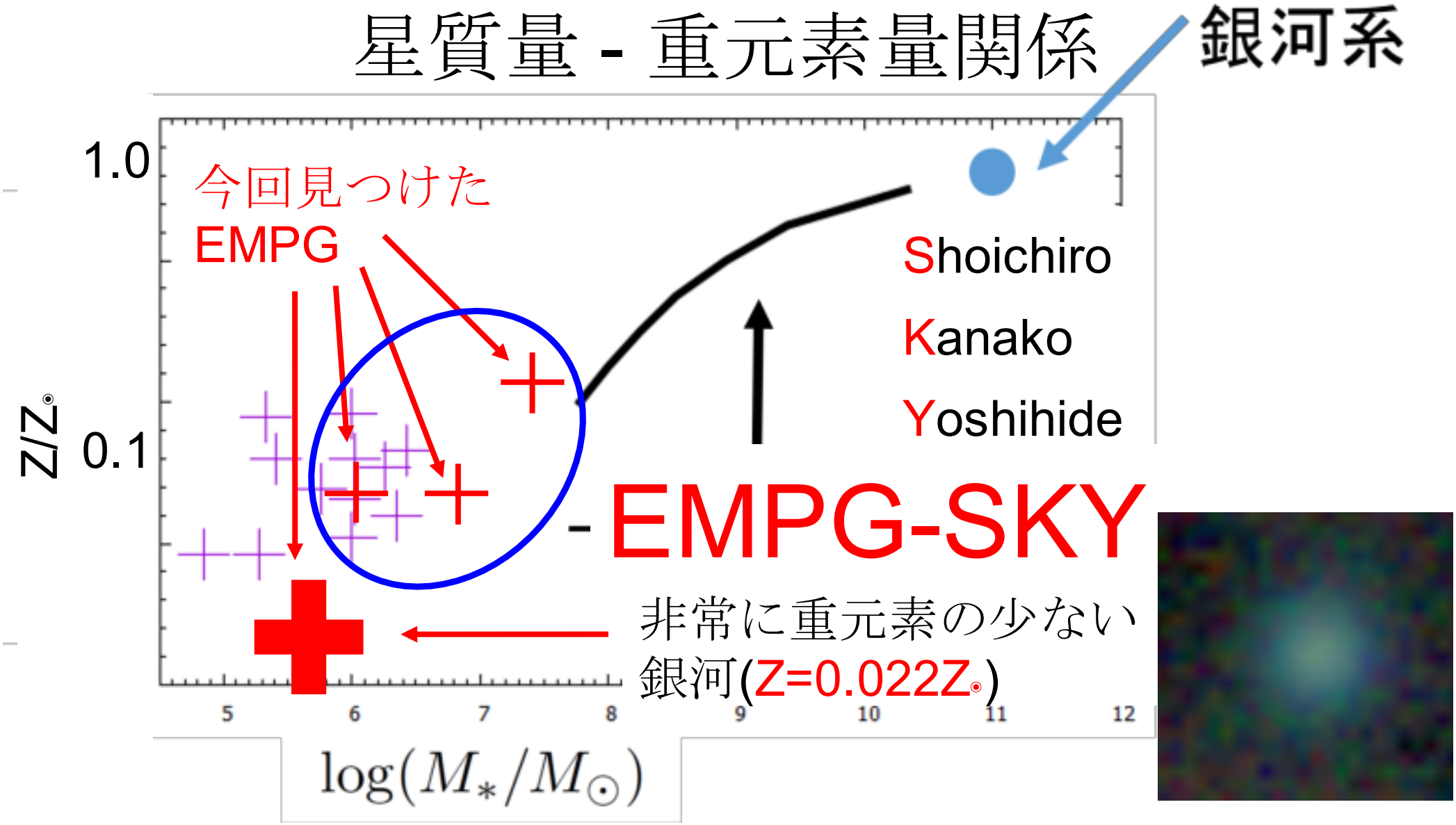


EMPG-HSC1



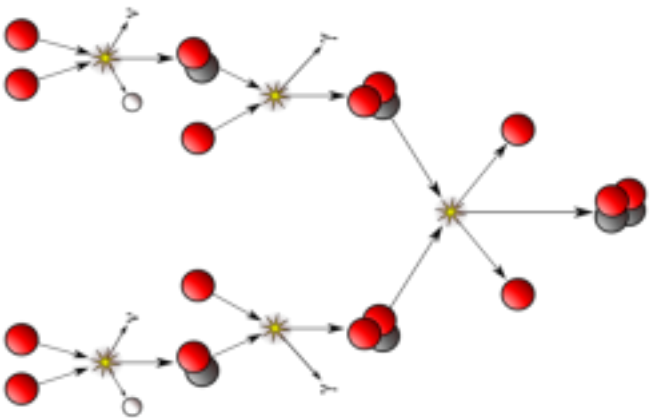
EMPG-HSC2

星質量 - 重元素量関係


銀河系
今回見つけた
EMPG
Shoichiro
Kanako
Yoshihide
- EMPG-SKY
非常に重元素の少ない
銀河(Z=0.022Z⊙)
1.0
0.1
Z/Z⊙
5
6
7
8
9
10
11
12
$\log(M_*/M_\odot)$

恒星内部での元素合成

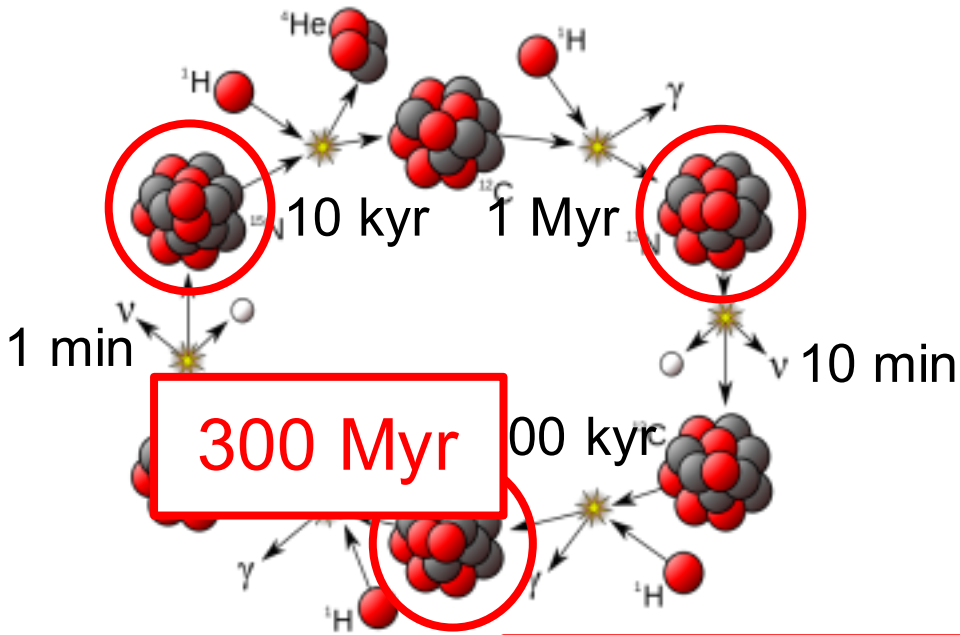
p-p チェイン



https://en.wikipedia.org/wiki/Proton–proton_chain_reaction

陽子のみで反応が進む

CNOサイクル



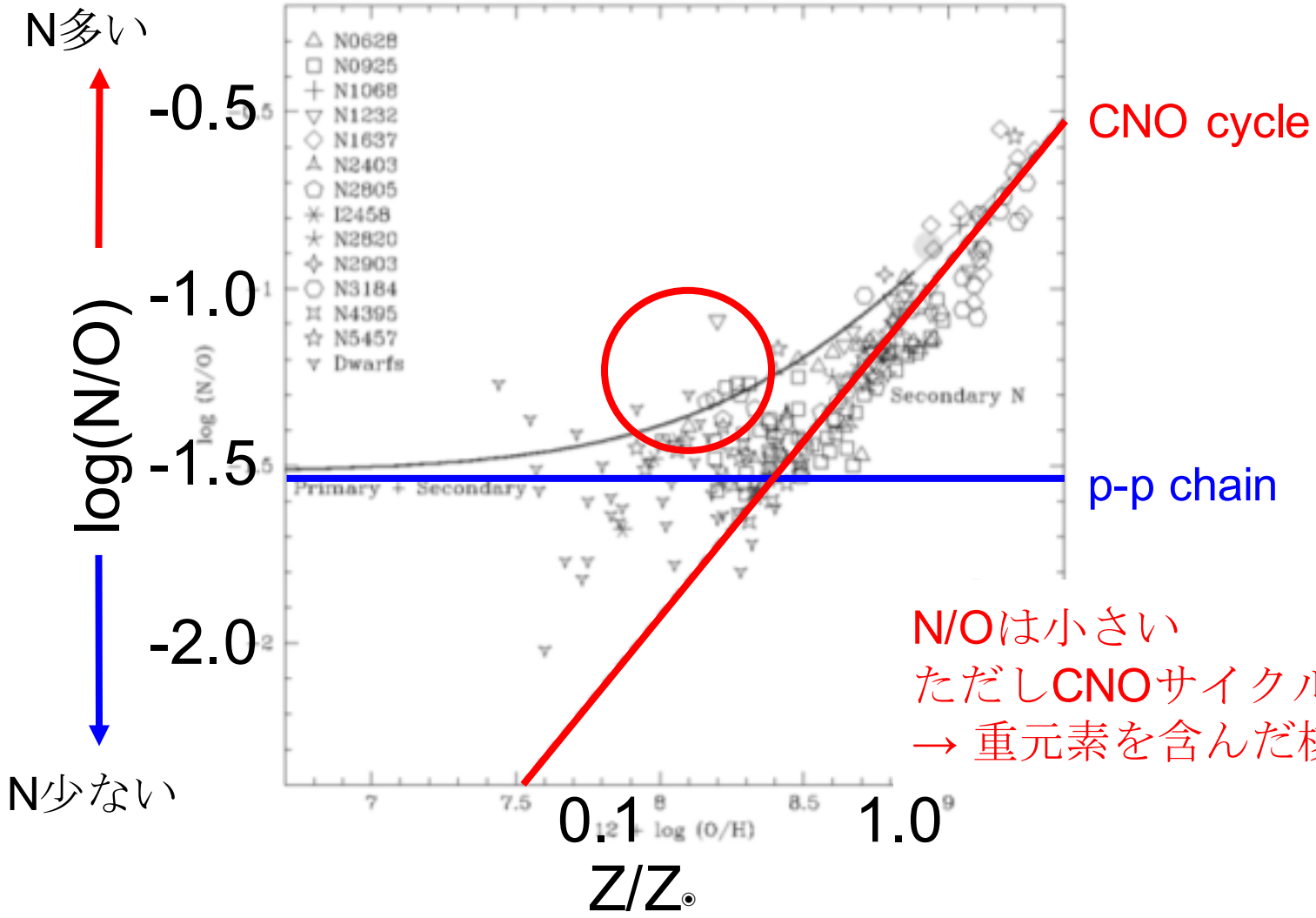
https://en.wikipedia.o

Nが多くなる

重元素が必要

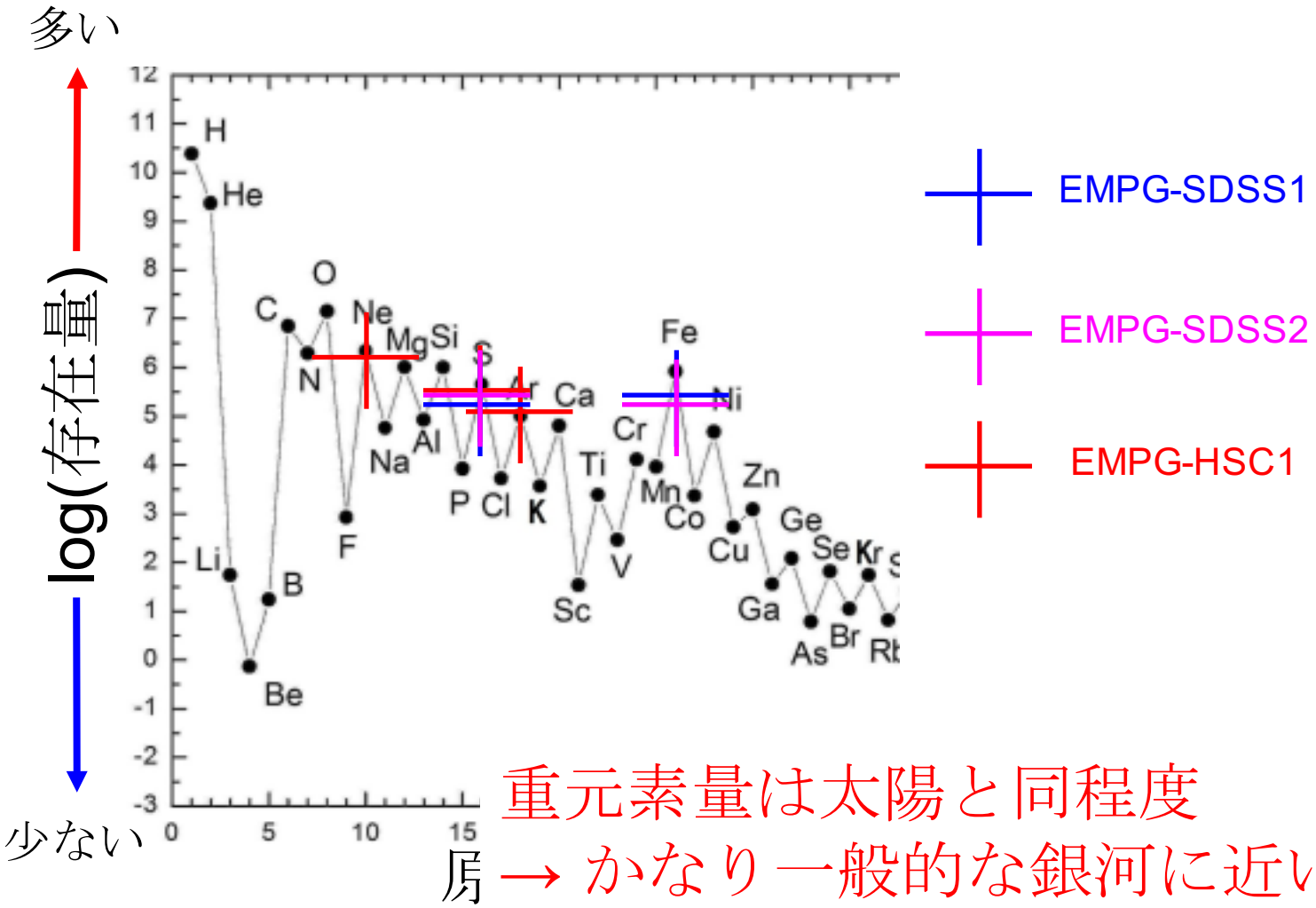
重元素の少ないEMPGはN/Oが小さくなるのでは？

N/Oは小さいのか？



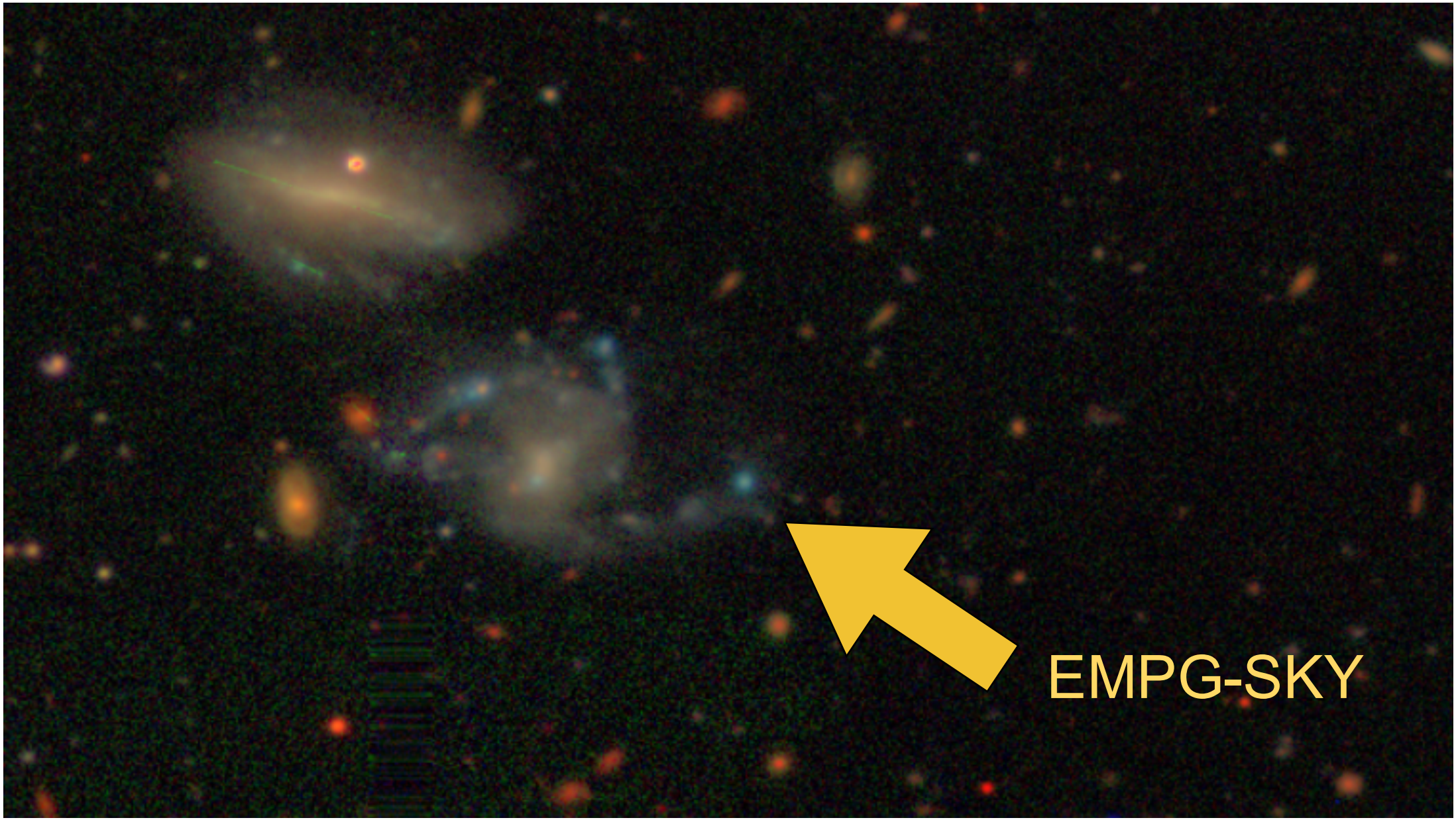
N/Oは小さい
ただしCNOサイクルも必要
→ 重元素を含んだ核融合も

Ne, Ar, S, Feの量



重元素量は太陽と同程度
→ かなり一般的な銀河に近い

結果 2


EMPG-SKY

EMPG-SKYに近い渦巻銀河

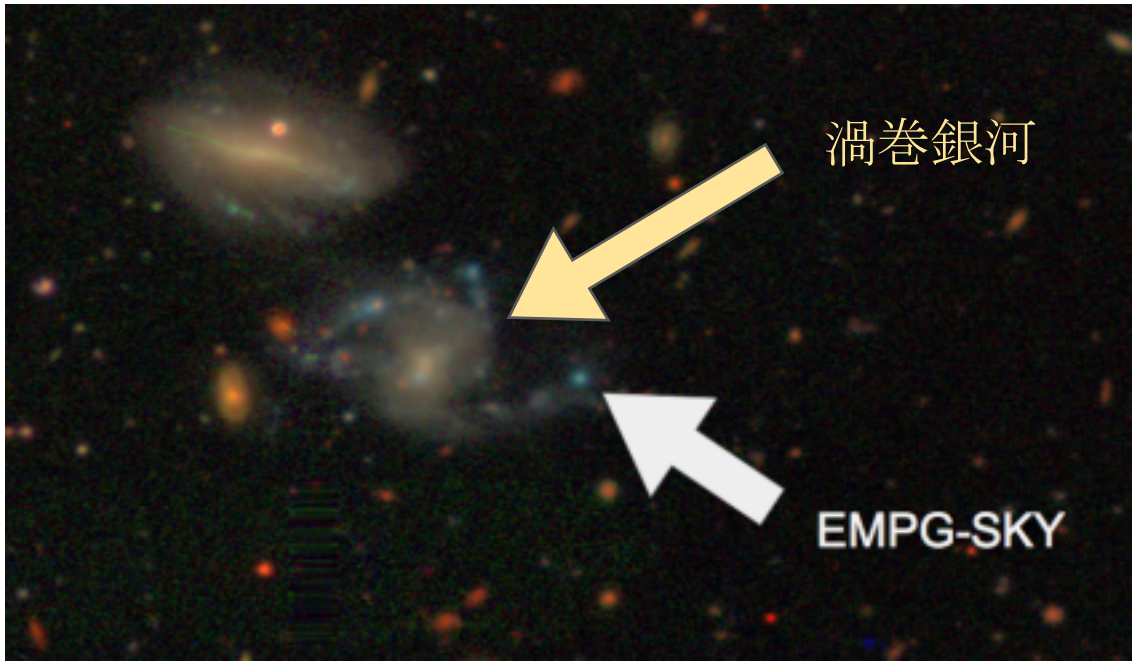
・EMPG-SKYの赤方偏移

z = 0.0324

・渦巻銀河の赤方偏移

z = 0.0310

⇨ ほぼ同じ位置！

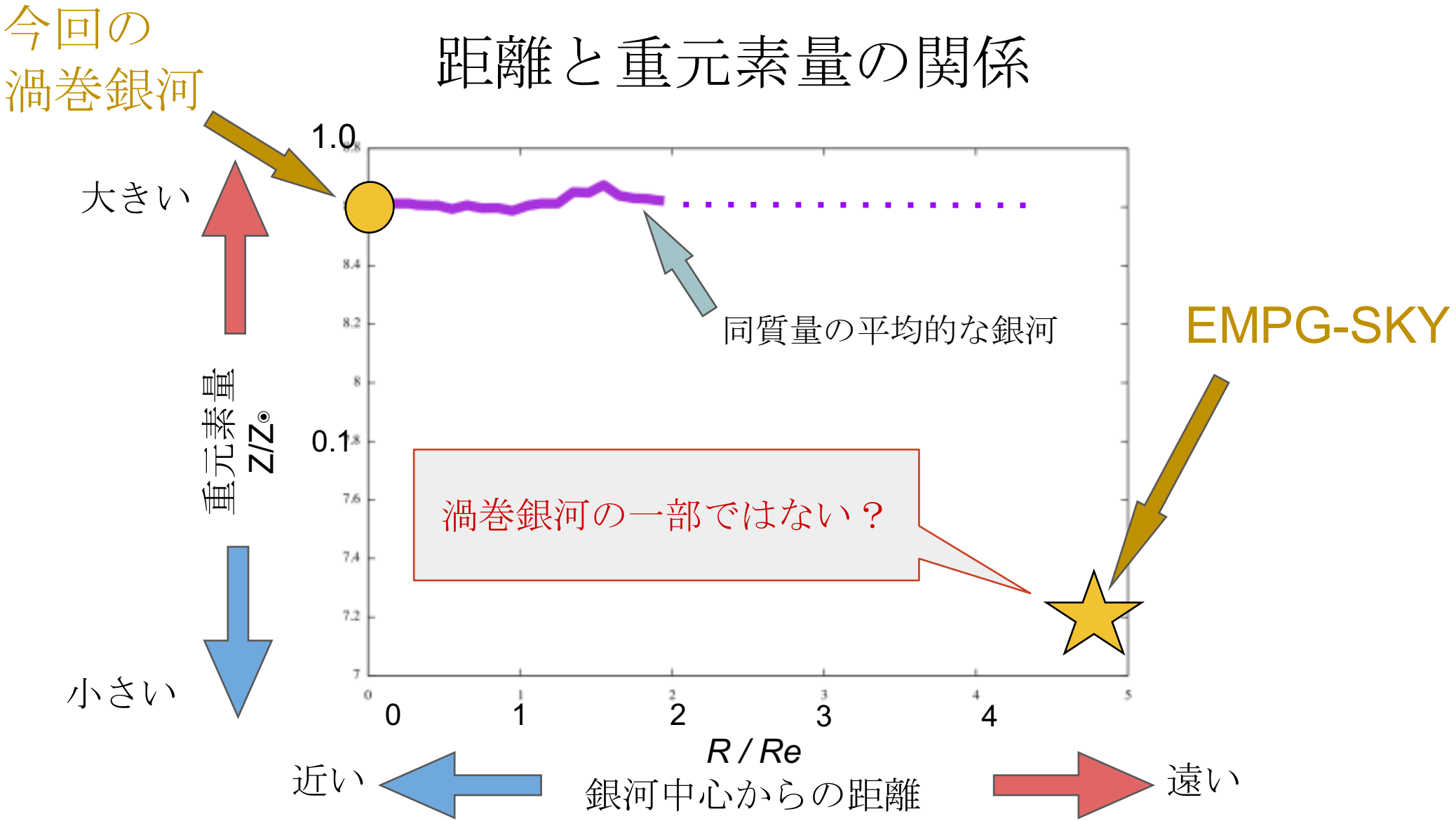


赤方偏移の差

Δz = 0.0014 → 相対速度 420 km/s

⇨ EMPG-SKYが渦巻銀河に近づいている？

距離と重元素量の関係


今回の
渦巻銀河
1.0
大きい
0.1
小さい
重元素量
Z/Z⊙
同質量の平均的な銀河
EMPG-SKY
渦巻銀河の一部ではない？
0
1
2
3
4
R / Re
近い
銀河中心からの距離
遠い

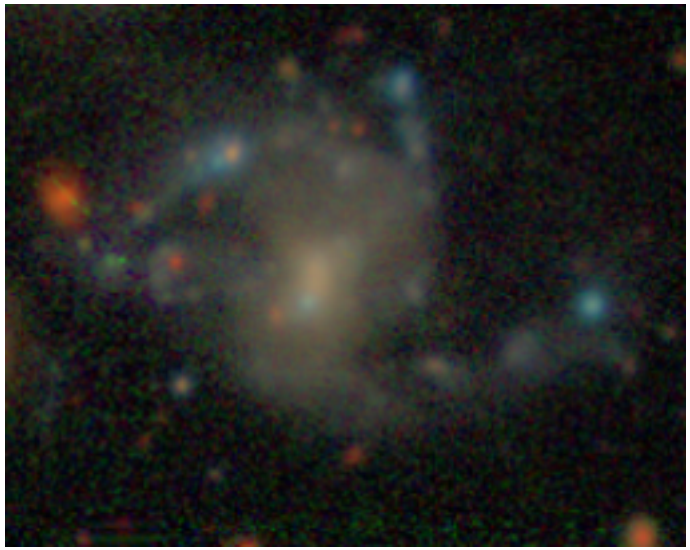
考察

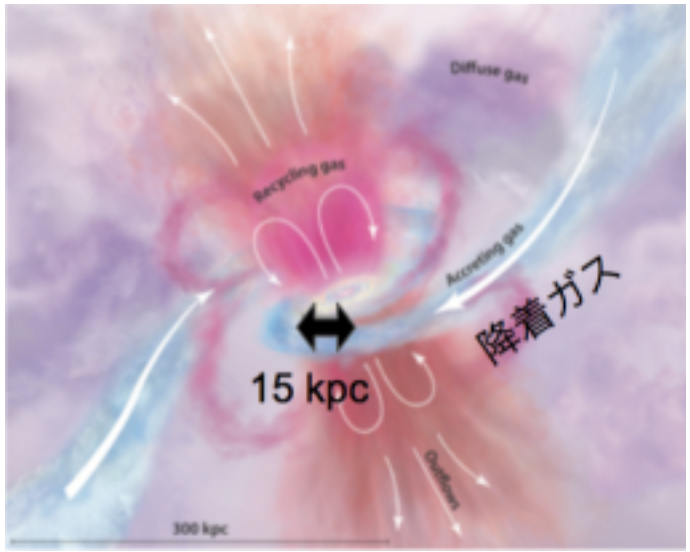
1. 平均的な銀河より低い重元素量
2. 渦巻銀河との速度差：420 km/s
3. 渦巻銀河の一部とは考えにくい

渦巻銀河に落ち込む
銀河間ガスの可能性

これまで実際に観測されたことはなかった

EMPG-SKY + 渦巻銀河
→ 銀河へのガス降着を初めて検出！？





Thumlinson +17

まとめ

□□すばるHSC & SDSSデータ＋深層学習 → 4個のEMPG

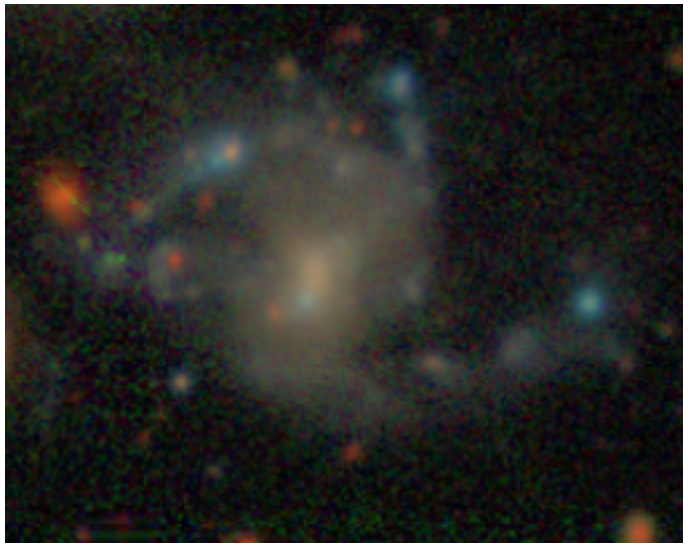
・重元素量(N、Ar、Fe . . .) → 平均的な銀河と同じ

・重元素量が太陽の2.2％の天体を発見（EMPG-SKY）

・EMPG-SKYは渦巻銀河に付随 → Δz = 0.0014

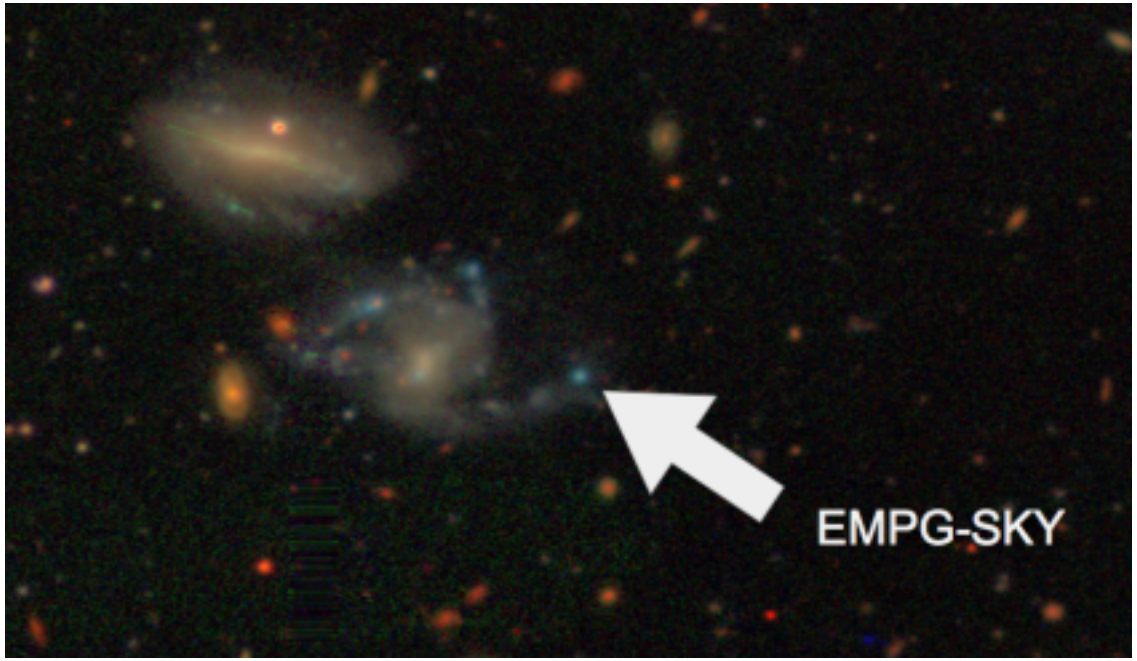
・相対速度(420 km/s) ＋ 距離に対する重元素量変化

→ 渦巻銀河に落ち込む銀河間ガスの可能性



EMPG-SKYの重元素量

太陽の2.2%



EMPGの中でもかなり低い！

距離と重元素量の関係

渦巻銀河中心の重元素量：太陽の55%

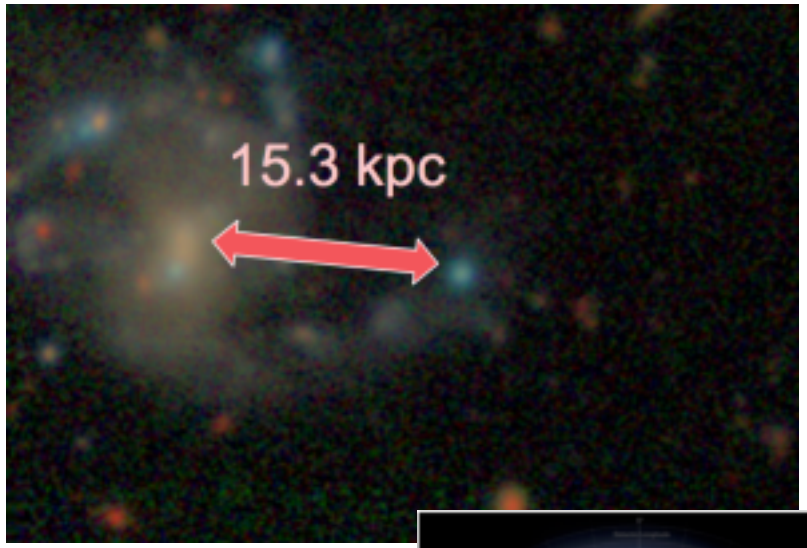
重元素量の低下

EMPG-SKYの重元素量：太陽の2.2%

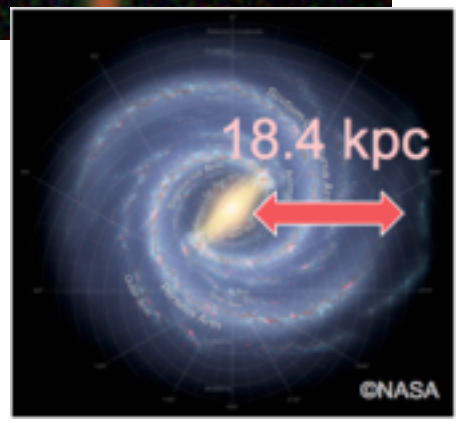
角距離から求まる距離

15.3 kpc

これらの関係は？



銀河系の半径
約18.4 kpc



EMPG-SKYの性質

・が太陽の2.2%

・host galaxy のMetallicity は太陽の55%

・host galaxy 中心からの距離は15.3 [kpc]

・他の銀河と比べて同じ距離で低いMetallicity

・銀河に落ち込む銀河間ガスの可能性

2.データ、解析方法

（以下下書き）

深層学習

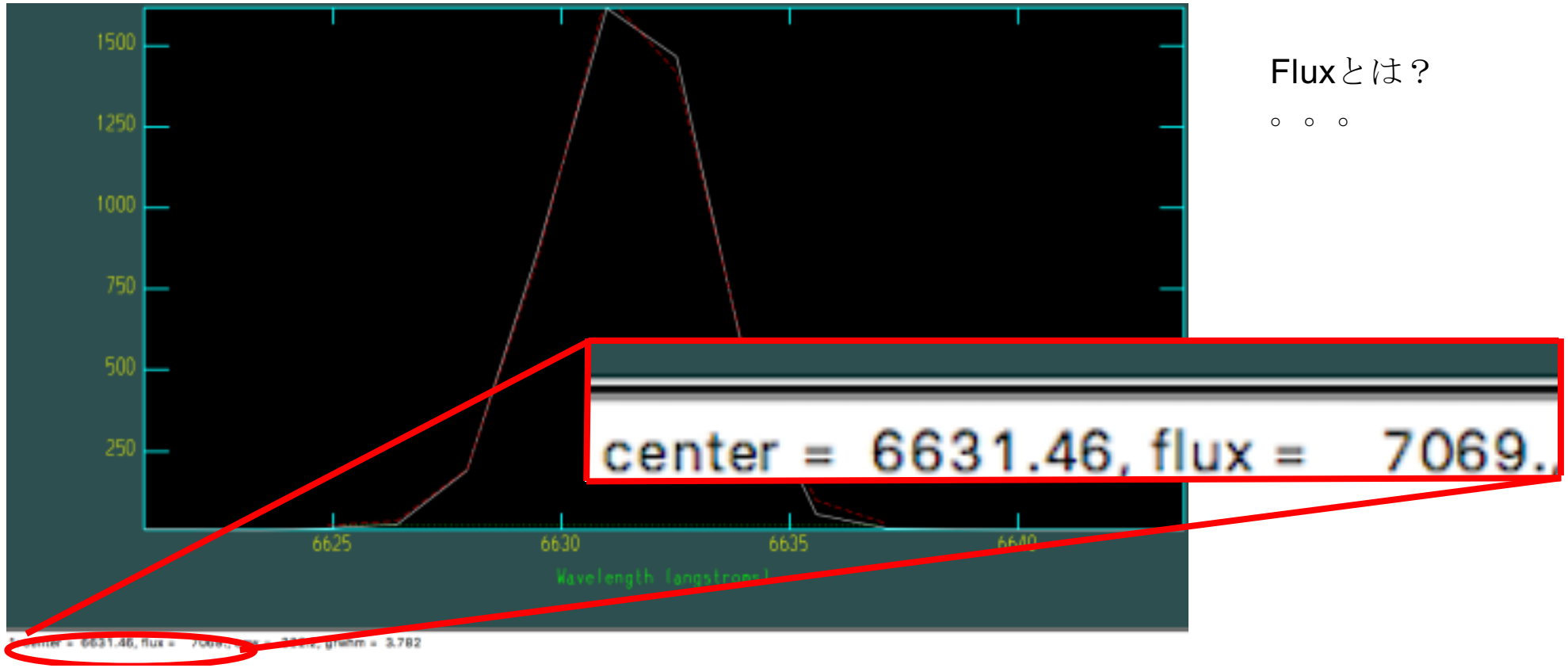
典型的なEMPGのスペクトルと一般的な銀河のスペクトルの比較

データの説明

2018サイエンスキャンプ

どこからデータをとってきたか、データの見方(ugriz, 二色図)、深層学習について(なぜ深層学習なのか、原理)、見つかったEMPGの個数、スペクトルの物理的過程、それぞれの物理量の計算方法(metallicity, flux, Te, steller mass)、metallicityから他の物理量の求め方

Gaussian Fitting、Flux



Fluxとは？

。 。 。

2018 spring school

どこからどのようなデータをもってきたか(HSC, SDSSの比較)、なぜ深層学習か、得られたデータの見方(ugriz,二色図,fitting)、深層学習の原理(自作のグラフ、概念図)、スペクトルの物理的過程、metallicityの求め方、なぜ求めるか、steller mass, Te, fittingをスクリーンショットで示す

（以下下書き）

2019サイエンスキャンプ

EMPGのスペクトル、深層学習とは？（一般論）、今回の研究の深層学習を含む全体像、SDSSから得られたデータの一つの画像を載せて説明、輝線から構成物質が分かるというお話、再結合線の説明（Hβ線を例に）、[OIII]輝線、Fluxからの金属量の推定方法、スペクトルデータのガウシアンフィッティング、電子温度T_e、金属量導出、HSCデータから得られたEMPG

どこからデータをとってきたか、データの見方(ugriz, 二色図)、深層学習について(なぜ深層学習なのか、原理)、見つかったEMPGの個数、スペクトルの物理的過程、それぞれの物理量の計算方法(metallicity, flux, Te, steller mass)、metallicityから他の物理量の求め方

EMPGのスペクトル、深層学習とは？（一般論）、今回の研究の深層学習を含む全体像、SDSSから得られたデータの一つの画像を載せて説明、輝線から構成物質が分かるというお話、再結合線の説明（Hβ線を例に）、[OIII]輝線、Fluxからの金属量の推定方法、スペクトルデータのガウシアンフィッティング、電子温度T_e、金属量導出、HSCデータから得られたEMPG

研究フローチャート

天体選択

- 深層学習の分類器作り
- EMPGの候補天体選択

→

解析

- 赤方偏移
- 電子温度
- 重元素量

他の重元素量について

Ne, Ar, S

→ 重力崩壊型超新星爆発で生成

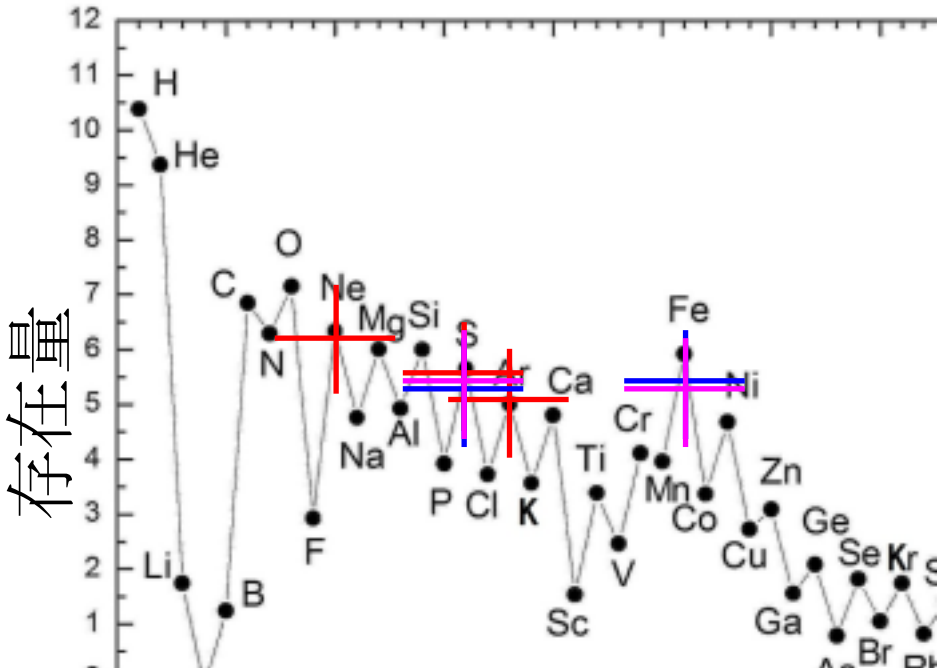
1 Myr

Fe

→ Ia型超新星爆発で生成

1 Gyr

→ 銀河が誕生してから経過した時間の指標



重元素量は太陽とあまり
変わらなかった
→ かなり一般的な銀河に近い