

初期銀河の観測的研究：

——中間質量ブラックホールが存在する兆候の発見——

筒泉佳子 堀江紘己 荻野恭輔 安田彩乃 渡辺くりあ 波多野駿

イントロダクション(筒泉)



出典 : https://youtu.be/v-g_UdY94Ds

初期宇宙の観測

・初期銀河どうやって作られた？

わずかなDark Matter (DM)の密度揺らぎがDMハローを作る

→DMハローが集まって成長する

→そこにバリオンが集まる

→星や銀河が作られる



出典: https://youtu.be/v-g_UdY94Ds

[DM分布の進化に注目して作られたシミュレーション映像]

元素合成について

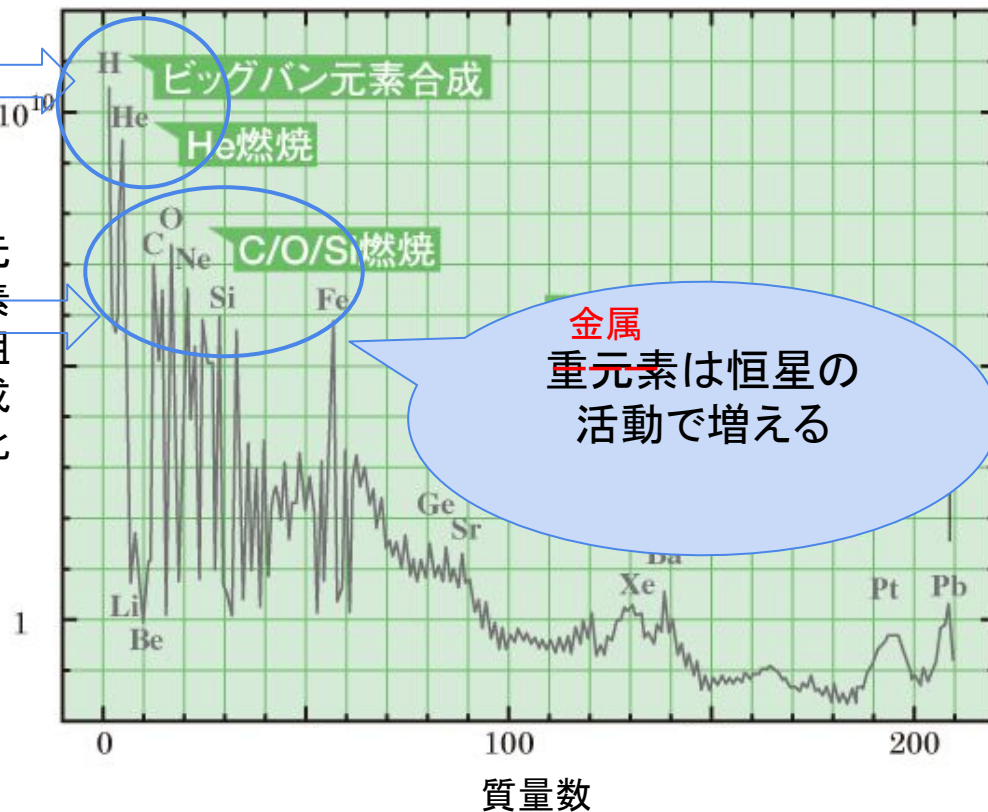
・H He Li...etc(軽元素)

→多い

・O N...etc(~~重元素~~^{金属})

→少ない

元素組成比



近傍で似たような銀河を探そう！

極金属欠乏銀河 Extremely Metal Poor Galaxy (EMPG)

- ・太陽の金属量の10%以下

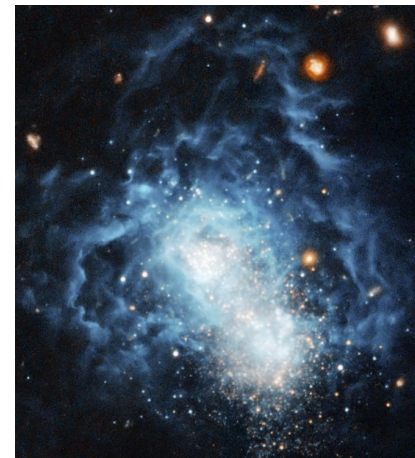
10%以下はまだあまり調べられていない

定義: 金属量→太陽の金属量の何倍か

- ・若くて青い

若い→大質量星が多い→表面温度が高い→黒体放射の中心波長が短い

→青い



有名なEMPG

出典:[HST/NASA/ESA]

EMPGを探そう

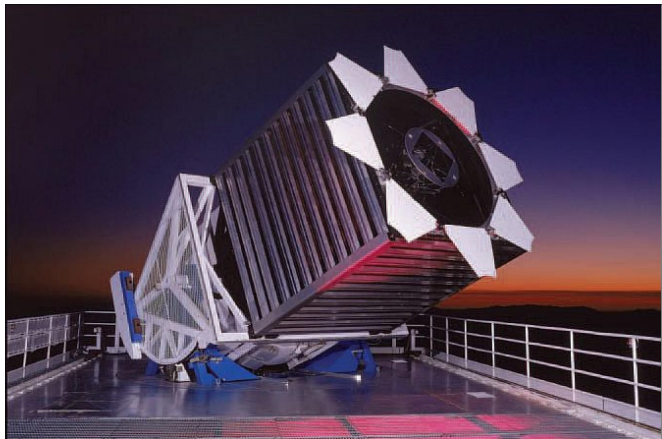
データと解析(機械学習パート)

堀江

データ

Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

- 探索範囲が広い(全天の25%)
- 探索限界が浅い(限界等級:21等級)



<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/sdss>

SDSSでは**90万天体**、HSCでは**4000万天体**が観測された
ここからEMPGを探したい

すばる Hyper Suprime-Cam (HSC)

- 探索範囲が狭い(全天の3%以下)
- 探索限界が深い(限界等級:26等級)



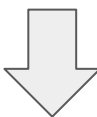
https://www.naoj.org/Projects/HSC/j_HSCProject.html

EMPGの特徴

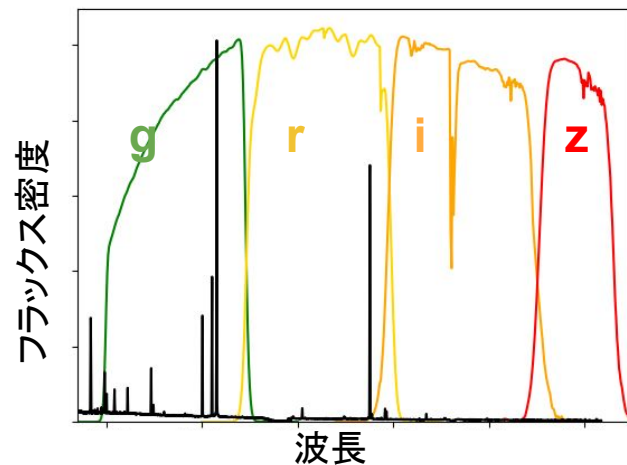
gバンドとrバンドが明るい



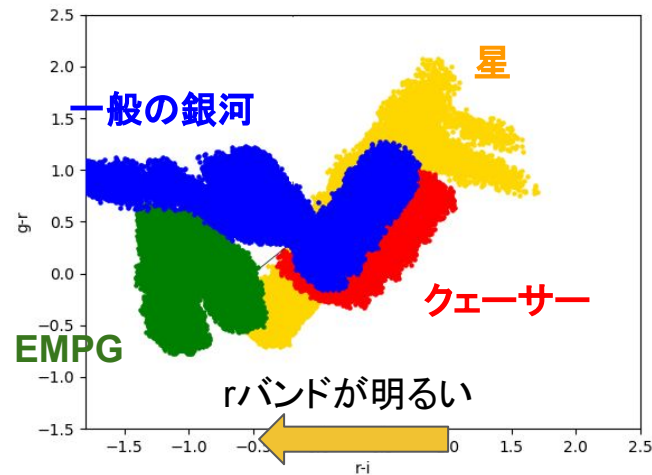
しかしこの情報からだけでは判断できない



機械学習を使う

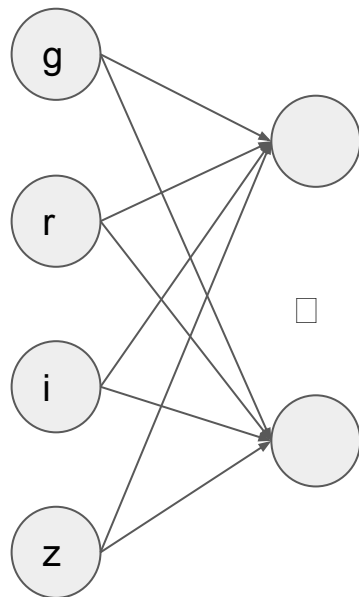


gバンドが明るい

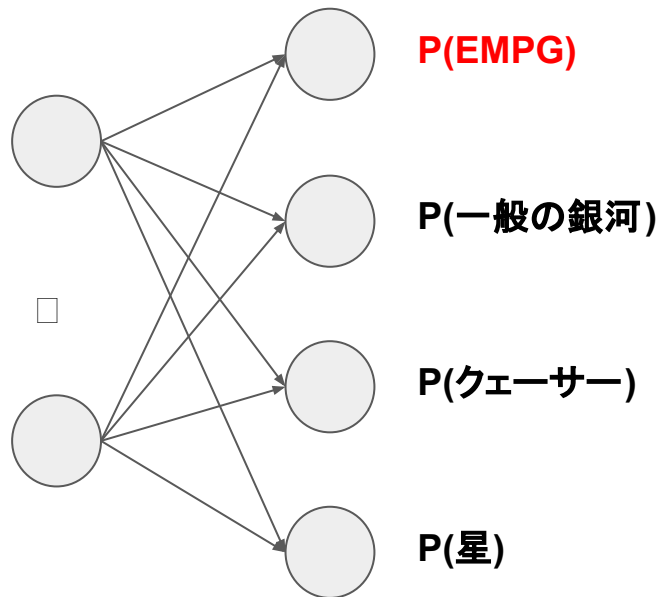


機械学習

入力層



出力層



畳込みニューラルネットワーク

機械学習の結果

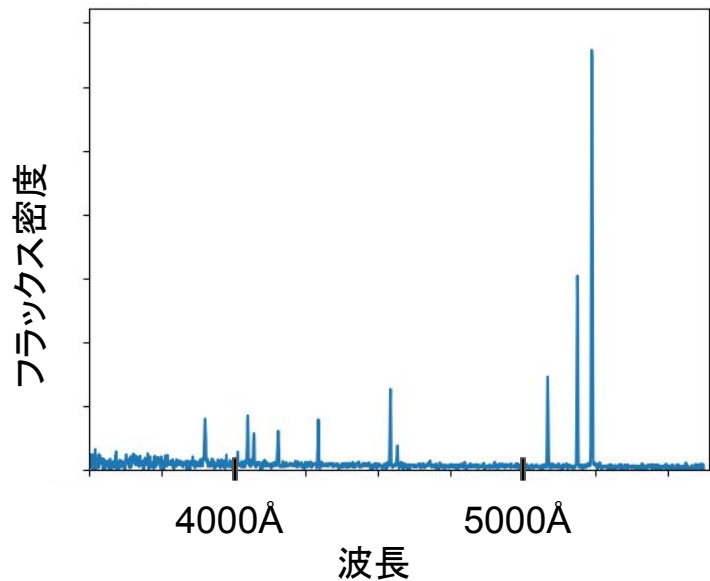
候補天体が16(SDSS) + 9(HSC) 個選ばれた

この中でどの天体がEMPGの定義
(太陽の金属量の0.1倍以下の銀河)
に合致するのはどれか？



ID: 1237661357541163066

金属量推定



1. N2法
2. R23法
3. 直接電子温度法

金属量

**EMPG候補天体から
EMPGを選び出す**

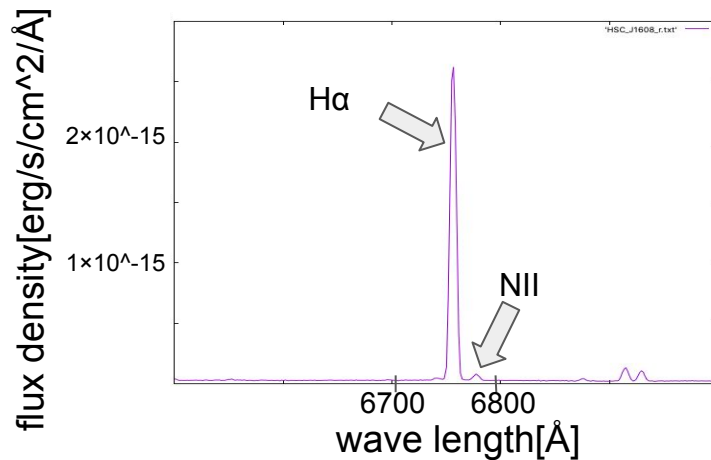
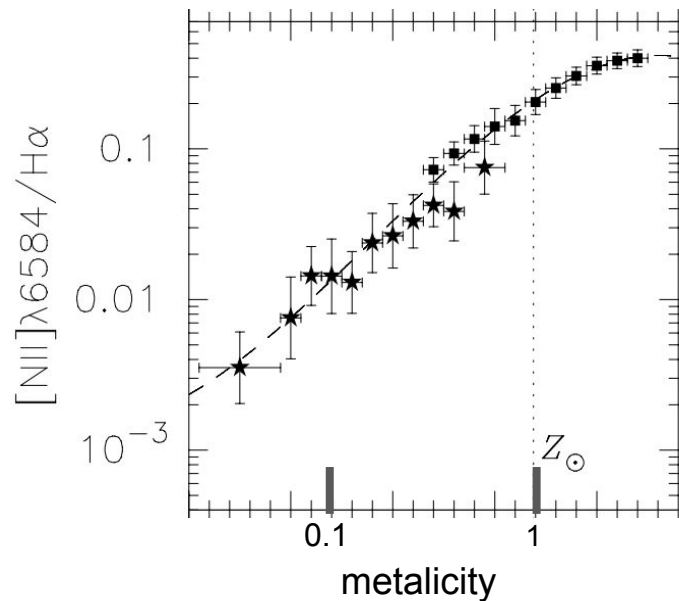
データと解析(金属量パート)

荻野

N2法

NII($\lambda 6583\text{\AA}$)とH α 輝線を用いて金属量を推定できる最も簡便な経験則

$$\log f_{NII}/f_{H\alpha} = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$



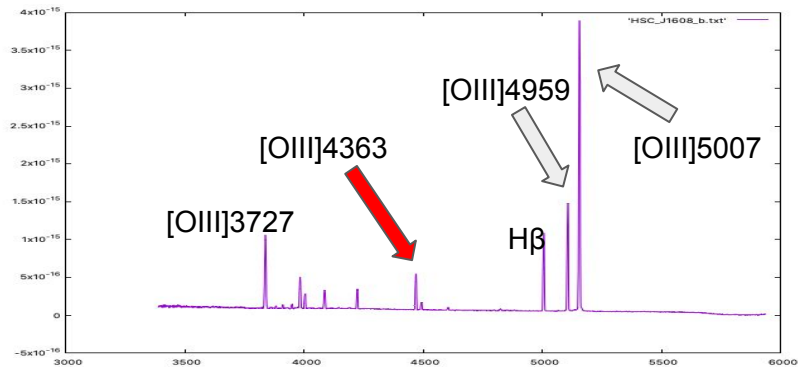
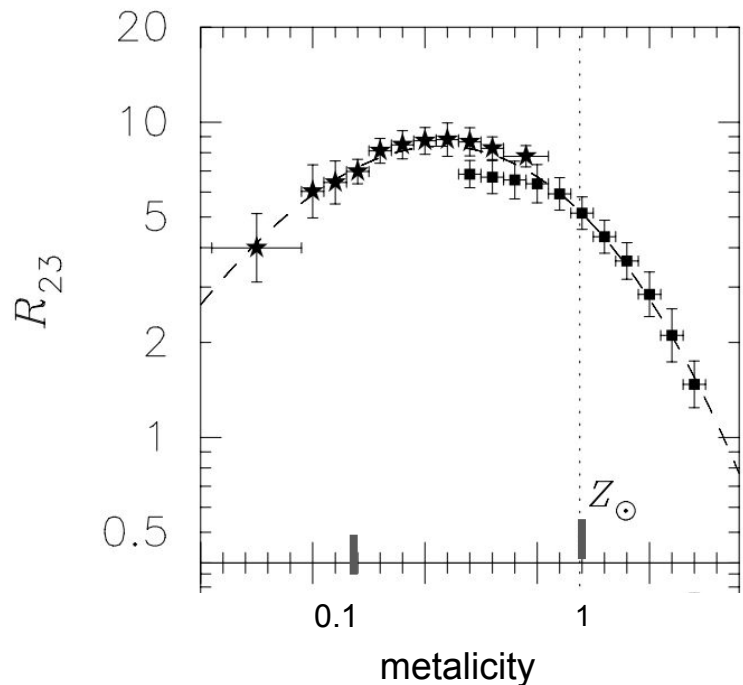
NII輝線が弱い天体に関して金属量が推定できないという問題点あり

R23法

NIIの代わりに指標としてR23を求めて金属量を出することができる

$$R_{23} = \frac{F([OII]\lambda 3727) + F([OIII]\lambda 4959) + F([OIII]\lambda 5007)}{F(H\beta\lambda 4861)}$$

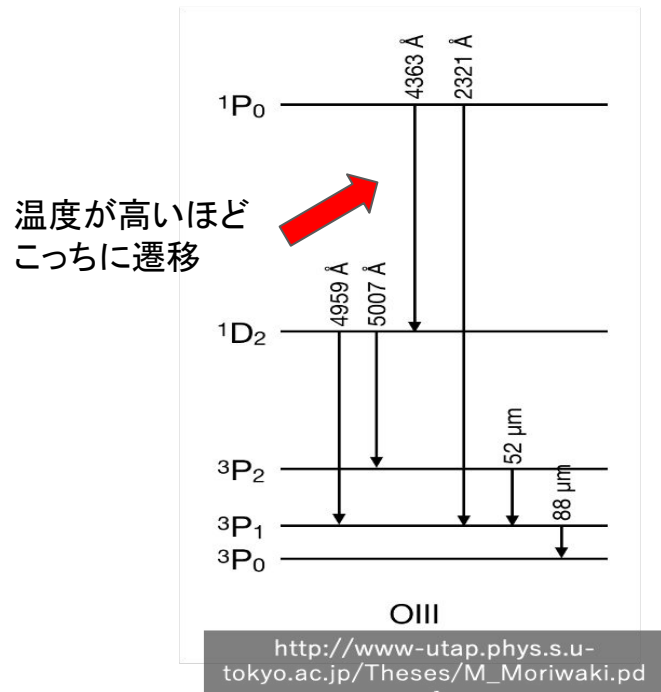
用いる輝線はN2法のに比べて低波長域で、今回得られたスペクトルではいずれもはっきりと観測されていた



ただし経験則

直接電子温度法

OIIIの各輝線の比率から電子温度を求め、それを元に金属量を求める物理的手法



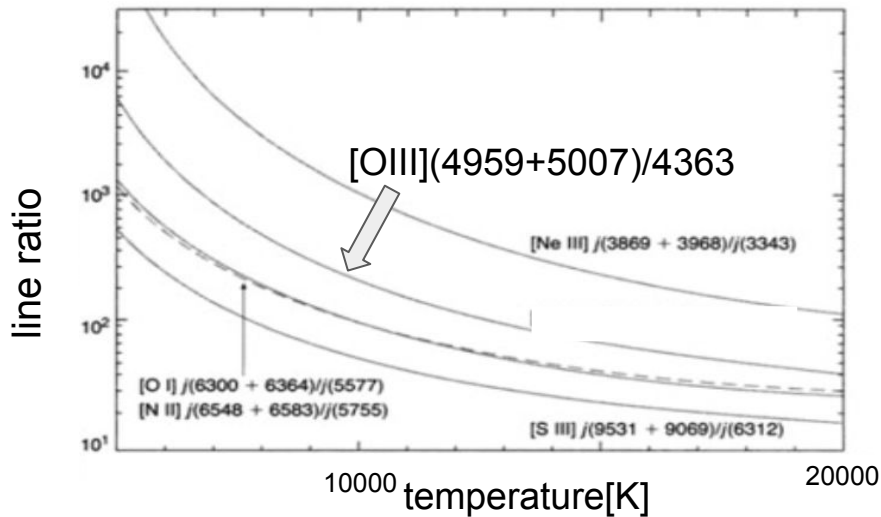
$$\frac{f_{[OIII]4959} + f_{[OIII]5007}}{f_{[OIII]4363}} = \frac{7.90 \exp(3.29 \times 10^4 / T_e)}{1 + 4.5 \times 10^{-4} n_e / T_e^{1/2}}$$

物理的な現象に基づいていて正確である！

(先ほどの二つの手法は直接電子温度法を元にした経験則)

直接電子温度法

電子温度とフラックスの関係



Lyman-alpha as an Astrophysical and Cosmological Tool: Fig 3.30

O⁺とO²⁺の電子温度をそれぞれ規格化したT2,T3を用いて

グラフよりλ4363Åの輝線の割合が大きくなるに従って電子温度は大きくなる

得られた電子温度(今回の場合は25000K付近)から金属量を求めることができる

$$* \quad \frac{O}{H} = \frac{O^+}{H^+} + \frac{O^{2+}}{H^+} \text{ として計算}$$

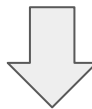
$$\frac{O^+}{H^+} = \frac{[OII]\lambda 3727}{H\beta} + T2 \text{ の補正項}$$

$$\frac{O^{2+}}{H^+} = \frac{[OIII]\lambda 4959 + 5007}{H\beta} + T3 \text{ の補正項}$$

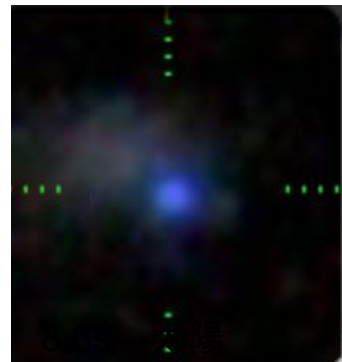
選択されたEMPGの一覧

EMPG	金属量($Z_{\odot}$)
HSC_J0156	0.058
HSC_J0232	0.038
HSC_J0210	0.032
HSC_J2236	0.035
HSC_J1608	0.076
HSC_J1631	0.029
HSC_J0159	0.043
SDSS_9843	0.046(N2で求めている)

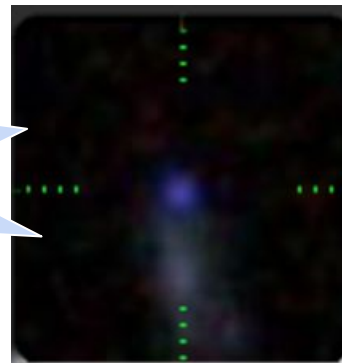
金属量は太陽金属量の3~8%



これらの天体はどれも太陽金属量の10%以下！！



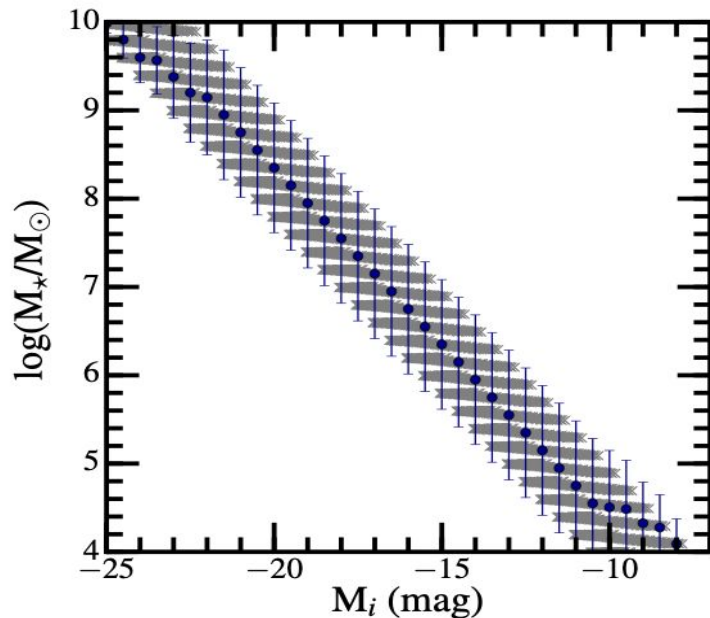
J1608



J0232

結果1(安田)

星質量の推定



小島 et al.

⇒ 星の質量 $\propto$ 星の明るさ

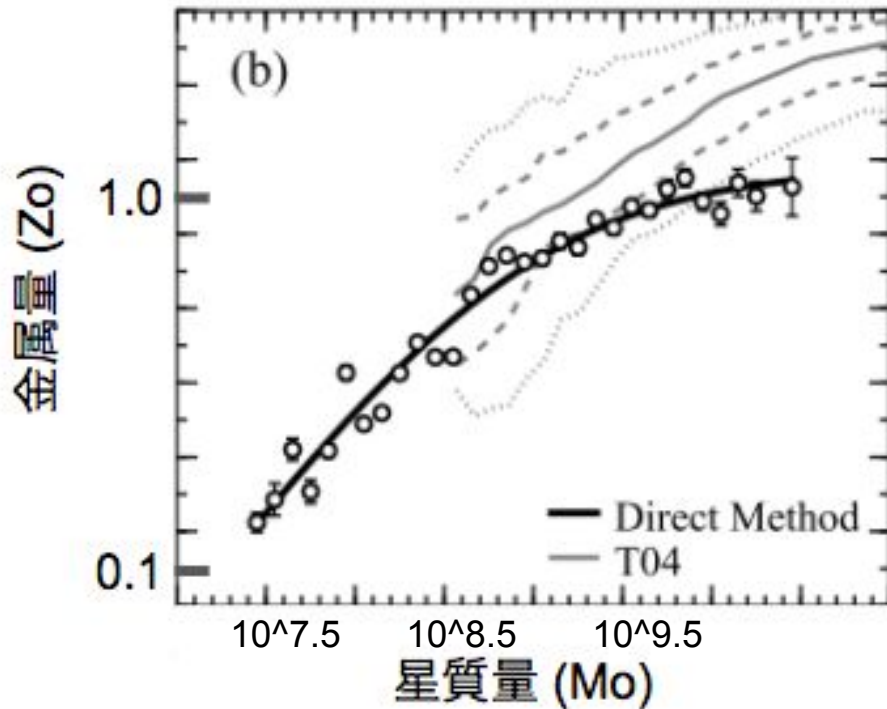
i-band絶対等級から
星質量を左のように見積もること
ができる

星質量-金属量関係

これまでの研究では
金属量 $0.1Z_{\odot}$
星質量 $10^{7.5} \text{ Mo}$ まで

今回検出した天体ではどうなるか？

BRETT H. ANDREWS¹ & PAUL MARTINI¹, 2013



星質量-金屬量關係

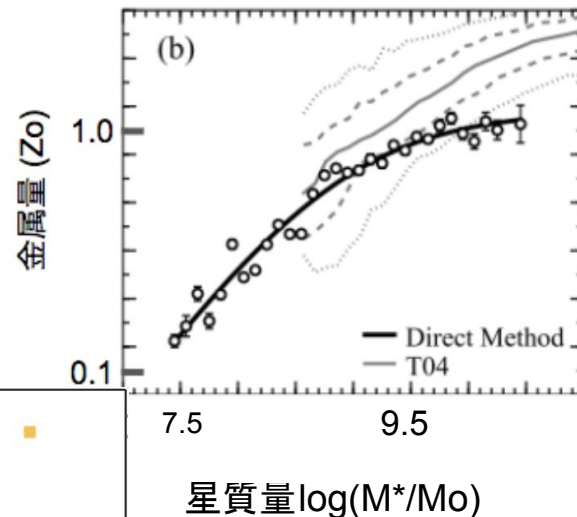
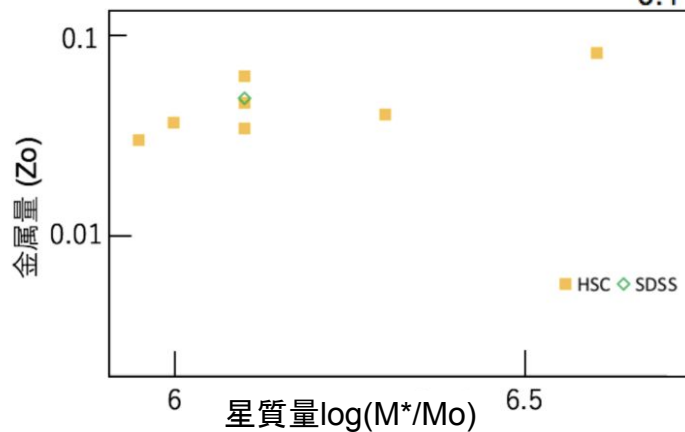
BRETT H. ANDREWS¹ & PAUL MARTINI¹, 2013

金屬量 1/10

0.1~1 $Z_{\odot}$



0.01~0.1 $Z_{\odot}$



$10^6 M_{\odot}$

星質量 1/10

$10^7 M_{\odot}$



紆余曲折、、、

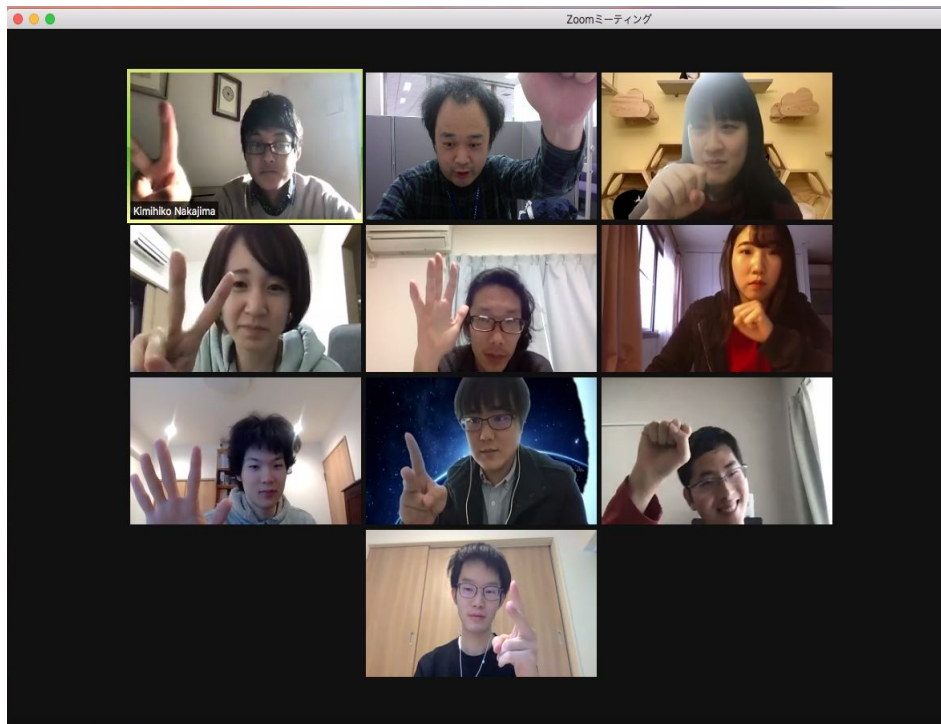
EMPGが見つかった！



EMPGの性質は？

金属量を求める他にも
様々な輝線の特徴や、
そこから求めることができる物理量に
ついて調べた

グループで議論中



紆余曲折1 R23と[O III]、[O II]輝線を使ってみた！

電離パラメータ

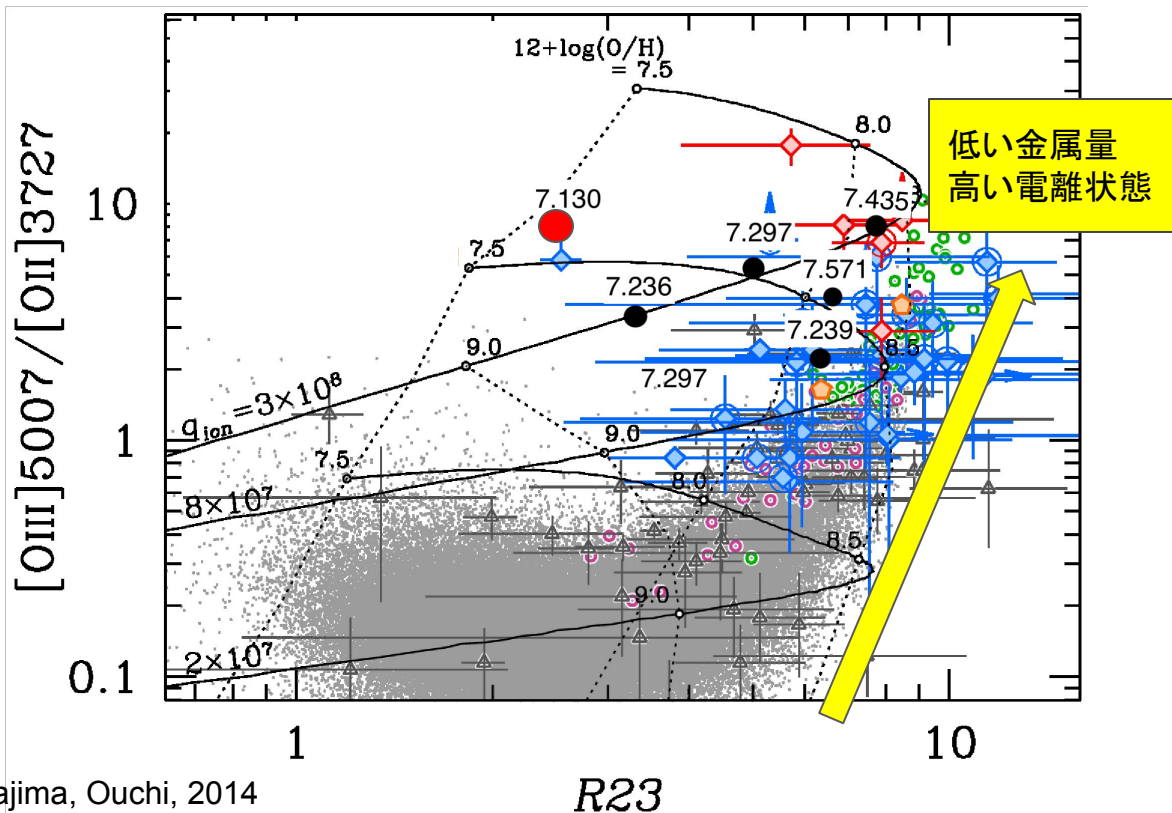
H II 領域の電離状態を表す量(難)

普通の銀河よりも離れた位置にプロットされた天体あり(7.13)



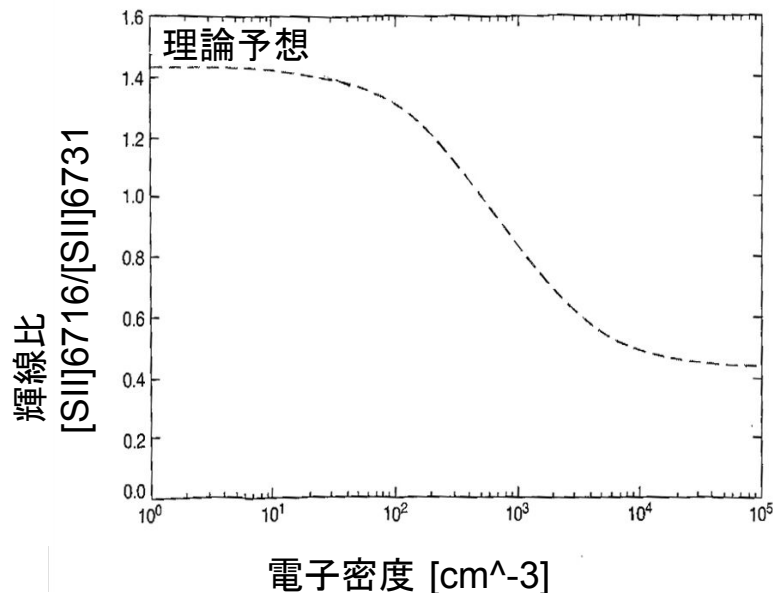
電離状態が興味深い

(金属量が低い割に電離パラメータがそれほど高くない)



紆余曲折2 [S II]輝線を使ってみた！

[SII]の $\lambda 6716\text{\AA}$ と $\lambda 6731\text{\AA}$ のフラックス比から電子密度を求めることができる
(直接電子温度法で金属量を求める計算にも必要)



電子密度: $100 \sim 300 \text{ cm}^{-3}$

これは他の銀河と比べても標準的な値

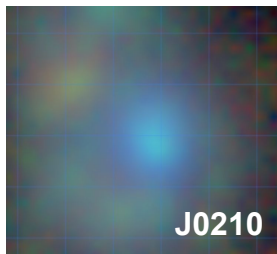
→ 電子密度は目立った特徴なし

Osterbrock & Ferland, 2005

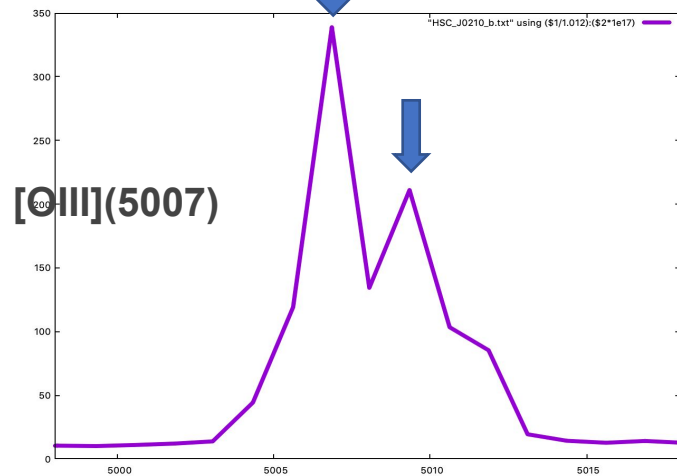
紆余曲折3

特徴的な天体の発見

輝線が分裂している天体を発見！



天体のスペクトルデータ

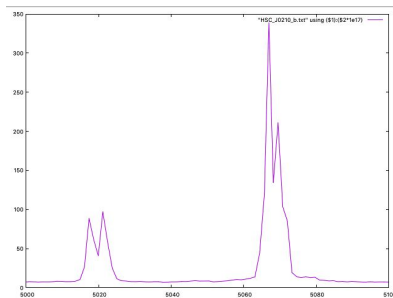


[OIII](5007) 輝線や他の弱い輝線が分裂している天体を発見

→天体が回転していると考えられる

→この天体の中央に **BH** が存在するかもしれない

ハタノ氏



BHは小さいため、回転によって遠のく輝線と近く輝線が一つの太い輝線となって見えるはず

→ **ブラックホール**ではない

→ J0210には見つからなかったけど、
他のEMPGではどうだろうか？

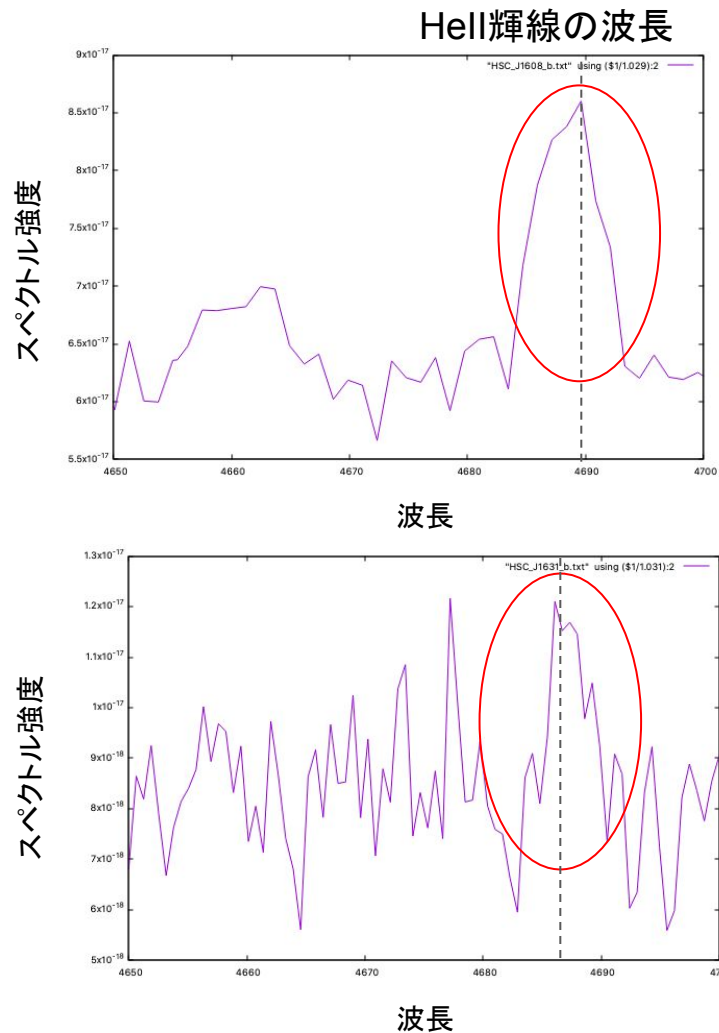
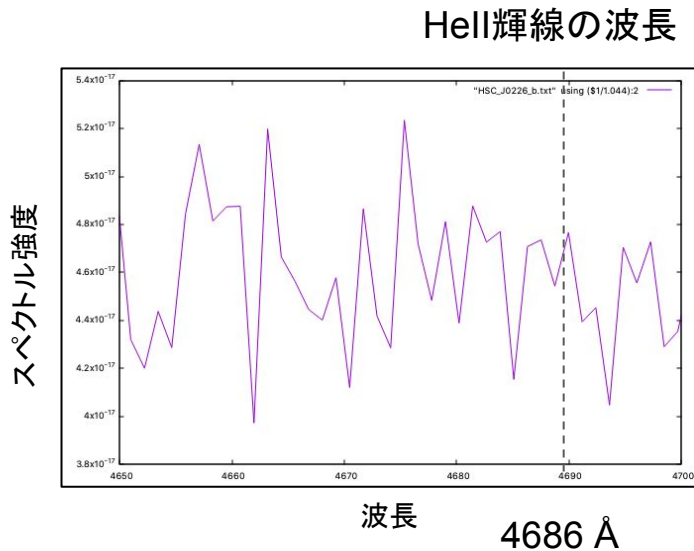
結果 2 (渡辺)

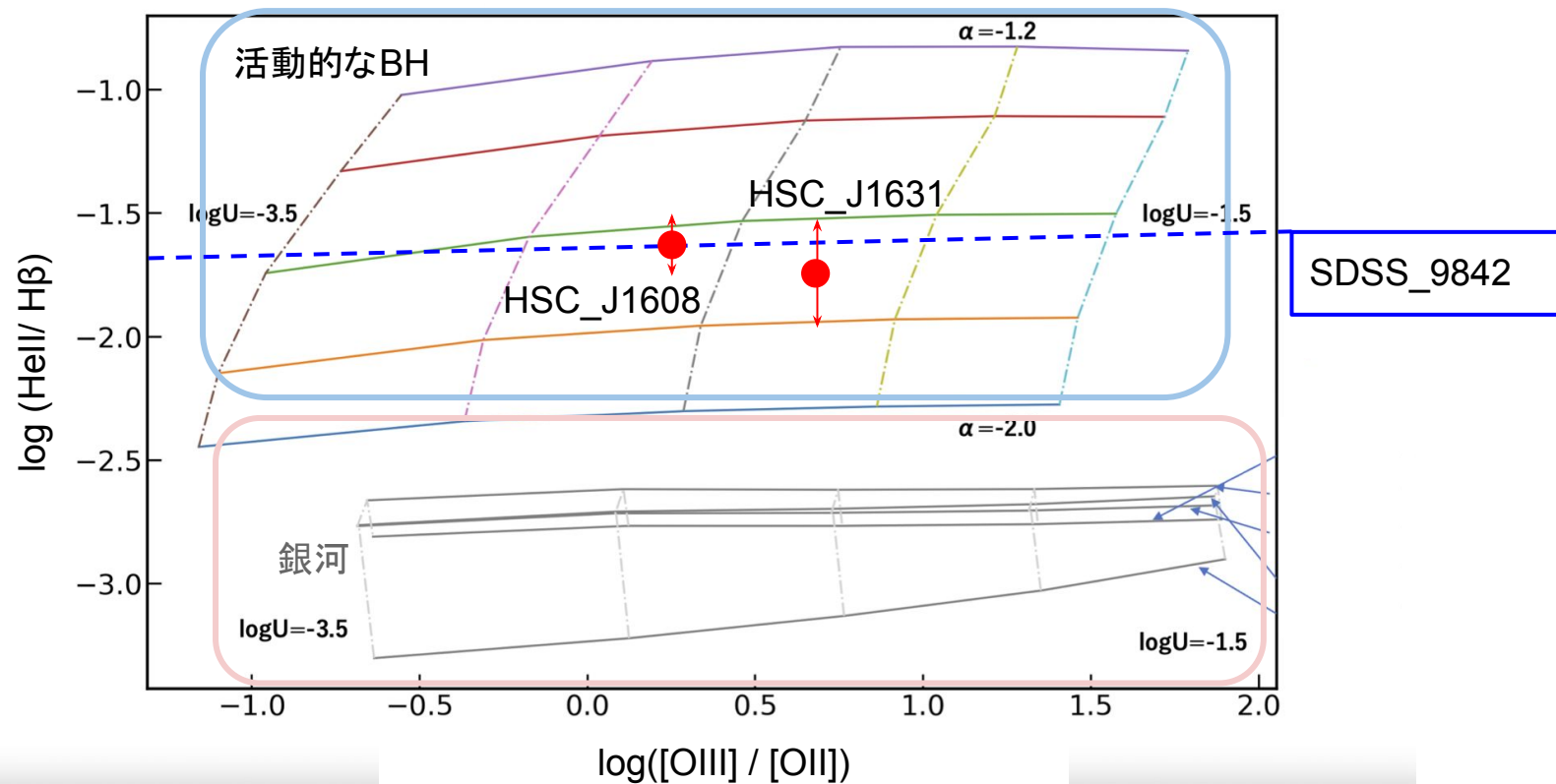
HeII輝線

イオン化エネルギー

[O III]...35.1 eV

HeII...54.12 eV





恒星だけではない→ブラックホール？

Umeda et al.

BHがあるはず



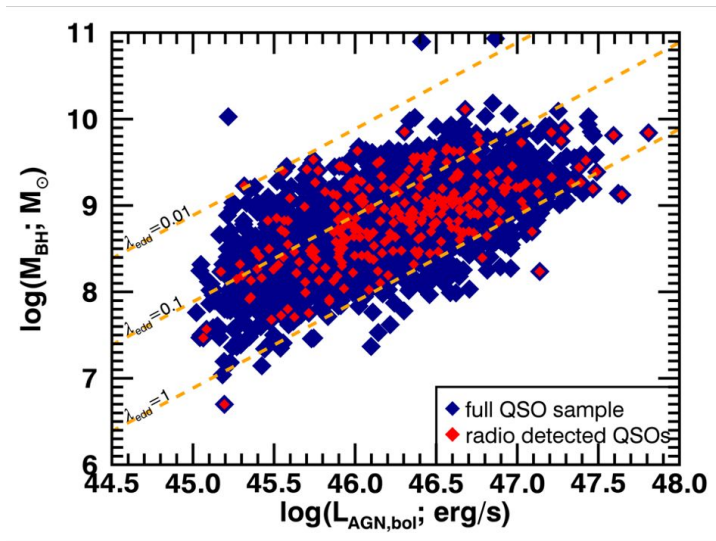
BH質量がX線光度と正の相関



Rosat(X線観測衛星)ではBH候補はX線が非検出



X線観測限界からBH質量の上限值



F. Stanley et al. 2017

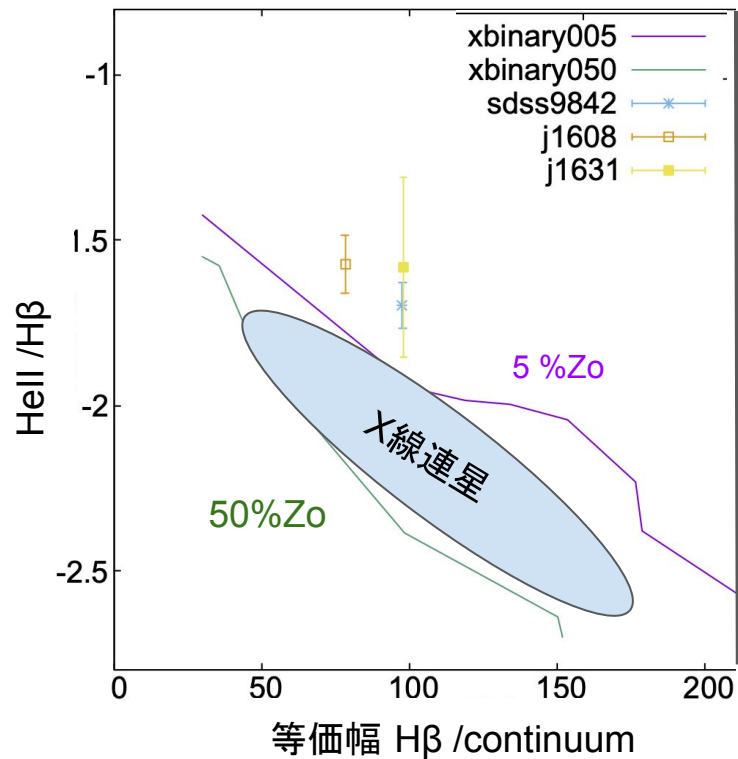
$$\text{HSC_J1608} < 5.5 \times 10^6 M_{\odot}$$

$$\text{HSC_J1631} < 6.31 \times 10^6 M_{\odot}$$

$$\text{SDSS_9842} < 4.83 \times 10^5 M_{\odot}$$

典型的な超大質量ブラックホール(10^7 - $10^{10} M_{\odot}$)ではなさそう

X線連星...恒星+恒星ブラックホール
高エネルギーの光子→HeII輝線



HeIIの輝線はX線連星によるもの？

輝線の強さと等価幅についてX線連星と比較

予想される線より上にある 2σ で棄却 (J1608, sdss9842)

X線連星(恒星ブラックホール)で
はなさそう

ブラックホールがあるとして、BH質量を計算すると...

Single Epoch Spectra $H\beta$ 輝線の線幅と明るさから質量を計算



$$\log M_{\text{BH}}(H\beta) = \log \left[\left(\frac{\text{FWHM}(H\beta)}{1000 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{L(H\beta)}{10^{42} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{0.63} \right] + (6.67 \pm 0.03). \quad (6)$$

Marianne Vestergaard and Bradley M. Peterson 2006

HSC_J1608 ... 9830 $M_{\odot}$

HSC_J1631 ... 1100 $M_{\odot}$

SDSS_9842 ... 528 $M_{\odot}$

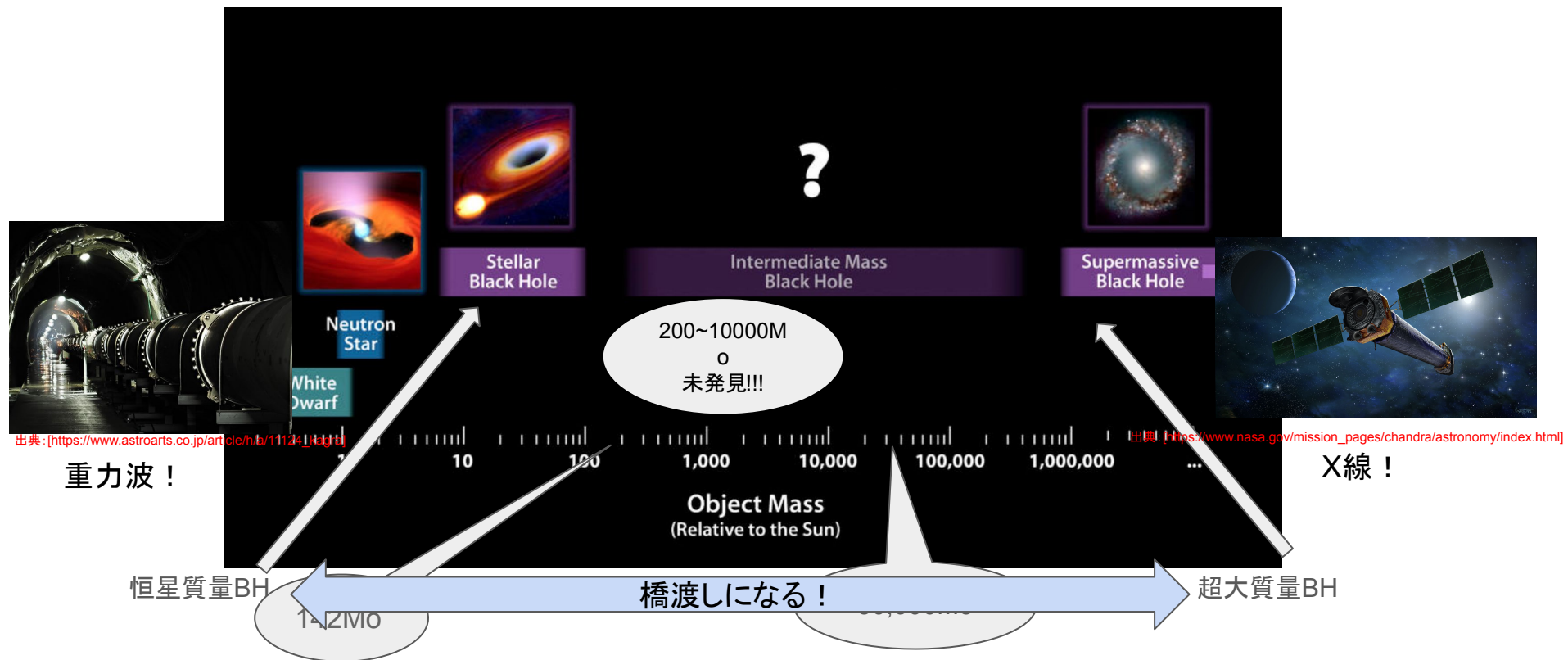
→画像

中間質量ブラックホール!?
(530-9800 $M_{\odot}$ 程度)

超大質量ブラックホール: 100万-10億 $M_{\odot}$
恒星ブラックホール: $< \sim 10 M_{\odot}$

ブラックホール研究の背景(筒泉)

中間質量ブラックホールが見つかったと何が嬉しい？



考察とまとめ(波多野)

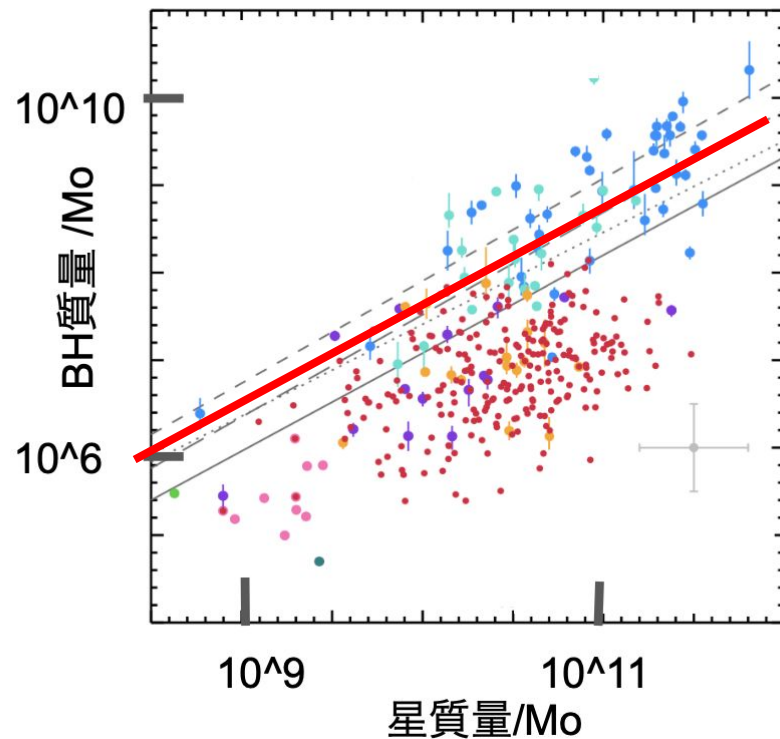
マゴリアン関係

既知の天体をプロット

直線上にのる

→銀河とBHが共に進化している

(銀河の星質量):(超大質量ブラックホールの質量)
=1000:1



Reines & Volonteri 2015

The Astrophysical Journal, 813:82 (13pp), 2015 November 10

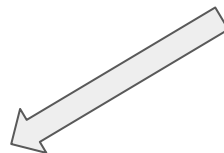
マゴリアン関係

既知の天体をプロット

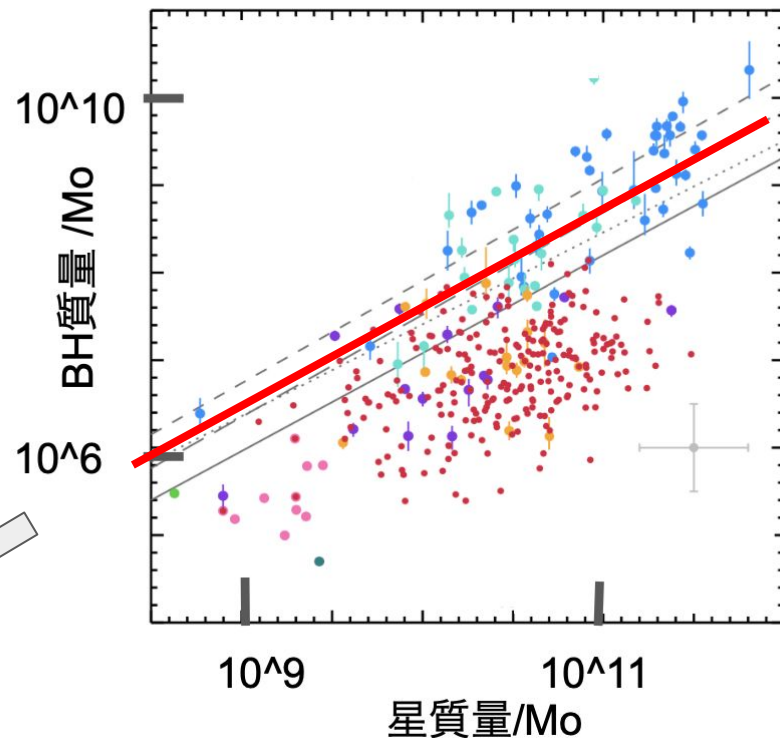
直線上にのる

→銀河とBHが共に進化している

(銀河の星質量):(超大質量ブラックホールの質量)
=1000:1



低い質量でも成り立つ？
今回の天体で検証



Reines & Volonteri 2015

The Astrophysical Journal, 813:82 (13pp), 2015 November 10

銀河と星の共進化: マゴリアン関係

10^6

10^7

10^{10}

BH質量 / $M_{\odot}$

10^6

10^9

10^{11}

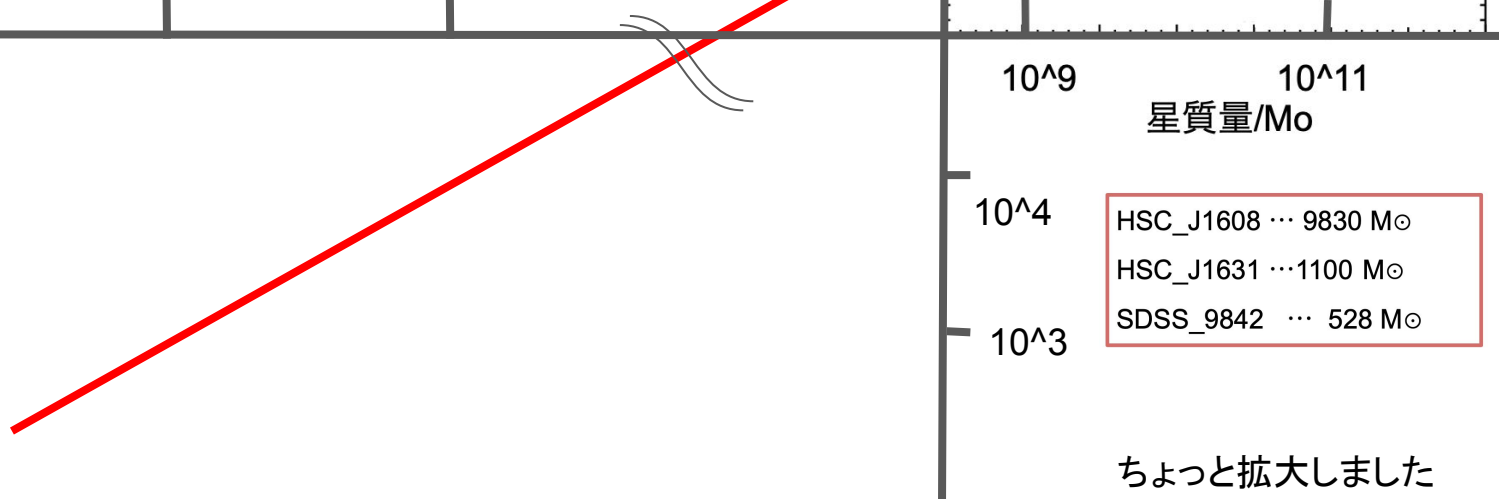
星質量 / $M_{\odot}$

10^4

10^3

HSC_J1608 ... 9830 $M_{\odot}$
HSC_J1631 ... 1100 $M_{\odot}$
SDSS_9842 ... 528 $M_{\odot}$

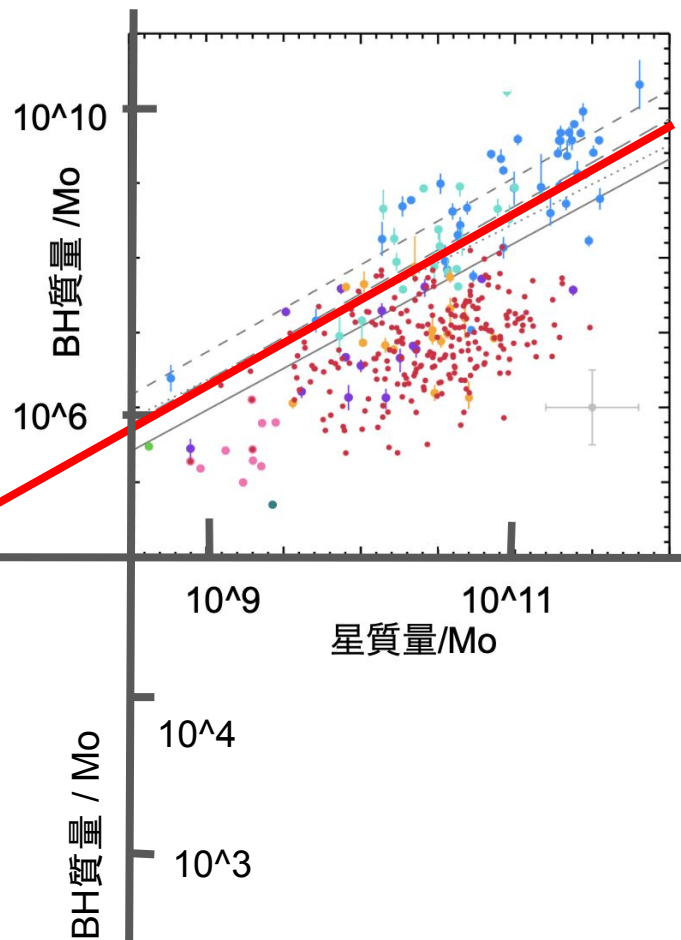
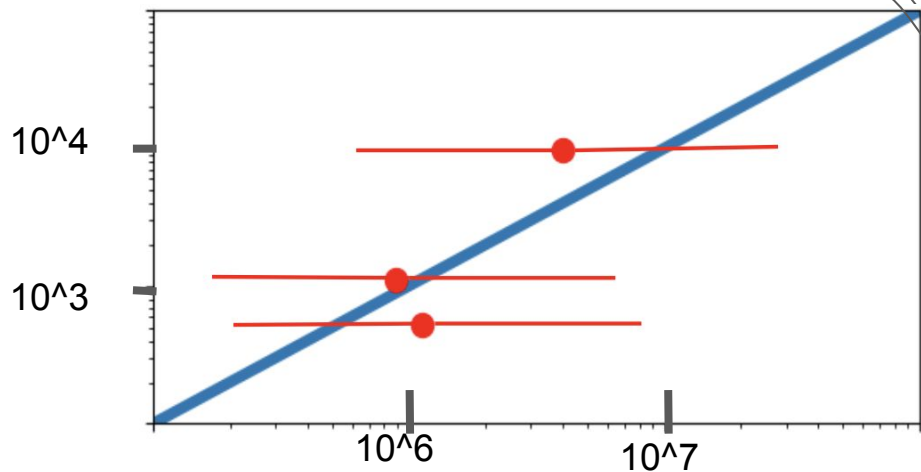
ちょっと拡大しました



銀河と星の共進化：マゴリアン関係

低質量側でもマゴリアン関係が成り立ってそう
どういう意味を持つ？ → 次スライド

横軸：星質量 / Mo



ちょっと拡大しました

今回の中間質量BHの起源

中間質量ブラックホールの起源

・説1:直接崩壊

→中間質量BHが直接できる

(金属量が低いと大きな星ができやすい)

→BH質量が卓越する

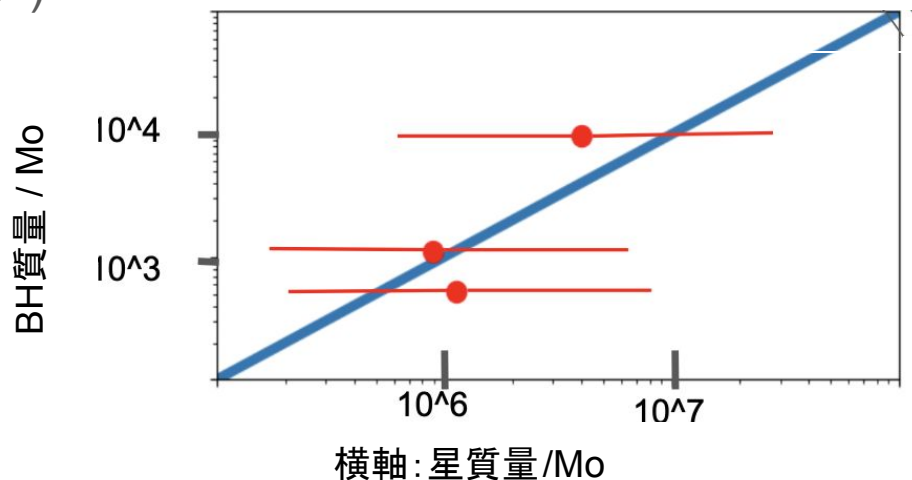
→線より上にプロットされる

・説2:恒星質量BHから成長

→マゴリアン関係にのる

今回はマゴリアン関係に乗った

→説2を支持



中間質量BHの探索先としてEMPGを提案

EMPGは成長の早い段階の銀河



BHも成長途中



中間質量BHがある可能性が高い

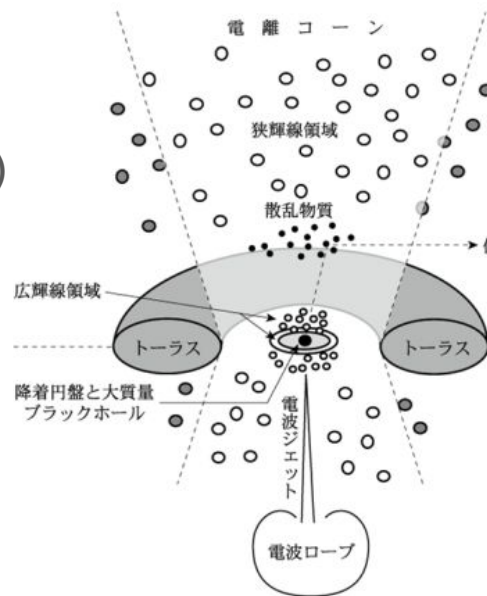
なぜ今まで研究されてこなかったか

<u>初期銀河</u>	<u>近傍EMPG</u>
BHが成長途中	BHが成長途中
遠い(見えない)	近い(見える)
数が多い	数が少ない

→機械学習でデメリットが解決

今後中間質量ブラックホールを発見するために

- ・より高感度のX線望遠鏡で観測したい
- ・X線連星を棄却する信頼性(2σ)を上げる(He II測定精度)
- ・信頼性のあるBH質量推定(反響マッピング法)
- ・さらなる候補天体を探索



まとめ

- ・SDSS&HSCデータを深層学習

→EMPGを9天体検出

- ・He IIやX線の観測結果

→中間質量BHを持つと考えるのが合理的(3天体)

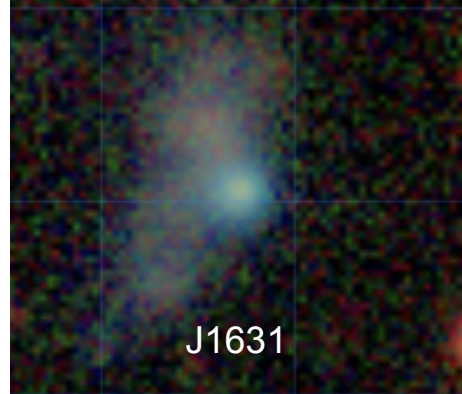
- ・BHの質量を計算 →星の共進化を示唆

- ・中間質量BHの探索先として近傍EMPGを提案

SDSS_9842「ほたる」



J1608

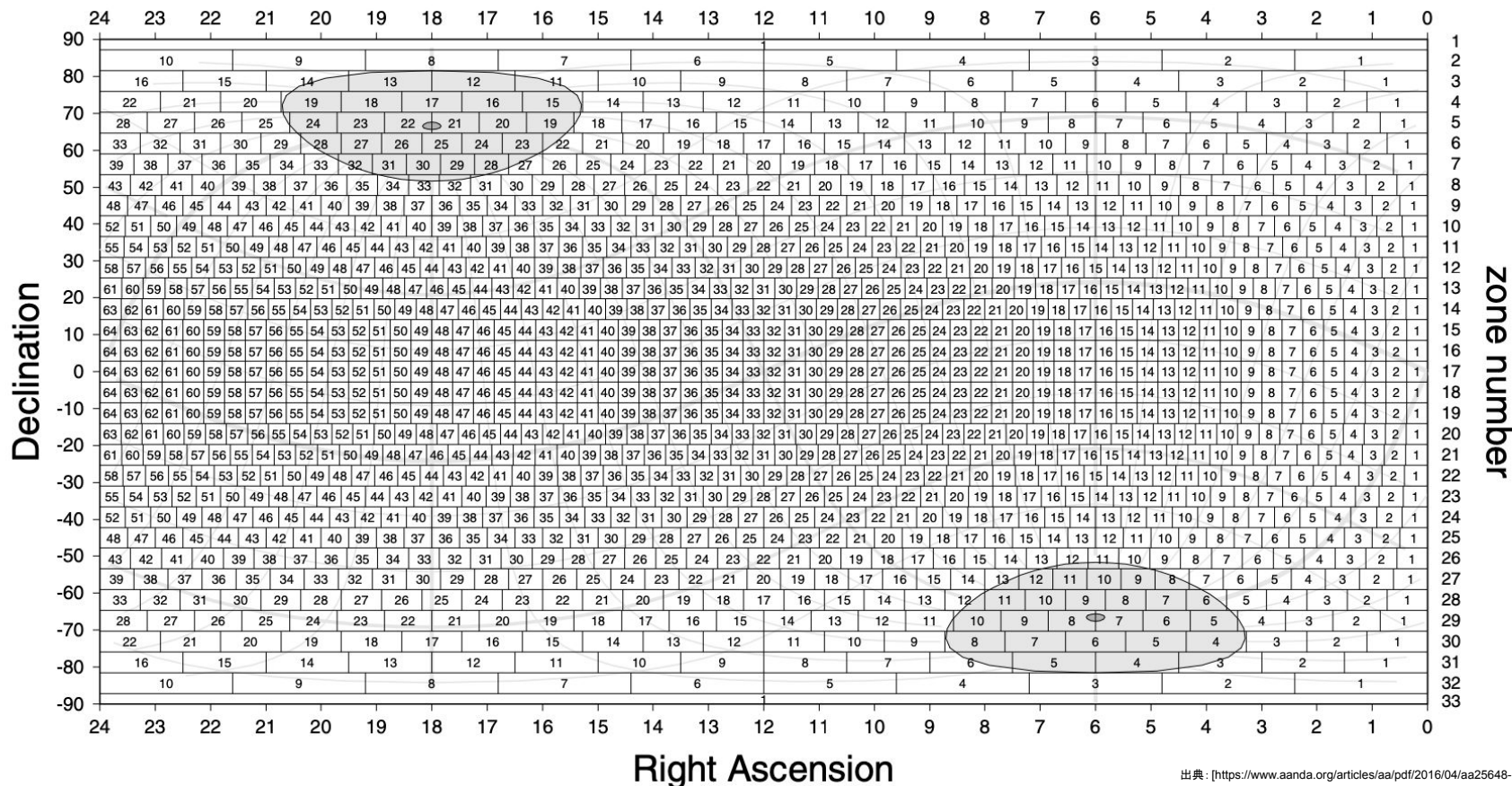


J1631

終

觀測的宇宙論班

資料: ROSATの観測範囲



質問用1

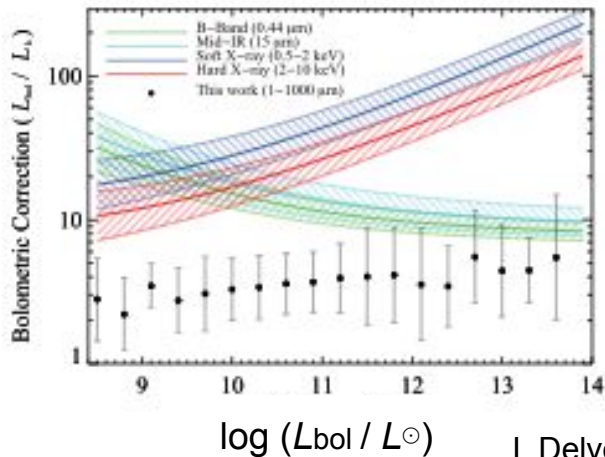
X線光度 $L_{\text{Xray}} \rightarrow$ ボロメトリック光度 $L_{\text{bol}} \rightarrow$ BH質量

$$F_{\text{Xray}} = \frac{L_{\text{Xray}}}{4\pi D^2}$$

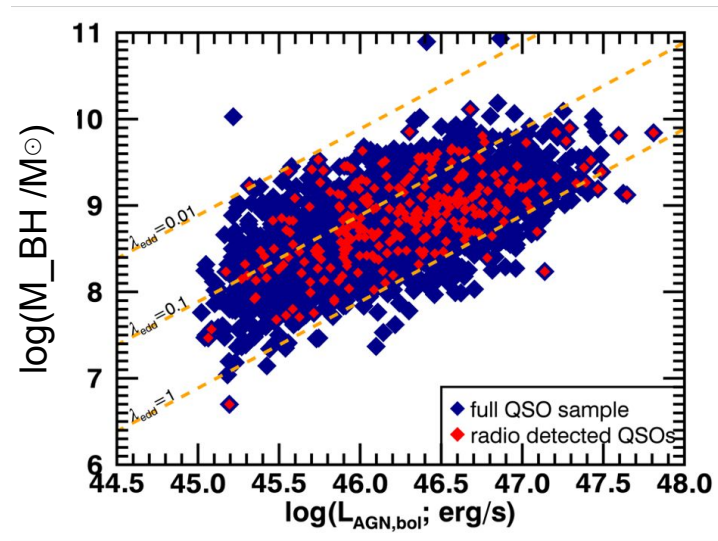
F_{Xray} : X線の強さ
 D : 銀河までの距離

$$L_{\text{Xray}} \propto L_{\text{bol}}$$

|



I. Delvecchio et al. 2014



F. Stanley et al. 2017

質問用2

$$M \propto R V^2$$

$$\log M_{\text{BH}}(\text{H}\beta) = \log \left[\left(\frac{\text{FWHM}(\text{H}\beta)}{1000 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{L(\text{H}\beta)}{10^{42} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{0.63} \right] + (6.67 \pm 0.03). \quad (6)$$

FWHM → 輝線幅
速度勾配を表す

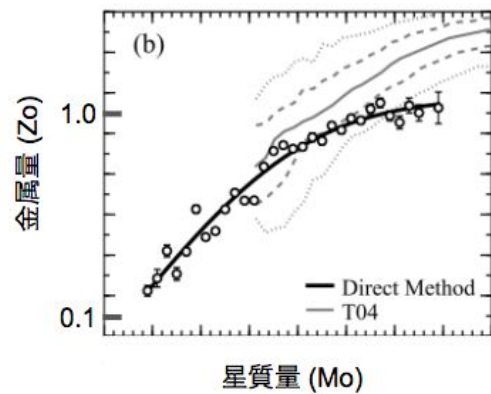
$L \rightarrow$ 光度 $R \propto L^{(0.63)}$ 経験則

基本データ

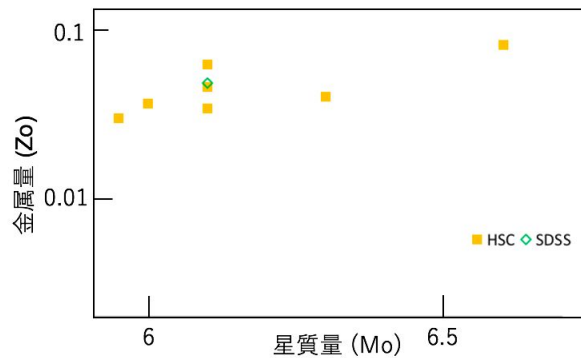
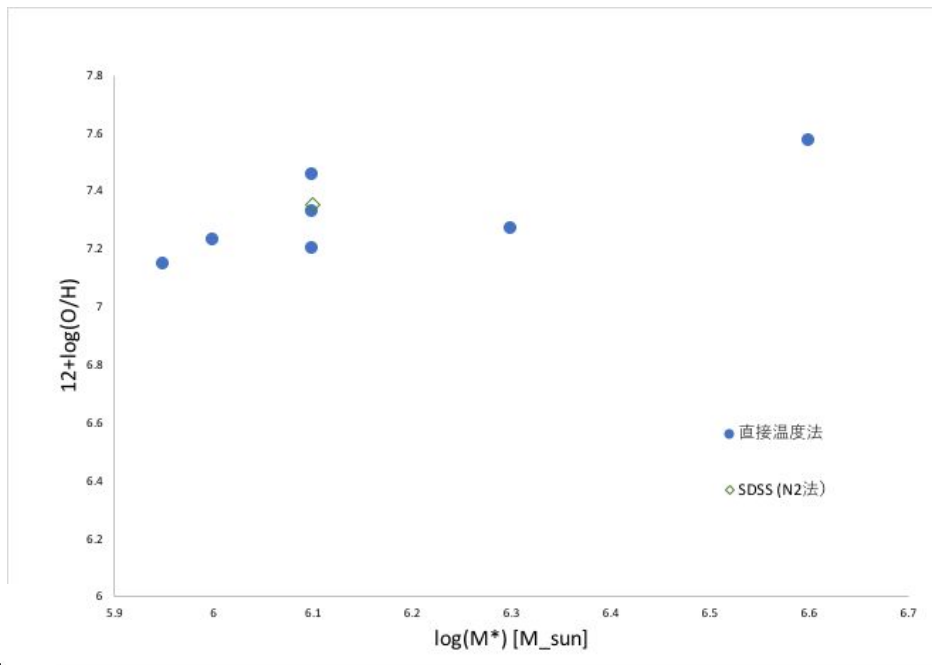
来年の参考になりそう

J1608 242.0459529 43.63150099

J1631 247.8093525 44.43456309



$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 12 + \log(\text{O}/\text{H})_{\text{asm}} - \log \left(1 + \left(\frac{M_{\text{TO}}}{M_*} \right)^\gamma \right)$$



資料: 反響マッピング法

天文学辞典

[活動銀河核](#)のスペクトルに見られる幅の広い(数千) [許容線](#)の源となっている領域のことで、[降着円盤](#)からの紫外線によって電離されたガスでできていると考えられている。領域の大きさは0.1パーセク(0.1 pc=0.3光年)以下と極めて小さく、ガスの数密度は から高い。活動銀河核の連続光強度(降着円盤から直接出た光)が時間変化すると、それにやや遅れて広輝線領域の輝線強度も変化する。この時間のずれから広輝線領域の大きさや形状を推定できる。これを[反響マッピング](#)という。スペクトルに幅の広い許容線の見られる活動銀河核は1型AGNと呼ばれている。[狭輝線領域](#)も参照。

$$10^{11} \text{ cm}^{-3} \quad 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad \text{km, s}^{-1}$$

今回の発表(担当とアウトライン:各スライドに図1枚)

1. EMPGイントロ 3枚(1名) 筒泉

- 初期宇宙について(元素合成の図)
- 星・銀河の形成について(DMのシミュレーション)
- EMPGが初期銀河の鍵を握っている？(図は後で考える)

2. データと解析、EMPGの検出XX枚(2名) 荻野、堀江

- 使った望遠鏡とデータ(2)
- 機械学習で調べる+候補天体がYY個(2)
- NII(1)(ここまで堀江)
- R23(1)

直接温度法による重元素量推定(3)、星質量推定(1)、輝線比(1)

3. 結果: EMPGの性質調べた。重元素量測定の仕方R23 vs. 直接温度法、紆余曲折あった。(1名) 安田

求めた金属量から、EMPGであると考えられる天体を示す(metallicityが7.69以下のもの)

J0210のピークが変、電子密度、EMPGの輝線の特徴、困った

4. 結果: 紆余曲折の末、中間質量ブラックホール存在の兆候が見つかった(1名) 渡辺

1) HeII/Hb HeII/Hb OIII/OIIグラフ 2)ブラックホール質量の計算 3)マゴリアン関係 4) 正しいかどうかの検証Rosatの結果 5) X線連星

・ブラックホール研究の背景の説明 2枚(EMPGイントロの人再登場)

- なぜX線でBHが見つけれられるのか？(降着円盤からX線が出る仕組み)
- なぜ中間質量BHIは重要？(NASAのやつ)

5. 考察とまとめ(1名) 波多野

- 1)4番のまとめ1, 5)→AGNある 4)→BHIは1e6Mo以下 2)BH質量は1e2,3 くらい
- 2)なぜ私たちが見つけれられたのか。(EMPGが初期宇宙の銀河に似ている)
- 3)SMBHが恒星からできるのか、直接崩壊からできるのか→マゴリアン関係(BH or 星が卓越？)

2019年の例

- ・イントロダクション4枚(1名)杉森

EMPGって何? 科学目標

- ・データと解析12枚(2名)天羽(前半)、駒木(後半)

使った望遠鏡とデータ、EMPGの選び方(機械学習)、金属量の求め方とその原理

- ・結果1、5枚(1名)大和

EMPGの金属量(EMPG-SKYを含む)

- ・結果2、5枚(1名)水越

EMPG-SKYの性質と物理的描像(考察)

+まとめ

BHはどのように観測される？

- ・降着円盤からX線が出る

恒星がBHに回転しながら落ちる時、

他の粒子とぶつかって摩擦生じる。1000万度くらい。

$h\nu = k_B T \rightarrow \text{X線}$

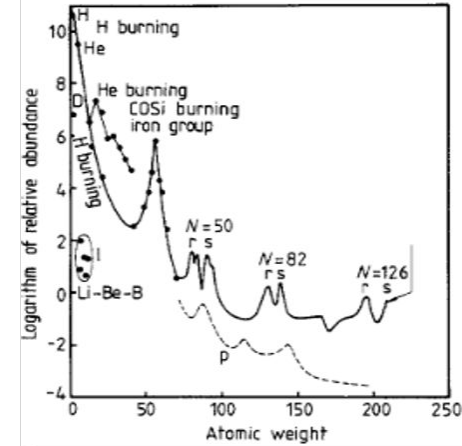
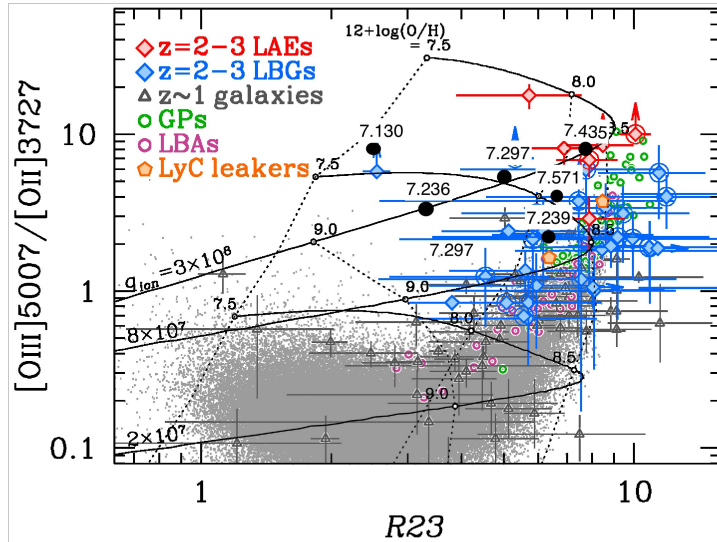
- ・電波？γ線？X線？（穴を残しておいた方が良い？）

電波は～γは～Xは～

→X線で！

どんな画像にしようかな。

<https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0601303.pdf>



(C.Rolfs,H.P.Trautvetter &W.S.Rodney, 1987)