

***Optical Spectroscopy of $H\alpha$ Filaments
in Cool Core Clusters:
Kinematics, Reddening, and
Sources of Ionization***

*McDonald, Veilleux, and Rupke,
2012, ApJ, 746, 153*

Takayuki Maebayashi

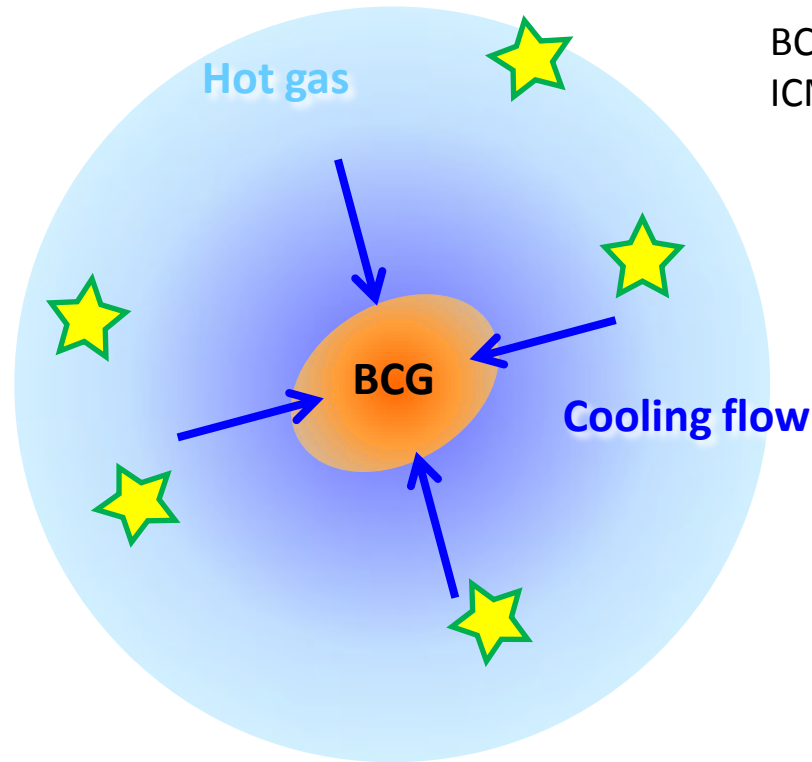
Abstract:

- Cool core cluster中心のBCG nuclei/H α filamentに対し, long-slit 分光観測を行い, 輝線flux, 相対速度, 速度幅等を取得した. そして, X線, H α 撮像データと合わせて, H α filamentの物理を調査.
- **相対速度場:** Extended filament $\rightarrow$ flat(~ 300 km/s) & smooth.
相対速度場: Compact filament $\rightarrow$ rotate-like.
- **速度場:** BCGから離れるに従って, filamentのFWHMは狭くなる.
- **輝線診断結果:** SF + Cooling plasma modelも可.
 $\rightarrow$ 輝線比を再現できる系もある.
 $\rightarrow$ しかし, やや低階輝線比を低く見積もってしまう.
輝線診断結果: SF + Shock modelがベスト.
 $\rightarrow$ 輝線比を説明できる. Shock fraction=0 $\sim$ 40%.
 $\rightarrow$ 輝線のFWHM ~ 200 km/sと $V_{\text{shock}}=100\sim 400$ km/sは整合する.
- **Filamentの起源:** Buoyant bubbleによるICMの引きずり, 押し上げ? Cool ICM cloudの落下?

一つの電離モデルだけでは,
輝線比は説明できない.

また、後ほど...

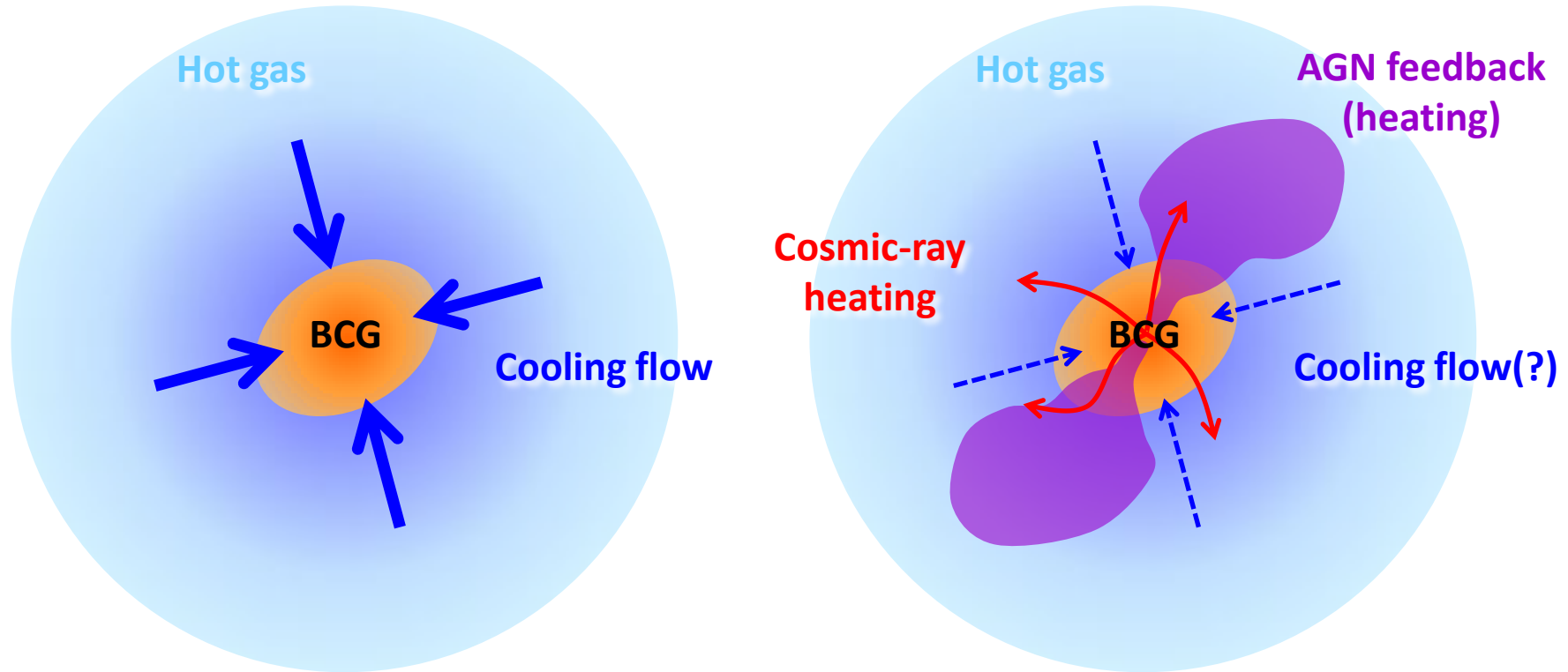
Introduction1: Cool core cluster



BCG: Brightest Cluster Galaxy
ICM: Intra Cluster Medium

リラックした銀河団のhot ICMは、ほぼ 静水圧平衡.
制動放射でX線($E \sim \text{keV}$, $T \sim 10^7 \text{ K}$)を放射し,
冷却 $\rightarrow$ 圧力減少 $\rightarrow$ 圧力 < 重力 $\rightarrow$ 崩壊(Cooling flow).
冷却時間 < Hubble time の銀河団 $\rightarrow$ 'Cool core' cluster.

Introduction2: Cooling flow(?)

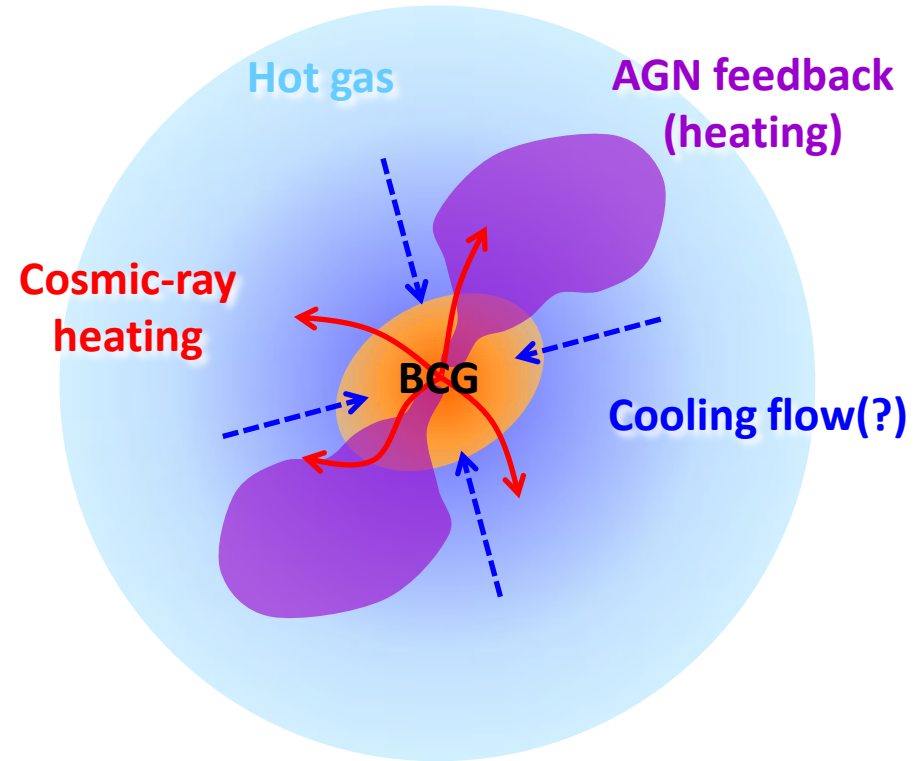


Cooling flow model (Fabian 94) $\rightarrow dM/dt = 100 \sim 1000 M_{\odot}/\text{yr}!!$

ICMは, 実はそんなに降ってない? $\rightarrow$ Cooling flow problem.

Reduced cooling flow model (Voigt+04) $\rightarrow dM/dt = 1 \sim 10 M_{\odot}/\text{yr}.$

Hydra A (Abell 0780):
Chandra/ACIS, VLA(4635 MHz), CFHT&DSS



Introduction2: Cooling flow(?)

$dM/dt = 100 M_{\odot}/\text{yr}$ の cooling flow が, $\Delta t = 10^9 \text{ yr}$ だけ継続した場合:
→ $M_{\text{cool}} = 100 \times 10^9 = 10^{11} M_{\odot}$ の星間ガスか恒星質量.

→ 星間ガスが銀河質量程度存在? → Ha filament 質量は, $10^{4-7} M_{\odot}$.

→ 分子ガス→恒星になったのでは? → BCG のカラーは赤い.

補足: 若い恒星質量/全恒星質量の比が, 1-10%程度になれば, 可視カラーで青くなる.

よって, ICM はそんなに降ってない?

→ 何らかの加熱源が存在?

Introduction3: H α filament

Chandra X-ray + H α imagingによって, 両者の空間分布が一致する事は既に知っている(McDonald+2010,11a).
このデータセットに, 可視分光データを加えて輝線診断を行い, cooling flowとH α filamentの物理を調査する.

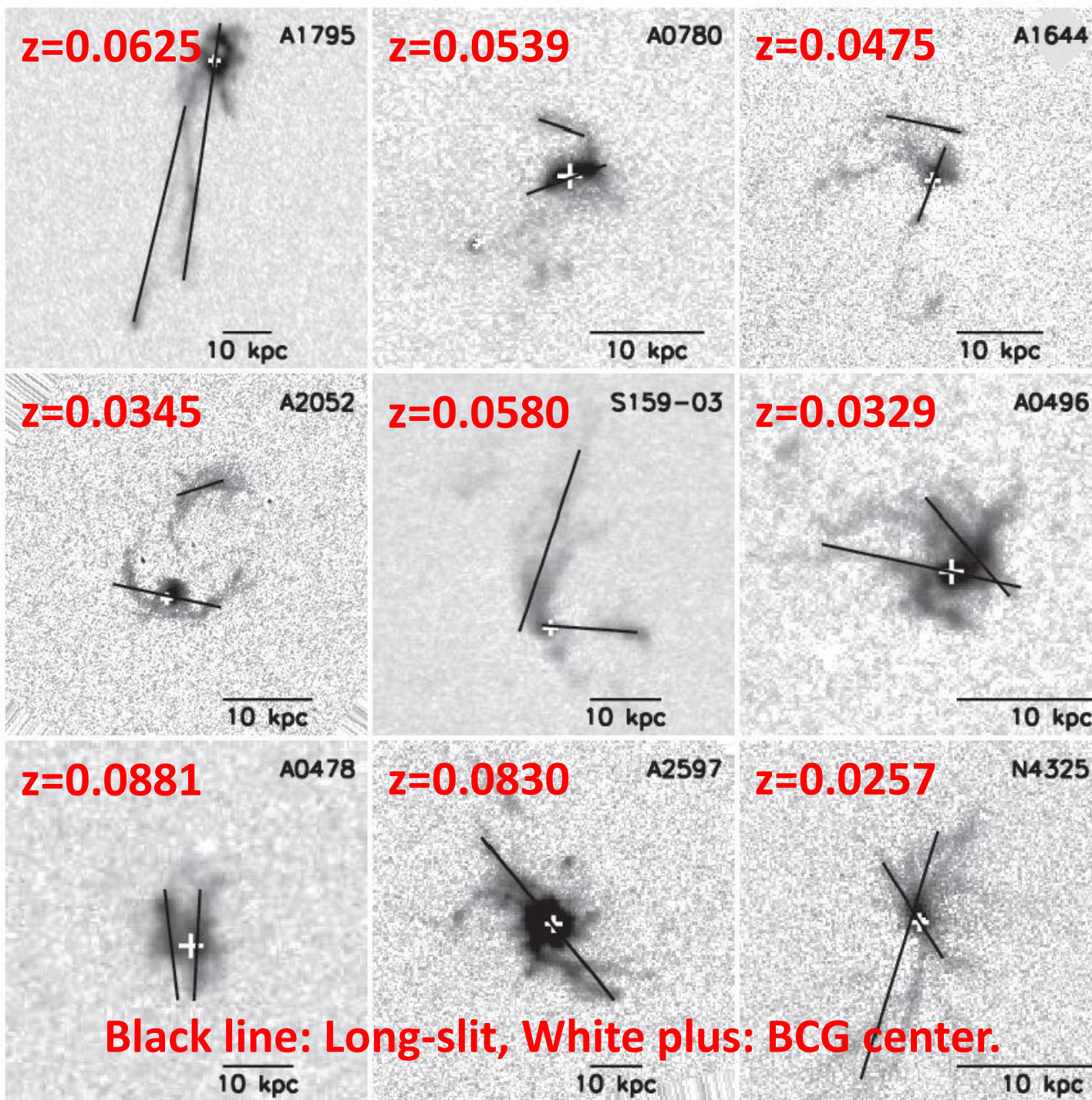


Cool core clusterは, multi-phase(Hot ICM, OVI, H α , H $_2$).
UV, opt, MIRの観測から, 星形成活動が確認されている.
 $\epsilon_{\text{cool}} = \text{SFR} / (\text{Cooling plasma } dM/dt) = 1 \sim 10\%$.

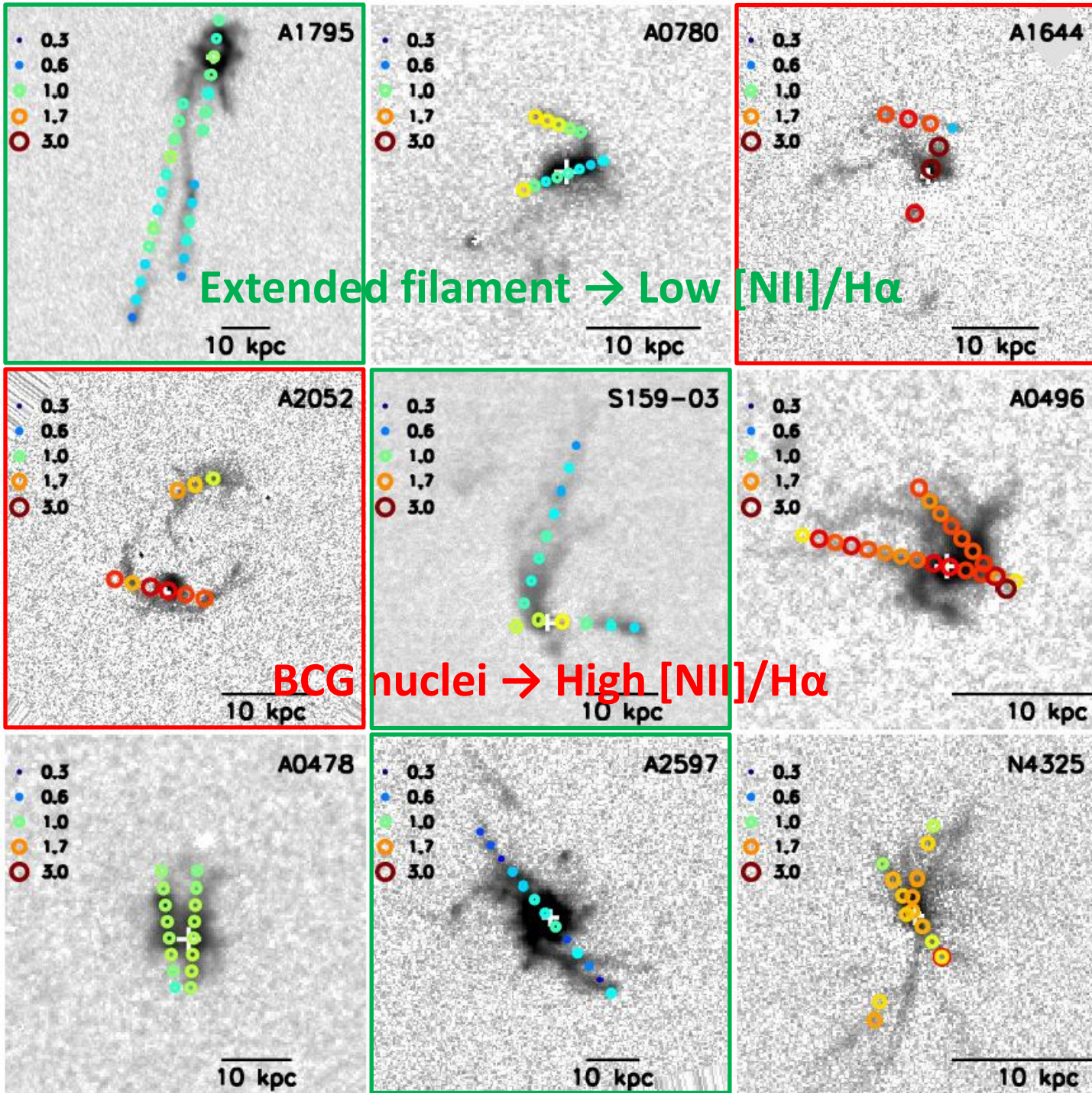
Data, Reduction:

- **H α imaging**(Maryland-Magellan Tunable Filter)
- **X-ray data**(Chandra archive)
- **Long-slit spectroscopy:**
 - Magellan telescope(6.5m)/IMACS, $\lambda=5000\sim8000$ Å.
 - Keck I telescope(10m)/LRIS, $\lambda=3500\sim7500$ Å.
- **IRAF reduction**
- Redshift, BCG $\rightarrow$ filamentの相対速度(v), line FWHM(σ_v), emission line flux([OIII], H β , [NII], H α , [SII], [OI]), $E(B-V)$.
- Galactic extinction(Cardelli+89, Schlegel+98)
- O₂ atmospheric absorption($\lambda\sim6870, 7620$ Å)

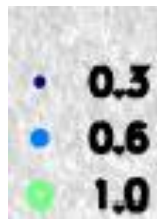
Data: $H\alpha$ imaging



Result 1: optical line ratio



$[NII]/H\alpha$
ratio

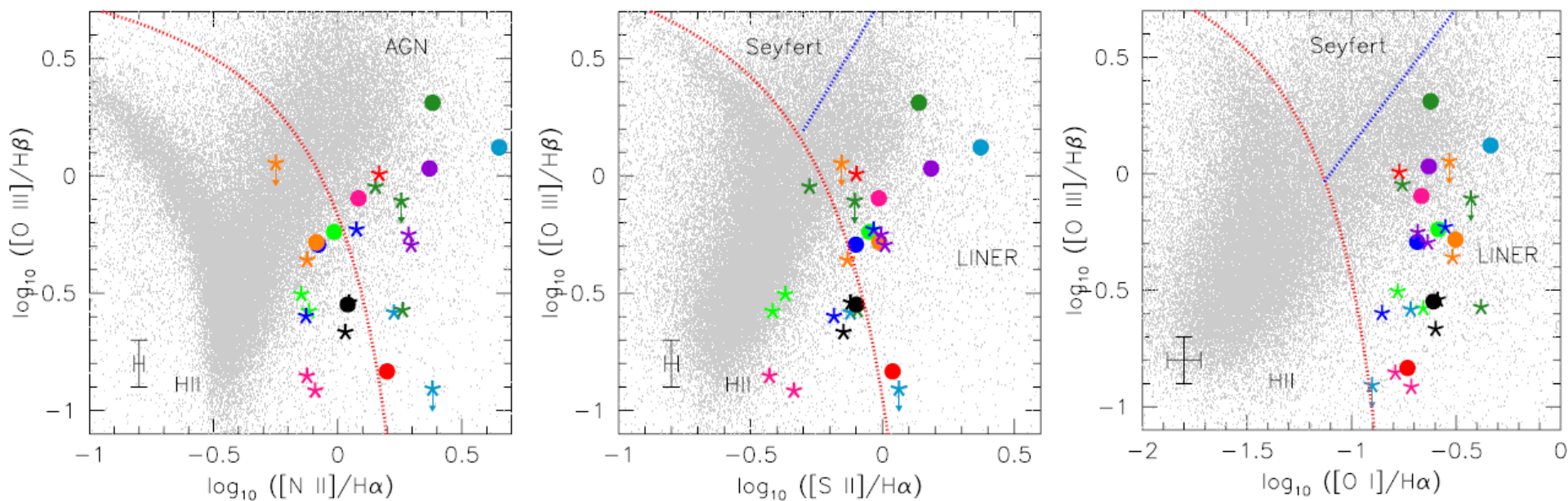


SF



AGN?
Shock?

Result1: optical line ratio



Abell 0478 Abell 1795
 Abell 0496 Abell 2052
 Abell 0780 Abell 2597
 Abell 1644 NGC 4325
 Sersic 159-03

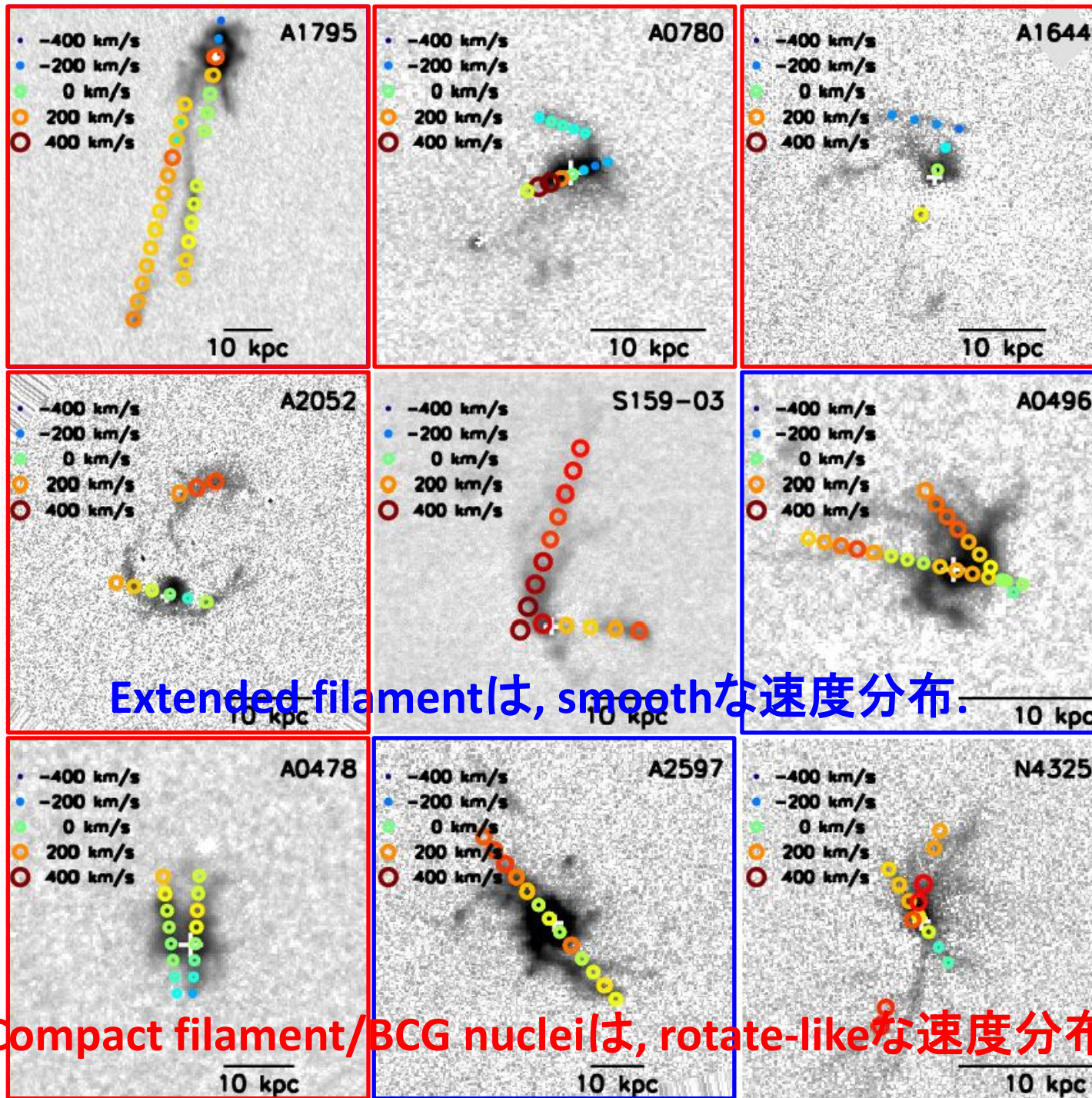
● Nucleus
 ★ Filament

✓ **H α filamentもBCG nucleiも,「右下」にずれる!!**

Filament: 他の観測から, 星形成活動が確認されているが, 輝線比を見る限り, SF modelだけでは説明不可.

Nuclei: 輝線比ではLINER(LL-AGN)に分類される. BCG nucleiは, X線や可視光では低光度で狭輝線成分のみ, が一般的. LINERに分類された事は, この一般傾向と整合する. しかし, filamentと同様な分布を示すBCG nucleiもあり, それらはAGN起源ではないのだろう.

Result2: gas kinematics



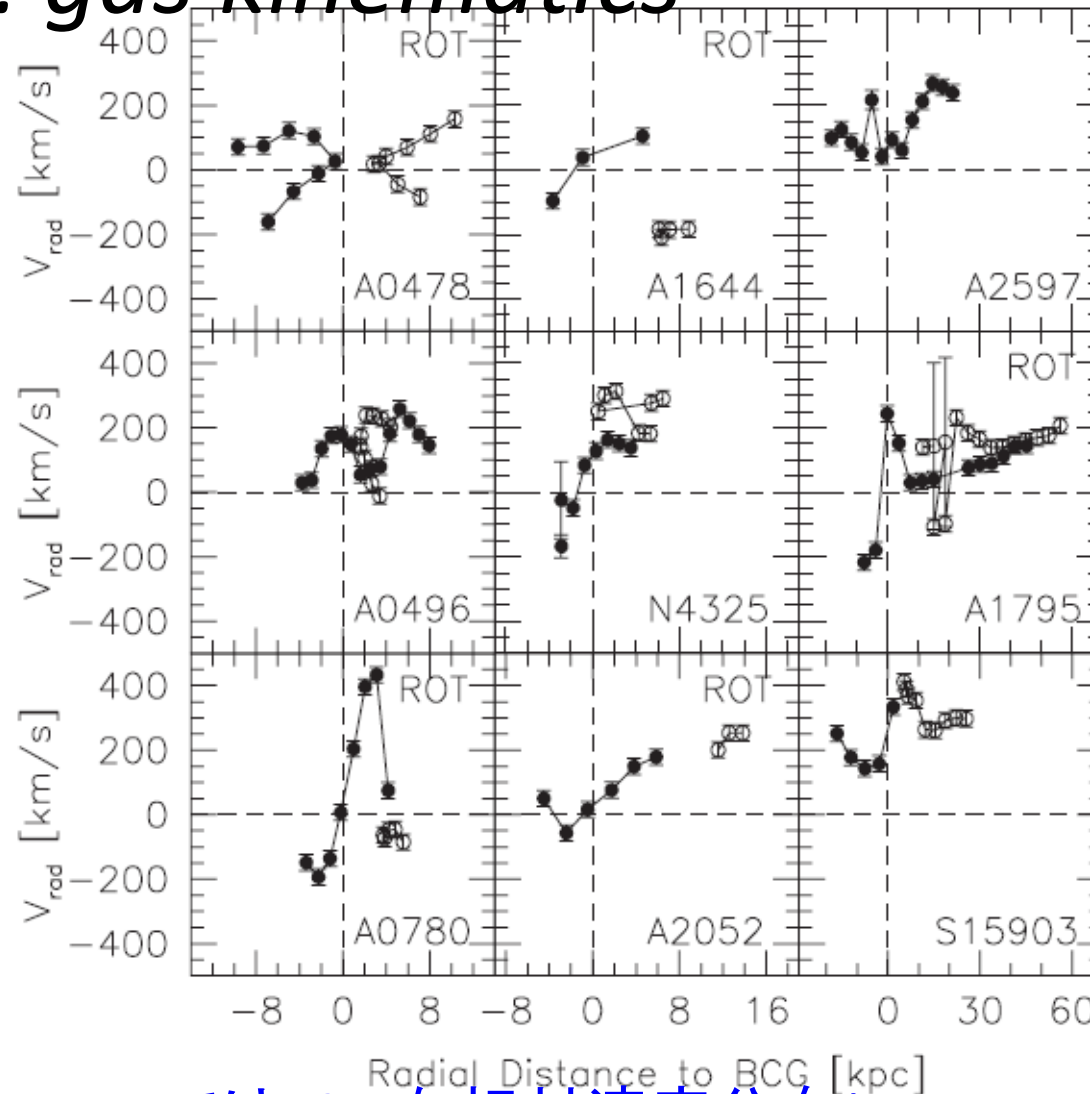
輝線とBCG
の
相対
視線速度

Extended filamentは, smoothな速度分布.

Compact filament/BCG nucleiは, rotate-likeな速度分布.

Distance<0 -> Filament R.A.がBCG R.A.より小さい.

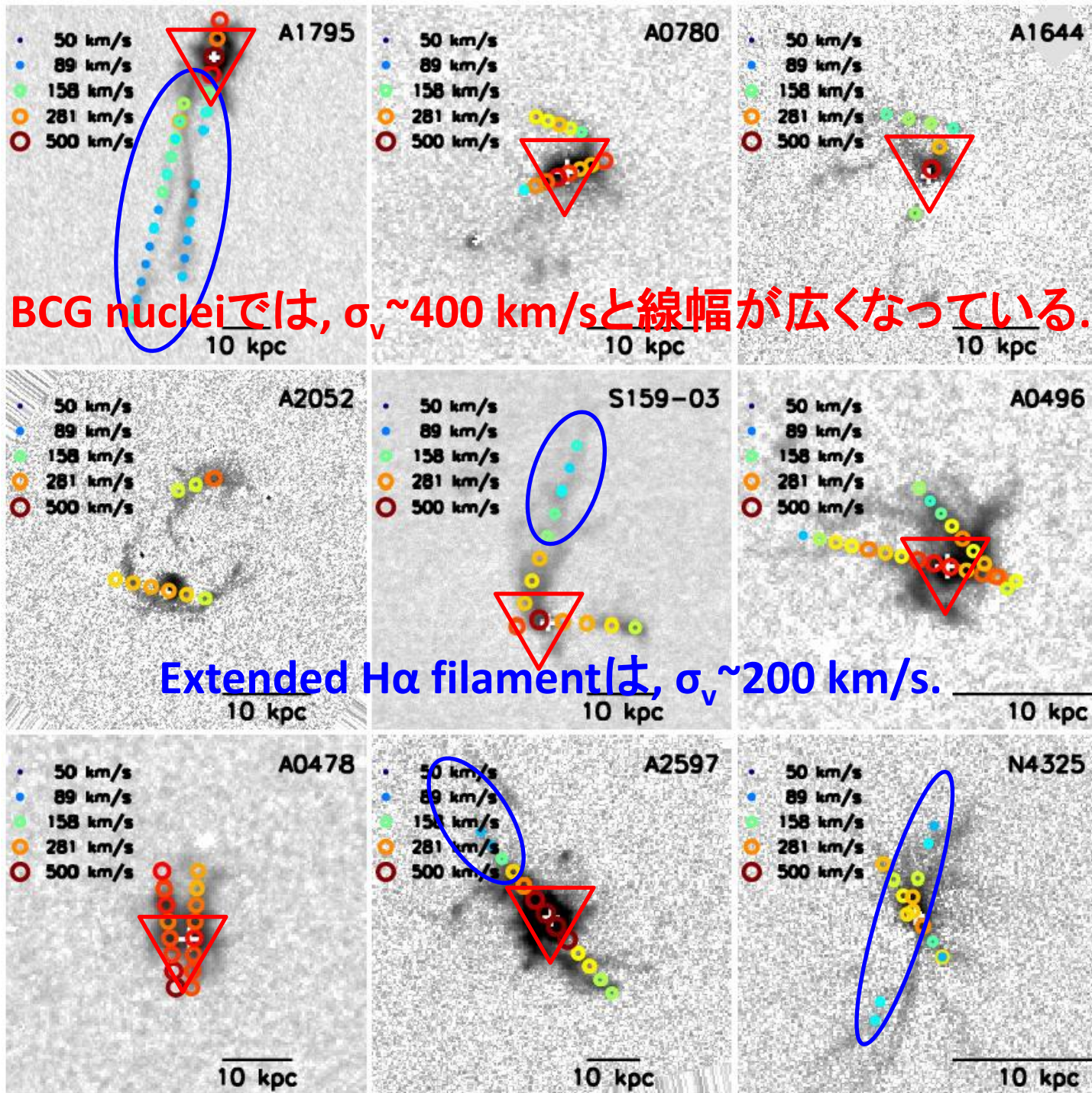
Result2: gas kinematics



$R > 10$ kpcでは, flatな相対速度分布($v \sim 300$ km/s).

$R < 10$ kpcでは, rotate-likeな相対速度分布.

Result2: gas kinematics



輝線の
の
FWHM
 σ_v



Result2: gas kinematics

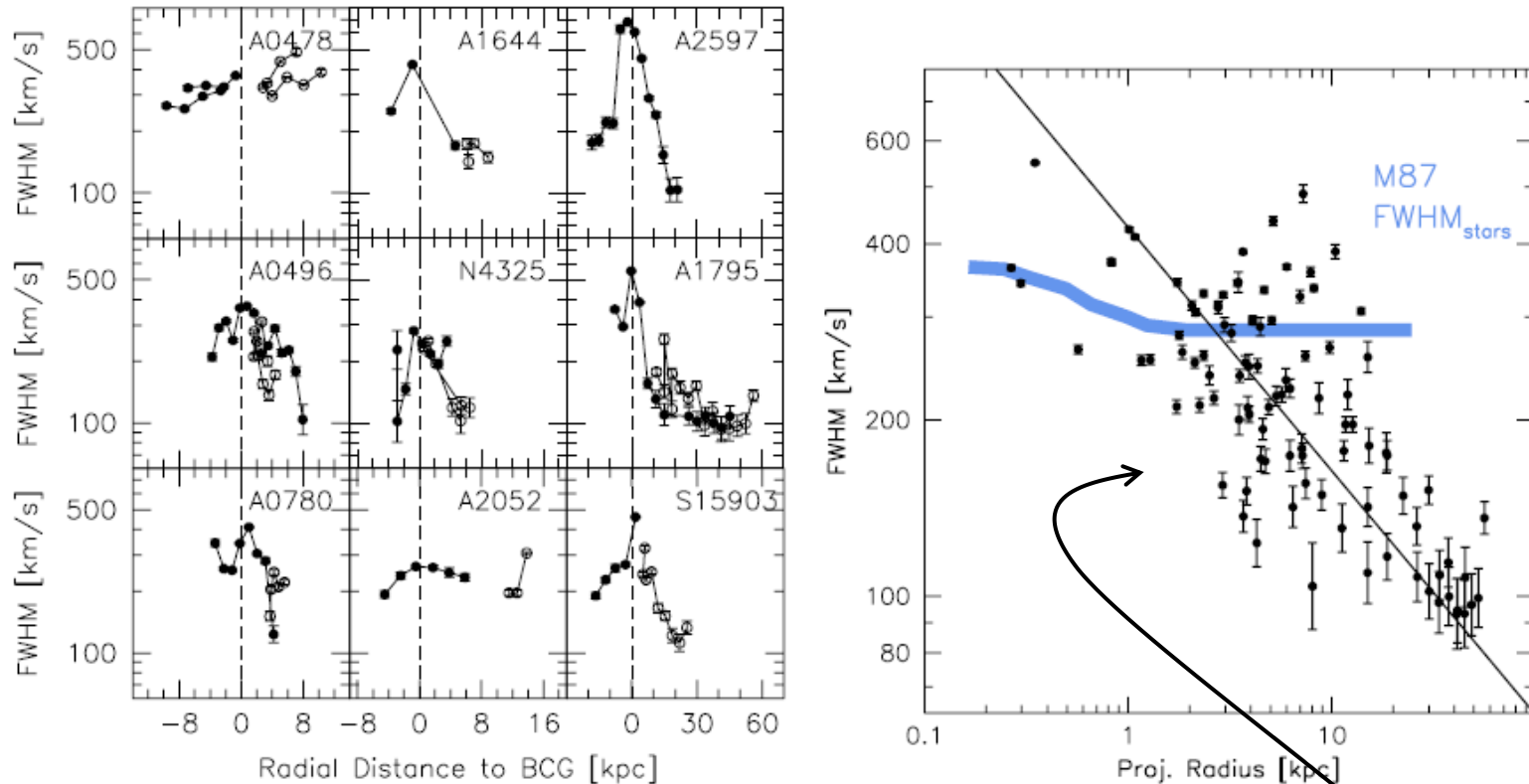


Figure 10. Left: similar to Figure 8, but now showing optical line width as a function of radius for individual clusters. Right: optical line width as a function of radius for all nine galaxy clusters. There is a strong correlation, such that the warm gas in the very center of the cluster is highly turbulent ($\text{FWHM} \sim 400 \text{ km s}^{-1}$) while the thin, extended filaments have very narrow lines ($\text{FWHM} < 200 \text{ km s}^{-1}$). This trend suggests that highly elongated filaments can only survive in regions with minimal turbulence. Shown in blue is the stellar absorption line width in M87 from Murphy et al. (2011).

BCGから離れているfilament程, FWHMが狭い。
 Extended($R \gtrsim 10 \text{ kpc}$) filamentは, $\text{FWHM} \lesssim 200 \text{ km/s}$.

Discussion1: sources of ionization

1. Star forming
2. Cooling plasma
3. Shock
4. Conduction
5. Cosmic ray

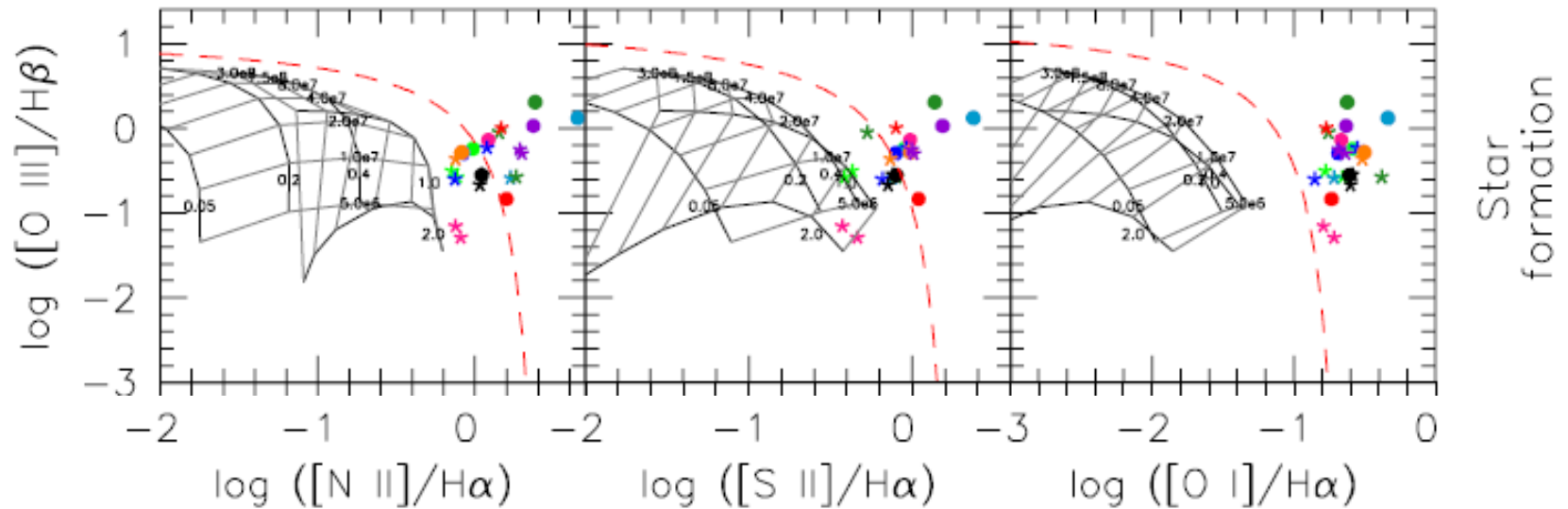
✓ AGN -> not likely.

∴ Low [OIII]/H β なので, AGNの寄与は弱い.

ここからは, モデル解釈.

Star forming:

ionization parameter:
ionizing photon number $\div$ hydrogen atom number.

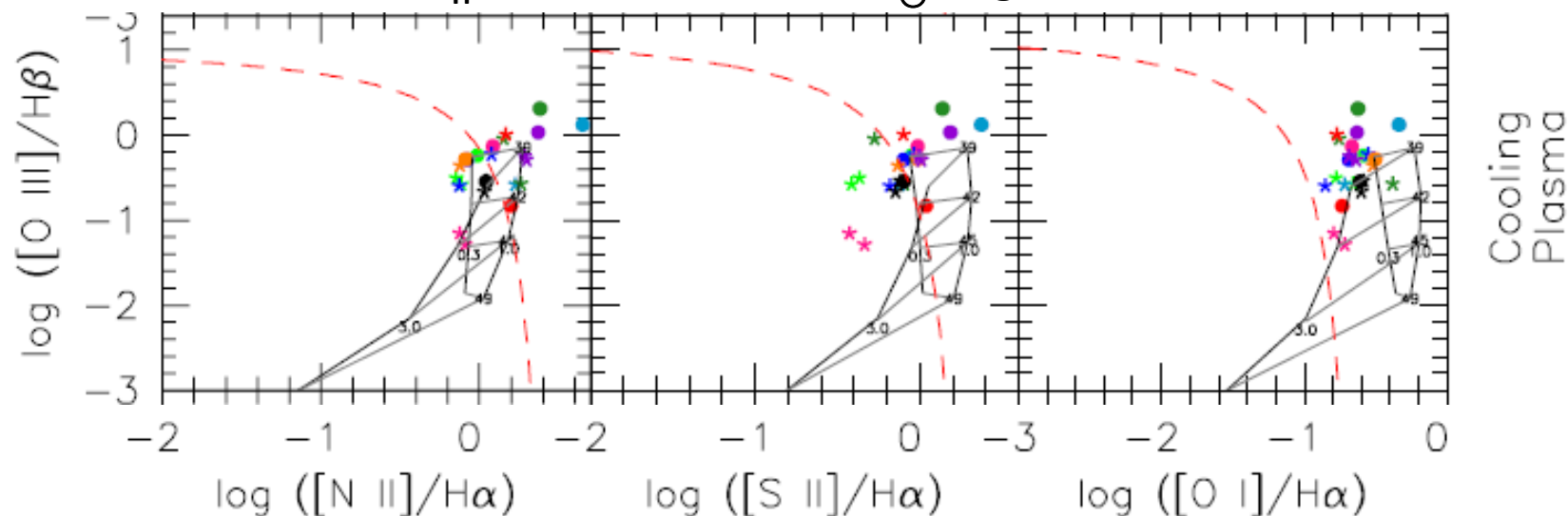


[NII]/H α , [SII]/H α は, 一部の観測データを再現できる.
[OI]/H α は, 全く再現できない.
IMF, ionization parameter, metallicityを変えてもダメ.

SF modeの輝線比が合わないとはいえ, cool core cluster中心では, 他の観測から星形成活動が強く示唆されている. そのため, SF modelは以後も棄却せずに, 「composite model」の片方として扱われる.

Cooling plasma:

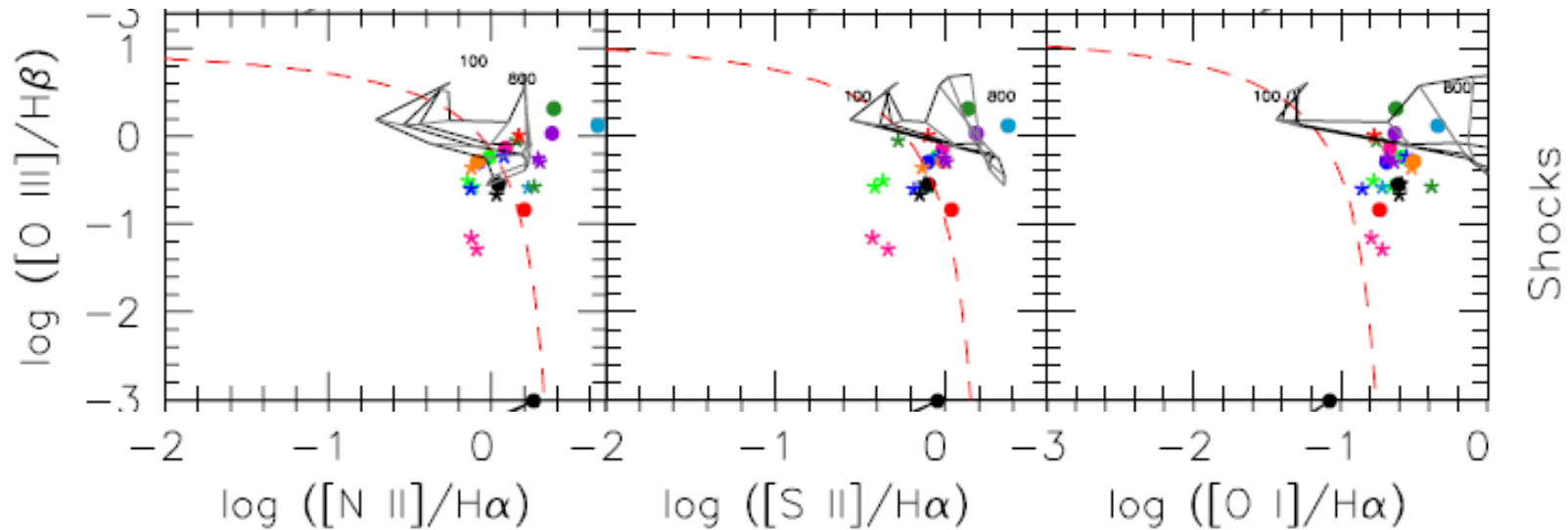
Model: $T=10^7$ K, $N_H=300 \text{ cm}^{-3}$, $Z=0.3/1/3 Z_\odot$, $\text{Log } U=-3.9/-4.2/-4.5/-4.9$.



[OIII]/H β , [NII]/H α は良く再現できている.
[SII]/H α , [OI]/H α をやや高く見積もってしまう.

→ 輝線強度比は, まずまず再現できる!

Shock:



[OIII]/H β をやや高く見積もってしまう.

[NII]/H α , [SII]/H α , [OI]/H α は良く再現できている.

→ 輝線強度比は, まずまず再現できる!

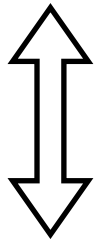
H α filament: $V_{\text{shock}} = 100 \sim 400$ km/s.

→ H α filamentの輝線FWHM ~ 200 km/sと近い値.

BCG nuclei: $V_{\text{shock}} = 400 \sim 800$ km/s.

Shock:

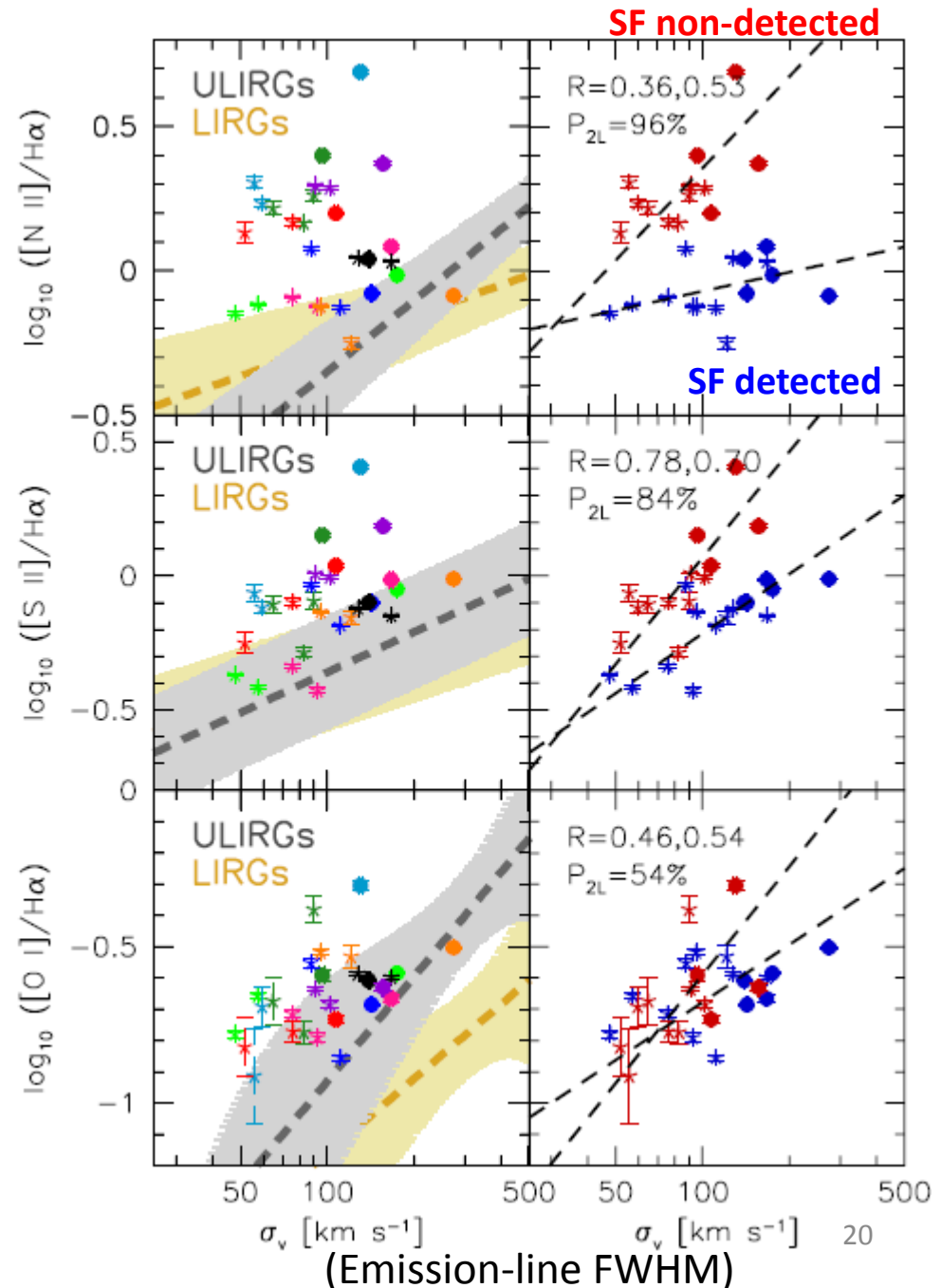
SF non-detectedの系は,
 (a)低階輝線比が高く,
 (b)輝線比の σ_v 依存性が強く,
 (c)ULIRG/LIRGの輝線比- σ_v 関係
 には乗らない($[\text{SII}]/\text{H}\alpha$, $[\text{OI}]/\text{H}\alpha$).



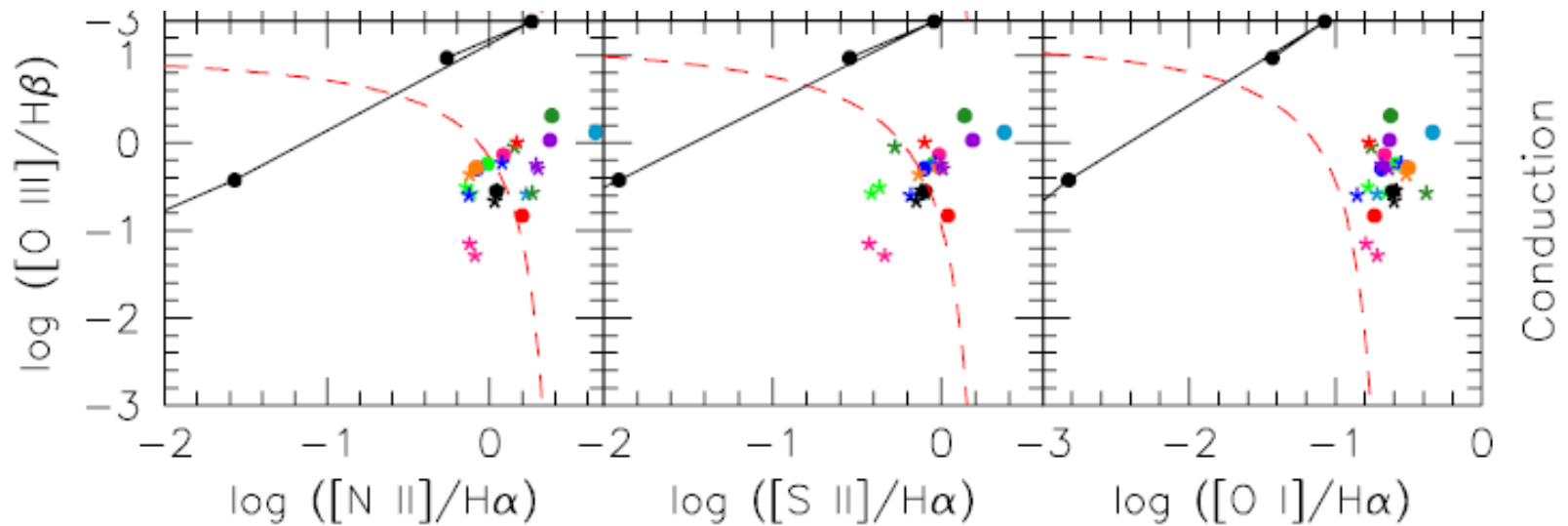
SF+Shock(dominate)?

SF detectedの系は,
 (a)低階輝線比が低く,
 (b)輝線比の σ_v 依存性が弱く,
 (c)ULIRG/LIRGの輝線比- σ_v 関係
 に近い.

SF(dominate)+Shock?



Conduction:



観測データを再現できない → (電離源として)棄却.

モデルのパラメータ空間をちゃんと調べていないだけにも思えるが.

Cosmic ray:

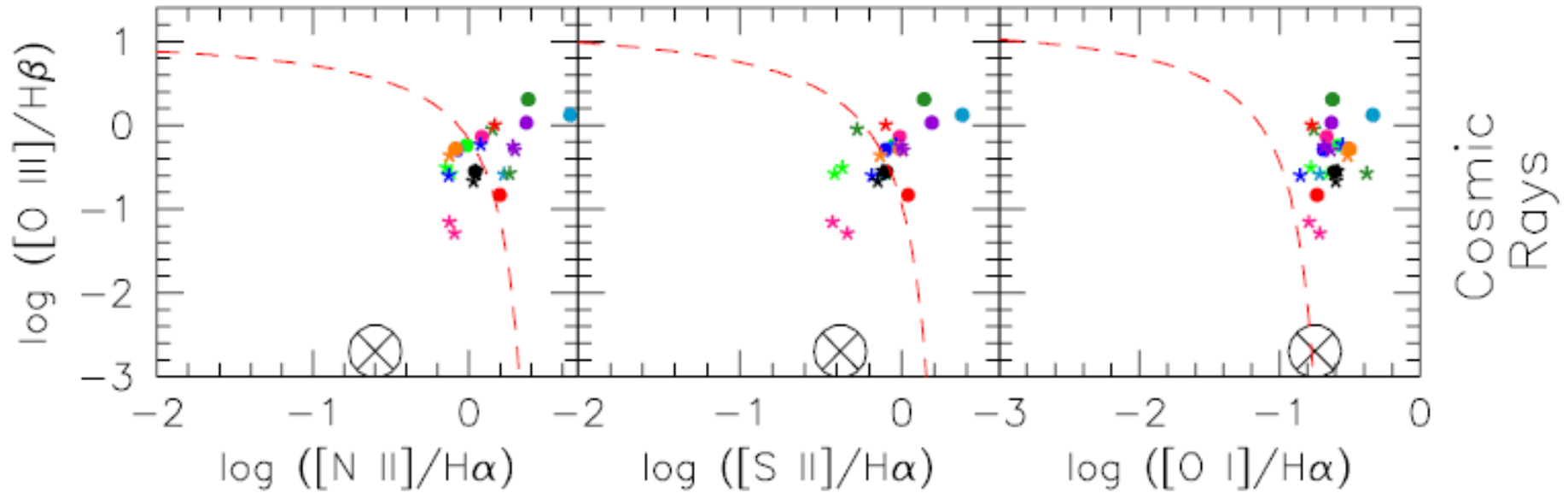
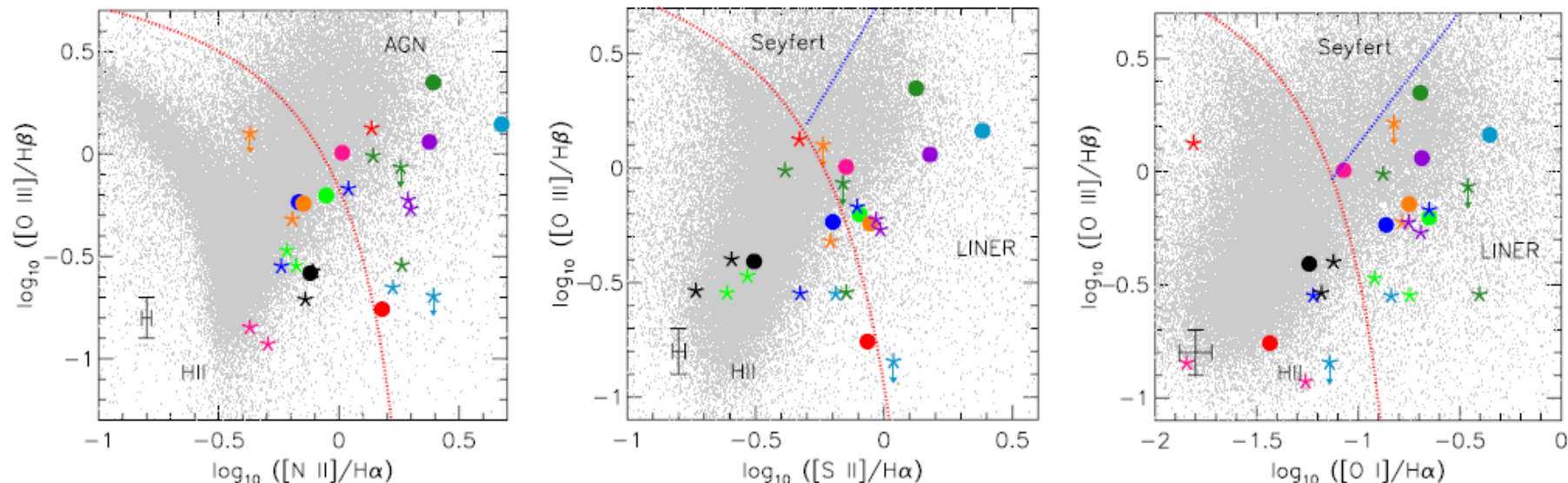


Figure 14. (Continued)

観測データを再現できない → (電離源として)棄却.

Discussion2: composite models

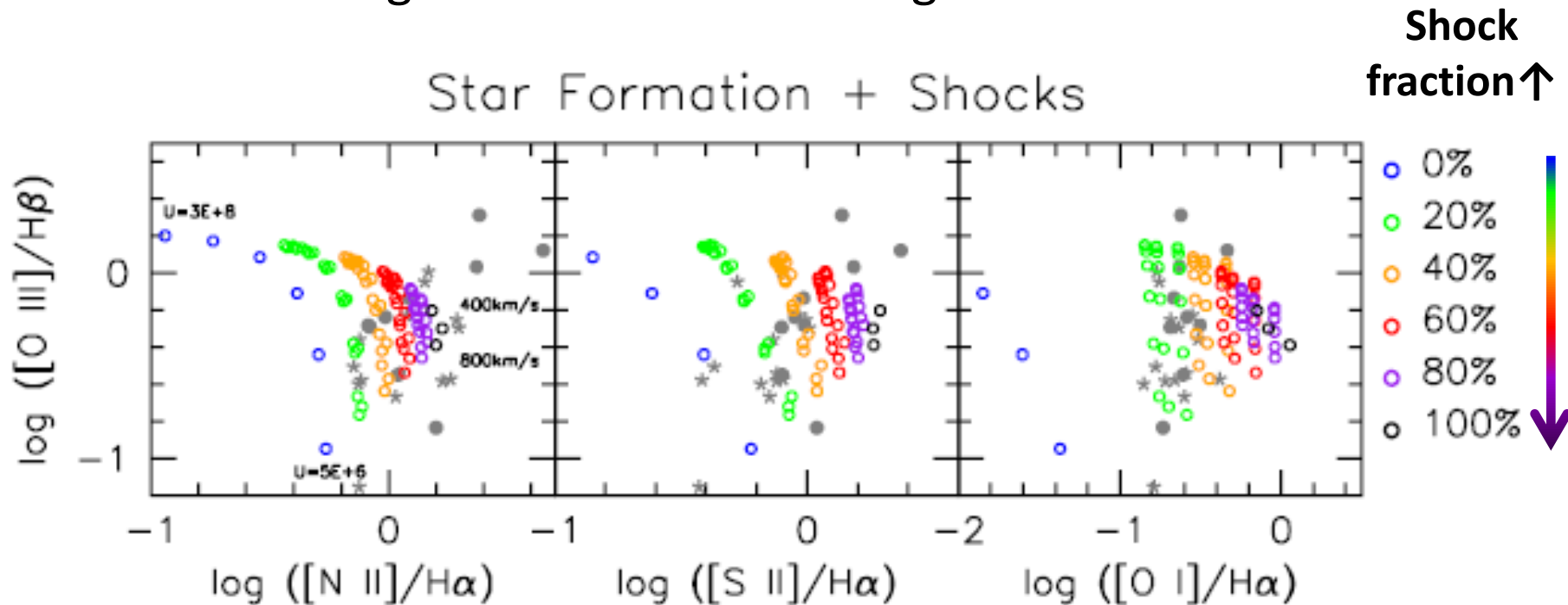
SF + Cooling plasma: HII region in a condensing plasma.



X線光度とcooling plasmaモデルを使って, 各輝線光度から hot ICM起源の輝線光度を除けば, 輝線比はSF領域に分布する??
→ 結果: 約半数の系が, SF領域に分布する様になった(-> OK?).
一方, まだLINER領域に分布する系もある(-> NO?).
→ 解釈: Shockの寄与もある? SF + Cooling plasmaではない?

Discussion2: composite models

SF + Shock: HII region in turbulent cooling flow.

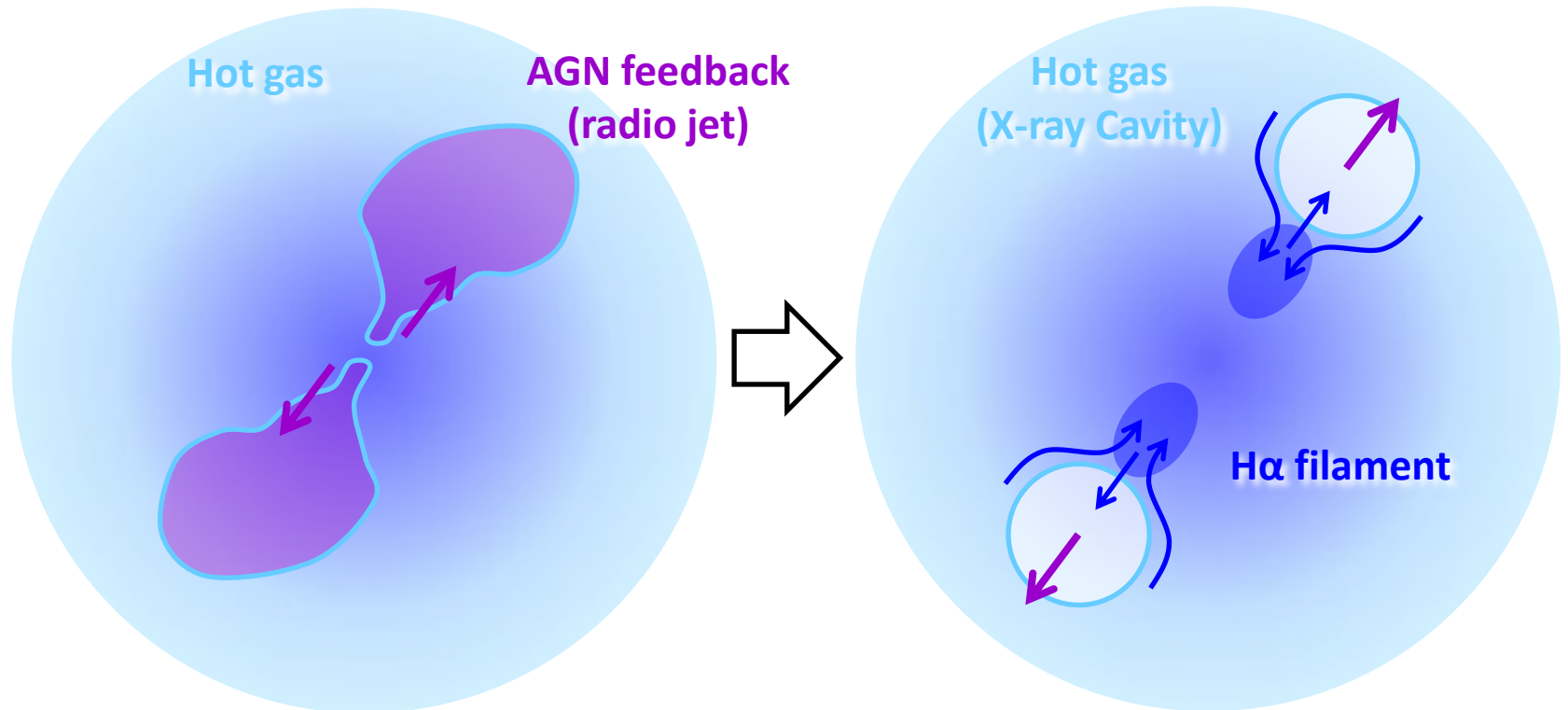


SF + Shockの場合, shockの寄与は0~40%.

SF + Cooling plasma+ Shockの場合, shockの寄与は0~20%.

Discussion3: The origin of the filaments

ICM trails buoyant bubbles

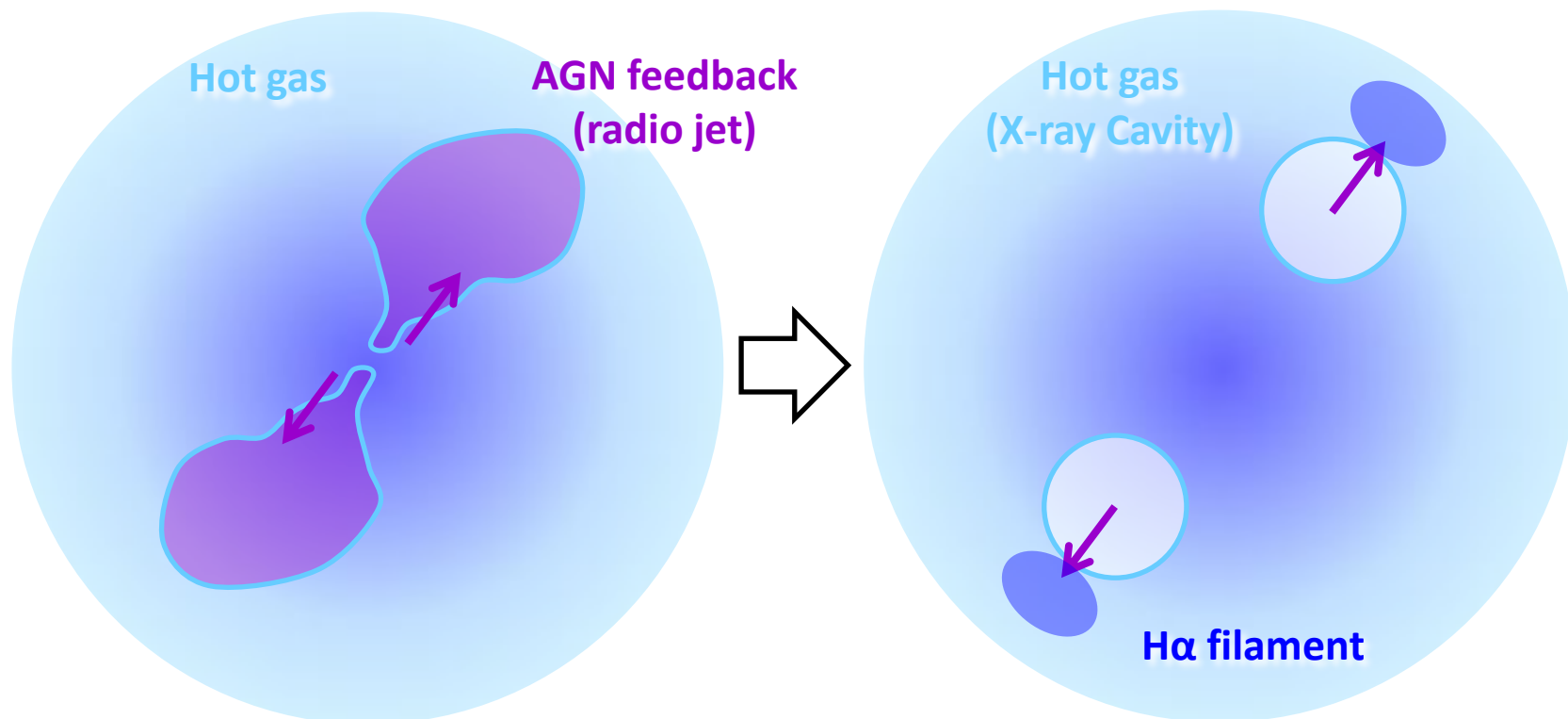


AGNがradio jetを噴射 → X-ray cavityの形成 → 浮力が作用 → CavityがICM内を上昇.
Cavityの後方に, ICMが集まる → H α filament形成.

→ 観測提案: Cavityとfilamentの位置関係, 速度場を調べよ!

Discussion3: The origin of the filaments

ICM is uplifted by buoyant bubbles

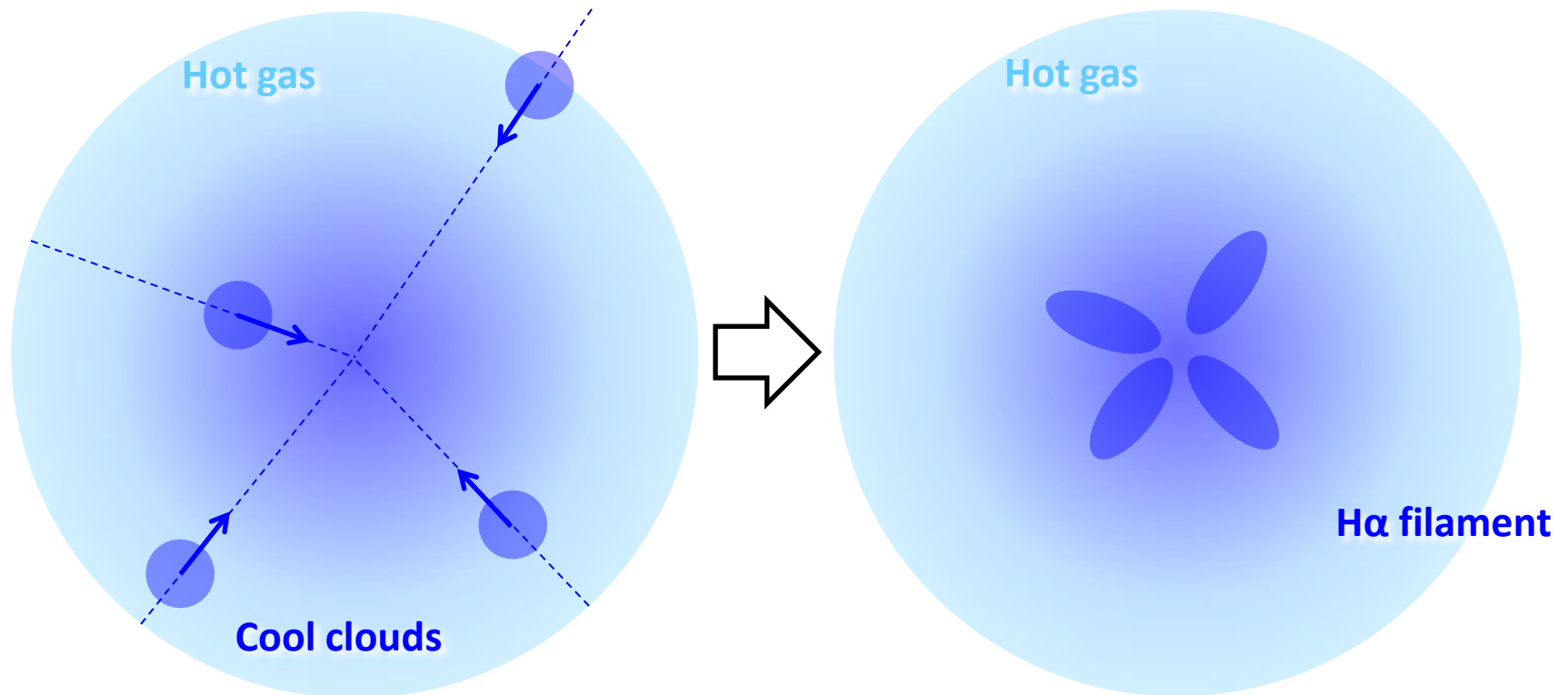


AGNがradio jetを噴射 → X-ray cavityの形成 → 浮力が作用 → CavityがICM内を上昇.
Cavityの前方に, ICMが集まる → H α filament形成.

→ 観測提案: Cavityとfilamentの位置関係, 速度場を調べよ!

Discussion3: The origin of the filaments

Free falling cool clouds



外からcool cloudsがFF $\rightarrow$ ICMにぶち当たり減速 $\rightarrow$ 重力が支配的になり再加速.
 $\rightarrow$ H α filament形成.

$\rightarrow$ 特に, 観測予言なし.

Summary:

- Cool core cluster中心のBCG nuclei/H α filamentに対し, long-slit分光観測を行い, 輝線flux, 相対速度, 速度幅等を取得した. そして, X線, H α 撮像データと合わせて, H α filamentの物理を調査.

- **相対速度場:** Extended filament $\rightarrow$ flat(~ 300 km/s) & smooth.

相対速度場: Compact filament $\rightarrow$ rotate-like.

- **速度場:** BCGから離れるに従って, filamentのFWHMは狭くなる.

- **輝線診断結果:** SF + Cooling plasma modelも可.

$\rightarrow$ 輝線比を再現できる系もある.

$\rightarrow$ しかし, やや低階輝線比を低く見積もってしまう.

一つの電離モデルだけでは,
輝線比は説明できない.

輝線診断結果: SF + Shock modelがベスト.

$\rightarrow$ 輝線比を説明できる. Shock fraction=0 $\sim$ 40%.

$\rightarrow$ 輝線のFWHM ~ 200 km/sと $V_{\text{shock}}=100\sim 400$ km/sは整合する.

- **Filamentの起源:** Buoyant bubbleによるICMの引きずり, 押し上げ? Cool ICM cloudの落下?