

# 論文内容の要旨

## 論文題目

An X-ray study of cluster vicinities and observational constraints on the warm-hot intergalactic medium

銀河団周辺部の X 線観測による中高温銀河間物質の研究

氏名 竹井 洋

## 1 近傍宇宙のバリオンの大半を占める中高温銀河間物質

WMAP 衛星をはじめとする近年の遠方宇宙の観測から、宇宙の描像が次々と明らかにされてきた。宇宙のエネルギー密度の  $\sim 70\%$  は真空のエネルギーが占め、残る  $30\%$  のうち  $8$  割以上を非バリオンのダークマターが占める。“普通の物質”であるバリオン（陽子、中性子など）は宇宙の  $4\%$  にすぎない — という描像、いわゆる  $\Lambda$ CDM モデルが宇宙を記述する標準モデルとして定着しつつある。すなわち、宇宙の  $96\%$  は直接観測にかかっていない“ダーク”なものなのである。それらに加え、残る  $4\%$  を占めるバリオンですら、約半分は未だ現在の宇宙で観測されていない。いわばダーク（ミッシング）バリオンなのである。

この「ミッシングバリオン問題」の解は、未だ観測されていない中高温銀河間物質（Warm-hot intergalactic medium; 以降 WHIM と呼ぶ）だと言われている。 $\Lambda$ CDM モデルは、宇宙の構造が階層的に — 星など密度の高く小さいものから先に、銀河団など密度が薄い大きなものは後に — 形成されると予想する。このモデルによると、近傍宇宙では銀河団よりも密度の薄いガスが重力収縮しながら徐々に加熱され、温度  $10^{6-7}$  K のフィラメントとして大規模構造を作っているという。そしてその質量は全バリオンの  $30-40\%$  を占める。密度が  $10^{-4}-10^{-6}$   $\text{cm}^{-3}$  と小さく、現存する検出器の感度では検出が難しいため、未だ観測されていないと考えられている。

大部分の質量を占めるとされる  $10^{6-7}$  K の WHIM の観測に有効な、WHIM 中の重元素による輝線、吸収線の X 線分光観測によって WHIM の検出が試みられてきた。しかし、吸収線の観測には非常に明るい背景天体が必要であるため、有意な観測は Nicastro らによる二例しかない。彼らはブレイザーが増光し全天で最も明るい天体の一つとなるのを狙って観測したが、それは非常に稀な例である。一方、輝線の観測報告は多数あるものの、銀河系内のガスの放射との区別ができないため WHIM のものだと断定するのが難しい。これらの難点に加えて、吸収線、輝線の両者を共に観測しない限り個々のフィラメントの密度、奥行きを決定することはできない。

## 2 本研究の戦略 — 銀河団周辺の WHIM の観測

これらの研究に対し、本博士論文では、銀河団近傍の WHIM に注目するという新しい視点にたつて研究を行った。この戦略の利点は、銀河団周辺は WHIM の密度が平均より高く、現存する検出器でも輝線、吸収線の両者の観測が期待されること、他の観測より温度の高い  $T > 10^6$  K の WHIM を観測できること、検出した WHIM と大規模構造との関連が明確であることである。柱密度が高いため、特別に明るい背景天体は必要ない。輝線、吸収線が共に観測されれば、WHIM の密度、奥行き、重元素組成比といった物理量に制限をつけられる。我々は、最も WHIM の検出可能性が高いと考えられる視線方向に伸びている銀河団 3 つを観測天体を選択した。かみのけ座銀河団、おとめ座銀河団、A2218 の三天体である。

かみのけ座銀河団、おとめ座銀河団の背後には、それぞれ X Comae、LBQS 1228+1116 という背景天体が存在し、輝線、吸収線の両者の観測が期待される。一方、A2218 は遠方 ( $z = 0.1756$ ) に存在し銀河系内の物質との区別が容易であることが期待される。前者二天体の観測は回折格子による点源の精密分光と CCD による広がった天体の撮像分光が同時に行える *XMM-Newton* 衛星で行い、A2218 の観測は、広がった天体の  $E < 1$  keV のエネルギー帯で過去最高の分光性能を持つずく衛星で行った。

## 3 観測結果 — 銀河団周辺の WHIM

### 3.1 かみのけ座銀河団周辺

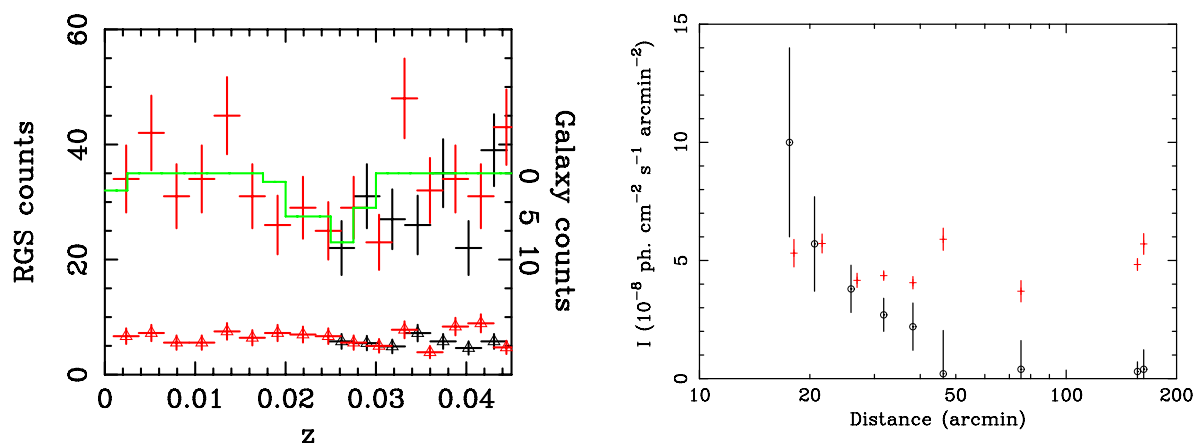


Figure 1: 左: X Comae のスペクトル。Ne IX 吸収線を仮定して波長を赤方偏移に変換。黒、赤の十字 (+) は 2 つの RGS 検出器に対応。三角 ( $\Delta$ ) はバックグラウンド。緑の線は X Comae 周辺の銀河の速度分布を逆向きに示したもの。銀河の分布に対応した波長に吸収線を発見。右: かみのけ座銀河団周辺の放射の Ne IX 強度 (黒丸  $\circ$ )、O VII 強度 (赤十字 +) とかみのけ座銀河団からの距離との相関。O VII 輝線の強度は銀河団からの距離によらずほとんど変わらないが、Ne IX 輝線の強度は銀河団に近づくほど増えている。吸収、放射の両者とも  $3 - 4 \times 10^6$  K の WHIM の存在を示唆している。

我々は、X Comae のスペクトル中に、赤方偏移した Ne IX の吸収線を  $2.6\sigma$  の有意性で検出した (図 1 左)。その赤方偏移は X Comae から 15 分角以内の銀河の赤方偏移の平均値と一致していた。同じ赤方偏移に Ne X、O VII、O VIII の吸収線の兆候もあり、これらを Ne IX に足し合わせると統計的な有意性は  $3.3\sigma$  に達した。一方、X Comae 周辺の広がった放射のスペクトルに  $\sim 9\sigma$  の有意性で Ne IX 輝線が検出された (図 1 右)。その強度がかみのけ座銀河団の中心に向かって大きくなることから、その大部分は我々の銀河系内ではなく、かみのけ座銀河団周辺に存在すると考えられる。これらの観測結果からかみのけ座銀河団周辺に Ne IX を含む中高温物質が存在すると結論づけた。

吸収線の柱密度は  $N_{\text{NeIX}} = 4.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  と、銀河系周辺に比べて一桁程度大きい。このことは銀河団近傍、すなわち大規模構造に沿った大量の WHIM の存在を示唆している。水素数密度  $n_{\text{H}}$ 、奥行き  $L$ 、Ne 組成比を  $Z$  とおくと、一様分布を仮定して、吸収線の柱密度は  $N_{\text{ion}} \propto n_{\text{H}} Z L$ 、と書け、放射強度からは、 $Z n_{\text{H}}^2 L$  が決定できる。これらを連立することで  $n_{\text{H}}$  と  $ZL$  を  $n_{\text{H}} = 2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$ 、 $ZL = 4.1 \text{ Mpc} Z_{\text{ISM}}$  と決定した。ただし  $Z_{\text{ISM}}$  は星間物質の重元素組成比である。奥行きと重元素組成比に相関はあるものの  $n_{\text{H}}$  を他の物理量に依存することなく決定した。

### 3.2 おとめ座銀河団周辺

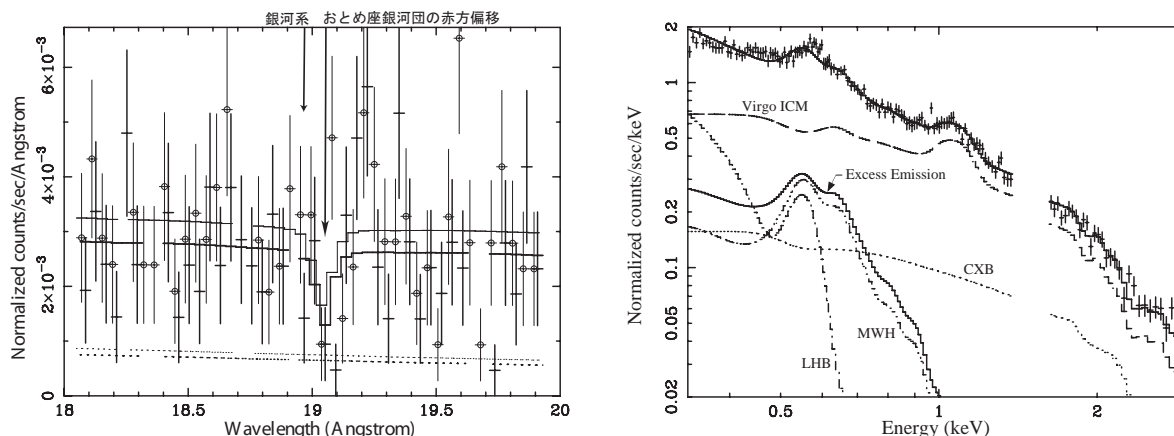


Figure 2: 左: LBQS 1228+1116 のスペクトル。銀河団近傍の OVIII 吸収線を発見。右: おとめ座銀河団周辺の広がった放射のスペクトル。モデルフィットに加えた各要素も表示している。銀河団の高温ガス (Virgo ICM) や平均的なバックグラウンド (CXB, MWH, LHB) に加えてもう一つ中高温 (0.2 keV) の熱的放射を加えなければスペクトルを再現しない。

LBQS 1228+1116 のスペクトル中には銀河団の赤方偏移 ( $z = 0.004$ ) に O VIII 吸収線が存在し (図 2 左; 統計的有意性 96.4%)、その周辺のスペクトルからは、銀河団からの放射と平均的なバックグラウンドでは説明できない中高温成分 (0.2 keV) の放射を検出した (図 2 右)。ここで検出された O VIII 吸収線の柱密度  $N_{\text{OVIII}} = 6.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  も銀河系周辺より一桁大きく、かみのけ座銀河団と同様の視線方向に延びた WHIM のフィラメントの存在を示した。放射成分については銀河系内起源であることを完全には棄却できず、この放射強度は上限値だと考えられる。それでも、 $n_{\text{H}} < 3.6 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$ 、 $ZL > 3.1 \text{ Mpc} Z_{\text{ISM}}$  と制限をつけた。

### 3.3 A2218 周辺

すざく衛星で A2218 周辺の広がった放射を観測したところ、 $\sim 0.3 \text{ keV}$  の中高温ガスの兆候が得られた。WHIM からの放射と銀河系内の放射のスペクトルは似ているため、我々は、系内放射が極大に近い  $1^\circ$ 、 $2^\circ$  離れた領域もあわせて観測し、系内ガスの放射強度を制限した。そして、系内放射と銀河団周辺のスペクトルを同時フィットしたところ系外中高温ガスの統計的有意性は 99.98% に及んだ。観測された放射強度はおとめ座、かみのけ座の両銀河団の観測から予想される放射強度と誤差の範囲で一致していた。しかし、この有意性や放射強度は検出器の較正に強く依存する。すざく衛星は打ち上げからの日が浅く、検出器の応答の不定性を考慮すると WHIM からの放射を検出したと結論づけることはできないだろう。

## 4 総合的考察

我々は3つの銀河団周辺を観測し、その全てにおいて付随する WHIM を検出した。このことは、銀河団の周辺には普遍的に WHIM が存在することを示唆している。観測された WHIM の温度は他の観測より高く、この温度の WHIM の観測は我々が初めて行ったと言える。我々は、「全ての銀河団に同程度の密度、サイズ、重元素組成比の WHIM が付随し、我々の観測した WHIM は (偶然) 視線方向に沿って存在しているものだ」という仮定のもと、個々の銀河団の観測を超えて WHIM の物理量を制限することを試みた。奥行き、そして質量  $M_{\text{WHIM}}$  を決めるには、個々の銀河団の観測では決まらない二つの free parameter  $Z$  (もしくは  $L$ ) と  $R_{\text{WHIM}}$  を決める必要がある。ただし、WHIM を半径  $R_{\text{WHIM}}$ 、奥行き  $L$  の円柱だと仮定している。ここで、 $M_{\text{WHIM}}$  は

$$M_{\text{WHIM}} \propto R_{\text{WHIM}}^2 L \propto R_{\text{WHIM}}^2 Z^{-1} \propto \left( \frac{R_{\text{WHIM}}}{L} \right)^2 Z^{-3} \quad (1)$$

という依存性をもつ。我々は物理量に以下のように物理量に制限をつけた。

### 1. $L/R_{\text{WHIM}} < 10$

おとめ座、かみのけ座のような近傍銀河団は18個発見されている ( $z < 0.03$ ;  $kT > 2$  keV のもの)。これら18銀河団のうち少なくとも2つ (おとめ座、かみのけ座) は、銀河の分布や我々の WHIM の観測から視線方向に延びたフィラメントの存在を示している。もし  $L/R_{\text{WHIM}} > 10$  ならば、2つ以上のフィラメントが視線方向を向く可能性が5%を切る。そこで我々は  $L/R_{\text{WHIM}} < 10$  を制限とした。このことはおとめ座、かみのけ座の銀河の視線方向の広がりとその垂直方向の広がりの5倍程度であることとも矛盾しない。

### 2. $L \gtrsim 6$ Mpc; $R_{\text{WHIM}} \gtrsim 0.6$ Mpc; $M_{\text{WHIM}} \gtrsim 9.3 \times 10^{12} M_{\odot}$ ; $\Omega_{\text{WHIM}} \gtrsim 0.02\%$

WHIM の重元素組成比は銀河団の重元素組成比  $Z \sim 0.5 Z_{\text{ISM}}$  を超えないだろうと予想される。この制限を使うと  $ZL$  が観測で求まっていることから  $L$  の最小値が推定できる。さらに1. の関係を使うことで  $R_{\text{WHIM}}$ 、 $M_{\text{WHIM}}$ 、バリオン密度  $\Omega_{\text{WHIM}}$  の最小値が求まる。

### 3. $Z \gtrsim 0.1 Z_{\text{ISM}}$

$ZL$  が観測で求まっていること、 $L/R_{\text{WHIM}}$  の最小値が求まっていることから、 $Z$  を固定した場合の  $\Omega_{\text{WHIM}}$  の最小値が計算できる。この最小値は総バリオン量  $\Omega_b$  より小さい必要がある。このことから  $Z \gtrsim 0.1 Z_{\text{ISM}}$  という制限がつく。これは WHIM の重元素組成比に対する世界で初めての観測からの制限である。

我々が求めた物理量は数値シミュレーションの予想と矛盾するものではない。観測からシミュレーションに強い制限を加えるには、より高い統計のデータを得ること、銀河団周辺の観測数を増やすこと、が必要である。将来の衛星計画によってそれは可能になるだろう。私の研究は銀河団周辺の WHIM を探査すること、輝線と吸収線を共に観測することの有効性と重要性を実証した先駆的な計画であり、その方法を確立したという意味でも有意義なものである。

## 5 まとめ

我々は視線方向に延びたフィラメントが期待されていた3つの銀河団、かみのけ座銀河団、おとめ座銀河団、A2218の周辺部から WHIM を探査し、前者2つから WHIM を検出し、A2218からも WHIM の兆候を得た。このことは、銀河団の周辺には普遍的に WHIM が存在することを示唆している。我々はさらに、かみのけ座銀河団、おとめ座銀河団で観測された WHIM と同様の WHIM が全ての銀河団に付随していると仮定し、WHIM の物理量を考察した。その結果、 $L/R_{\text{WHIM}} < 10$ 、 $L \gtrsim 6$  Mpc、 $R_{\text{WHIM}} \gtrsim 0.6$  Mpc、 $M_{\text{WHIM}} \gtrsim 9.3 \times 10^{12} M_{\odot}$ 、 $\Omega_{\text{WHIM}} \gtrsim 0.02\%$ 、 $Z \gtrsim 0.1 Z_{\text{ISM}}$  という制限を得た。本研究は  $T > 2 \times 10^6$  K の WHIM に対する初の観測的研究であり、WHIM の  $n_{\text{H}}$ 、 $L$ 、 $Z$  への制限をつけた世界初の研究でもある。