

# 宇宙の構造に迫る中高温銀河間物質の探索



竹井 洋

〈JAXA 宇宙科学研究本部 〒229-8510 相模原市由野台 3-1-1,  
SRON, Sorbonnelaan 2, 3584 CA Utrecht, The Netherlands〉  
e-mail: takei@astro.isas.jaxa.jp/y.takei@sron.nl

中高温銀河間物質 (warm-hot intergalactic medium; WHIM) は、近傍宇宙 (赤方偏移  $z < 1$ ) において全バリオンの半数程度を占めるといわれながら現在も未確認の物質である。中高温銀河間物質は宇宙の真の構造を探る最も重要な手がかりの一つだと考えられるため、われわれを含む多くのグループによって観測が試みられている。しかし、観測的にはその存在が明らかになっているとは言いがたい。われわれは感度の高い検出器を用い、特に銀河近傍に注目するユニークな方法で中高温銀河間物質に迫ってきた。本稿ではわれわれの観測を含めこれまでの観測をレビューするとともに、今後の観測の展望を記す。

## 1. 中高温銀河間物質とミッシングバリオン

WMAP による宇宙マイクロ波背景放射の観測により、宇宙論は「精密科学」になったと言われる。「桁があていばよし。2, 3 倍の誤差があることもしばしば」と言われる天文学において、宇宙の年齢が 137 億年と精度よく (誤差 1% 程度) 決められたのは衝撃であった。しかし、宇宙論のすべての謎が解かれたわけではない。宇宙の 96% を占めているのはダークエネルギー、ダークマターであり、その正体はいまだ不明である。陽子、中性子など「普通の」物質 (バリオン) は宇宙の 4% を占めるにすぎない。そのうえ、このバリオンですら近傍宇宙 ( $z < 1$ ) においては過半数が観測にかかっていない (たとえば文献 2)。この謎は「ミッシングバリオン (あるいはダークバリオン) 問題」と呼ばれ、ダークマター、ダークエネルギーと並ぶ、宇宙論に残された大きな謎の一

つである。宇宙の 4% を占めるバリオンの半分程度というところ 2-3% である。しかし、たかが 2-3% と思うなかれ。人類が長い歴史のなかで観測してきた星や銀河、銀河団などはバリオンの姿である。生物を形成しているのもバリオンである。宇宙の本当の姿を知るには残る半分のバリオンを観測するのが不可欠であろう。現在の標準的な宇宙論モデル ( $\Lambda$ CDM モデル) に基づいた数値シミュレーションによると、ミッシングバリオンの大多数は数十から数百万度の温度の希薄な銀河間物質であるという (たとえば文献 3)。この銀河間物質は「中高温銀河間物質 (warm-hot intergalactic medium; WHIM)」と呼ばれている。この温度の希薄なガスを観測するのは困難であり、そのため、中高温銀河間物質はこれまでの観測では検出できないダークな状態で存在しているというのがシミュレーションの結果である。なお、「中高温 (warm-hot)」という単語は、強い X 線を放出する hot gas (数億度程度) ほど熱くはなく、ライマン

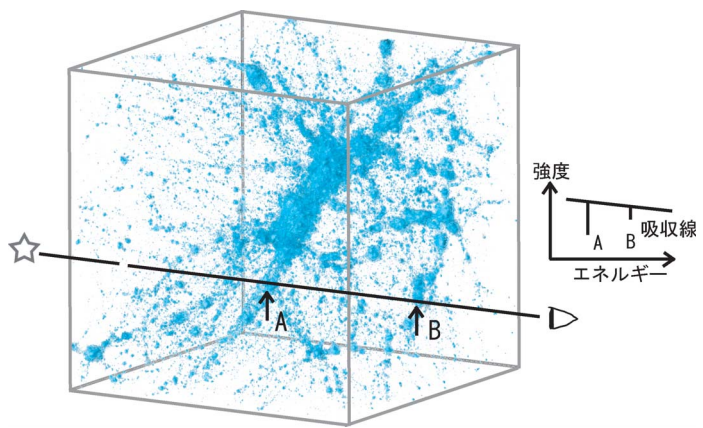


図1 中高温銀河間物質を吸収線で観測する場合の模式図。遠方の明るい天体のスペクトル中に、中高温銀河間物質からの吸収線を探す。赤方偏移によって中高温銀河間物質までの距離がわかる。青図はシミュレーションで得られた質量分布 (1 辺  $50 h_{70}^{-1}$  Mpc; 河原 創氏提供)。

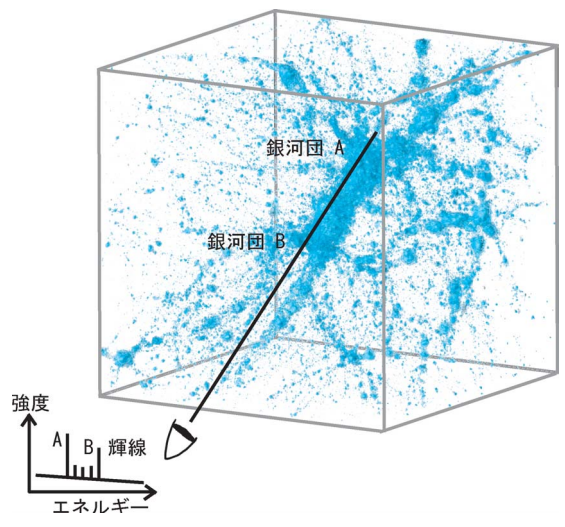


図2 中高温銀河間物質を輝線で観測する場合の模式図。銀河団周辺等密度の濃い部分を観測することで中高温銀河間物質からの輝線を狙う。青図は図1と同様。

$\alpha$  吸収線で観測されるような warm gas ( $< 10$  万度) よりも温度が高いためにつけられたものである。

中高温銀河間物質は3次元のクモの巣状の宇宙の大規模構造フィラメントに沿って分布すると考えられている。その構造はダークマターによる重

力場により作られるものであり、中高温銀河間物質の分布を知ることはダークマターの分布を明らかにすることにほかならない。図1, 2の青図はシミュレーションで得られた質量分布である。図2に矢印で示した最も密度の高い部分は銀河団に相当する。それ以外の、銀河団を結ぶような構造やより密度の小さい部分は中高温銀河間物質が占めていると考えられているのである。そこで、中高温銀河間物質を検出、観測することはミッシングバリオン問題を解決するだけでなく、宇宙の構造を知るうえでも欠かせない役割をもつ。

それではどうすれば中高温銀河間物質を観測できるのだろうか。この温度では、水素やヘリウムは完全に電離してしまい、観測が困難である。一方、酸素、ネオンなどの重元素は、イオンにはなるものの、二つ程度の電子が残る。このようなイオンが存在すると、特徴的なエネルギー(波長)に輝線や吸収線が観測されるため、これらのイオンからの輝線、吸収線が中高温銀河間物質の手がかりとなる。イオンの電離状態は温度に敏感であるため、それらのイオンの存在は中高温物質が存在する証拠だと言える。特に観測が期待されるのは OVI ( $O^{5+}$ ), OVII ( $O^{6+}$ ), NeIX ( $Ne^{8+}$ ) などの

イオンである。OVIの輝線/吸収線は紫外光領域に、OVII, NeIXの輝線/吸収線はX線領域に存在するため、それらの波長での観測が重要である。また、輝線/吸収線のエネルギー(波長)から赤方偏移を求めることができれば、観測した中高温銀河間物質までの距離を知ることができる。

## 2. 吸収線による中高温銀河間物質探査の試み

図1のような場合を考える。明るい背景天体(星印)を観測したときに、視線方向に中高温銀河間物質が存在すれば、背景天体のスペクトル中に、中高温銀河間物質中のイオンに特徴的な吸収が見えるだろう。これが、吸収線を用いた中高温銀河間物質の探査方法である。吸収の深さは(吸収線が飽和していない場合)イオンの柱密度に比例するため、吸収量から中高温物質の存在量の手がかりが得られる。

この方法により、ハッブル宇宙望遠鏡やFUSE(Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer)衛星で取得された40以上の天体の紫外光スペクトル中に、OVIの吸収線(1032.9 Åと1037.6 Å)が発見された。OVIは温度30万度程度のガスに含まれるため、これらのOVI吸収線は30万度程度の温度の中高温銀河間物質の証拠だと言える。多数のOVI吸収線が観測されているため統計的にバリオン量への寄与を計算することができる。その結果OVIを含むような温度十万度から数十万度程度の中高温銀河間物質でミッシングバリオンの1/10程度が説明できることがわかっている(たとえば文献4, 5)。

この温度の中高温銀河間物質の証拠が得られたことは重要なことであるが、言い換えるとOVIを含むような中高温銀河間物質はミッシングバリオンの1/10にしかすぎないとも言える。残る大多数のミッシングバリオンは、より高温(数百万度)のOVIIやNeIXを含むような中高温銀河間物質である可能性が高い。それらのイオンはX

線のエネルギー帯に輝線/吸収線を作るので、X線による観測が重要となる。しかし、X線の分光器(現在稼働中の検出器の中で最も分光性能が高いのは、Chanda, XMM-Newton衛星搭載の回折格子分光器)の感度はFUSEやハッブル宇宙望遠鏡より低い。そのため、現存する検出器で紫外光と同様に中高温銀河間物質を検出するには、全天で1, 2を争うような明るい背景天体を見る必要があるのが難点である。

NicastroらはMrk421というブレイザーに注目した<sup>6)</sup>。この天体は全天でも有数の明るさを持ち、時間変動が激しい。彼らは明るさが極大になったときを狙ってMrk421をChandra衛星の回折格子検出器LETGで観測し、スペクトルの中高温銀河間物質による吸収線を探したのだ。その結果、二つの赤方偏移(0.011と0.027)にOVII, NVIIの、赤方偏移0.027にはさらにNVI, CVIの吸収線が発見された。複数の吸収線が偶然同時に観測される可能性は低い。彼らが報告したこれらの吸収線の有意性はそれぞれ5.8 $\sigma$ , 8.9 $\sigma$ という高いものであった。また、この結果から計算される宇宙のバリオン密度は全エネルギー2.7 $^{+3.8}_{-1.9}$ %であった。この値はミッシングバリオンのすべてが数百万度の中高温銀河間物質で説明できることを示唆している。この結果は、(数百万度の)中高温銀河間物質の初の確固たる観測だと考えられた。

しかし、同じ天体をXMM-Newtonで観測した際にはこれらの吸収線は確認されなかった<sup>7)</sup>。XMM-Newtonのデータのほうが統計がよいため、Nicastroらの結果で吸収線構造が見えたのは統計のいたずらであろうと考えられるようになった。また、Kaastraらは、Nicastroらのデータの有意性をモンテカルロシミュレーションで検証し、統計的にも94%程度の有意性しかないという結論を得た(1.9 $\sigma$ 相当)<sup>8)</sup>。Nicastroたちが吸収線を探した波長範囲は回折格子の波長決定精度に比べて100倍程度大きい。これは「ある波長に吸収線

が存在するか」という試行をおよそ 100 回行えることに相当する。そのため、ある一つの波長に吸収線が存在する確率がものすごく低くても、「どこかの波長」(どこかの赤方偏移)にたまたま吸収線が存在する確率は 6% 程度存在してしまうというのが Kaastra らの主張の意味するところである。これらの反論を考慮すると、Nicastro らの観測結果は「確固たる」ものではないというのが現在多くの研究者が考えるところである。

### 3. 輝線による中高温銀河間物質探査の試み

中高温銀河間物質中の重元素による輝線放射を直接とらえようという観測も行われている。輝線の強度は密度の 2 乗に比例するため、中高温銀河間物質の密度の濃い領域を狙うのが効果的である。図 2 に示すように、密度が最も高いのは銀河団近傍である。銀河団ガスそのもの(ピリアル半径の内部)の温度は中高温銀河間物質より 1 桁程度高いが、その外周には中高温銀河間物質が存在すると考えられているからだ。この中高温銀河間物質は、銀河団の重力ポテンシャルにまさに落ち込んで加熱されている、密度の高いものである。観測によって得られるデータは視線方向に積分したものなので、奥行き方向にフィラメントが延びていけばさらに強い輝線が期待される。ただし、回折格子ではこのような広がった放射の観測はできないため、観測は CCD 検出器を用いて行うこととなる。酸素輝線のエネルギーにおける X 線 CCD 検出器の分光能力は回折格子ほど高くないため、CCD 検出器では近傍銀河団の赤方偏移を決定できないことが難点である。

Kaastra らは多数の銀河団を解析し、そのうち三つの銀河団に銀河団高温ガスだけでは説明できない OVII, OVIII 輝線を観測した。そして、これらが中高温銀河間物質によるものだろうと報告した<sup>9)</sup>。また、Finoguenov らも、かみのけ座銀河団周辺の Coma-11 領域に、銀河団高温ガスでは説

明できない強度の OVII, OVIII 輝線を観測した。彼らは 20 Mpc 広がった中高温銀河間物質のフィラメントがかみのけ座銀河団の前方にあるのだと解釈した<sup>10)</sup>。

しかし、これらの観測も反論の対象になっている(たとえば文献 11)。酸素輝線のエネルギー領域には検出器起源の酸素の構造があり較正が難しい。その不定性が輝線のような構造を作り出す可能性がある。また、われわれの銀河系にも数百万度のガスが存在し、OVII, OVIII の輝線を放射する。銀河系の OVII, OVIII 輝線強度は方向ごとに異なるため、この見積もりを間違えると OVII, OVIII 輝線の強度を誤って測定することになってしまう。もし CCD 検出器に銀河系と銀河団の赤方偏移を充分区別できるだけの分光能力があれば、こういった不定性はなくなるのだが、観測された銀河団の赤方偏移は 0.06 以下でありそれも難しい。さらに、銀河団内に中高温物質が共存できるというシミュレーションもあり、観測された酸素輝線の起源は諸説残っている<sup>12)</sup>。

### 4. われわれの観測 1: 吸収と輝線を同時にとらえる

以上のように、中高温銀河間物質の検出だと考えられる観測結果が次々に登場した一方で、それらの観測に対する反論も相次いでいる。現在のところ中高温銀河間物質の確固たる観測が存在するとはいえない。

われわれは別の観点から観測天体を選び、中高温銀河間物質の検出を目指してきた。それは「銀河団の背景にいる明るいクェーサー」である。このクェーサーの(回折格子)スペクトル中に銀河団の赤方偏移の吸収線が発見されれば、それは銀河団周辺のフィラメントによるものだと言える。銀河団の赤方偏移は他の観測からすでにわかっている。そこで、Nicastro らのような統計的問題に悩まされることがないという特徴をもつ。銀河団周辺の中高温銀河間物質の密度は高いため、

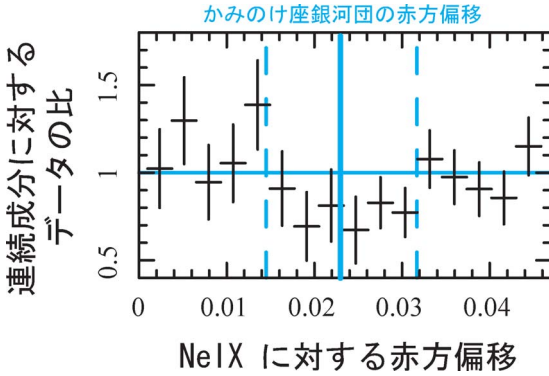


図3 かみのけ座銀河団後方のクェーサーのスペクトル。NeIX吸収線付近を拡大し、横軸を赤方偏移に直している。青い実線はかみのけ座銀河団の赤方偏移を表す。かみのけ座銀河団付近（青い破線の間）に吸収が見える。

クェーサーの明るさがそこそこであっても有意な吸収が見えるかもしれない。もちろん、このような天体はそう多くはないが、われわれは多数の銀河団を吟味し、おとめ座銀河団、かみのけ座銀河団の背景に比較的明るいクェーサーが存在することを確認した。両銀河団はメンバー銀河の位置分布から、奥行き方向に伸びた構造が示唆されているという利点をもつ。奥行き方向に伸びたフィラメントが銀河団に付随している可能性を示しており、もしそうならば大きな柱密度が期待される。

これらの観測では回折格子によるクェーサースペクトルだけではなく、クェーサーなどの点源を除いたあとの、銀河団周辺部の放射の CCD スペクトルも同時に取得できる。CCD スペクトル中には中高温銀河間物質の輝線放射が観測される可能性があり、「吸収と輝線を同時にとらえる」という他の観測にはない利点もある。単純なモデル（一様分布、一温度など）を仮定すると、吸収線の深さは「イオンの密度×奥行き長さ」、輝線強度は「電子の密度×イオンの密度×奥行き長さ」に比例する。そこで、もし吸収線の深さと輝線強度の両者が決定できれば、「電子の密度」と「イオンの密度×奥行き長さ」をそれぞれ決定できることに

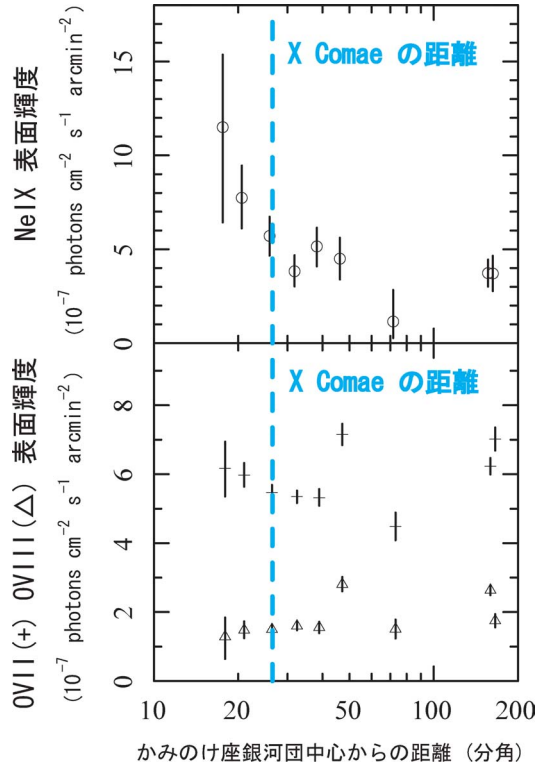


図4 かみのけ座銀河団周辺の NeIX, OVII, OVIII 輝線強度のプロファイル。OVII, OVIII の強度は銀河団中心からの距離によらずほとんど一定なのに対し、NeIX の強度は中心に近づくほど強くなっている。OVII, OVIII の放射は主に銀河系起源であり、NeIX には銀河団近傍の成分が存在すると考えられる。

なる。これは輝線、吸収線の両者を観測することで初めて得られる知見である。

われわれは XMM-Newton 衛星で両銀河団を観測した。回折格子により背景天体のスペクトルをとらえ、CCD によりその天体周辺の広がった放射のスペクトルを取得した。ここでは観測時間が長く (452 ks) より統計の高いデータを得たかみのけ座銀河団周辺について詳細に記す。

かみのけ座銀河団の背景天体 X Comae の回折格子スペクトルは、全体としてはべき型関数で表せるものだった。もし、かみのけ座銀河団周辺に中高温銀河間物質が存在すれば、対応する赤方偏

移)に電離した酸素やネオンの吸収線が見つかるはずである。われわれは OVII, OVIII, NeIX, NeX といった吸収線のエネルギー付近を詳細に調べた。

得られたスペクトルの NeIX 吸収線近傍の拡大図を図 3 に示す。横軸は赤方偏移到直している。ちょうどかみのけ座銀河団の赤方偏移のあたりに吸収構造が確認できる。この吸収線の統計的有意性は 99.2% であった。また、有意性は 90% 未満であるものの OVII, NeX, OVIII にも吸収の兆候が示唆された。多くの中高温銀河間物質の検出報告に反論が出たこともあり、 $5\sigma$  程度の有意性がないと「絶対確実」な観測だとはみなされない。そういう意味では 99.2% ( $2.7\sigma$  相当) は十分に有意だとは言えない。ともあれ、長時間の観測をした甲斐があり NeIX の吸収構造を発見することができた。これは大きな成果だと言える。

X Comae 周辺の CCD スペクトルには銀河団高温プラズマからの放射に加えて OVII, OVIII, NeIX の輝線放射が見られた。銀河団ガスはこれらの放射を出すには温度が高すぎる。つまり、この輝線放射の起源は、われわれの銀河系周辺の中高温のガスからの放射、あるいはかみのけ座銀河団近辺の中高温ガスからの放射のどちらかだと考えられる。それらを区別するにはどうすればよいのだろうか。一つの指標は赤方偏移だが、かみのけ座銀河団の赤方偏移は 0.023 と小さいため CCD のエネルギー分解能では両者を区別するのは難しい。われわれは銀河団中心からの距離と輝線放射強度の相関を調べることで両者が区別できないかと考えた。その結果を図 4 に示す。横軸は銀河団中心からの距離、縦軸は OVII, OVIII, NeIX の輝線強度である。OVII, OVIII の強度は銀河団中心からの距離によらずおよそ一定であり、これは銀河系のガス起源だと考えられる。一方 NeIX の強度は銀河団中心にいくほど強くなっており、銀河系成分に加えて銀河団領域からの寄与があると言える。そのスケールは銀河団高温ガ

スと同程度であった。

NeIX の輝線、吸収線それぞれの有意性はそれほど高くなかったが、両者が見えたことは、NeIX を出すような中高温ガスがかみのけ座銀河団周辺に実際に存在していることを示していると言える。また、これらの吸収線、輝線の観測を組み合わせると中高温ガスの性質を調べたところ、温度 200 万度から 600 万度、密度  $(0.2-8) \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2}$  (宇宙の平均密度との比  $\delta$  に換算して  $10 < \delta < 400$ )、奥行き長さ 6 メガパーセク (1 パーセクは約 3 光年; Mpc) 以上という性質が得られた。統計誤差のため大きな制限はつけられていないが、この奥行き長さは銀河団のピリアル半径 (2.4 メガパーセク) より大きいと、中高温ガスは奥行き方向に広がっていると言える。これは、かみのけ座銀河団は奥行き方向に広がったフィラメントを伴う、という予想と一致するものである。なお、おとめ座銀河団周辺の同様の観測では有意性は 96.4% ( $2.1\sigma$  相当) だったものの OVIII 吸収線、輝線構造を観測し、同様の解析を行った。そして、 $\delta < 220$  という結果を得た。このように、われわれは中高温銀河間物質による輝線と吸収線の両者が観測できる天体を探し、有意性は低いものの両者を観測した。またそれらの観測結果を組み合わせることで奥行き長さと密度に制限をつけた。これらは世界で初めての成果である (詳細は文献 13, 14)。

### 5. われわれの観測 2: 「すぎく」衛星による観測

われわれのかみのけ座銀河団の観測や Nicastro らの Mrk 421 の観測は非常に観測時間の長いものであった。それらの観測でも吸収線の有意性はそれほど高くなかったということは、現存する回折格子による観測の困難を示している。それではほかによい観測はないのだろうか。CCD による近傍銀河団の観測は、銀河団周辺からの放射と銀河系の放射の赤方偏移の違いを区別できないとい

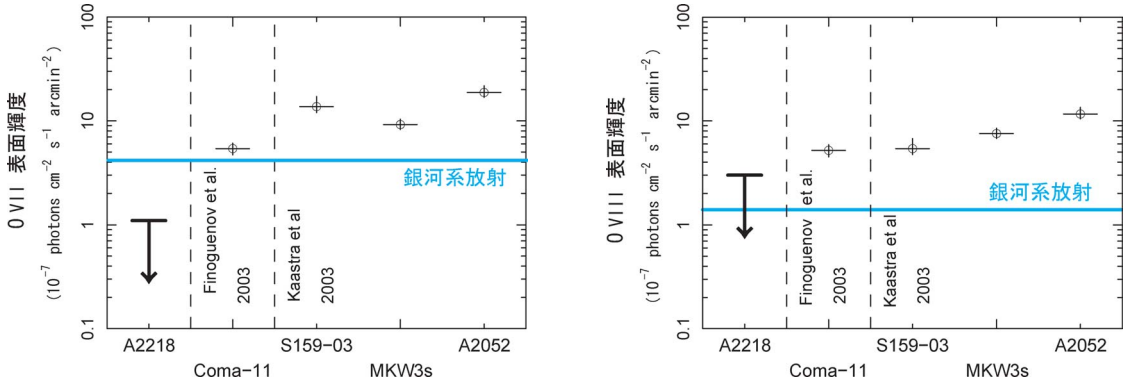


図5 A2218 近傍の OVII 輝線強度 (左), OVIII 輝線強度 (右) の上限値と他の観測との比較. 左から Coma-11<sup>10)</sup>, Sérsic 159-03, MKW 3S, A2052<sup>9)</sup>. 参考までに銀河系放射の強度も示す.

う困難があるものの、回折格子の観測を上回る統計が得られていた。銀河団の赤方偏移が大きければ CCD 検出器であっても赤方偏移を区別することができる。そこで、われわれは A2218 という赤方偏移 0.178 に存在する銀河団を観測し、その周辺部から中高温銀河間物質の放射を観測することを目指した<sup>15)</sup>。A2218 は重力レンズによる観測によって質量分布が視線方向にやや偏っていることが示唆されている。つまり、赤方偏移が高いという利点だけではなく視線方向に延びたフィラメントが示唆されるという利点ももつ。

観測には 1 keV 以下の輝線に対する検出感度が高い「すざく」衛星を用いた。「すざく」衛星は 2005 年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星である。中高温物質からの酸素輝線は 0.5 keV 程度に期待されるため、「すざく」衛星の利点が活かされる観測であった。

残念ながら、A2218 のスペクトルには赤方偏移した酸素の輝線は見つからず、上限値を得るにとどまった。しかし、この上限値を「中高温銀河間物質を検出した」という近傍銀河団の観測結果 (XMM-Newton 衛星による) と比べると、われわれの結果の観測精度の高さがわかる。図 5 にわれわれの結果と他の観測結果、および銀河系放射の酸素輝線強度を比較した。A2218 周辺の OVII,

OVIII 上限値 ( $2\sigma$  上限値) は、他の観測結果に比べて非常に小さい。これは赤方偏移の高い銀河団を選択し、検出感度の高い「すざく」衛星を用いた結果である。温度 0.2 keV の一様なプラズマを仮定して、A2218 周りの中高温ガスの密度の上限値を計算すると、宇宙の平均密度の 270 倍だと計算される ( $\delta < 270$ )。

図 6 にシミュレーションにより得られた  $\delta$  の

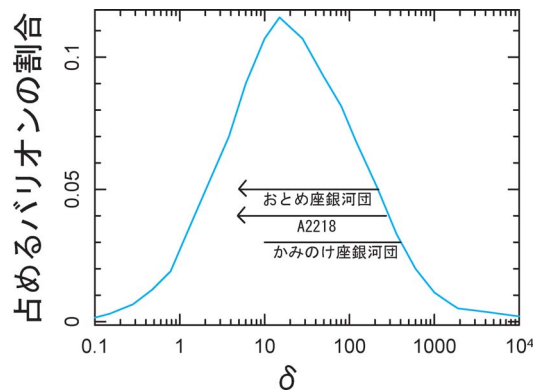


図6 われわれの観測のバリオンに対する感度。青線はシミュレーションによる各  $\delta$  のバリオンが占める割合の計算値<sup>16)</sup>。横線はわれわれの観測で求めた各銀河団の  $\delta$  の範囲、あるいは上限値。われわれの観測の感度は銀河団周辺の中高温銀河間物質を検出するレベルに達している。

分布（青線）を示す。シミュレーションによると大部分のバリオンは $\delta > 10$ で存在し、銀河団周辺のような密度の高い部分は $\delta = 100$ 以上が期待される<sup>16)</sup>。一方、われわれの観測からえられた $\delta$ の制限も図6に重ねて示した（黒線）。われわれの観測の感度は、それらの中高温銀河間物質を検出するレベルに達している。残念ながら現在の観測精度ではシミュレーションのモデルを制限するまでには至っていないが、このように精度のよい観測を続けていくことで観測からモデルを制限することが十分期待できる。

## 6. 今後の展望

21世紀が始まって数年間X線を用いた「中高温銀河間物質の検出報告」が数多くなされた。筆者は2004年頃「数多く中高温銀河間物質の検出報告が聞かれ、その存在は観測的にも明らかになったと言える。これから先はその物理量を精度よく求め、宇宙論モデルと比較する時代となる」と考えたものだった。翌2005年にAstro-E2衛星（現「すざく」衛星）の打ち上げが控えており、その衛星にはマイクロカロリメーターXRSという極低温で動作する精密分光検出器が搭載されていた。その分光能力はCCDの20倍にも及ぶため、中高温銀河間物質の研究を大きく発展させることが期待されたからだ。しかし、残念なことに機上での液体ヘリウム喪失によりXRSが天体を観測することはなかった。また、銀河系の放射や検出器の応答関数などの理解が深まってくるにつれ、これまでの検出報告に潜む疑問点が目立ってくるようになった。2007年現在、筆者は「X線による中高温銀河間物質の確固たる検出報告というのはいまだない」と考えている。これまでの報告の中に本当に中高温銀河間物質を観測しているものがあるかもしれない。しかし、誰もが納得するほどの観測結果だとは言えないのが現状である。

中高温銀河間物質の研究を劇的に進めるには、マイクロカロリメーターによる、きわめて高いエ

ネルギー分解能での分光観測が重要である。赤方偏移した酸素輝線を疑いなく検出できれば中高温銀河間物質の存在は確固たるものとなるからだ。日本のNeXT衛星など、現在計画されている世界の大型X線ミッションではほぼすべてマイクロカロリメーターの搭載が予定されており、中高温銀河間物質からの輝線の観測が期待される。さらに、広視野大有効面積（ $\sim 1$ 度四方、 $> 100 \text{ cm}^2$ ）のマイクロカロリメーター搭載ミッションでは図1, 2に示したようなクモの巣状の中高温銀河間物質の地図を描くことも可能となる。赤方偏移から中高温銀河間物質フィラメントまでの距離を知ることができるので、2次元ではなく3次元の地図を作ることができるという特徴がある。これは重力場の分布、ダークマターの分布の大きな手がかりとなるだろう。日本ではDIOS衛星<sup>17)</sup>という計画により、世界に先駆けて中高温銀河間物質の3次元マップの作成を描くことを目指している。シミュレーションを用いた中高温銀河間物質の検出可能性の調査、必要な検出器性能の評価、観測計画の最適化などについても吉川、河原、須藤らの日本の成果が多数あり<sup>18)-22)</sup>、実現に向けて奮闘している。ただし、このようなカロリメーター搭載ミッションのデータが得られるのは5年以上先のことである。それまでは回折格子やCCD検出器を用いた研究が主なものとなる。

現状で最も感度の高い観測はCCD検出器を用いた銀河団近傍の観測であろう。観測場所こそ銀河団近傍に限られるが、宇宙論モデルから期待される中高温銀河間物質の密度を検出できる精度が得られている。現在考えられているモデルが正しいならば観測する銀河団の数を増やしていけば必ず観測にかかるはずであり、一方、どの銀河団の近傍にも中高温銀河間物質起源の輝線が観測されなければ、モデルに再考を迫ることになろう。現在の中高温銀河間物質の観測的研究は、構造形成の理論モデルや宇宙論パラメーターに制限をつけるには至っていない。そのため、少しでも観測か



らモデルにフィードバックを与えられれば、それは大きな進展となる。そのような研究には、輝線への高い感度を誇る「すざく」衛星が力を発揮するだろうと期待される。

## 謝 辞

本研究の多くは筆者が修士/博士課程在籍時に満田和久教授（東京大学/宇宙研）の指導のもとに行われたものである。満田教授および藤本龍一助手（当時；現 金沢大学准教授）には、本研究に直接関係あることのみでなく、研究全般に関するあらゆることを指導していただきました。この場を借りて感謝いたします。両氏のほかにも国内外の多くの研究者の方々に有用なコメント、提案などをいただきながら研究を行って参りましたが、皆様方に感謝いたします。東京大学理学系研究科の河原 創氏には本稿の図を快く提供していただきました。感謝いたします。また、筆者は2004年から2006年まで日本学術振興会特別研究員として援助を受けておりました。この研究はその援助のもとなされたものです。

## 参 考 文 献

- 1) Spergel D. N., et al., 2003, ApJS 148, 175
- 2) Fukugita M., Hogan C. J., Peebles P. J. E., 1998, ApJ 503, 518
- 3) Cen R., Ostriker J. P., 2006, ApJ 650, 560
- 4) Tripp T. M., Savage B. D., Jenkins E. B., 2000, ApJ 534, L1
- 5) Danforth C. W., Shull J. M., 2005, ApJ 624, 555
- 6) Nicastro, F., et al., 2005, Nature 433, 495
- 7) Rasmussen A. P., Kahn S. M., Paerels F., den Herder J. W., Kaastra J. S., de Vries C., 2007, ApJ 656, 129
- 8) Kaastra J. S., Werner N., den Herder J. W., Paerels F. B. S., de Plaa J., Rasmussen A. P., de Vries C. P., 2006, ApJ 652, 189
- 9) Kaastra J. S., Lieu R., Tamura T., Paerels F. B. S., den Herder J. W., 2003, A&A 397, 445

- 10) Finoguenov A., Briel U. G., Henry J. P., 2003, A&A 410, 777
- 11) Bregman J. N., Lloyd-Davies E. J., 2006, ApJ 644, 167
- 12) Cheng L.-M., et al., 2005, A&A 431, 405
- 13) Fujimoto R., et al., 2004, PASJ 56, L29
- 14) Takei Y., Henry J. P., Finoguenov A., Mitsuda K., Tamura T., Fujimoto R., Briel U. G., 2007, ApJ 655, 831
- 15) Takei Y., et al., 2007, PASJ 59, S339
- 16) Dave', et al., 2001, ApJ 551, 473
- 17) Ohashi T., et al., 2006, Proc. of the SPIE, 6266, 62660G
- 18) Yoshikawa K., Taruya A., Jing Y. P., Suto Y., 2001, ApJ 558, 520
- 19) Yoshikawa K., Yamasaki N. Y., Suto Y., Ohashi T., Mitsuda K., Tawara Y., Furuzawa A., 2003, PASJ 55, 879
- 20) Yoshikawa K., et al., 2004, PASJ 56, 939
- 21) Yoshikawa K., Sasaki S., 2006, PASJ 58, 641
- 22) Kawahara H., Yoshikawa K., Sasaki S., Suto Y., Kawai N., Mitsuda K., Ohashi T., Yamasaki N. Y., 2006 PASJ 58, 657

### Investigation of the Warm-Hot Intergalactic Medium and the Structure of the Universe

Yoh TAKEI

ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara-shi, Kanagawa 229-8510, Japan and SRON, High Energy Astrophysics Division, Sorbonnelaan 2, 3584 CA Utrecht, The Netherlands

Abstract: A large amount (about half) of baryons in the local universe is thought to reside in a so-called warm-hot intergalactic medium. Although many researchers are trying to detect it, its existence is not observationally confirmed. We have been searching cluster vicinities for the warm-hot intergalactic medium using deep X-ray observations. I review the observations performed so far and show the prospects of future studies.