

ひとみ衛星で観測されたペルセウス座銀河団の X 線スペクトル解析

X-ray spectral analysis of the Perseus cluster observed by Hitomi satellite

X 線天文学研究室 BP18009 池本 一樹

指導教員：久保田 あや 教授

1 はじめに

銀河団は 1000 個もの銀河からなる宇宙で最大の天体である。図 1 は GSRC12C 305mm F8 で観測したペルセウス座銀河団の可視光画像で、一つ一つの明るい点が個々の銀河に対応している。可視光で見えるのは銀河中の恒星からの光だが、銀河団からの X 線放射を捉えると、全く異なる姿が明らかになる。図 2 は Chandra 衛星で観測したペルセウス座銀河団の X 線画像である。個々の銀河は見えず、銀河間空間全体が X 線で輝いていることがわかる。X 線は数千万 K の高温ガスから放射されるので、この事実は銀河間空間を高温ガスが満たしていることを示すと同時に、高温ガスを銀河団に重力的に閉じ込めるためには目に見える(すなわち恒星)の質量だけでは全く足らず、宇宙に暗黒物質が存在することが明らかになった [1]。

2016 年に稼動した X 線天文衛星のひとみ衛星 [2] は、世界で初めてマイクロカロリメータによる X 線観測を可能とした衛星で、かつてない超高分解能分光観測を実現した。これにより、ガスに含まれる元素のスペクトルが微細構造分裂のレベルで検知可能となり、ガスの温度や運動を測定する可能性が一気に進んだ。本研究では、ひとみ衛星搭載のカロリメータ (SXS) で取得したペルセウス座銀河団のデータを解析し、銀河団観測におけるカロリメータの可能性について新たな知見を得ることを目的とする。



図 1: 可視光で見たペルセウス座銀河団 (出典:<http://starwatch.web.fc2.com/gallery/photo/NGC12121-ag.html>)



図 2: X 線で観測したペルセウス銀河団 (出典:<https://chandra.harvard.edu/photo/2017/perseus/>)

2 ひとみ衛星搭載のマイクロカロリメータ

ひとみ衛星は JAXA が各国の研究機関と共同で開発した宇宙 X 線観測装置である。日本で 6 番目の天文衛星として 2016 年 2 月 17 日に種子島宇宙センターから打ち上げられた。しかし、運用上のミスから不具合が発生し、同年 3 月 26 日に運用を断念した。稼働時期は 1ヶ月と短かったもののその間にペルセウス座銀河団、超新星残骸 N132D などの観測が行われた [2]。

マイクロカロリメータである SXS では、センサー部分の吸収体が X 線エネルギーを吸収し、温度上昇を精密に測定することで X 線光子 1 個 1 個のエネルギーを求める。ひとみ衛星以前の X 線検出器では、主として X 線を検出器で光電吸収する際に発生する電子キャリアとしていたが、マ

イクロカロリメータでは電子ではなく X 線を吸収する際の温度上昇による音響振動子(フォノン)をキャリアとする。これにより、半導体である CCD で、6keV の X 線に対するエネルギー分解能が半値全幅で $\Delta E=120\text{keV}$ ほどであったが、SXS では 5eV に向上した [3]。図 3 に CCD と SXS で得られたペルセウス座銀河団のスペクトル比較を示す。

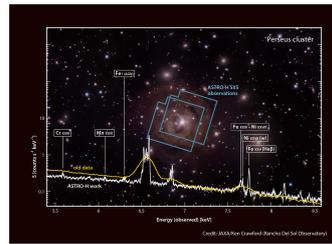


図 3: CCD と SXS で観測したペルセウス座銀河団のスペクトル。黄色が CCD、白が SXS(出典:<https://www.isas.jaxa.jp/topics/001181.html>)

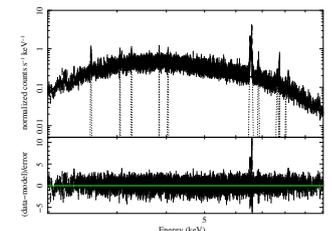


図 4: ひとみ衛星によって観測されたペルセウス座銀河団の X 線スペクトルに zbremss モデルで合わせたスペクトル

3 スペクトル解析

3.1 全体的な特徴

ペルセウス座銀河団のひとみ衛星による観測は 2016 年 2 月 24 日から 3 月 7 日の中で 6 回行われた。このうち中心に近い 3 月 7 日のデータを解析した。観測データを宇宙科学研究所の DARTS のアーカイブサイトからダウンロードし、スペクトルを抽出した。図 4 は 2-10keV のエネルギー帯で、高温プラズマからの熱的制動放射 (zbremss モデル) で再現したスペクトルである。zbremss のパラメータはプラズマ温度と赤方偏移である [4]。このモデルによって全体の温度が $(4.935^{+0.056}_{-0.100})\text{keV}$ であると分かった。

図 4 には連続的な放射に加えて、線スペクトルが見られる。これは高階電離した様々なイオンの特性 X 線である。特性 X 線は原子核の周りの電子が上位の軌道から下位の軌道に遷移する際に発生し、そのエネルギーは原子番号 Z の 2 乗に比例し、また電離度が大きいほど高エネルギー側にシフトするため、どのような元素が存在するか、またどの程度電離しているかを知ることが出来る。図 4 で顕著な特性 X 線を記述するため gaussian(つまり正規分布)モデルに加えてある。

3.2 水素様鉄輝線の解析

図 4 では 6-7keV の領域に特に顕著な輝線が見られ、これらは鉄イオンの特性イオンに対応する。鉄原子は最も安定な原子核であり、銀河団スペクトルにおいてもその存在を際立つ。6.55keV と 6.84keV に構造が見られ、これらの電子

が2つ残った状態(ヘリウム様イオン、He α という)と電子が1つのみの状態(水素様イオン、Ly α という)の電子軌道 n=2 から n=1 への遷移に伴う特性 X 線である [5]。

まず、6.84keV 付近の鉄の Ly α の解析を行なった。過去の CCD の解析では Ly α は 1 本の輝線として検出されていたが、SXS では電子の軌道とスピンの縮退がとけ、j+1 = 1/2 と 3/2 の 2 本の輝線として分離していることが分かる。これらの輝線を gaussian モデルで評価した結果を表 2 に示す。赤方偏移を修正し、静止系エネルギーに戻すとエネルギーは 6.95keV と 6.97keV の 2 つの gaussian で表され、2 本の輝線のエネルギー差は 20eV であり、これは鉄の Ly α の微細構造分裂の値である。また、gaussian の標準偏差は $\sigma = 3.7\text{eV}$ と非常に細かい構造であることが分かる。このような細かい輝線幅の決定も SXS のエネルギー分解能なくしてはなし得なかったと言える。輝線の幅はイオンのランダムな運動によって決まり、それを熱運動とすると、 $kT = 7.7\text{keV}$ が得られるが、これは制動放射の温度と比べ 1.5 倍程度高い。

次に、輝線のプロファイルに、量子力学的な効果が見られるかどうか検証するため、gaussian を voigt モデル [4] に置き換えてスペクトルを評価した(図 5)。voigt は熱幅と自然幅を合わせたものを持つ。自然幅は量子力学の不確定性原理の励起状態の寿命とエネルギーの揺らぎによって発生する [6]。その結果を同じく表 2 に示す。voigt と gaussian の再現性を比較すると voigt ではパラメータが 1 つ増えたのに対し、 χ^2 の値の改善は $\Delta\chi^2 = 1.3$ にとどまり、F 検定の値は 0.99 で統計的に有意ではなかった。しかし、輝線の広がりには 2 成分を考慮したことで、速度由来の広がりには $\sigma = 1.3\text{eV}$ 、すなわち $\sigma < 3.0\text{eV}$ と制限できた。これに対する温度は上限で $kT=5.2\text{keV}$ と誤差の範囲で制動放射の値に合う。

表 1: 鉄の Ly α のモデルフィットの結果

モデル名	パラメータ	単位	ベストフィット値
gaussian モデルのフィット結果			
power-law	PhoIndex		$-2.26^{+0.13}_{-0.14}$
	norm		$(1.5^{+0.16}_{-0.16}) \times 10^{-5}$
gaussian1	LineE	keV	$6.8346^{+0.0014}_{-0.0018}$
	σ	eV	$3.72^{+0.95}_{-0.71}$
	norm		$(1.15^{+0.21}_{-0.21}) \times 10^{-5}$
	eqw	keV	$(0.94^{+0.15}_{-0.15}) \times 10^{-2}$
gaussian2	LineE	keV	$6.85383^{+0.0010}_{-0.00082}$
	eqw	keV	$(1.90^{+0.34}_{-0.37}) \times 10^{-2}$
	$\chi^2(dof)$		69.7(53)
	null-hypothesis		6.3×10^{-2}
voigt モデルのフィット結果			
power-law	PhoIndex		$-2.15^{+0.22}_{-0.22}$
	norm		$(1.665^{+0.110}_{-0.092}) \times 10^{-5}$
voigt1	LineE	keV	$6.834^{+0.00019}_{-0.0017}$
	σ	eV	$1.3^{+1.8}_{-1.8}$
	γ		$(6.9^{+2.6}_{-1.2}) \times 10^{-3}$
	norm		$(1.65^{+0.33}_{-0.33}) \times 10^{-5}$
	eqw	keV	$(1.50^{+0.30}_{-0.30}) \times 10^{-2}$
voigt2	LineE	keV	$6.85343^{+0.0015}_{-0.00060}$
	eqw	keV	$(3.04^{+1.0}_{-1.0}) \times 10^{-2}$
	$\chi^2(dof)$		68.4(52)
	null-hypothesis		6.3×10^{-2}

3.3 ヘリウム様鉄輝線の解析

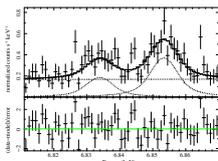


図 5: 鉄の Ly α を voigt モデルでフィットさせたスペクトル

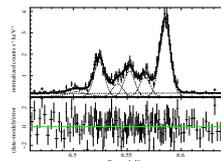


図 6: 鉄の He α を voigt モデルでフィットさせたスペクトル

続いて 6.55keV 付近の He α の解析を行なったが、Ly α と同様に gaussian と voigt でデータの再現性は変わらなかった。また voigt のパラメータの決定精度が悪かったため、ここでは gaussian の結果に基づいて述べる。He α は電子が 2

個残っているため、Ly α に比べて様々な輝線が観測される。6.52keV の位置では禁制線、6.55、6.57keV の位置では半禁制線、6.59keV の位置では共鳴線がそれぞれ分離されている [5]。 σ は 4.6eV と求まり、温度は 12.5keV と得られたが、Ly α の結果から推測すると量子力学的不確定性の広がりも考慮すると 12.5keV より低くなる可能性はある。この結果は Ly α や制動放射と合わなかった。

表 2: 鉄の He α のモデルフィット結果

モデル名	パラメータ	単位	ベストフィット値
power-law	PhoIndex		$2.3^{+3.0}_{-4.6}$
	norm		$(9.4^{+0.1}_{-0.1}) \times 10^{-2}$
gaussian1	LineE	keV	$6.50182^{+0.0012}_{-0.0012}$
	σ	eV	$4.56^{+0.16}_{-0.16}$
	norm		$(2.02^{+0.41}_{-0.43}) \times 10^{-5}$
	eqw	keV	$(9.0^{+1.3}_{-1.3}) \times 10^{-3}$
gaussian2	LineE	keV	$6.52390^{+0.00029}_{-0.00018}$
	norm		$(1.29^{+0.072}_{-0.072}) \times 10^{-4}$
	eqw	keV	$(6.30^{+0.74}_{-0.38}) \times 10^{-2}$
gaussian3	LineE	keV	$6.54115^{+0.00061}_{-0.00071}$
	norm		$(4.85^{+0.69}_{-0.69}) \times 10^{-5}$
	eqw	keV	$(2.24^{+0.36}_{-0.32}) \times 10^{-2}$
gaussian4	norm		$(9.13^{+0.83}_{-0.73}) \times 10^{-5}$
	eqw	keV	$(4.36^{+0.40}_{-0.35}) \times 10^{-2}$
gaussian5	LineE	keV	$6.56650^{+0.00081}_{-0.00066}$
	norm		$(7.18^{+0.69}_{-0.69}) \times 10^{-5}$
	eqw	keV	$(3.39^{+0.33}_{-0.32}) \times 10^{-2}$
gaussian6	LineE	keV	$6.58500^{+0.00021}_{-0.00025}$
	norm		$(2.64^{+0.10}_{-0.11}) \times 10^{-4}$
	eqw	keV	$0.1455^{+0.0050}_{-0.0062}$
	$\chi^2(dof)$		121(112)
	null-hypothesis		0.26

3.4 鉄以外の元素

鉄以外の Ly α の温度も gaussian モデルで求めた。これらを制動放射で求めた温度と比較すると(図 7)、硫黄、アルゴン、カルシウムの Ly α は誤差の範囲で制動放射で求めた温度と合っている。これらを voigt モデルで求めると温度は下がる傾向になるだろう。

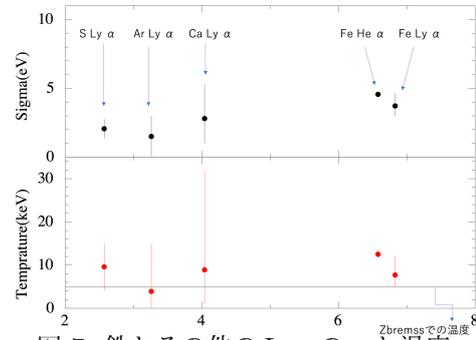


図 7: 鉄とその他の Ly α の σ と温度

4 まとめ

voigt プロファイルを使用することによって gaussian に比べて量子力学の観点から有意になることが予想されたが今回はその結果が出なかった。2022 年度にはひとみのリカバーミッションとして計画されている XRISM の打ち上げが予定されている。XRISM にはカロリメータが再度搭載され、銀河団の統計のより良いスペクトルが取得することで、輝線プロファイルをさらに精緻に決定することが出来ると期待される。

References

- [1] 小山勝二 X 線で探る宇宙 培風館
- [2] 大橋隆哉・高橋忠幸 2019 年 天文月報 vol5、p274
- [3] 藤本龍一 2019 年 天文月報 vol7、p452
- [4] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/Models.html>
- [5] 久保田あや 2021 年 分光研究
- [6] 天文学辞典 日本天文学編 <https://astro-dic.jp>