

銀河団ガスの鉄族元素量測定

山口 弘悦

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: yamaguchi@astro.isas.jaxa.jp

ひとみ衛星は、主力搭載装置であるX線マイクロカロリメータの卓越した分光能力によって、単一の銀河団におけるクロム、マンガン、ニッケルの元素量精密測定を初めて可能にした。貴重な初期観測データは、ペルセウス座銀河団の鉄族元素組成比が太陽組成と一致する事実を明らかにした。

1. 事故発生

「ひとみ」の事故当時、私はNASAゴダードスペースフライトセンターの研究者だった。打ち上げ以降、海外に伝わってくる情報は「順調」を示すものばかりで、当初から失敗の予兆があったことや、このような結末が待ち受けていることは、微塵も想像しなかった。関係者の長年の努力がようやく実るのだと考えていた矢先のことだった。

各国のSpace Agencyが多額の予算をつぎ込んだ大型衛星の喪失は、当然「対岸の火事」では済まなかった。日本ではおそらく馴染みがないと思われるが、米国では“soft money”による雇用形態が珍しくない。簡単に言うと、プロジェクトに直接付帯する予算で人件費が賄われる。つまり私を含む多くの人間が、「ひとみ」の予算で雇われていた。ポスドクのように定まった任期はないが、終身雇用の保証もない。プロジェクト終了と同時に予算は打ち切られるので、被雇用者はその前に次の職場を探さなければならない。米国には、そうやって幾多のプロジェクトを渡り歩き、定年を迎える研究者も少なからずいる。したがって準備期間のないままに衛星が突然死すると、悲惨なことがおきる。実際「ひとみ」の喪失後、40-50代の同僚たちが失意のうちに業界を去った。私自身も、真面目に転職を考え始めていた。

2. 撤退戦の意義

そんな状況の中、本稿で紹介する論文¹⁾を書くことになる。いろいろあっていろいろアレな某誌への投稿を目指すことが決まった。やけっぱちな気持ちの一方で、カロリメータによるサイエンスを極限まで絞り出し、少しでも将来への指針に繋げたい思いもあった。今回は観測された天体の数も限られており、一つ一つの論文が持つ科学的価値は決して高くない。悲痛な撤退戦の中で重要だったのは、「ひとみ」の観測自体が何を明らかにしたかではなく、精密X線分光で一般に何ができるのかを、僅かながらも「実データに基づいて」整理したところにあったと私は考えている。したがって本稿では、論文にする上で書かざるを得なかった「解釈」の部分には敢えて触れず、カロリメータ検出器がX線分光天文学を如何に質的に変えたかだけを端的に述べたい。

3. 本題

銀河団の詳しい説明は他の記事に任せ、ここではその化学的性質に注目する。銀河団ガスには、宇宙創成時に作られた水素やヘリウムに加えて様々な重元素が含まれる。重元素は、恒星内部、あるいは超新星爆発時の元素合成を起源とする。銀河団ガスの質量は構成銀河(星)の質量を上回る

ので、その化学組成は宇宙全体の平均に限りなく近いと考えられる。よって、近傍銀河団のガスの化学組成を調べることで、過去に起こった超新星の平均的性質や、発生頻度を明らかにできる²⁾。そのためは、なるべく多くの元素を分離検出できることが望ましい。

「ひとみ」以前の非分散型検出器では、「あすか」や「すざく」にも搭載されたX線CCDが最も分光能力に長けていた。鉄輝線がある6.5 keV付近の半値全幅は140–200 eV程度である。この分解能だと、ケイ素や鉄のような強い輝線は容易に検出できるが、クロム、マンガン、ニッケルなどの微弱な輝線を単一の銀河団から検出することは難しい。そのため、従来は数十個の銀河団のスペクトルをスタックするという半ば強引な手法で、これらの元素量が見積もられていた³⁾。またそのような努力をもってしても、測定にかかる系統誤差は極めて大きかった。

この状況を劇的に変えたのがカロリメータである。SXSによるペルセウス座銀河団のスペクトルを図1に示す。クロムとマンガンの輝線は等価幅にして数eVしかないものの、いずれもクリアに検出されている(図1a)。ざっくりと議論すると、[等価幅]/[エネルギー分解能]で表す無次元量が、おおよそ1を超える場合にのみ、輝線の強度測定を現実的な観測時間で行えると考えてよい。従来のCCD検出器だと上記の値が 10^{-2} のオーダーになるため、そもそも検出が困難、あるいは検出できたとしても正確な強度測定はほぼ不可能だった。一方、ニッケル輝線(図1b)は比較的大きな等価幅を持つが、すぐ隣には強い鉄輝線(ヘリウム状イオンの3p-1s遷移)がある。そのためCCDのスペクトル(灰色のデータ点)ではこれらを分離検出できなかった。まとめると、**カロリメータ検出器は単一銀河団におけるクロム、マンガン、ニッケルの元素量精密測定を初めて可能にしたと結論できる**。ペルセウス座銀河団の場合、それらの鉄に対する個数比は、太陽組成と同一であるこ

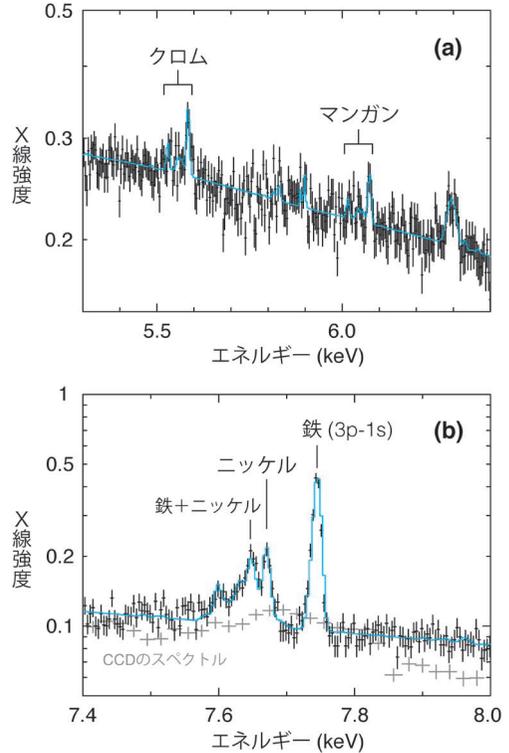


図1 「ひとみ」の観測によって得られたペルセウス座銀河団の精密X線スペクトル。(a)はクロムおよびマンガン輝線の周辺、(b)はニッケル輝線の周辺を示す。XMM-NewtonのCCD検出器による同天体のスペクトル(灰色)では、ニッケルと鉄の輝線が分離できなかった。

とが初めて確認された¹⁾。これは、過去にCCDで測定された値(数十個の銀河団の平均値)³⁾を大きく下回るものだった(図2)。

なお、これら鉄族元素(クロム、マンガン、鉄、ニッケル)はIa型超新星の主要生成物であり、その組成比は親星の性質(進化過程や最終質量)を制限する指標となる^{4),5)}。したがって質量や赤方偏移の異なる様々な銀河団をカロリメータで系統的に観測すれば、鉄族元素の組成比からIa型超新星の一様性、あるいは多様性の起源に迫れるはずだ。残念ながら「ひとみ」の銀河団観測は1天体に終わり、これ以上の追究は許されなかった。しかし今回この点を見出したことが、冒頭で

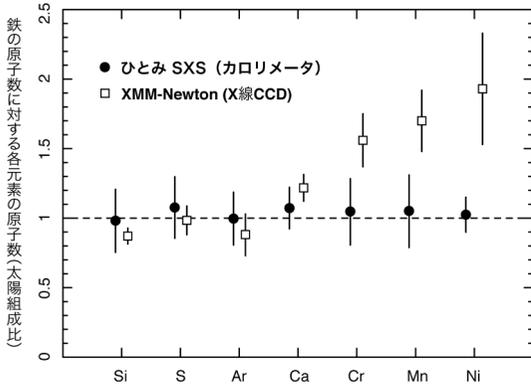


図2 「ひとみ」とXMM-Newtonによる銀河団重元素組成測定と比較。XMMの総観測時間は「ひとみ」の10倍以上あるにも関わらず、鉄族元素の測定値にかかる統計誤差と系統誤差が極めて大きい。この差は主に、エネルギー分解能の違いに起因する。

述べた「実データに基づくサイエンス検討」の意味で本成果が持つ唯一の価値だと考えている。XRISM衛星やAthena衛星によって、精密X線分光が今度こそ花開くことを期待したい。またその時世界に伍するためにも、私たちX線天文コミュニティは地に足をつけ、今できることを堅実にこなしていかなければならない。XRISMさえあればなんとかなる、という慢心があってはならない。

謝辞

本研究は「ひとみコラボレーション」の成果です。計画に関わった全ての人々にご支援をいただいた皆様に深く感謝いたします。また、本来ならなくてもおかしなかったXRISMプロジェクトの早期実現にご尽力いただいた関係者の皆様、日本天文学会の皆様、国民の皆様に、この場をお借りして心より御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Hitomi Collaboration, 2017, *Nature*, 551, 478
- 2) Mushotzky, R., et al., 1996, *ApJ*, 466, 686
- 3) Mernier, F., et al., 2016, *A&A*, 592, 157
- 4) Yamaguchi, H., et al., 2015, *ApJ*, 801, L31
- 5) Leung, S-C., & Nomoto, K., 2018, *ApJ*, 861, 143

Abundances of the Fe-peak elements in the hot intracluster medium

Hiroya YAMAGUCHI

*Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1
Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara 252-5210,
Japan*

Abstract: The Hitomi X-ray Observatory enabled the first detection and accurate abundance measurement of Cr, Mn, and Ni in a single galaxy cluster, owing to the unprecedentedly high spectral resolution of the X-ray microcalorimeter SXS. Our observations revealed that these elements have near-solar abundance ratios with respect to Fe, in contrast to previous CCD measurements.