

X線天文衛星「ひとみ」が観たペルセウス座銀河団～太陽と同じ鉄族元素組成

山口 弘悦^{*1} 松下 恭子^{*2} 大橋 隆哉^{*3}
Yamaguchi Hiroya Matsushita Kyoko Ohashi Takaya

1. X線天文衛星「ひとみ」

2016年2月17日にJAXAが打ち上げた「ひとみ」はX線分光能力を格段に高めると共に、X線から軟γ線に至る広いエネルギー範囲で高い感度を持つX線天文衛星として開発された。米国のチャンドラとヨーロッパのXMMニュートンという大型衛星が、それぞれX線画像の解像度と大きな有効面積を特徴とするのに対し、日本の「ひとみ」はエネルギー軸に着目することで世界最高性能を達成することを目標とした。特に50 mKの極低温で動作するマイクロカロリメータ検出器(SXS)は、日米協力を軸に開発され、0.3-12 keVにわたる広いエネルギー帯域において5 eV(半値全幅)という優れたエネルギー分解能(CCD検出器の30倍以上)を実現する新しい検出器である(図1)。

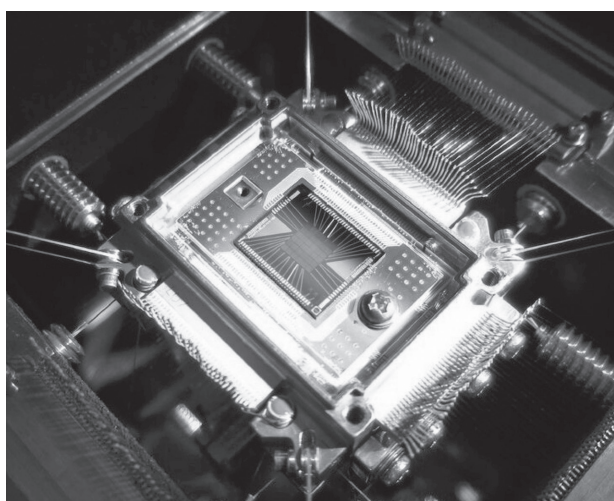


図1 ひとみに搭載されたマイクロカロリメータSXS素子部の写真

(写真提供: NASA ゴダード宇宙飛行センター)

衛星全体の開発と打ち上げは日本が中心となり、30を超える国内の研究機関のほか、米NASA、ヨーロッパESAやカナダも参加し、8年以上をかけて開発された。H-IIA ロケット30号機によって種子島宇宙センターから打ち上げられた「ひとみ」は予定通りの軌道に投入され、衛星共通機器の動作確認、X線望遠鏡の伸展、冷却系を含めた観測機器の立ち上げ等が順調に行われ、SXSも5 eVを切るエネルギー分解能を軌道上で実現できた。しかし姿勢制御における異常事象のために衛星が高速でスピンする事態となり、3月26日をもって「ひとみ」の機能は失われた。その原因究明と再発防止策についてはJAXAの報告に譲る¹⁾。

このように「ひとみ」は短命に終わってしまったが、幸いにしてSXSは衛星打ち上げの1週間後からX線で最も明るい銀河団(ペルセウス座銀河団)を観測しており、この天体から優れた分光データ(スペクトル)を取得できた。このデータに基づく科学成果だけでも、英国のNature誌や日本天文学会欧文研究報告誌から既に計8本の学術論文が発表されている²⁾。本稿ではその中から、銀河団の「化学的性質」に関する成果³⁾について解説したい。

2. 銀河団の高温ガス

銀河団とは、文字通り多数(一般に100個以上)の銀河が集まる宇宙最大規模の天体であり(図2)、その空間スケールは差し渡し約1千万光年にも及ぶ。銀河団の中心には大量のダークマターが存在し、その重力によって星や銀河だけでなく、それよりはるかに大質量の高温電離ガス(プラズマ)が束縛される。ガスの温度は数千万～1億℃に達し、X線で

明るく輝く。したがって銀河団をX線で見ると、星や銀河ではなく、それらを取り巻く高温ガスを見ることになる⁴⁾。

ここで、銀河団の化学的性質に注目してみよう。銀河団ガスには、宇宙創成時に作られたHやHeに加えて、CやO、Si、Fe等の重元素が含まれる。いずれも生命や文明の維持に欠かせない重要な元素である。これらの重元素は太陽よりも重い恒星の内部で合成され、星風活動や超新星爆発によって宇宙空間にばらまかれる。つまり、銀河団ガスに含まれる（あるいは我々の身の回りに存在する）重元素の組成には、宇宙誕生後137億年の間に生まれた無数の星の進化と爆発の歴史が刻まれているのである。

先述の通り、銀河団ガスの総質量は構成銀河の総質量をはるかに上回る。したがってその化学組成は宇宙全体の平均値に限りなく近いと考えてよい。宇宙の平均組成が分かると、例えば我々の近傍、すなわち太陽系の化学組成と比べることができる。元素の存在比は星間分子や惑星系の形成率にも強く影響するため、両者の比較は地球外生命の存在可能性を探る上でも重要である。また、重元素の起源は過去に起こった超新星の積算なので、銀河団ガスの化学組成から、宇宙全体で「どのようなタイプの超新星が、どのくらいの割合で発生したか」を明らかにで

きる。これらが、X線を用いた銀河団観測の科学的意義のひとつである。

3. 銀河団ガスのスペクトル分析

では、目的の元素量測定はいかにして行うか。その方法について簡単に述べておきたい。一般に銀河団ガス等の高温希薄プラズマは、図3aのようなX線スペクトルを示す（図は理論モデル）。なだらかに伸びる「連続成分」は、主に陽子（水素イオン）と自由電子のクーロン相互作用による「制動放射X線」である。したがってその強度はHの数密度に比例する。一方、無数に見える「輝線成分」は、重元素ごとに特定のエネルギーを持つ「特性X線」である。したがってその強度は各元素の数密度に比例する。以上により、連続成分に対する輝線の強度比（等価幅）を測ることで、Hに対する各重元素の個数比が分かる。極めて単純な原理だ。観測したエネルギー帯域にその元素の輝線が1つでもあれば、いとも容易く元素量が測定できそうである。しかし現実はその簡単にいかない。検出器の分光能力に限りがあるため、実際に得られるのは、図3bのように「なまされた」スペクトルになってしまうのだ。この「なまり具合」の指標が、冒頭でも述べた「エネルギー分解能」であり、X線検出器の場合、鉄K殻輝線がある6 keVの半値全幅を使って表すことが多い。従来のX線観測で広く用いられたCCD検出器では、半値全幅は140-200 eV (@6 keV)となる。この程度の性能だと、弱い輝線が連続成分に埋もれて見えなくなり、エネルギーの近い複数の輝線が互いに混じり合ってしまう。そのため、元素量の正確な測定が長らく難しかった。

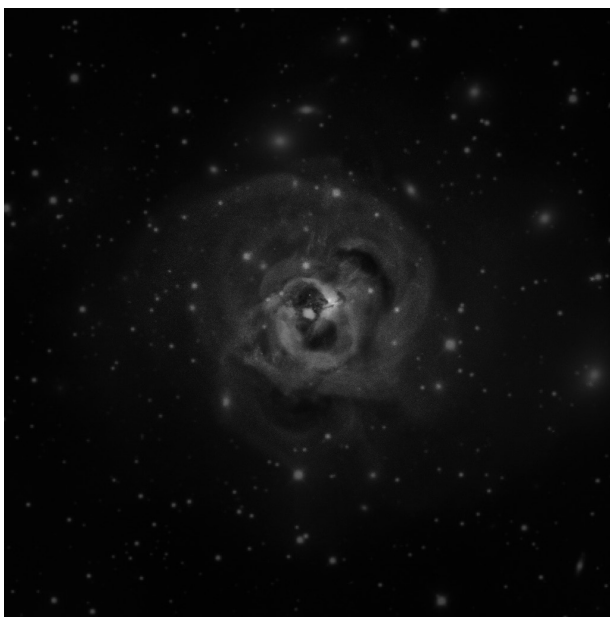


図2 ペルセウス座銀河団の可視光・X線合成画像

泡状に拡がった成分が高温ガスからのX線放射を示す

Credit: 可視光画像 Ken Crawford (Rancho Del Sol Observatory), X線画像 NASA/CXC/IoA/A.Fabian, et al.

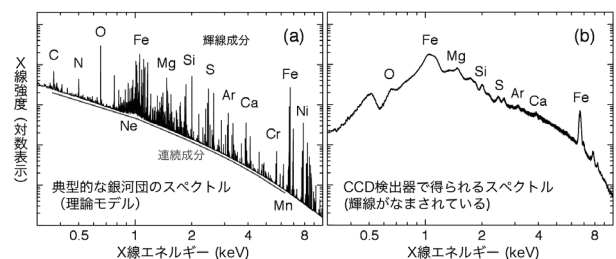


図3 (a) 理論的に予想される典型的な銀河団のX線スペクトル。主にHを起源とする「連続成分」と、重元素を起源とする「輝線成分」から成る。(b) 図3aのスペクトルをCCD検出器で観測した場合に取得されるデータ。個々の輝線を分離できない

4. 「ひとみ」のスペクトルデータ

この状況を劇的に変えたのが、「ひとみ」が搭載したSXSである。SXSのエネルギー分解能は従来のCCD検出器より30–40倍高い。この性能により、ペルセウス座銀河団の初期観測から、図4aに示す精密X線スペクトルが取得された。中でも顕著な成果が7.7 keV付近のNi輝線を初めて分離できたことだ(図4b)。比較のために示した図中灰色のデータ点は、欧州の衛星XMMニュートンのCCD検出器によって得られた同一天体のスペクトルだが、ここではNiとFeの輝線が分離できていない様子が分かる。つまりSXSは、両元素の独立な測定を初めて可能にしたのである。同様にして、SXSはCrとMnの微弱な輝線も検出した。ここでもカロリメータの優れた分光能力が決め手になったことは言うまでもない。

一方で、残念だったこともある。既にお気付きの読者もおられるかもしれないが、図4aのスペクトル強度(縦軸の値)が図3a,bと比べて、低エネルギー側で著しく下がっている。更に、SXSは本来0.3 keV以上の帯域に感度を持つにも関わらず、1.8 keV以下のX線が全く検出できていない。これは、当該観測が初期運用中に行われたため、汚染防止用に備え付けられた検出器の「ふた」が開いていなかったためだ。ふた越しでも1.8 keV以上のデータがこれだけクリアに得られたことは、むしろ幸いだったかもしれない。しかしこのことが原因で、CやO、Ne等、1.8 keV以下の帯域に輝線を持つ重元素が全く検出できなかった。これらの組成測定は、2021年に打ち上げを予定される「X線天文衛星代替機」に持ち越しとなった。

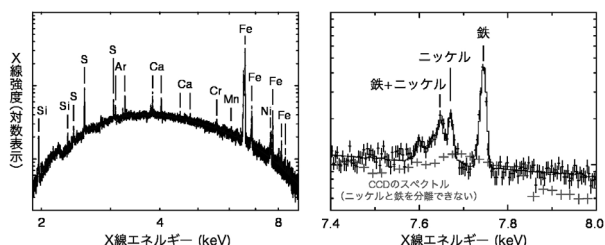


図4 (a) ひとみSXSによって取得されたペルセウス座銀河団の精密分光スペクトル。(b) Ni輝線周辺(7.4–8.0 keV)の拡大図。XMMニュートンのCCD検出器による観測(灰色)では、NiとFeの輝線が分離できなかった

(出典：参考文献3)

5. 太陽と同じ重元素組成

図5にSXSによる重元素組成の測定結果を黒丸で示す。縦軸は鉄原子の数に対する各元素の原子数を、太陽における個数比で規格化した値、すなわち「太陽組成比」である。ご覧の通り、どの重元素の値も太陽組成と完全に一致している。比較対象として、XMMニュートンのCCD検出器による測定⁵⁾を四角で示した。Si、S、Ar、Caの組成はSXSの結果とほぼ一致するが、鉄族元素(Cr、Mn、Ni)の組成は軒並み過大評価されていることが分かる。先述の理由で、これらの元素の輝線が十分に分離できなかったためであろう。なお、Hに対する重元素の個数比は、いずれの測定においても太陽比の0.6倍程度であった。これは、銀河団に含まれる始原ガス(ビッグバンの際に作られたHとHe)の割合が、我々の太陽系近傍と比べて大きいことを意味する。これに対し、重元素間の組成比が両者で一致する事実は、様々な種族の超新星(例えばSiを作りやすい種族とFeを作りやすい種族)の混合率が、銀河団と太陽系近傍で大きく変わらないことを意味する。言い換えると、我々の太陽は広い宇宙において特異な環境にあるわけではなく、宇宙全体と同じような化学進化を経験してきたと言える。太陽系が特殊でないのであれば、宇宙の至るところに生命が根付いていても不思議ではない。

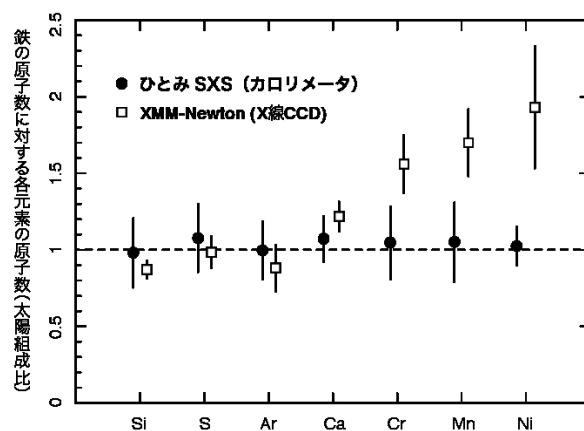


図5 SXS(黒丸)とXMMニュートン(白四角)による銀河団重元素組成測定と比較

(出典：参考文献3)

6. 鉄族元素の組成が伝えるもうひとつの事実

ところで、Cr, Mn, Fe, Niといった鉄族元素は、「Ia型（いちえーがた）」と呼ばれる種族の超新星を主要起源とする。Ia型超新星は、白色矮星と呼ばれる高密度星の核融合暴走によって起こる、言わば「宇宙の巨大核爆発」だ。この超新星には、現代の宇宙物理学において極めて重要な役割がある。それは、爆発直後の絶対的な明るさが天体間でほぼ一様のため、見かけ上の明るさから逆算して距離の測定に利用できることだ。このことからIa型超新星は「宇宙のものさし」とも呼ばれる。過去にはこの性質を利用して、宇宙の膨張が加速している事実が明らかにされた（2011年ノーベル物理学賞の授賞対象⁶⁾）。しかし現在に至ってもなお、天体間で明るさが一様になる物理的根拠が解明されていない。それどころか、実際には明るさ一様ではなく、爆発する環境によって大きく性質が異なる可能性まで指摘されている。

この疑問に答えるのが、鉄族元素の組成である。なぜなら、各元素の生成量がIa型超新星の性質（白色矮星の質量等）に強く依存することが理論的に知られているからだ⁷⁾。したがって、Ia型超新星の性質に顕著な個体差があれば、積分された鉄族元素の組成は環境によって大きく異なることが予想される。今回「ひとみ」の観測は、環境の全く異なる太陽系とペルセウス座銀河団の間で、鉄族元素の組成が完全に一致することを明らかにした。この事実は、

Ia型超新星の平均的性質が宇宙全体で均一であることを示唆する。しかし、銀河団1つの観測結果からこの結論を下すのは、いささか時期尚早であろう。肝心なのは、多数の銀河団同士の比較研究である。残念ながらそれが実現できるのは「X線天文衛星代替機」が稼働する2021年以降に持ち越しとなってしまったが、「ひとみ」が遺してくれた貴重なデータは将来の銀河団観測への大きな指針を示してくれた。今後の展開に期待したい。

謝辞

「ひとみ」計画は研究者、大学院生、エンジニアを含めると300名ほどの努力に支えられたものである。この計画に関わったすべての人々にご支援をいただいた皆様に心から感謝を申し上げる。

引用文献

- 1) http://www.jaxa.jp/press/2017/05/20170530_hitomi_j.html
- 2) 例えば Hitomi Collaboration, *Nature*, **535**, 117 (2016)
- 3) Hitomi Collaboration, *Nature*, **551**, 478 (2017)
- 4) 例えば、谷口、岡村、祖父江編、シリーズ現代の天文学 銀河 I, 第9章 (2007)
- 5) Mernier, F., *et al.*, *A&A*, **592**, 157 (2016)
- 6) Riess, A. G., *et al.*, *ApJ*, **116**, 1009 (1998)
- 7) Yamaguchi, H., *et al.*, *ApJL*, **801**, L31 (2015)

(*1 NASA ゴダード宇宙飛行センター,

*2 東京理科大学, *3 首都大学東京)