

X線天文衛星「すざく」(ASTRO-EII)の観測成果について
- 「すざく」宇宙で最重量級の衝突現場を検証する:
X線で探る銀河団の衝突と合体

石田 学 (ISAS/JAXA)
Suzaku Deputy Project Scientist

発表内容

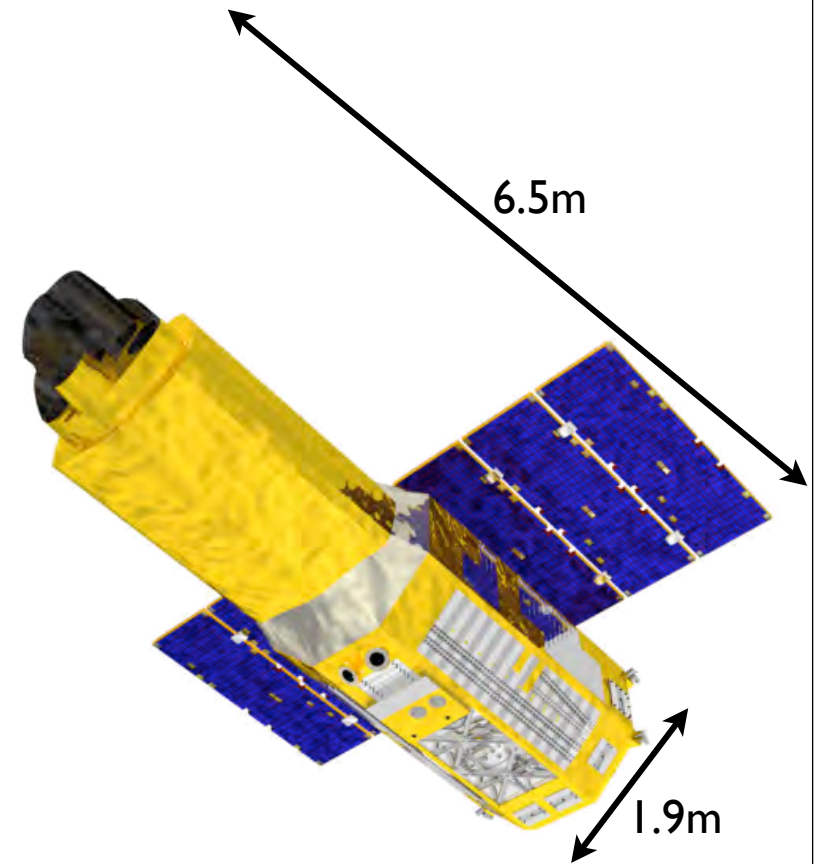
- X線天文学が目指すもの
- 「すざく」 紹介
- 銀河団
- ダークマター
- 今回の成果について
- 次期X線ミッションASTRO-Hへの展望

X線天文学の目指すもの

- 宇宙は137億年前に誕生し、ビッグバンの名残である3K背景放射の揺らぎを種として、宇宙膨張に逆らいながら、自己重力により、星、銀河、銀河中心の巨大ブラックホール、銀河団、超銀河団の順に、次第に大きな構造を形成するようになった。こうした宇宙の構造進化を理解することがX線天文学の究極の目的である。
- 宇宙に存在するエネルギー（質量）の96%は、ダークマター、ダークエネルギーで占められており、これらは現在の手段では観測にかからない。宇宙の構造進化を解明するために、残りの4%の物質を観測することになるのだが、そのうち、実に80%以上は温度100万K以上の中高温ガスであり、X線でのみ観測できるものである。宇宙の構造進化の解明にX線天文学の果たす役割は極めて大きい。
- 上記の課題に挑むために、直近の研究の方向性として、以下の三点が上げられる。
 - 1) 数千万光年の広がりを持つ宇宙最大の天体である銀河団の中にはダークマターが作る重力により、宇宙初期のガスが大量に閉じ込められている。これを観測し、超高温ガスが放射するX線のドップラー計測を行う。これにより、**銀河団衝突の現場**での対流や衝突の速度を実測し、**宇宙の大きな構造がどのように成長してきたかを解明**する。
 - 2) ブラックホール周辺の超高温、超強重力環境を観測するためにX線は最適である。最近、ビッグバンから数億年から数10億年後、銀河はその中心にブラックホールをいだいて生まれ、共に進化して現在にいたるといふ、考えが提示されている。ASTRO-Hは、周辺物質によって吸収されにくい硬X線での高感度観測を行い、80億光年遠方までの巨大ブラックホールの探査を行い、**巨大ブラックホールが銀河進化に果たす役割を解明**する。
 - 3) 最近、活動銀河核のジェットに代表される非熱的な粒子が宇宙の重要な構成要素である可能性が指摘されている。高エネルギーX線での高感度撮像観測により、宇宙の非熱的粒子の分布を測定する。
- 今回の「すざく」の成果は、上記1)の課題に関連し、X線ドップラー観測から、ダークマターの質量を測定する手法に道を開くものである。

すざく衛星

- 「すざく」衛星
2005年7月10日に内之浦宇宙センターからM-Vロケット6号機で打ち上げられた我が国5番目のX線天文衛星。
- 目的
宇宙の構造形成、ブラックホール直近領域の探査などを、0.3-600keVに亘る広帯域での高感度観測と、高分解能によるX線分光により実現する。
- ISAS/JAXA と NASAを中心とする広範な国際協力による開発と運用を実施している。
- 高い角度分解能を持つ米国のChandra衛星、広い集光面積を持つ欧州のXMM-Newton衛星と相補的な役割を果たし、世界のX線天文学の三極のうちの一極を担う。
- 軌道上天文台として、国際公募による観測を実施中。



「すざく」衛星外観：

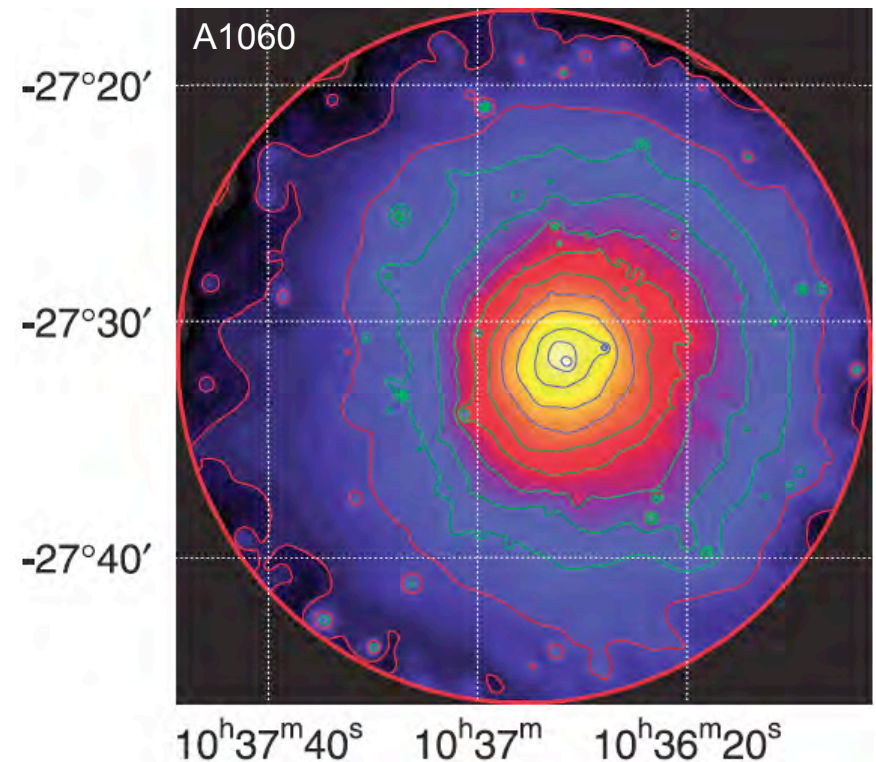
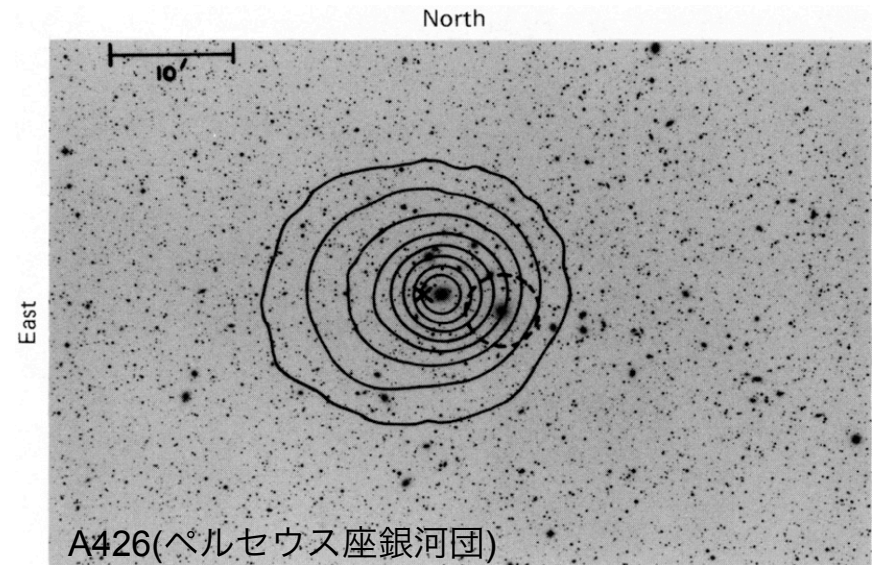
「すざく」のこれまでの研究報告

- 年間100本以上の査読つき論文を発表。
- これまで4回の国際会議を開催。
 - 2006年12月@京都
 - 2007年12月@San Diego, California
 - 2009年6-7月@小樽
 - 2011年7月@Stanford, California
- これまで4冊の成果論文特集号を日本天文学会欧文研究報告から出版。
 - 2007年1月
 - 2008年1月
 - 2009年1月
 - 2011年11月25日（すざく-MAXI共同）
- 今回の報告は、「すざく」の第四特集号に含まれている39本の論文のうち的一本であり、宇宙の構造進化の解明というX線天文学の究極の目標に直結し、かつASTRO-Hへの発展性があることから選ばれた研究成果である。



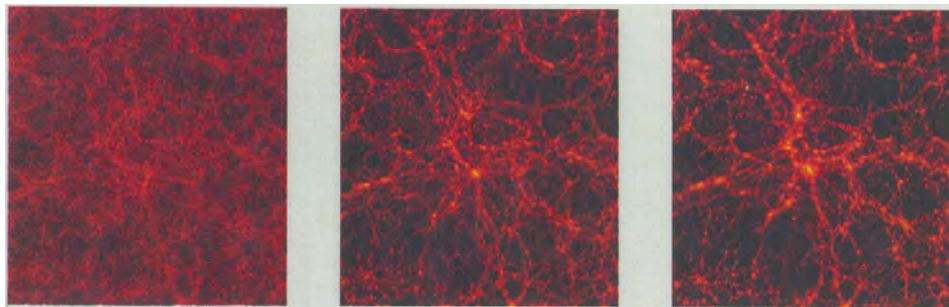
銀河団

- 銀河団は数千万光年の空間の中に、自己重力により、銀河が10~1000個程度閉じ込められた天体である（参考：我々の銀河系の広がりはおよそ15万光年）。
- 可視光では個々の銀河が観測されるが、X線では、銀河団の重力場に閉じ込められた高温ガスが観測される。その温度は1千万度~数億度。ガスは、宇宙初期から存在していたものと、個々の銀河から超新星爆発によってもたらされたものの両方からなる。
- X線を放射する高温ガスの総量は、典型的には可視光で見えている星の全質量の2~5倍にもなる。
- X線を放射する高温ガスの温度から、これを閉じ込めておくのに必要な重力質量が求められている。この重力質量は高温ガスの総質量の5~10倍と見積もられているが、正体が不明のため、ダークマターと呼ばれている。
- しばしば銀河団同士の衝突が観測されている。銀河団同士の衝突は、宇宙で最大規模の衝突現象である。

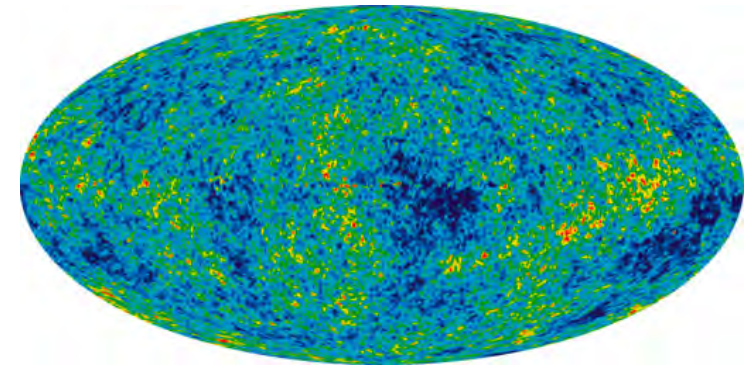


ダークマター: 宇宙構造形成

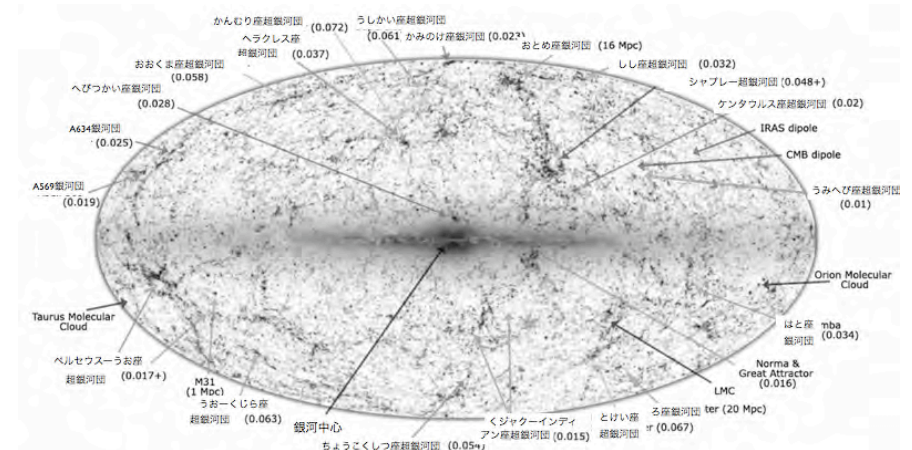
- 宇宙初期に発生したゆらぎを種に、ダークマターによる物質間の引力が宇宙膨張に打ち勝って大規模構造が進化してきた。これと、空間同士の斥力に相当するダークエネルギーとの大小関係により、宇宙の構造進化が支配されてきた。
- どこにどれだけの量のダークマターが存在するかを知ることは、宇宙における構造の進化を理解する上で必要不可欠である。
- ASTRO-Hによる銀河団の観測が、宇宙の構造進化のモデルに対して強い制限を与えることになると期待されている。



小 ←————→ 大
Dark Matter/Dark Energy



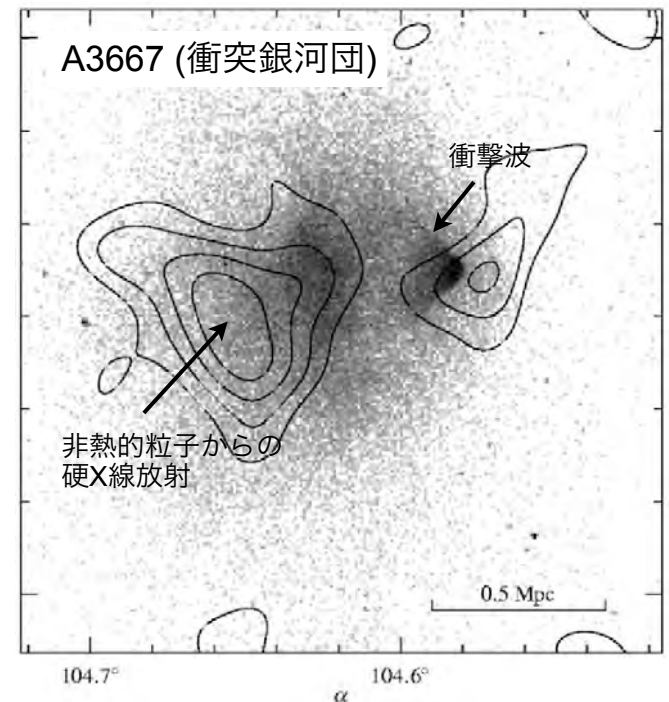
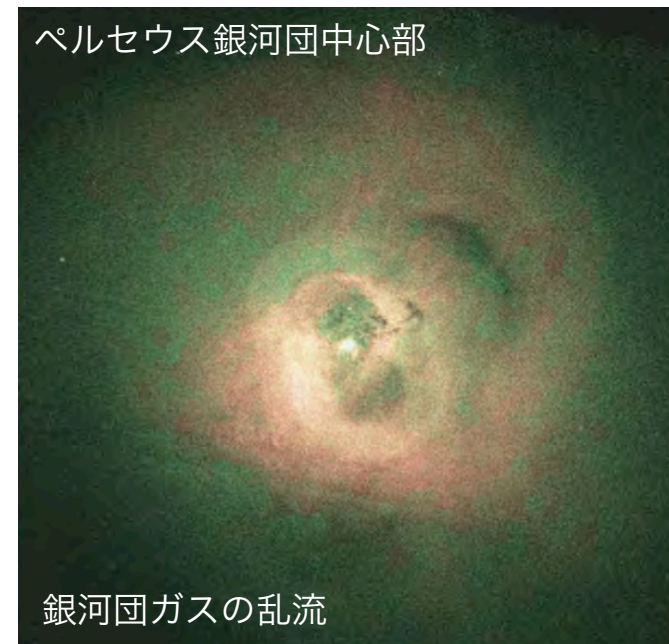
宇宙誕生から38万年後の3K放射温度の分布。温度の揺らぎは $200\mu\text{K}$ 以下で $\Delta T/T < 10^{-6}$



137億年後の現在の近傍宇宙($z < 0.08$)。数千万光年スケールの銀河団が、さらなる大構造(超銀河団)を形成している。 $\Delta\rho/\rho > 500$

ダークマター質量決定への道筋

- 15年ほど前までは、大部分の銀河団では、高温ガスは静水圧平衡にあると考えられてきた。この場合、ガスの運動は熱運動のみに限られ、銀河団の総質量は、それが生み出す重力エネルギーがガスの熱運動のエネルギーに釣り合っているとして見積もられてきた。
- 近年は、銀河団ガスの運動エネルギーは、以下のようないくつかの要素で構成されていると考えられている。
 - (1)ガスの熱運動のエネルギー（既知）
 - (2)ガスの巨視的な運動エネルギー（銀河団の自転、銀河団同士の衝突）
 - (3)ガスの乱流運動のエネルギー
 - (4)ガスの非熱的な運動エネルギー
- 今回の「すざく」の成果は(2)に関連する。
- (3)、(4)は磁場、銀河団同士の衝突で発生する衝撃波や、銀河団中心にある活動銀河核からのジェットが引き金になっていると考えられている。
- 銀河団のダークマターの総量（重力質量の総量）を見積もるには、これらの運動エネルギーを合算したものに重力エネルギーが釣り合うとして見積もる必要がある。現状では(1)しか考慮できないため、ダークマターの総質量は過小評価されていることになる。
- 2014年打ち上げ予定のASTRO-Hの軟X線精密分光器(SXS)、硬X線撮像分光器(HXI)を動員することにより、(2)~(4)を多数の銀河団で観測することが初めて可能になる。



銀河団内の巨視的運動のこれまでの観測

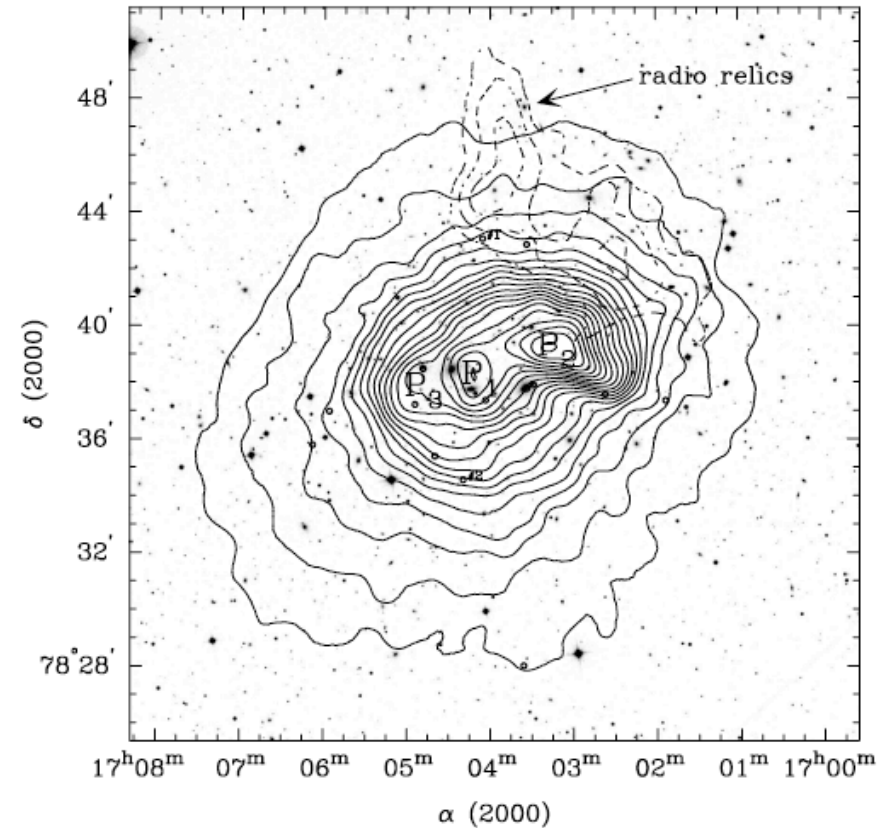
- ペルセウス銀河団が $\sim 4100\text{km/s}$ で自転していることを発見。(Dupke & Bregman 2001a)
 - 「あすか」のデータが否定。(Ezawa et al. 2001)
- ケンタウルス銀河団が 1600km/s で自転していることを発見。(Dupke & Bregman 2001b)
 - Chandra衛星のデータでも追確認。(Dupke & Bregman 2006)
 - 「すざく」のデータが否定。上限値 1400km/s 。(Ota et al. 2007)
- A2319銀河団では速度の上限値 2000km/s 。(Sugawara et al. 2009)。
- これまでの試みは、検出器のエネルギー分解能の制限のため、ことごとく失敗に終わっている。

Abell 2256銀河団

■ Abell 2256銀河団

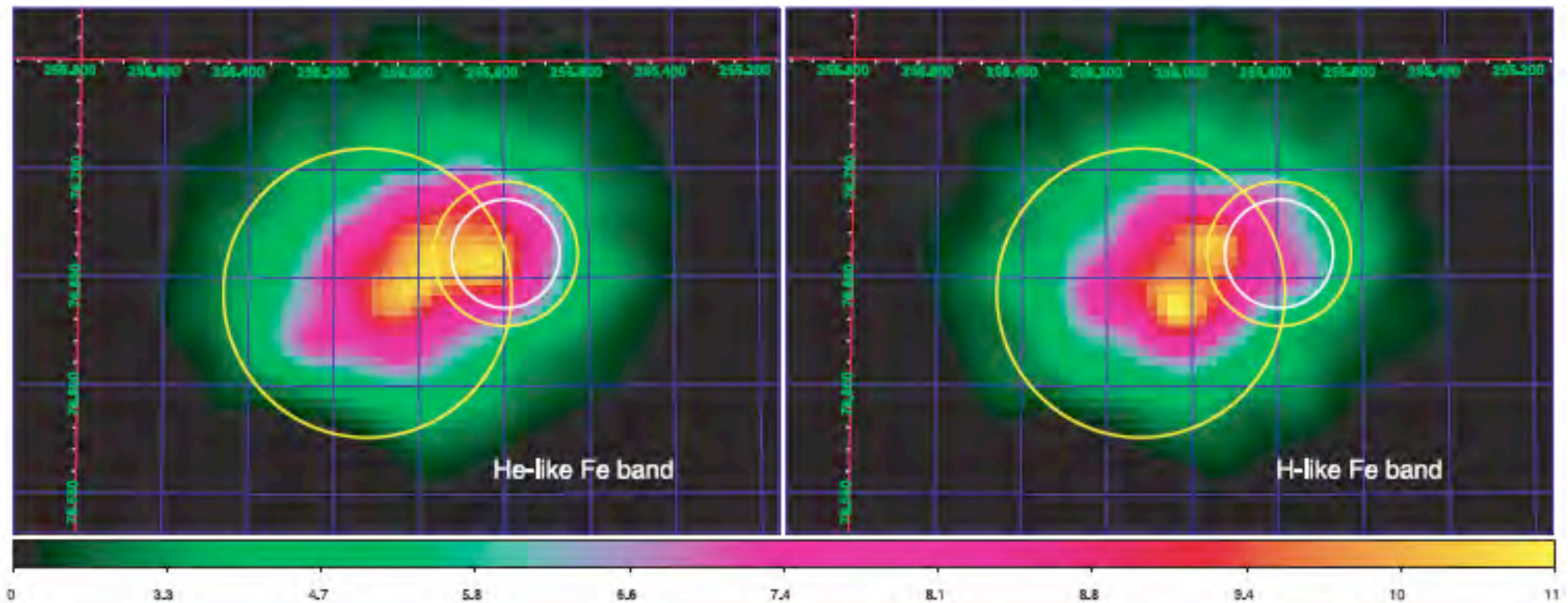
- こぐま座にある銀河団で、地球からの距離は8.4億光年 (赤方偏移 $z=0.058$)。
- 確認されているだけで大小300個ほどの銀河からなる。
- Einstein衛星(1978-1981)の時代からX線表面輝度に2つのピークがあることが知られており、2つの銀河団が衝突している過程にあるのではないかと推測されていた。
- すざくによる観測は2006年11月10日～13日にかけて実施された。観測時間は94,400秒。

A2256銀河団 (Chandra衛星)



背景の黒い点は可視光の画像、等高線はX線の表面輝度を表す。

「すざく」の成果 - (1)

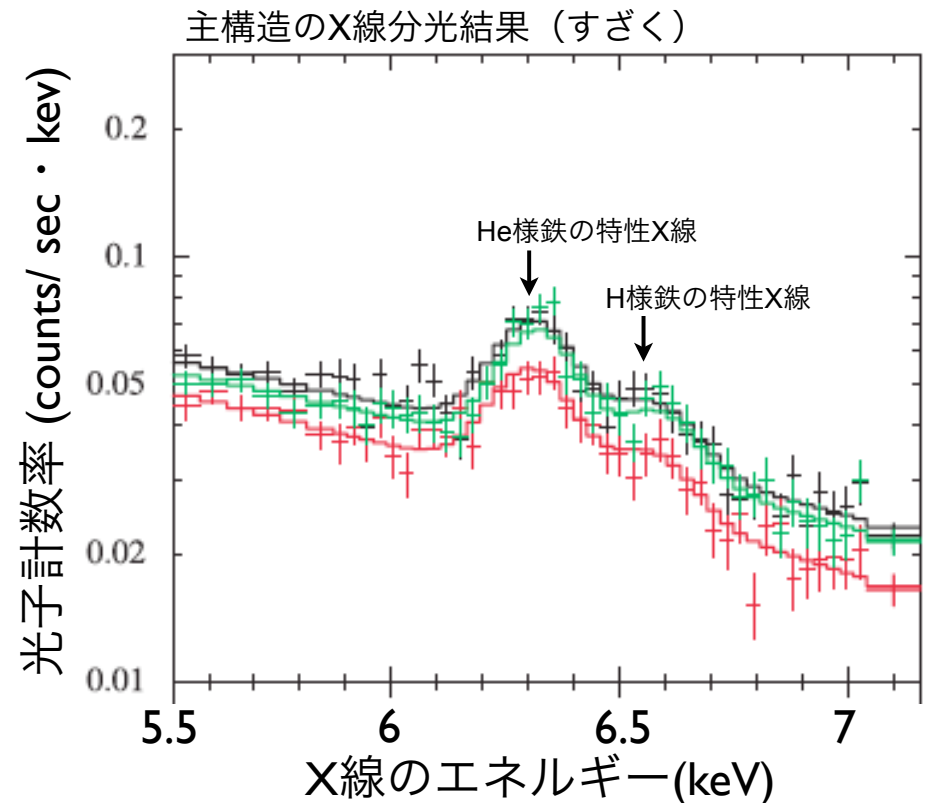


- 高温プラズマから発生するヘリウム様に電離した鉄と水素様に電離した鉄からの特性X線でイメージを取得したところ、主構造（図中の大きな黄色の円の内側、かつ小さな黄色の円の外側の領域）と副構造（図中の小さな白の円で囲まれた領域）で、この2本の輝線の強度比に違いがあることが明瞭になった。
 - 特性X線：ある特定の元素が、ある特定の電離状態にある時に放出するエネルギー（= 波長）の決まったX線。プラズマの温度が高いほど電離が進み、高階電離した原子からの輝線が相対的に強くなる。
 - 主構造：温度 $6.4 \times 10^7 \text{K}$: H様輝線が相対的に強い。
 - 副構造：温度 $4.5 \times 10^7 \text{K}$: He様輝線が相対的に強い。
- この時点で2つの構造がもとは別々の銀河団であることが明らかとなった。

「すざく」の成果 - (2)

■ 鉄の特性X線の分光解析

- 特性X線は、横軸エネルギー、縦軸計数率のグラフ (スペクトル) 上で、ピークとなって現れる。
- 特性X線のエネルギー方向への広がり
は、検出器のエネルギー分解能が有限であることによる見かけの効果である。
- 今回の解析の狙いは、主構造と副構造が相対運動をすることによる視線方向のドップラー偏移の違いにより、それらから放射されている輝線を中心エネルギーが相対的にずれるのを検出することにある。



黒、赤、緑は、三台のX線CCDカメラ(XIS0, XIS1, XIS3)にそれぞれ対応する。十字がデータ点、ヒストグラムが観測データを最もよく説明するプラズマ放射モデルを表している。

「すざく」の成果 - (3)

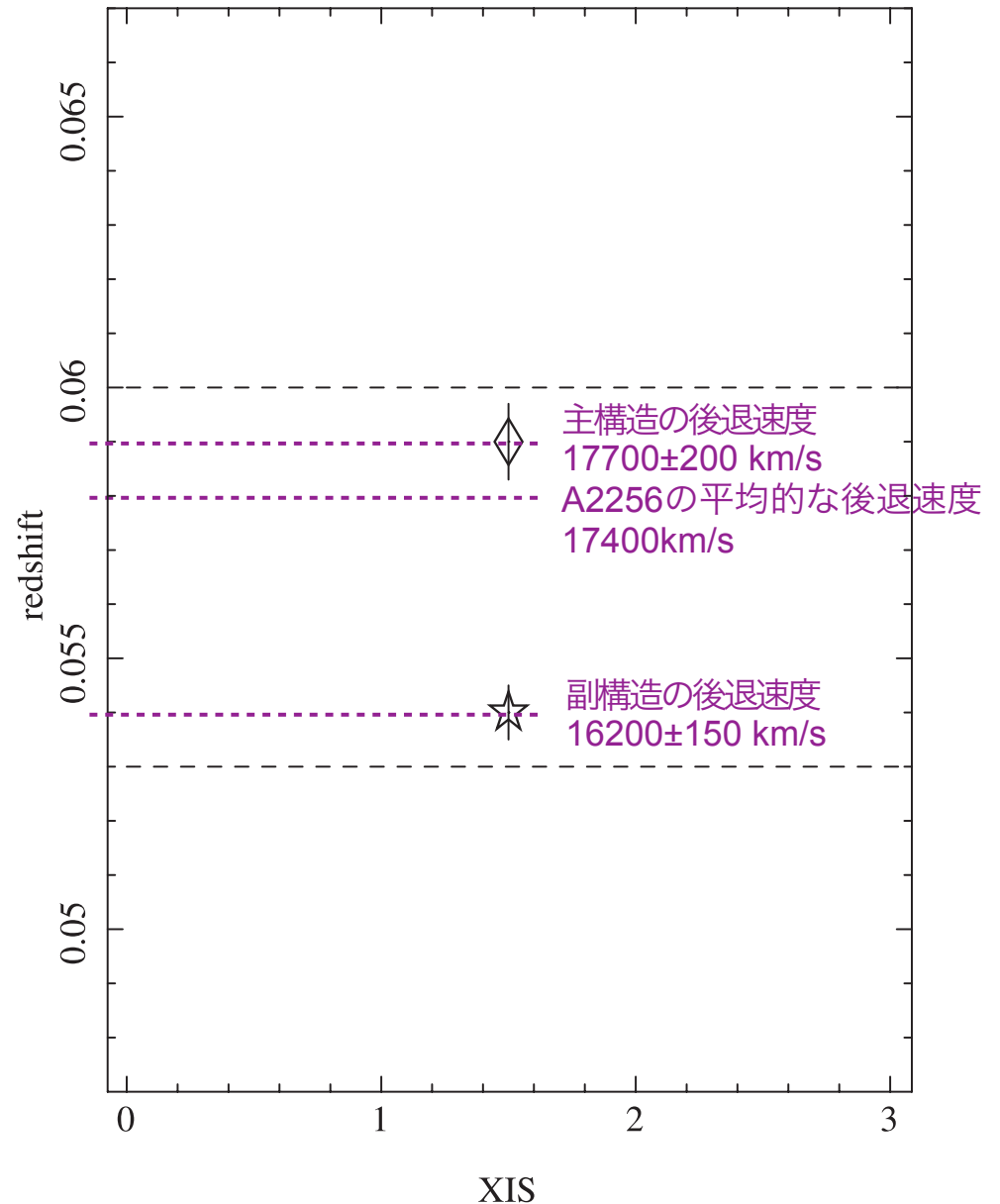
■ 赤方偏移 (redshift, z)

- 近傍宇宙では、特性X線のエネルギーのずれの割合は赤方偏移 z に比例する。

$$z = \frac{v}{c} = \frac{\Delta E}{E}$$

- ここで v は後退速度、 ΔE は特性X線のエネルギーのずれである。
- 注意深く輝線のエネルギーのずれ(ΔE)を調べたところ、
 - 主構造の後退速度は約17700km/sであり、A2256の平均的な後退速度より大きいことから、主構造は銀河団の重心からみて手前にあり、相対的に我々から遠ざかる方向に運動している。
 - 副構造の後退速度は約16200km/sであり、A2256の平均的な後退速度より小さいことから、副構造は銀河団の重心からみて奥側にあり、相対的に我々に近づく方向に運動している。

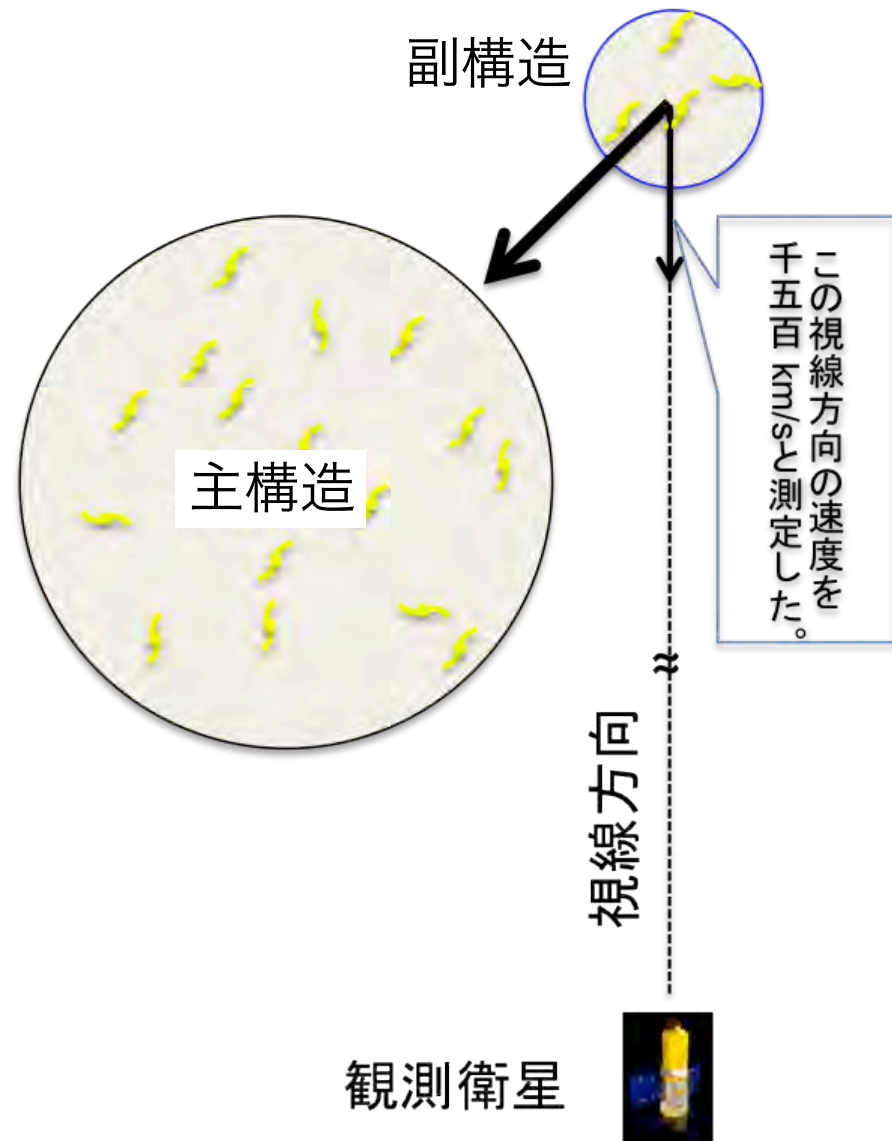
となっていることがわかった。すなわち、2つの銀河団は互いに衝突しつつあることがわかった。衝突の相対速度は 1500 ± 300 km/s。



「すざく」の成果 - (4)

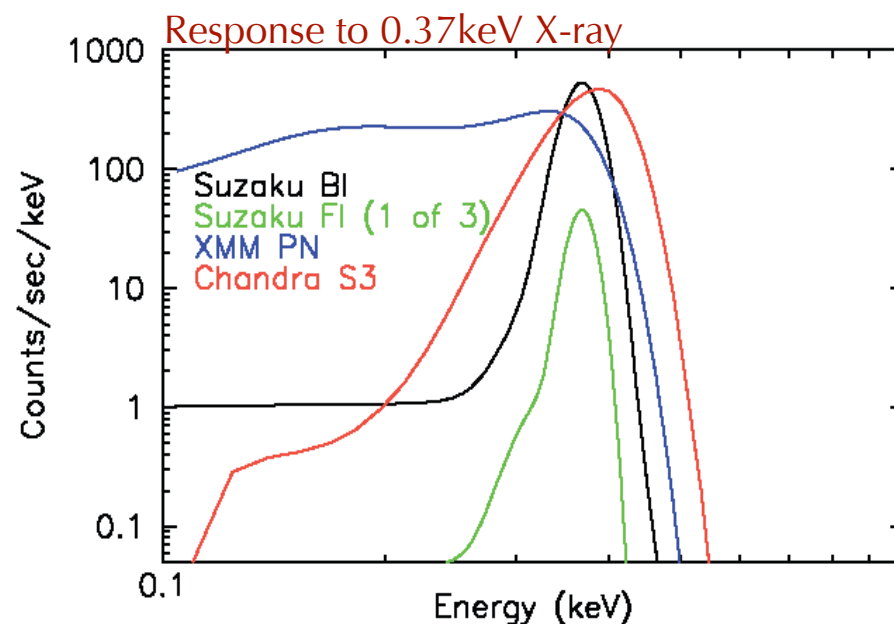
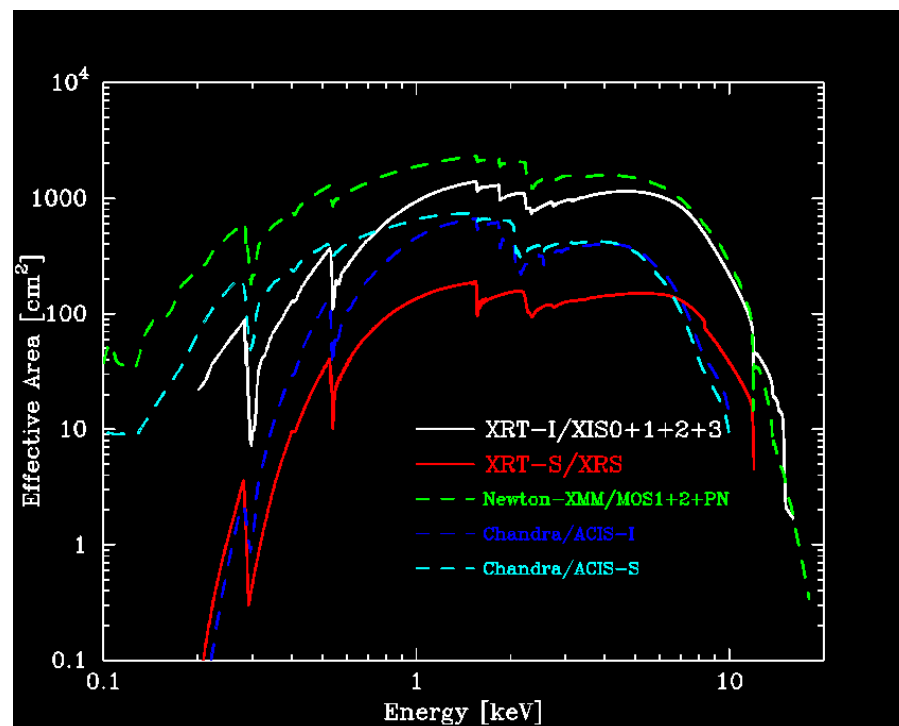
■ まとめ

- A2256銀河団全体は、膨張する宇宙に乗って、 17400km/s の速度で我々から遠ざかっている。
- 主構造の後退速度は 17700km/s であり、A2256全体の静止系で見た場合に、我々から 300km/s の速度で遠ざかっている。副構造よりも手前側にあり、副構造の重力により我々から遠ざかる方向に運動していると考えられる。
- 副構造の後退速度は 16200km/s であり、A2256全体の静止系で見た場合に、我々に 1200km/s の速度で近づいている。主構造よりも奥側にあり、主構造の重力により我々に近づく方向に運動していると考えられる。
- 2つの構造は、相対速度 1500km/s で衝突しつつある。



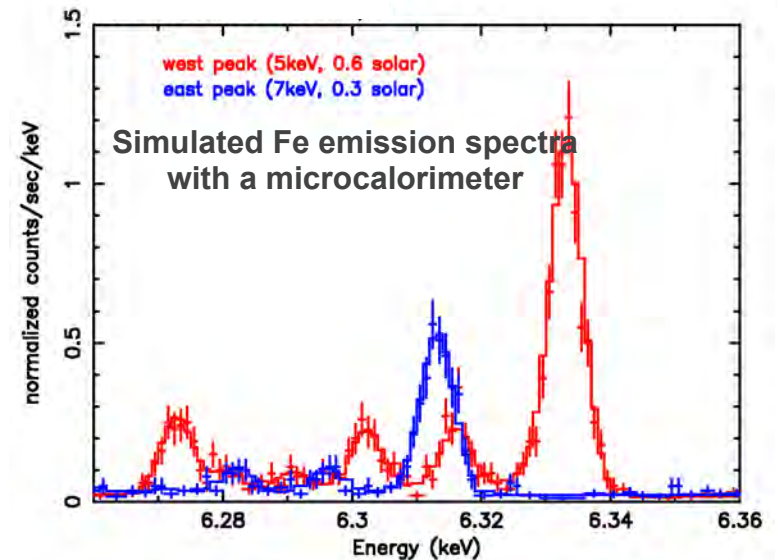
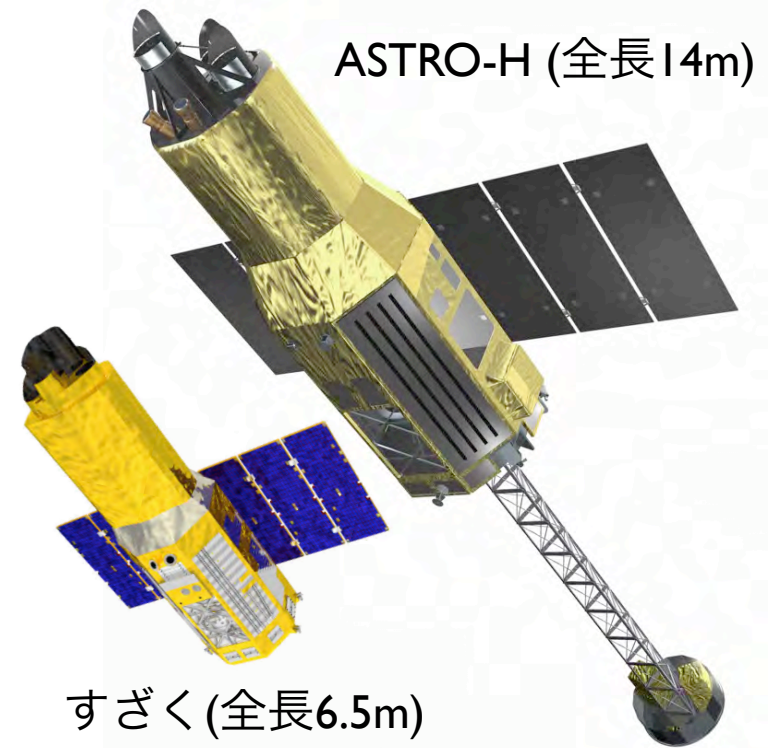
今回の成果をもたらしたもの: X線CCDカメラ(XIS)の特長

- 広い集光面積
 - 1-6keVの中エネルギー帯で1000cm²。
 - XMM-Newton衛星にはやや劣るものの、ほぼ同等。
- 他の衛星に比べ、特に低エネルギー側(<2keV)で優れたエネルギー弁別能力を有する。
 - X線ドップラー観測に極めて有効。
- 低軌道による低いバックグラウンド性能。
 - 銀河団は空間的に広がっていて表面輝度が低いため、検出器のバックグラウンドが低いことは本質的に重要である。
 - 「すざく」衛星は低軌道で地磁場に守られているため、長楕円軌道をとるXMM-Newton衛星やChandra衛星よりもバックグラウンドが低く安定している。
- 高精度のエネルギー較正
 - 検出器チームの努力により、鉄の特性X線のエネルギー帯で、精度0.1%での較正が実現している。



ASTRO-Hへの展望

- 2014年打上げ予定
 - X線マイクロカロリメータ(SXS): 「すざく」 X線CCDカメラの30倍のエネルギー弁別能力により、100km/s以下の視線方向速度の検出が可能になる。
 - 硬X線撮像検出器(HXI): 10-80keV帯での撮像を可能とし、このエネルギー帯での検出感度が「すざく」硬X線検出器の100倍になる。
- ASTRO-Hの最重要科学目標
 - 100個程度の代表的な銀河団において、高温ガスの熱エネルギーを測定し、鉄輝線のエネルギー領域(6キロ電子ボルト)で300km/sの速度分解能の分光性能を実現し、銀河団ガスの運動エネルギーを測定する。硬X線帯域で「すざく」の約100倍の感度で分光観測することで非熱的エネルギーを測定する。
 - これにより、ダークマターの総質量を求め、宇宙の構造形成のモデルに強い制限がつけられると期待されている。



SXSで期待されるA2256のHe様鉄輝線のスペクトル。
「すざく」XISの30倍のエネルギー弁別能力を有する。