

# 論文内容の要旨

## 論文題目: Hard X-ray Emission from Groups of Galaxies Detected with ASCA

(「あすか」により検出された銀河群からの硬X線放射)

氏名 中澤 知洋

### 1 はじめに

銀河団は、大きなものになると数千の銀河からなる宇宙で最大の自己重力系であり、暗黒物質を含めたその重力エネルギーは  $10^{64}$  erg にも達する。銀河団には、その重力ポテンシャルによって温度  $5 \sim 10$  keV のプラズマ (ICM) が大量に閉じ込められており、その中を  $1000 \text{ km s}^{-1}$  という速度で銀河がランダムに運動している。

最近になって SAX や RXTE といった衛星の活躍により、Coma 銀河団などから、非熱的なハード X 線の超過成分が初めて報告された。この発見は銀河間の大きく広がった空間において、粒子加速が行なわれていることを意味しており、2つの点で極めて興味深い。一つには、加速のメカニズムそのものである。銀河団は、 $10^{24}$  cm というスケールを持つプラズマの塊であり、密度が希薄なので高エネルギー粒子のエネルギー散逸も小さいため、原理的に他の天体プラズマよりも高エネルギーまでの加速が可能である。このことから、いわゆる「最高エネルギー宇宙線 ( $10^{20}$  eV)」の起源として注目される。もう一つには、X 線の観測から非熱的粒子のエネルギー密度や、銀河間磁場の値が求まるために、これらを考慮せずに求められている銀河団の質量、とくに暗黒物質が増える可能性である。この値は宇宙の進化と深く関係していることから、宇宙論に対して大きな影響を与える可能性がある。

ところが、銀河団からの X 線放射は ICM からの熱的放射が強く、ハード X 線は  $\sim 30$  keV 以上にしか現れてこない。10 keV を越える硬 X 線の領域では X 線の集光技術が実用化されていないために、検出器の感度が極めて限られており、非熱的な放射が報告された銀河団は今のところ 3 つしかない。

そこで我々は銀河群に注目した。銀河群は小型の銀河団といえる天体であり、重力エネルギーも  $10^{62}$  erg と大きい。一方で、銀河群の銀河間プラズマ (IGM) の温度は 1 keV 程度と低く、その熱的放射は  $\sim 4$  keV 以上のバンドにはほとんど寄与しない。したがって、もし銀河群に非熱的な放射が存在すれば、10 keV までに高い感度をもつ「あすか」衛星などを用いてこれを検出できる。特に「あすか」搭載の GIS 検出器は非常に低い、安定したバックグラウンド特性を持ち、ハード X 線の検出にもっとも適した装置といえる。

## 2 銀河群からの硬 X 線の検出

われわれは「あすか」の観測データの中から、十分な統計を持つ近傍の銀河群 18 個を選びだし、硬 X 線の存在を系統的に調べた。図 1a に「あすか」で得られた HCG 62 銀河群 ( $z = 0.0146$ ) の X 線スペクトルを示す。この銀河群は半径  $15'$  以上までに広がった X 線放射を持ち、そのスペクトルは温度 1 keV 程度の熱的なプラズマ放射の特徴を示すが、同時に 4 keV より上に明らかな超過成分が見られた。この成分の広がりを調べると、IGM と同じ程度かそれ以上に広がっている (図 1b)。我々は混入 X 線源や検出器に由来する系統誤差、とくにバックグラウンドの見積もりなどを詳細に検討したが、いずれの成分でも説明できないことが判明した。これら結果は、真に広がったハード X 線の放射の存在を強く示すものである。ハード成分のスペクトルは、光子指数  $\Gamma \sim 2$  のパワーロー、または温度 6 keV 以上の高温プラズマの放射モデルで良く合い、その 2–10 keV での明るさは  $\sim 4.2 \times 10^{41}$  erg s $^{-1}$  で、IGM からの放射 (0.5–10 keV) の 20% に相当する。

この他の 17 個の銀河群についても、同様の解析をしたところ、全体の半分に当たる  $\sim 9$  個の銀河群から、ハード X 線の兆候を発見した。その明るさは、 $1 \sim 18 \times 10^{41}$  erg s $^{-1}$  程度であり、IGM 放射の 10  $\sim$  40% に相当する。この比は、非熱的なハード X 線が観測された 3 つの銀河団のそれに近い。一方で、残りの 8 個の銀河群は超過ハード成分をほとんど示さず、その明るさの上限は IGM の 5% 以下となった。これらの結果から、ハード成分の強度は銀河群によって大きく異なり、その明るさは IGM の明るさの 30% をほぼ上限として、広く分布することが示された。

## 3 ハード X 線の放射のメカニズムと加速／加熱

我々は HCG 62 銀河群をモデルに、ハード X 線の放射機構について考察した。100 keV 程度の電子による非熱的な制動放射であるとする説では、同時に IGM が強く加熱されるため全体としてのエ

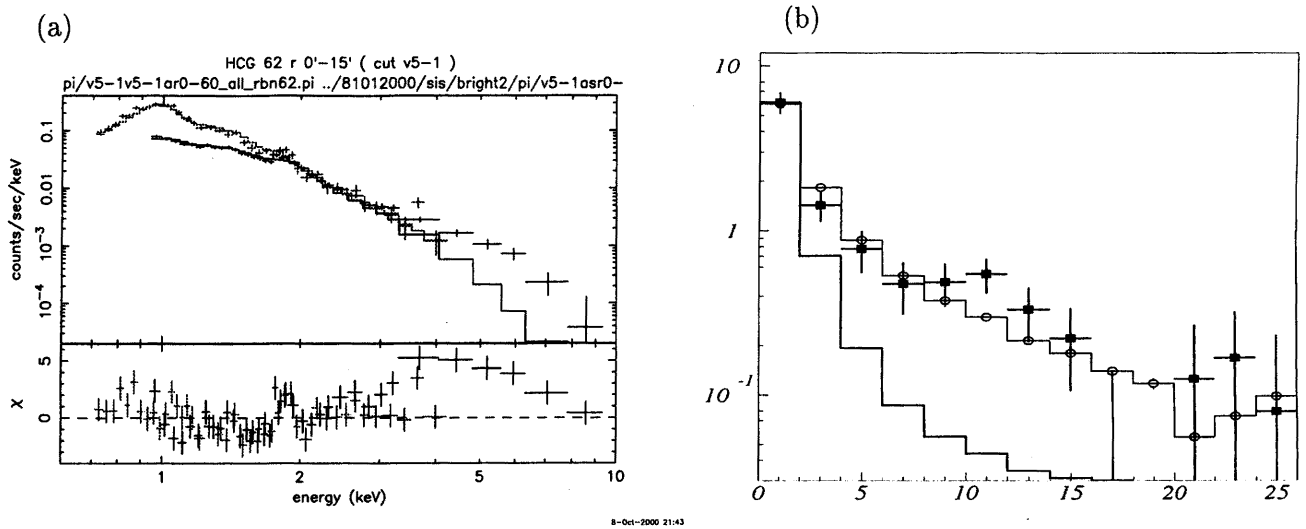


図 1: (a) HCG 62 銀河群から得られた 0.5–10 keV の X 線スペクトルを、熱的な放射モデルで Fit したものの。 (b) 4–8 keV の X 線の半径方向の輝度分布 (■) を 0.5–4.0 keV の熱的な放射成分 (○) と比べたもの。太線は点源を仮定した時の分布。

エネルギー散逸が極めて大きい。我々の銀河群のサンプルから加熱の証拠が見られないこと、および総エネルギーが大き過ぎることから、この説は考え難いと結論される。相対論的電子が 3 K の宇宙背景放射を逆コンプトン過程で叩きあげている場合には、HCG 62 が有意なシンクロトロン放射をしていないことから、銀河間の磁場が  $\sim 0.1 \mu\text{G}$  よりも小さいと求まった。電波のファラデー回転などから一般に銀河間の磁場は  $1 \mu\text{G}$  以上と考えられるので、この説が正しいためには、磁場の強度に大きなムラがある必要がある。熱的な放射を考えた場合には、その明るさからしてハード成分と IGM の圧力平衡を仮定するには無理が多く、 $20 \mu\text{G}$  程度の磁場で閉じ込めてやる必要がある。逆コンプトン説または熱的な説では、いずれも非熱的な圧力は局所的に大きな値を持つものの、全体としては小さいことが示唆された。

このようなハード成分を生み出す、加速/加熱の機構については、現状では複数の可能性が残されている。その中で我々は、メンバー銀河の運動エネルギーの散逸に注目した。銀河群の形態とハード X 線の相関を調べたところ、強いハード X 線を示す銀河群では中心部に複数の銀河を持つのに対し、示さないものでは単一の卓越した銀河がある傾向を発見した (図 2)。この傾向は、プラズマ中を運動する銀河のエネルギーがハード成分の起源であることを示唆している。

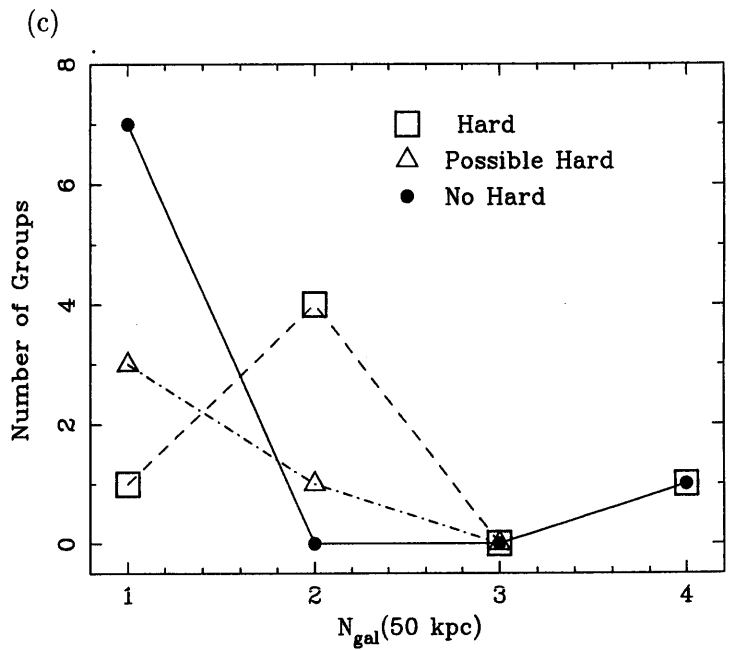
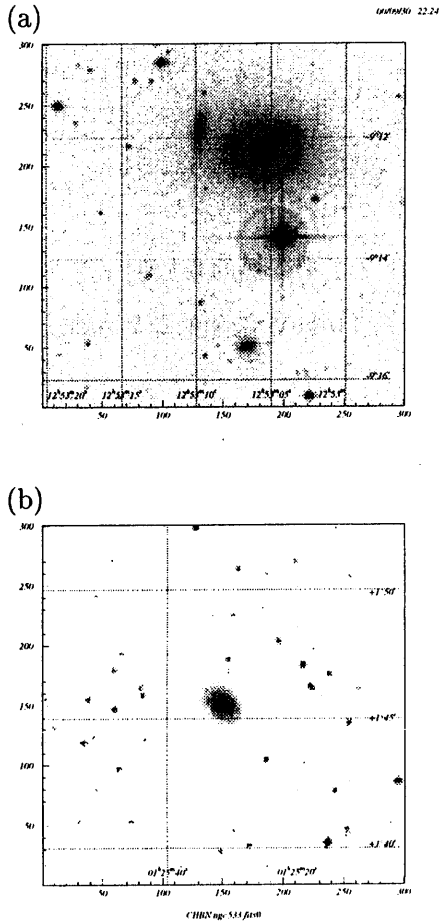


図 2: (a) HCG 62 銀河群の中心 100 kpc 四方の可視光イメージ。4 つの銀河が密集している。(b) NGC 533 銀河群の中心 300 kpc 四方のイメージ。明るい銀河は一つしか見られない。(c) 中心 50 kpc に存在する銀河の数 ( $N_{gal}$ ) の頻度分布。18 個の銀河群を、ハード成分の強いもの (□; HCG 62 群ほか 6 例)、弱いもの (●; NGC 533 群ほか 8 例)、どちらともいえないもの (△; 4 例) の 3 つに分類した。