

論文内容の要旨

論文題目：Observational Study of Diffuse X-ray Emission from Globular Clusters and their Interaction with the Galactic Halo

(球状星団からの広がった X 線放射および
銀河ハローとの相互作用の観測的研究)

氏名 岡田 祐

1 はじめに

球状星団は、10 万～100 万個もの古い星が 10-100 pc 程の半径内に球状に密集した自己重力系であり、星の進化、宇宙の化学進化、近接連星の生成、星団自身の力学的進化、銀河ハローとの相互作用など、重要な宇宙物理学のテーマの宝庫といえる。その中で興味深い現象が星団の運動に伴うハローとの相互作用である。一般に天体が希薄なプラズマ中を運動する際、衝撃波の生成や物質の散逸などの重要な物理現象を直接プローブすることができる。

実際、星団は $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$ の速度でハロー中を運動しており、これはハローの音速 ($\sim 30 \text{ km s}^{-1}$) に比べるとはるかに速いため、条件が揃えば星団の進む前方に衝撃波が形成される可能性が高い。この相互作用の鍵となるのが星団ガスである。これまでに星団ガスはその存在が示唆されているもののほとんど検出されていない。従って衝撃波によって暖められたプラズマからの X 線放射が検出されると、そのガスの存在を証明し、かつ星団ガスはハローとの相互作用によってはぎとられているという解釈を与えることができる。また観測の困難な銀河ハローの密度の推定など、重要な物理量を直接決定する手段ともなりうる。さらに、プラズマ加熱に加え、ショックにおいて粒子加速が起きる可能性もあり、粒子加速研究において新しい知見をもたらすことも期待できる。

古くは 1980 年代に *Einstein* 衛星を用いこのような X 線の探査が行われてきたが、有意な結果は得られていなかった。1990 年代、*ROSAT* 衛星によって、47 Tuc から広がった X 線放射が検出され、シェル状に広がって見えることから、bow shock による熱的 X 線放射の可能性が示唆された (Krockenberger & Grindlay 1995)。しかし、この放射は非常に S/N が悪く、あくまでも可能性を示唆するにとどまっていた。そこで本論文では、従来より一桁以上も空間分解能に優れたチャンドラ衛星の公開データを用い、球状星団に付随した広がった X 線放射の系統的な探査を行った。

2 データ解析と結果

銀河系に付随する約 150 個の球状星団の中から、チャンドラ衛星、ニュートン衛星で観測が行われ、データの公開されている 13 個の球状星団のうち、明るい X 線源の混在していない 12 個すべてのデータの解析を行った。そのうち、6 個の球状星団から広がった放射を 3σ 以上の有意性で検出した。その中で 5 個の星団からについては、 5σ 以上の信頼度が得られた。また、点源の解析を行う事で、その放射が、検出限界以下の暗い点源の集合でも説明できないことを確認し、観測された現象が真に広がった放射であることを示した。

図 1 (上段) に本論文で重要となる 3 つの星団 (47 Tuc, NGC 6752, M5) について、チャンドラ衛星で得られた X 線の画像を示す。47 Tuc と NGC 6752 では星団の中心から $3'$ ~ $6'$ 程度離れた場所に、M5 では、星団のほぼ中心付近に広がった放射が存在することがわかる。そのサイズは $1'$ ~ $5'$ 程度広がっており、どれも非対称な形をもち、特に NGC 6752、M5 はアーク状の構造が見られる。さらに、47 Tuc と NGC 6752 では、広がった X 線放射のピーク付近に一致した電波 (843 MHz) の対応天体を発見した。これを図に等高線で示した。

検出された現象が星団の運動と関連しているかを調べるため、可視光で測定された視野方向および横方向の固有運動の文献値を用い、銀河ハローに対する星団の速度を求めた。その結果、47 Tuc と NGC 6752 では図 1 に示すように、X 線放射は期待通り、星団の運動方向と数度以内で一致した方向にあることが確認された。M5 についても、ほぼ同様であった。一方ケンタウルス座 ω 星団では、星団の運動方向と $\sim 100^\circ$ もずれており、残る一例 (M80) も $\sim 30^\circ$ で X 線データが十分な精度をもたなかった。従って 5 例中の 3 例では、見つかった広がった放射は星団の運動に強く関連していることが示唆される。

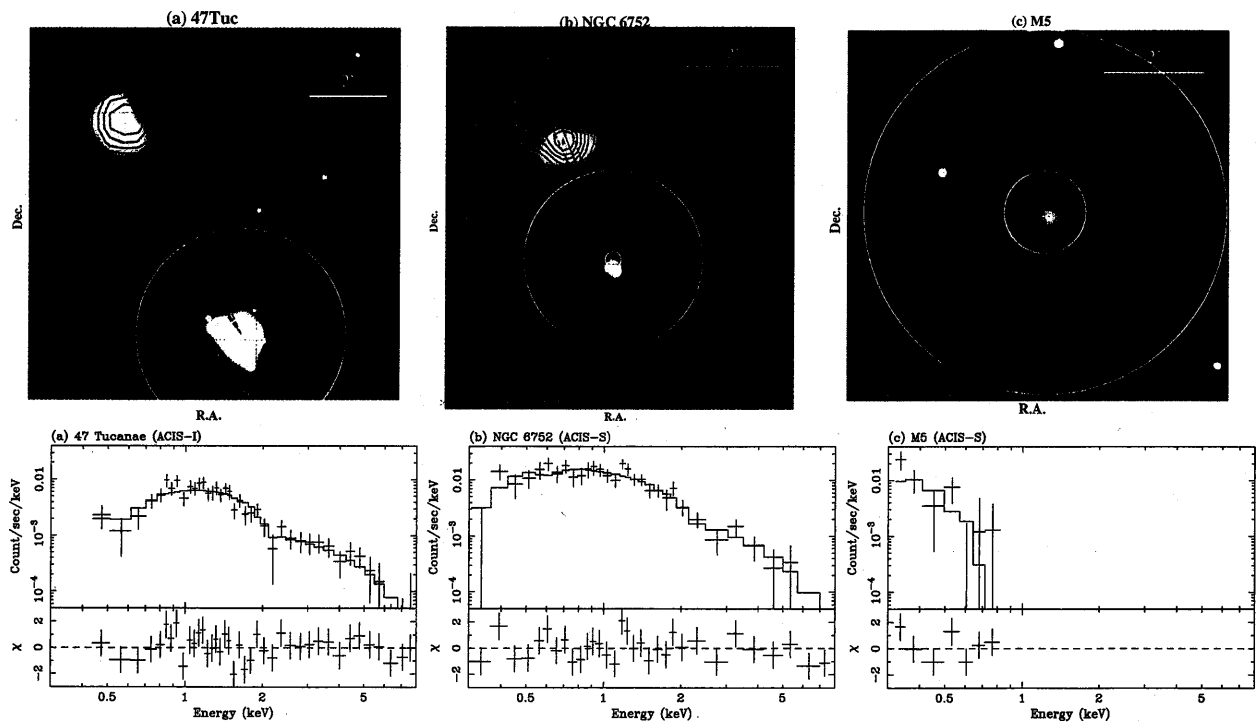


図 1: (上段) *Chandra* ACIS によって得られた球状星団 47 Tucanae (左)、NGC 6752 (中)、および M5 (右) の 0.3–7.0 keV の X 線画像 (点源の除去後)。電波対応天体の見つかった 2 天体 (47 Tuc, NGC 6752) については 843 MHz の電波画像を等高線で重ねた。白円は球状星団のコア半径 (内) と half mass 半径 (外) を示す。また球状星団の銀河ハローに対する速度方向を矢印で示す。(下段) これらの広がった X 線放射の、検出器の応答を含んだ X 線スペクトル。

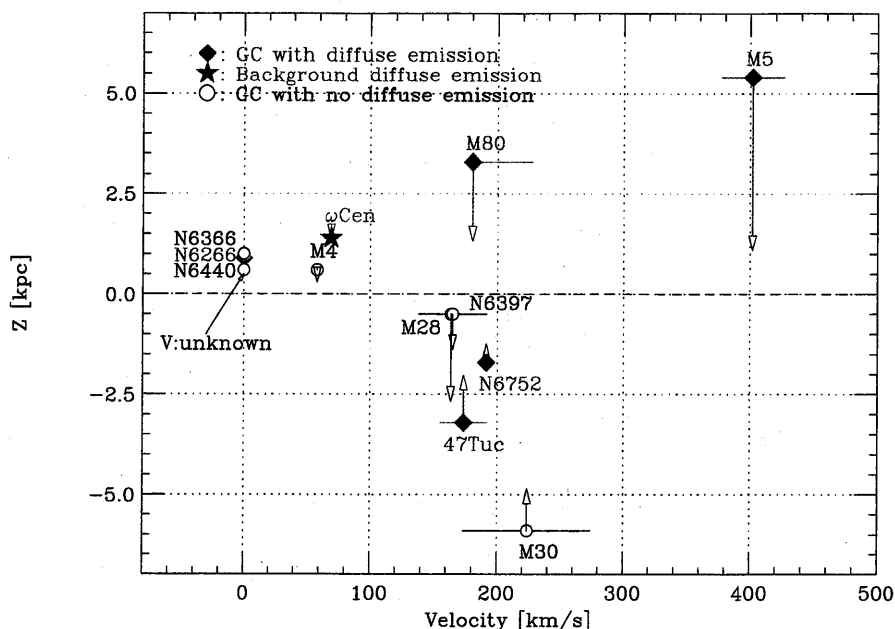


図 2: 12 個の球状星団の銀河ハローに対する運動速度 ($V \text{ km s}^{-1}$) と銀河面からの距離 ($z \text{ kpc}$) の関係。星団の速度の z 方向の成分を矢印で示した。広がった X 線放射が検出された天体を赤で、検出されなかった天体を黒で示す。NGC 6266、NGC 6366、および NGC 6440 は速度が求まっていない。

図 1 (下段) に、これら 3 つの星団の広がった放射領域の X 線スペクトルを示す。47 Tuc と NGC 6752 のスペクトルは高エネルギー側まで続いているのに対し、M5 のスペクトルは、1 keV 付近ではば検出されなくなっている。前者は光子指数 ~ 2 の Power law 型関数でよく再現され、後者は、0.05 keV 程度の光学的に薄いプラズマからの熱的放射のモデルでよく再現された。その光度は、0.5–4.5 keV 内で前者が $\sim 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ 、後者が $\sim 10^{31} \text{ erg s}^{-1}$ であった。

検出された広がった X 線放射が、真に星団に付随するものか否かを、星団の運動方向との関係、X 線の光度や形態、また電波対応天体の有無、などの観点から検討した。その結果、 ω 星団のものは背景の銀河団を見ている可能性が大きいですが、図 1 に示した 3 天体 (および M80) では、球状星団に付随する現象であることが確認された。

最後に、星団に付随したディフューズ X 線放射が検出された 4 つの星団と、検出されなかった残りの星団を系統的に比較した。すると、図 2 に示されるように、検出された 4 天体は、どれも運動速度が大きく、銀河面から 1 kpc 以上離れた位置にあり、さらに運動の z 方向がどれも銀河面を向いていることがわかった。よってこれらの星団は長い間、銀河面から遠くハローを旅し、内部に十分なガスを溜め込んだあと、まさに銀河面に突入しようとしている星団と解釈できる。速度は速くても、まさに銀河面から出て来た直後と考えられる M28 や NGC 6397 では、ディフューズな X 線放射は検出されなかった。これらのことから、検出された X 線放射は、銀河ハローと内部ガスとの相互作用による bow shock に起因した現象であると解釈できる。

3 熱的 diffuse 放射の解釈

M5 に付随する熱的放射は、まさにショックによって加熱されたプラズマからの放射であると考えられる。実際、強い衝撃波を仮定したときの M5 の運動速度 (400 km s^{-1}) から決まる温度が 0.3 keV 程度であり、観測と矛盾ない。X 線の光度と温度からハローの密度を推定すると $\sim 7.8 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ と求ま

り、これを用い、運動に伴って星団がハローガスから受ける動圧と、星団の重力によるガスの束縛の強さを比較すると、動圧が優勢になることが確認できた。これは、ハローとの衝突によって星団ガスがはぎ取られていることを裏付けるものである。さらに立場を逆転させ、星団ガスがハローに及ぼす動圧とハローの熱的圧力を比べることで、実際に星団の運動によりハロー中にショックが生成される環境であることを確認した。熱的放射に費されたエネルギーは、星団ガスから供給される総エネルギーより少なく、エネルギー収支の観点からも、解釈は妥当であることを確認できた。これらの裏付けにより、bow shock に起因した現象を初めて高い信頼性で検出したことになる。

4 非熱的 diffuse 放射の解釈

47 Tuc と NGC 6752 から検出された放射は、ハードなスペクトルと電波対応天体から、非熱的放射の可能性が高い。観測されたスペクトルは、熱的なものとしても解釈できるが、その場合は 2 ~ 3 keV という高い温度が示唆され、強いショックで期待される温度 (~ 0.01 keV) を 2 桁も上回るため、現実的ではない。非熱的放射の候補は、シンクロトロン放射、逆コンプトン放射、非熱的制動放射である。系のサイズ、磁場、および運動速度から、これら星団のショック面における加速で到達できる電子の最高エネルギーは、 $\sim 10^{10}$ eV (ローレンツ因子; $\gamma \sim 10^4\text{--}5$) 程度と見積られる。ところが、シンクロトロン放射の場合、銀河ハローの典型的な磁場を $1 \mu\text{G}$ と仮定すると、観測された X 線強度を作り出すのに必要な電子の加速エネルギーは 10^{13} eV と非常に高い値になってしまい、この可能性は棄却される。

次の可能性として、相対論的な電子のスペクトルのうち、 $\gamma \sim 10$ のものが星の可視光を逆コンプトン散乱して X 線を作り、 $\gamma \sim 10^4$ のものが $\sim \mu\text{G}$ の磁場中で電波を出すというシナリオがありうる。しかしこの場合、電子のエネルギー密度が、 10^{-7} erg cm $^{-3}$ となり、典型的な星間空間のエネルギー密度を 6 ~ 7 桁も越えてしまうため、非現実的である。

そこで、最後に残った非熱的制動放射について検討を行う。星団の運動から期待される、 $\sim 10^{35}$ erg s $^{-1}$ のエネルギー入力の大部分が熱的プラズマの生成と 100 keV 程度の超熱的電子の加速に使われると仮定する。超熱的電子は、背景プラズマとのクーロン散乱で大部分のエネルギーを失うが、その約 0.1% は制動放射に費されることが確立しているため、観測された X 線放射の光度 (10^{32} erg s $^{-1}$) は無理なく説明できる。100 keV 電子のタイムスケールは $\sim 10^4$ 年程度であり、これによって総エネルギーが求まり、放射領域のサイズを用いて、電子のエネルギー密度が $\sim 10^{-11}$ erg cm $^{-3}$ であると決まった。これは逆コンプトン散乱の場合に求めたエネルギー密度より 4 桁も低くなり、現実的な値である。また、電子の一部は高エネルギー側 ($\gamma \sim 10^4$) まで加速されて逃走電子となり、星間磁場とシンクロトロン相互作用を起こして観測された電波が生成されたとして全てを矛盾なく解釈できる。但し、観測量を説明するためには、系の入力エネルギーの約 10% 程度が加速に使われている必要があり、このような効率のよい加速がどのように起きているのかは今後の課題である。

本研究によって大きく分けて二つのことを観測的に明らかにした。一つは、運動に起因する広がった X 線放射を数例発見し、これらが星団とハローとの相互作用によるショックに起因する現象であることをつきとめた。これにより、星からばらまかれた物質が断続的にハロー空間に散乱されつづけていることを証拠づけた。また、ショック面での粒子加速現象の兆候を観測的に発見し、その放射が、超熱的電子による非熱的制動放射で説明できることを示し、これと同時に高いエネルギーまで加速されている電子と磁場の相互作用によるシンクロトロン放射を世界で初めて検出した。