

# X線観測による銀河団の重力ポテンシャル形状の解析

東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻 牧島・中澤研究室 修士課程一年 西田 瑛量

平成 23 年 8 月 29 日

## 1 概要

X線の撮像分光観測を行なうと、銀河団の重力ポテンシャル形状を推定することができる。こうして推定されたポテンシャル形状は、大まかには、等温自己重力系の近似解である King の近似式に合っている。しかし、ペルセウス銀河団 (Simionescu et al. 2011) やケンタウルス銀河団 (Ikebe et al. 1999)、Abell1795(Xu et al. 1998) といった銀河団の観測から、銀河団の中心 100 kpc より内側の領域で、King 解より深いポテンシャルを持つという観測結果が知られていた。

この結果に対して、二つの解釈が提案されている。一つは N 体計算にもとづく解釈で、ダークマターが中心に強く集中し、ポテンシャルが深くなるよう寄与するというものである (Navarro, Frenk & White 1997)。もう一つは、King 解による典型的な銀河団中の質量分布に加えて、中心銀河に付随する質量分布が存在し、全重力質量が 2 つの空間スケールで階層的に分布するとする見方である (Ikebe et al. 1996; Xu et al. 1998; Makishima et al. 2001)。中心銀河に付随する質量は、バリオンの寄与をかなり含む可能性がある。

これらの解釈の概要とその比較、またこれから X 線天文衛星「すざく」を使ってどう研究を進めていくかについて、本発表で紹介したい。

## 2 銀河団

銀河団は宇宙最大の天体であり、その全重力質量は  $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$  程度であることが知られている。銀河団を可視光で見ると数十から数千の銀河が集まっているのが見え、大きさは数 Mpc 程度である。X 線で観測すると、温度  $10^7 - 10^8$  K の高温ガスが広がって見え、X 線の表面輝度から求めた高温ガスの質量は、星（銀河）の質量を数倍もしのぐ。すなわち高温ガスは、銀河団の最も優勢なバリオン成分である。しかし、銀河の速度分散、X 線の計測（後述）、重力レンズ観測などから推定すると、銀河団の全質量はバリオン質量（星 + ガス）を大きく上回っている。すなわち銀河団質量の 8 割から 9 割はダークマターによって占められていると考えられている。

本研究の目的は、銀河団の中心付近におけるダークマターの空間分布を理解することにある。それを達成するために、X 線観測から表面輝度と温度を計算する。この二つの物理量からガスの圧力勾配を求め、それが重力と釣り合っていると仮定すると、重力場を推定できる。言い換えると、高温ガスが重力により閉じ込められ、静水圧平衡（各点でのガス流速がゼロ）にあると仮定すると、閉じ込めに必要な全重力質量の半径分布を計算できる。そこで、X 線天文衛星「すざく」のデータを用いて解析を行うことにした。

## 3 X 線天文衛星「すざく」

「すざく」(Mitsuda et al. 2007) は 2005 年 7 月に打ち上げられた日本で 5 番目の X 線天文衛星である。「すざく」には二つの検出器が搭載されており、一つは X 線 CCD カメラ (XIS; X-ray Imaging Spectrometer; Koyama et al. 2007)、もう一つは硬 X 線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector; Takahashi et al. 2007, Kokubun et al. 2007) である。XIS は X 線反射鏡 (XRT; X-Ray Telescope) と組み合わせられ、0.2-12 keV の光子を一個ずつ検出し、その位置とエネルギーを計測する。HXD はバックグラウンドが小さくなるように作られた井戸型フォススイッチカウンターであり、10-600 keV を分光して観測を行う。今回は「すざく」の XIS を用いることにした。XRT+XIS は、角分解能はさほど高くないが、XIS は高いエネルギー分解能、大きな有効面積、そして低バック

グラウンドという三つの特徴を持つ。これらの特徴から XIS は広がった高温ガスの観測に最適であり、そのため「すざく」は銀河団の観測で大きな成果をあげつつある。

## 4 ヘビつかい座銀河団

重力質量分布を求めるという目的のために今回は、ヘビつかい座銀河団を選んだ。この銀河団は、銀河面に近い ( $b \simeq 9.3^\circ$ ) ため長らく認識されず、ようやく 1981 年に Wakamatsu & Malkan(可視光) および Jonston et al.(X 線) により独立に発見され、既知の X 線源 4 U 1708-23 と同定された。その後「てんま」(Okumura et al.1988) や「あすか」(Matsuzawa et al.1996, Watanabe et al.2001) XMM-Newton (Nevalainen et al.2009) や INTEGRAL (Eckert et al.2008) などで観測されてきたが、まだまだ研究が進んでいない銀河団である。図??は 0.5-12 keV の

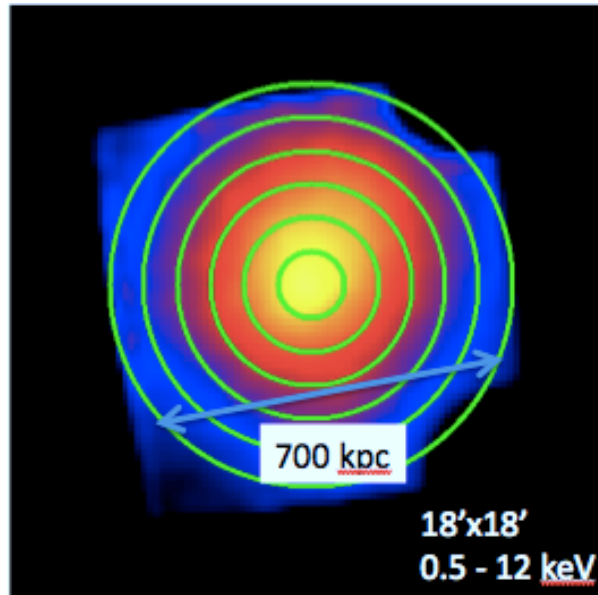


図 1: ヘビつかい座銀河団の 0.5 – 12keV の「すざく」XIS 画像。NXB(Non X-ray Background) は引いてある。線の同心円は、解析に用いた領域分割。

エネルギー帯で作成した X 線の表面輝度分布画像である。この銀河団は 130 Mpc と近い距離にあり、視直径が大きい。また、高い X 線表面輝度を持ち、かつ高温の銀河団である。この図のように X 線で見ると形状は丸いので、球状の銀河団である。「すざく」の観測は 2 回行われており、1 回目は中心 15 ks および周辺を、2 回目は 2007 年に観測された 100 ks のものがある。本研究では 2 回目の公開データを用い、ガスの温度分布と表面輝度分布を求め、ガスの閉じ込めに必要な重力質量分布を調べる。

## 5 スペクトル

図??で緑の同心円で示したように、X 線の表面輝度ピークを中心に、それぞれのスペクトルを集積した。図??は、中心 1.5 分角の領域から作成したスペクトルである。スペクトルの縦軸は、単位エネルギー幅に入る X 線光子のカウント数で、装置のレスポンスを含んだままの状態を表示している。全体的に熱的制動放射が見えている。低エネルギー側は星間吸収と検出器のレスポンスによってスペクトルが落ちていて、2 keV 付近の構造は検出器によるものである。6 keV 付近に鉄輝線がはっきり見えているのが分かる。この鉄輝線は、ガスが高温状態にある為、鉄イオンが水素様イオンとヘリウム様イオンの状態になっていることを示している。また、この鉄輝線の幅は重元素の存在量と温度によって決まっている。

このデータを、高温プラズマの放射モデル、宇宙 X 線背景放射モデル (Kushino et al. 2002)、星間吸収モデルを用いてフィットした結果、赤色の線のようになった。このとき  $\chi^2 / \text{d.o.f.} = 670/523$  となり、データとモデル

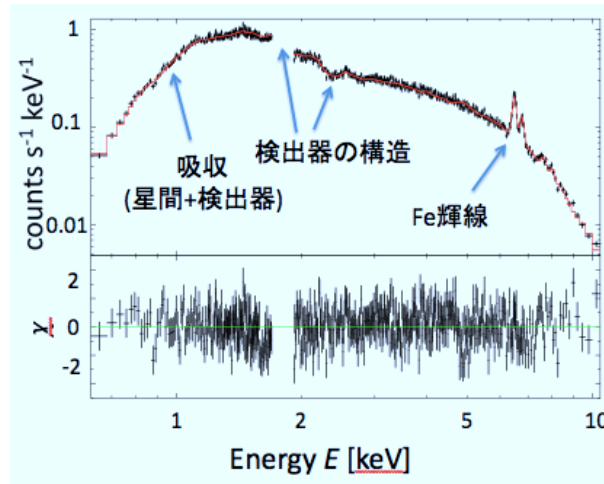


図 2: 中心 1.5 分角内でのスペクトル

がよく合っていることがわかる。他に得られるパラメーター値は、温度  $kT = 8.0 \pm 0.1$  keV、水素柱密度  $(3.67 \pm 0.06) \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ 、赤方偏移  $z = 0.028 \pm 0.001$ 、重元素の存在量  $0.45 \pm 0.02 Z_{\odot}$  となる。

## 6 温度分布

図??と同様に 6 個の領域のスペクトルを解析し、それらのガス温度を求めた結果、半径方向の温度分布は図??に示すようになった。ガスの温度は 100 kpc より外側では 10 keV 程度で推移しており、中心付近が 8 keV になっているのが分かる。

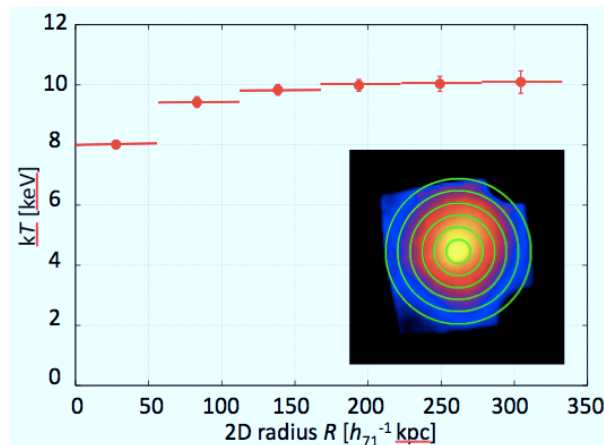


図 3: ガス温度の 2 次元半径に対する分布。誤差棒はフィッティングの  $\pm \sigma$  を示す。

## 7 表面輝度の解析

### 7.1 表面輝度分布

図??の画像から表面輝度分布を求めたところ、図??のようになった。この分布をどういったモデルで記述できるか考える。

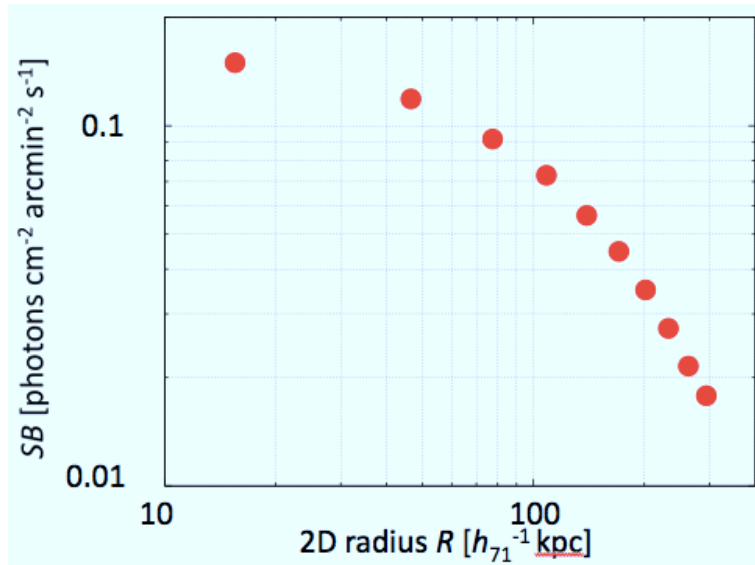


図 4: 0.5-12 keV で求めた表面輝度

## 7.2 $\beta$ モデルでのフィット

銀河団ガスの表面輝度分布を表すモデルの代表的なものに、 $\beta$  モデルがある。これは全重力質量が自己重力系の等温球対称な近似解であるキングモデルで近似でき、そのポテンシャル中に等温ガスが静水圧平衡で分布するという状況に対応しており、そのガス密度は、

$$n_{\text{gas}}(r) = n_{\text{gas}0} \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}\beta} \quad (1)$$

と表される。 $r_c$  はキングモデルのコア半径、 $r$  は 3 次元半径、 $\beta$  はキングモデルとの広がり比を表すパラメータである。ガスの emissivity は  $\propto n^2$  であり、それを 2 次元に応用すると表面輝度分布の式が、

$$S(R) = S(0) \left[ 1 + \left( \frac{R}{r_c} \right)^2 \right]^{-3\beta+1} \quad (2)$$

と表される。これを用いて、図 4 の表面輝度分布をフィッティングした。その結果、図 5 のように中心付近の二

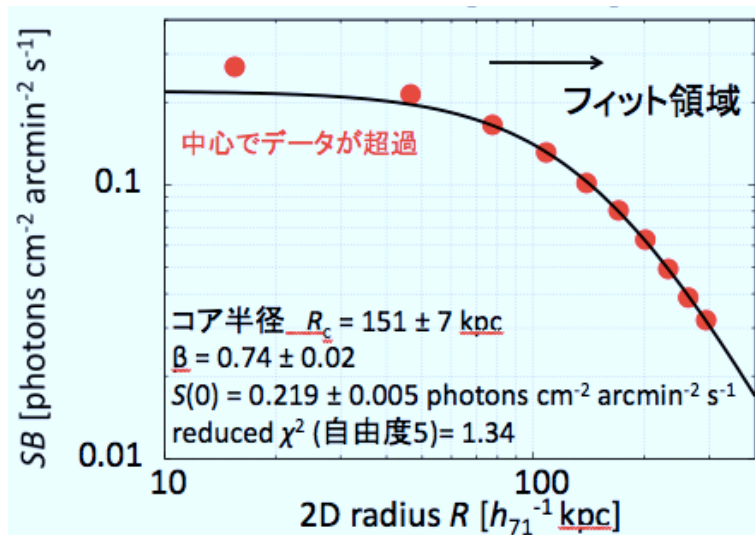


図 5: 0.5-12 keV で求めた表面輝度

点を除くとうまくフィットでき、図中に記入したパラメーターが得られた。しかし中心の2点は明らかにモデルより超越しており、それらを含めるとフィットは reduced  $\chi^2$ (自由度 7) =  $1.7 \times 10^{-2}$  と許容されなくなってしまう。つまり中心付近では、 $\beta$  モデルで計算されるポテンシャルより深いことを示している。

### 7.3 2 モデルのフィット

図??の中心部で見られる輝度の超過は、炉座銀河団 (Ikebe et al. 1996) やケンタウルス銀河団 (Fukazawa et al. 1993) などと同様に見られており、それらの研究では2  $\beta$  モデルが導入された。

2 モデルとは、表面輝度分布の式 (??) に現象論的に、コア半径の小さなもう一つの モデルを加えたもので、このとき表面輝度分布は、

$$S(R) = S_1 \left[ 1 + \left( \frac{R}{r_{c1}} \right)^2 \right]^{-3\beta_1+1} + S_2 \left[ 1 + \left( \frac{R}{r_{c2}} \right)^2 \right]^{-3\beta_2+1} \quad (3)$$

と表される。この式でフィットすると、図??が得られた。

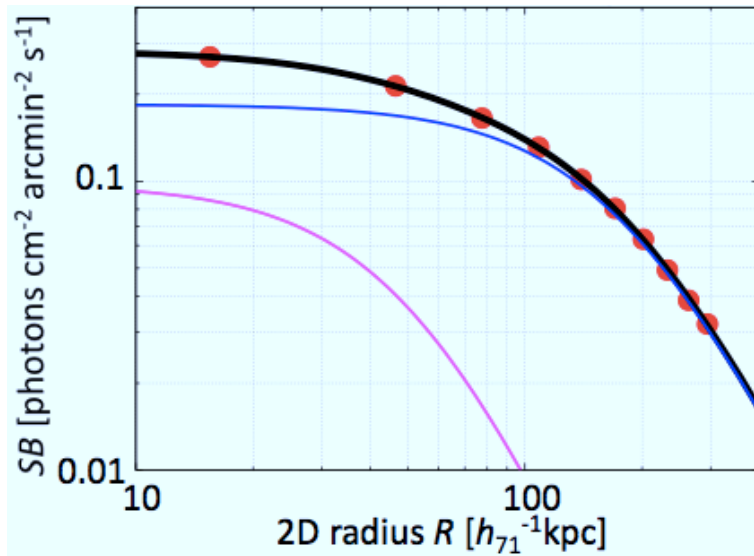


図 6: 2 $\beta$  モデルによるフィット。紫色の線がコア半径の小さな モデルを表し、青色の線がコア半径の大きなモデルを表している。これら二つを足し合わせたものが黒線となっている。

このときのパラメータ値は、表??のように求められた。

| 表 1: 表面輝度分布を 2 $\beta$ モデルでフィットしたときのパラメーター |  |
|--|--|
| reduced $\chi^2$ (自由度 5)                   | 1.27   |
| 表面輝度 $S_1$                                 | $(18 \pm 1) \times 10^{-2}$ photons $\text{cm}^{-2}$ arcmin $^{-2}$ s $^{-1}$    |
| 表面輝度 $S_2$                                 | $(9.7 \pm 1.3) \times 10^{-2}$ photons $\text{cm}^{-2}$ arcmin $^{-2}$ s $^{-1}$ |
| $\beta_1 = \beta_2$                        | $0.79 \pm 0.04$  |
| コア半径 $r_{c1}$                              | $179 \pm 19$ kpc   |
| $r_{c2}$                                   | $53 \pm 10$ kpc  |

reduced  $\chi^2$  をみてもよく合っているのがわかる。 $\beta$  の値は XMM-Newton による先行研究 (Nevalainen et al. 2009) に一致し、コア半径も Ota & Mitsuda (2002) が多数の銀河団で発見した、2 つの典型的なコア半径 ( $\sim 155$  kpc および  $\sim 45$  kpc) に良く一致する。

## 8 全重力質量分布

温度分布と表面輝度分布が分かったら、(??) 式により 3 次元の emissivity が

$$\epsilon(r) = \epsilon_1 \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_{c1}} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}\beta} + \epsilon_2 \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_{c2}} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}\beta} \quad (4)$$

と求められ、その平方根として  $n_{gas}(r)$  が求められる。この密度分布を用いて、全質量分布は、

$$M_{tot}(r) = \frac{k_B T r}{m G} \left( \frac{d \ln n_{gas}}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} \right) \quad (5)$$

として求めることができる。これより全重力質量分布は図??のように求められた。100 kpc より外側ではシング

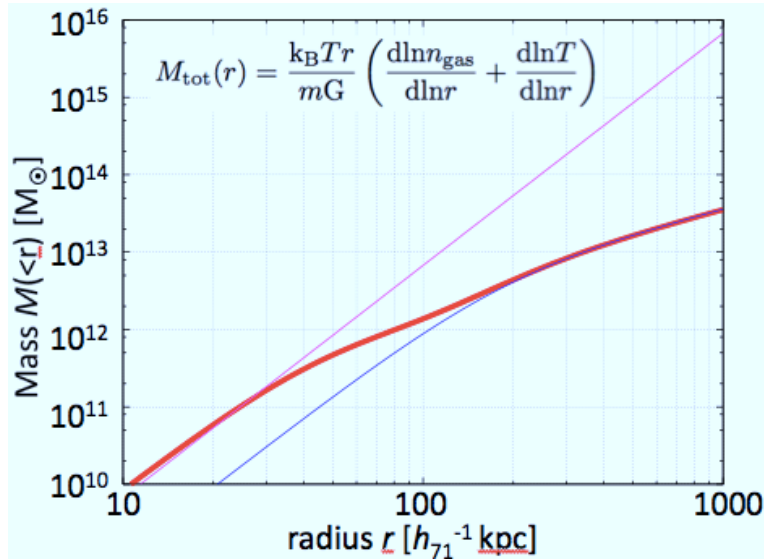


図 7: 半径  $r$  以内の全質量分布 (赤線)。青線はシングルモデルから導かれる全質量分布を、紫線は密度一定の場合の全重力質量分布を表している。

ルモデルとよく一致し、中心付近では密度一定と見なせることが分かる。また、全重力質量は 1000 kpc の位置で  $3.5 \times 10^{13} M_{\odot}$  であり、過去の研究結果 (Mohr et al. 1999) と無矛盾である。

## 9 まとめと今後の展望

本研究では「すざく」のデータを用いて、100 ksec で観測されたへびつかい座銀河団のデータを解析した。この銀河団の温度分布を調べると、周辺付近では  $\sim 10$  keV だが中心では  $\sim 8$  keV と分かった。表面輝度の分布は、75 kpc より外側ではモデルで再現できるが、中心付近では超過成分があり、2モデルでフィッティングするとよく合う。この特徴は、Abell 1795 (Xu et al. 1998) などと同様、中心 100 kpc 以内に質量の超過があることを表している。今後 NFW モデルを含め、異なるモデルでもフィッティングして比較する。

他にも、重元素量とその二次元分布を調べることで、へびつかい銀河団がどのような銀河団か明らかにしていく。また、Beppo SAX や INTEGRAL (Nevalainen et al. 2008) が報告した非熱的放射も、「すざく」の硬 X 線検出器で探査していく。