

暗黒物質の正体に迫る

一銀河団内の暗黒物質の質量分布測定一

池 辺 靖

〈理化学研究所 〒351-01 埼玉県和光市広沢2-1〉

e-mail: ikebe@postman.riken.go.jp

宇宙は暗黒物質によって支配されていると考えられているが、その正体ははまだ謎につつまれている。暗黒物質の正体解明のためのひとつの手がかりとして、銀河団における暗黒物質の質量分布の研究が、観測および理論の両面から進められている。「あすか」衛星による X 線観測での新しい成果を中心に、この分野での観測的研究の最前線を紹介する。

1. 宇宙は暗黒物質からできている

2～3年前だったか「人間は少し神に近付いた」とかいうあるテレビ番組の宣伝用ポスターを目にしたことがある。理論宇宙物理学が大きな成功を収め、ホーキングが著書¹⁾の中で「我々が全てを説明する統一理論を手に入れる日は近い」などと言ったりするなかで、一部の人々が傲慢にも口にした戯言である。物理学の根本の謎はまだ多く、その中でも暗黒物質の正体の解明は最重要課題ではないだろうか。

暗黒物質を直接見た人もいないし、その性質もほとんどわかっていないのであるが、暗黒物質は確実に実在し、しかも宇宙の力学を支配する最も主要な成分であることがわかっている。宇宙が暗黒物質によって支配されている様子は、宇宙で最も大きな天体である銀河団において顕著に見ることができる。3章で述べるように、銀河団の全質量の実に70～90%が、この正体不明の暗黒物質によって占められているのである。この稿では、これまでの観測的研究により、どのようにして暗黒物質の支配する宇宙の姿が明らかになってきたかを説明するとともに、暗黒物質の正体を突き止めるための一つの方法として、暗黒物質の空間分布についての研究を紹介する。まずは銀河団の説明から始めよう。

2. 銀河団、それは宇宙最大の天体

銀河団とは、100～1000個の銀河の集団のことである。銀河団を構成している銀河の運動は、重力によって束縛されており、個々の銀河は、銀河団が形成されてから現在までに、数回程度は銀河団の中を往復しているだろうと考えられている。複数の銀河団が集まり超銀河団を形成している可能性も示唆されているが、あまりにスケールが大きすぎるために、銀河団同士の相互作用はまだ進んでいないであろう。したがって中味がよくかき混ぜられた、あるていど進化した天体という意味では銀河団が宇宙最大のものであるといえる。

銀河団にはまた、高温で希薄なプラズマ（ホットガス）が満ちていて X 線を放出している。これまでの観測からホットガスの温度は $10^7 \sim 10^8$ 程度、また密度はガス原子の個数密度にして $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 個/cm³ 程度であることがわかっている。これはどのくらいの密度であろうか。1気圧の大气は 0.5×10^{20} 個/cm³ の個数密度をもっている。実験室で簡単な真空装置だけでつくれる真空度は 10^{-6} Torr 程度で、これは約 10^{11} 個/cm³ の個数密度に対応する。また放射光実験施設では 10^{-9} Torr、電子と陽電子の衝突実験を行う粒子加速器でも真空度は 10^{-11} Torr 程度までで、つまり原子の個数密度にしてそれぞれ約 10^8 個/cm³、 10^6 個/cm³ 程度である。

cm^3 もある。このように銀河団内空間は地上でつくることのできるどんな真空よりも高真空なのである。しかし銀河団は非常に大規模な天体であるが故に、放出される X 線のエネルギーは太陽の放出している全エネルギーの $10^{10} \sim 10^{12}$ 倍、またすべてのホットガスを足し合わせた質量は、銀河団を構成している銀河の総質量の 1~10 倍にも達することがわかっている。

このように観測によって目に見える銀河団というのは、銀河の集団であると同時にホットガスに満たされている天体である。ところが、銀河団の全質量のうちで最も大きな割合を占める成分は、銀河でもホットガスでもなく、暗黒物質なのである。

3. 銀河団の暗黒物質

観測の次に科学者がまずやることは、観測結果が我々の知っている物理法則と矛盾するようなことはないかどうかを確認する作業である。その作業の結果、ニュートンの法則から要求される銀河団の持つべき全質量と、直接観測された物質の総質量とが一致しない、という矛盾が発見された。

銀河団の全質量を測るひとつの方法は、銀河団を構成している個々の銀河の運動の様子から推定する方法である。銀河の運動は可視光スペクトルの赤方偏移から、その視線方向の速度についてのみ直接知ることができるが、横方向の速度や、奥行き方向の位置の分布などはわからない。しかしながら銀河の位置の分布も速度の分布も一様球対称であると仮定できる場合が少なくなく、その場合には視線方向の速度の分布から全質量分布を求めることができる。それによると、銀河団の規模によってばらつくが、銀河団の全質量は、太陽質量の $10^{13} \sim 10^{15}$ 倍と求まっている。次節で詳しく説明するが、X 線を放出しているホットガスを閉じ込めておくのに必要な質量についても、ほぼ同じ値が求まっている。

一方、光の明るさから推定される銀河の質量と、X 線強度から計算されるホットガスの質量とを足し合わせたものは、直接観測された物質の総質量と行うことができるが、それは銀河の運動あるいはホットガスの観測から求めた全質量のうち、たった 10~30% を占めるにすぎないのである。全質量の残りの 70~90% を占めているものはいったいなんなのだろうか。この重力だけを担って光を発しない物質は正体不明のまま「暗黒物質」と命名され、その正体については様々なモデルが提案されてきた。

暗黒物質を説明するモデルのひとつに、暗黒物質は非常に暗いために未だ観測できていない多数の天体である、とする考えがある。また質量を持つニュートリノも暗黒物質候補のひとつである。それら既知の物質で暗黒物質を説明する試みとは別に、地上実験ではまだ見つからないが、大統一理論などでその存在が予言されている、相互作用の弱い「未知の素粒子」が暗黒物質の正体ではないかという考えも提唱されている。先に“重力だけを担って”と書いたが、重力である必要は実はない。観測を説明するためには、直接観測されている物質つまり銀河とホットガスの及ぼす重力以外に、別の力の源が必要なだけなので、重力以外の力、例えば電磁気力あるいは第五の力である可能性も捨て切れない。したがって、ここでは暗黒物質という言葉はこのような可能性も含んだ広義の意味で用いることにする。

以上示したように、宇宙最大規模の天体である銀河団の質量のうち、70~90% もの部分がなにかからできているのか、いまだにわかってないのである。

4. ろ座銀河団における暗黒物質の分布

X 線観測から暗黒物質の正体に切り込む方法の一つは、その空間分布を調べることである。現在宇宙で活躍中の日本の「あすか」衛星^{2,3,4)}を用いて、ろ座銀河団における暗黒物質の分布を求めた、

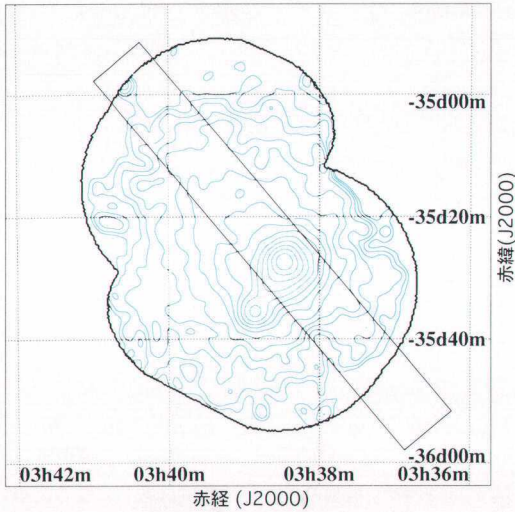


図1 「あすか」搭載のガス蛍光比例計数管を用いて得られた、ろ座銀河団の中心部の X 線強度分布。最も外側の太い線が観測された視野を表す。視野中心の方向が異なる 3 回の観測で得られたデータを足し合わせているので、おかしな視野の形になっている。等高線は対数スケール。

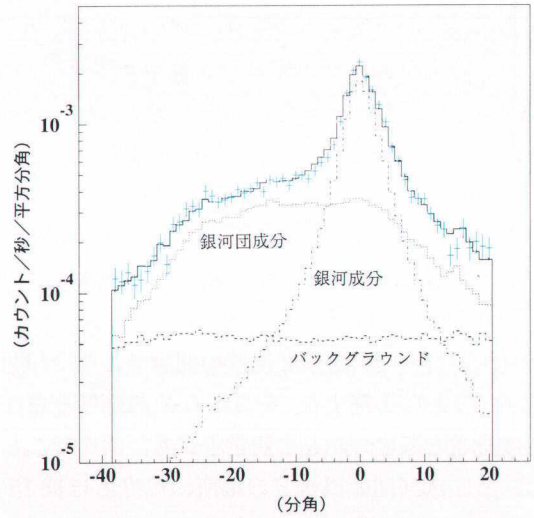


図2 図1に示した細長い領域内のデータだけ抜きだしてつくった、1次元の X 線強度分布。+がデータ。実線はあるモデルにもとづいたシミュレーションの結果であり、点線で示した3つの要素の和になっている。

新しい結果について以下で解説しよう。

ろ座銀河団は我々から最も近い距離にある比較的小さな銀河団のひとつで、近いが故に X 線での詳細な観測が可能な銀河団である。図1に「あすか」衛星に搭載されたガス蛍光比例計数管という焦点面検出器を使って得られた X 線輝度分布を示す。可視光観測では、全部で 200 個程の銀河が中心から 3°以上外までの広い領域にわたって分布しているのが観測されている⁵⁾のに対し、「あすか」で観測された領域は中心付近でしかないことに注意してほしい。X 線強度のピークは NGC 1399 という、ろ座の中ではもっとも大きな楕円銀河の位置に一致しており、またピークから南東方向に 10 分角離れたところに楕円銀河 NGC 1404 に対応する別のピークが見える。それら 2 つの楕円銀河に付随する成分に加えて、視野全体が X 線で光っており、銀河団スケールの成分が存在していることがわかる。図2は図1に示した細長い領域から切り出してつくった 1 次元の X 線輝度分布で、楕円銀河 NGC 1399 に付随する

成分と銀河団全体に付随する成分と、2つの成分がはっきりと見て取れる。この X 線輝度分布はどのような重力ポテンシャル分布を反映しているのだろうか？

ホットガスを記述するパラメータ、圧力(P)、密度(個数密度を n 、質量密度を ρ と書く。銀河団のホットガスについては $\rho = 0.6 m_p n$ の関係がある。 m_p は陽子の質量。)、温度(T)、そして重力ポテンシャル(ϕ)は次の2つの式で関係づけられている。

$$\nabla P = -\rho \nabla \phi \quad (1)$$

$$P = nk_B T \quad (2)$$

式(1)はガスの圧力が重力と釣り合っている(静水圧平衡)ことを示しており、また式(2)は理想気体の状態方程式である。未知数は4つ(P , $n(\rho)$, T , ϕ)に対し式は2つしかない。X 線観測はその4つの未知数のうち、温度 T と密度 n とを与えてくれ、それによって圧力 P として重力ポテンシャル ϕ を解くことができる。ホットガスから放出される単位体積あたりの X 線強度は、 $n^2 \Lambda(T)$ と表

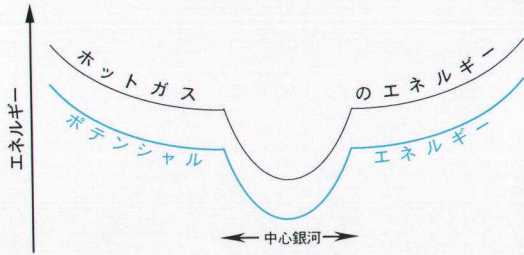


図3 ろ座銀河団の重力ポテンシャルの階層構造。

され、ガス密度の自乗と温度の関数である冷却関数 $\Lambda(T)$ とに比例する。そのため X 線輝度分布は密度分布と温度分布とで決定される。幸いなことに、ろ座銀河団の場合どの場所の温度もほぼ 10^7 度で等しく、等温のホットガスとみなせるということが X 線スペクトルの解析からわかった。そのため X 線輝度分布は密度分布がそのままダイレクトに反映されていると考えてよい。図2の X 線輝度分布から、ホットガスは大きなスケールのなめらかな分布に加えて、より小さなスケールに集中して分布している様子が見て取れる。これは、銀河団と銀河という2つの階層にそれぞれ付随するホットガスを見ていると解釈できるのではないだろうか。そしてこの等温ホットガスの階層構造は直ちに重力ポテンシャルの階層構造を導く。つまり銀河団スケールの重力ポテンシャルの井戸の中に、銀河スケールの小さな重力ポテンシャルの井戸が存在しているという描像が得られる(図3参照)。

さて定性的にポテンシャルの様子はわかったが、ダークマターの空間分布を知るにはホットガスの場所ごとの温度および場所ごとの密度を定量的に求める必要がある。ただしここで言っている場所ごとのという意味は3次元でのある場所であるのに対し、我々が観測できるのは空に投影された2次元の銀河団でしかないという事情がある。この奥行き方向の構造を直接見ることができない、というあらゆる天体観測における共通の悩みに加えて、「あすか」の場合その2次元に投影され

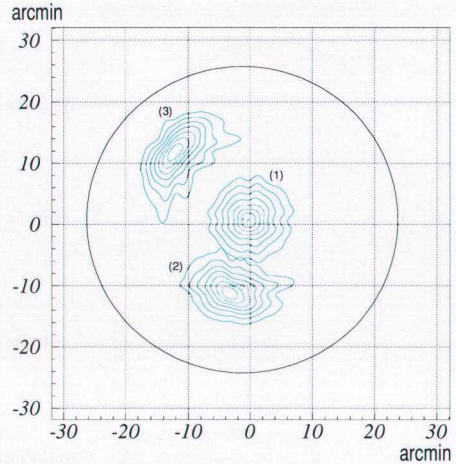


図4 「あすか」搭載のガス蛍光比例計数管による、点光源の画像の例を3つ示した。X線反射望遠鏡の特性のために、入射位置によって形が大きく変化する様子がわかる。

たもともとの空の様子を知ることすら簡単ではない。というのも「あすか」では、たとえ点光源からやってきた X 線であっても、X 線反射望遠鏡^{6,7)}で反射されたあとの焦点面での分布は、点状ではなく大きく広がったものになるため、得られる画像はかなりぼやけているのである。そのぼやけ方も図4に示したように焦点面の場所によっても、また X 線のエネルギーによっても異なる。「あすか」の X 線望遠鏡を「ありゃ結像鏡じゃねえんだよ、集光鏡なんだよ。おう？」と評した先生もいたように、広いエネルギーバンドと大きな有効面積という優れた特性と引き替えに、X 線望遠鏡の結像性能は落とさざるを得なかったのである。

このような複雑なレスポンスを持った望遠鏡で得られた画像から、3次元の場所ごとの密度と温度を求めるという“逆問題”は、“順問題”を繰り返すことで解くことができる。具体的に言うと、まずホットガスの密度および温度の3次元構造モデルを建て、そのようなホットガスを「あすか」で観測した場合に得られるであろうデータをシミュレーションする。そのシミュレーション結果と実データとを比較するという作業を繰り返す行

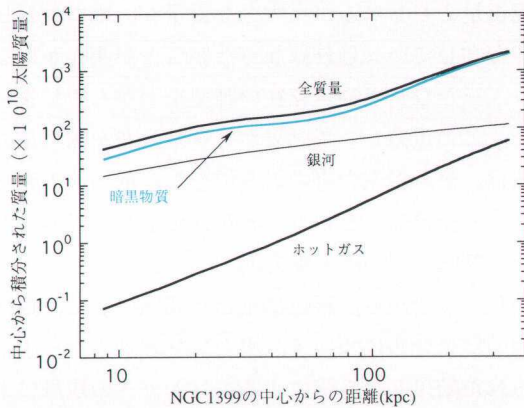


図5 ろ座銀河団を構成しているそれぞれの要素の質量分布。銀河の質量分布は文献⁹⁾による。ホットガスの分布は、図2のシミュレーションのもとになったモデルであり、これから銀河団の全質量が計算される。全質量からホットガスおよび銀河の質量を差し引いた分が暗黒物質の質量となる。

ことで、最もよくデータを再現するモデルを探ることができる。ろ座銀河団の場合、温度分布については至るところ 10^7 度で等温と近似できることがわかっているので、密度分布に対してのみ3次元モデルを建てればよい。解析の結果、図2の輝度分布は銀河団と銀河にそれぞれ対応する2つの球対称なホットガスの重ね合せというモデルで説明することができ、ホットガスの密度分布を定量的に評価することに成功した。得られたホットガス分布を図5に示した。実際には3次元分布であるが、そのままでは表示が困難なので、NGC 1399の位置を中心とし、中心からそれぞれの半径まで積分した質量を表示している。このホットガス分布より式(1)(2)などを用いて全質量分布を計算した。可視光観測による銀河の質量⁹⁾にホットガスの質量を足し合わせても、全質量にとうてい達しないことは一目瞭然である。そして足りない分はすべて暗黒物質の寄与と考え、図5のように暗黒物質の質量分布が求まった。暗黒物質は銀河団スケールに広がって分布しているだけでなく、より小さな銀河のスケールにもかたまっている。つまり階層構造をなしていることがはっきり

した。

このように銀河団の中心銀河のまわりの暗黒物質の分布が、観測的に銀河団の暗黒物質分布からはっきり分離されたのは、この「あすか」の観測によるものが初めてであると言ってよいだろう。「あすか」に先立つこと2年半前に打ち上げられた、ドイツのX線天文衛星 ROSAT では、その観測エネルギー帯において、X線バックグラウンドが高く、かつ変動するために、ろ座銀河団のように表面輝度が低く視野いっぱい広がったX線源の観測は困難であった。ここで紹介した「あすか」の新しい結果は、「あすか」の有する広いエネルギー帯、高いエネルギー分解能、そして低いバックグラウンドの生んだ成果といえる。

5. ダークマターの正体は?

我々の目的はダークマターの正体を探ることにあった。さて「あすか」で得られた、ろ座銀河団の質量分布などから、それに対する答を見出すことができるであろうか?

2章で述べたように、暗黒物質の一つの候補は、重力以外には非常に弱い相互作用しかしない物質であり、ニュートリノや、まだ想像の産物でしかない様々な「未知の素粒子」などが提案されている。これら数あるモデルのうちどれが現実に合致するかを調べるために、暗黒物質の空間分布の観測結果と理論的予測との比較を行う方法が考えられる。この方法を説明するためにビッグバン宇宙論に少し立ち入ろう。

ビッグバン宇宙論に基づくと、宇宙の誕生初期に刻み込まれた物質分布中の小さな振幅のムラムラが、時間とともに自己重力によって成長することによって、現在観測されるような顕著な構造を持った宇宙になったと考えることができる。「あすか」の観測によって明らかになった、ろ座銀河団における暗黒物質の階層構造はまさにそのムラムラの実例である。宇宙誕生から現在までに、暗黒物質のもつムラムラのパターンのがどのように成

長してきたかは、宇宙を構成している物質の性質に強く依存する。したがって、観測から得られた銀河や銀河団の質量分布を理論的予測と比較することから、暗黒物質の種類に制限を与えることができるかと期待される。しかしながら、理論、観測ともにまだまだ未熟で、暗黒物質の正体を突き止めるまでには至っていないというのが現状である。

ろ座銀河団でみられたように暗黒物質が星やホットガスと同じように階層構造をなしているという事実は、暗黒物質の性質が星やホットガスに似ている、つまり暗黒物質は暗くて未だ観測されていない天体であるというモデルを支持しているとも考えられる。ごく最近になって、そのような直接検出することのできない暗い天体を、マイクロ重力レンズ効果という現象を通じて間接的に観測する技術が発達してきた。我々の銀河系の中および周辺についてのみであるが、そのような暗い天体の個数を数え上げるプロジェクトが始まったところである。

6. 重力レンズ効果と X 線観測

銀河団の質量分布を求める方法として、可視光観測で銀河の運動を調べる方法、および X 線観測からホットガスの密度と温度を調べる方法について解説したが、第 3 の方法として近年人気が急上昇してきた、重力レンズ効果を利用した方法についてすこしふれておきたい。近年、可視光における最先端の観測から、銀河の画像がアーク状（三日月形あるいは弓形）に歪んだり、同じクエーサーが 2 つや 3 つに分かれて見えたりといった現象が多数観測されるようになった。これらの現象は、天体と観測者との中間に位置する強い重力源によって光路が曲げられるために起こると解釈されており、重力レンズ効果と呼ばれている。重力レンズ効果は一般相対論で完全に記述でき、観測されたレンズイメージから重力源の質量分布を求めることができる。その結果、直接観測された銀河の

総質量よりもはるかに大きな質量が、重力源として存在していなければならないことが明らかになり、三たび暗黒物質存在の証拠をつかんでしまった。この重力レンズ効果から質量分布を求める方法は、それが重力場にのみ依存し、他の力の影響を全く受けないということがはっきりしているという意味でたいへん魅力的である。

しかしながら、新たに生じた問題として、銀河団の質量分布について、重力レンズ効果から求められた結果と、X 線によるホットガスの観測による結果とが互いに矛盾するということが指摘された⁹⁾。このように現状の重力レンズ効果を用いた研究は、暗黒物質の正体を明らかにするどころか、X 線の研究との間に新たな矛盾を生じてしまったわけだが、互いに矛盾する結果というのは実に歓迎すべきものである。なぜなら互いに矛盾する結果は、それぞれの結果をもたらした手法の見直しに役立つだけでなく、常に新しい知見への入り口だからである。

手法に関しては言えば、重力レンズによる方法も X 線による方法も互いに比較するにはまだ発展途上にあると言える。具体的には、重力レンズ効果によって質量分布の求められる領域は、銀河団の中心部のごく小さな領域のみであるのに対し、X 線観測ではまだそのような小さなスケールでの温度分布を十分な精度で決めることができないという事情がある。また重力レンズ効果の観測も、その精度および情報量の点からいうと、まだまだ不十分である。

重力レンズ効果の観測と、X 線観測と、将来それぞれの観測技術を発展させつつ、お互いの結果の矛盾が解消するように努力することで、暗黒物質についての理解が深まることが期待される。が、それだけでなく、この問題は銀河団スケールにおいては一般相対論のもたらす結果とニュートン力学のもたらす結果とが一致しない、という大変な事態を生み出す可能性も秘めているのである。

7. 最後 に

以上、ろ座銀河団の例を挙げながら説明してきたように、「あすか」による詳細な X 線観測は、銀河団内の暗黒物質の空間分布を徐々に明らかにしていくだろう。また、銀河団の質量分布の測定に利用できる、重力レンズ効果の観測や、我々の銀河系周辺でおこるマイクロ重力レンズの観測など、近年の観測技術の発達により、暗黒物質の研究は新たな局面を向かえようとしている。

謝 辞

この記事を書くにあたり、ドイツのマックスプランク研究所所属の服部誠氏にいろいろと助けていただいた。服部氏は理論家の立場から私の原稿全体をきびしくチェックし、一部加筆もして下さった。また理化学研究所の河合誠氏、吉田篤正氏、山田亨氏、田村啓輔氏、大谷知行氏、そして本紙編集委員の田代信氏から御助言をいただき参考にさせていただいた。ここにお礼申しあげる。

参 考 文 献

- 1) ホーキング S.W. (林一訳), 1989, ホーキング宇宙を語る (早川書房)
- 2) 野本陽代, 1993, 天文月報, 86(9), 387
- 3) 堂谷忠靖, 1994, 天文月報, 87(6), 253
- 4) Tanaka, Y., Inoue, H., Holt S. S., 1994, PASJ 46, L37
- 5) Ferguson H. C., Sandage A., 1990, AJ 100, 1
- 6) 国枝秀世, 1992, 天文月報, 85(9), 384
- 7) Serlemitsos P., et al., 1995, PASJ 47, 105
- 8) Killeen N. E. B., Bicknell G. V., 1988, ApJ 325, 165
- 9) Miralda-Escude, J., Babul A., ApJ, 449, 18

What is dark matter ?

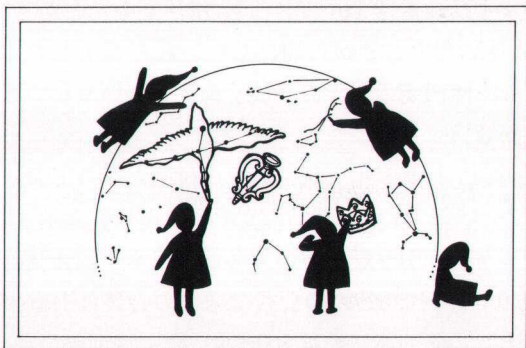
—Measurements of the mass distribution of dark matter in clusters of galaxies—

Yasushi IKEBE

The Institute of Physical and Chemical Research

Abstract : While we do not know what it is, dark matter is thought to be the major component of the universe and to play a main role in determining the fate of the universe.

To see what dark matter is, the spatial distribution of dark matter in clusters of galaxies has been investigated observationally as well as theoretically. In this article, the frontier of the observational study of this subject is introduced. In particular, new results from the X-ray observations with the ASCA satellite are presented.



宇宙が落書き帳

池辺尚子 (東京都)

真黒な体をしたダークマター達が宇宙に落書きをしているところです。落書きは我々に見えるけれど、落書きをしている者達は見えない。