

高校生のための現代物理学講座

銀河団でみる宇宙論

佐々木 伸
東京都立大学大学院理学研究科

2002年7月31日

概要

宇宙論は宇宙全体を対象にし、宇宙は何から出来ているのか、宇宙はどのような変化をして現在にいたったのか、将来どうなるのか、等の疑問の答えを求める学問である。ここでは、銀河団と呼ばれる天体に注目して宇宙を作っている物質が私たちの体を作っている物質とは異なることをみる。

1 宇宙論とは

物理学の中に宇宙で起る現象を対象とする宇宙物理学という分野がある。その中で、宇宙全体を対象とする分野を宇宙論と呼び、例えば、以下のような疑問に答えようとしている。

- 宇宙を構成している物質およびその割合
人間と地球、太陽は同じ物質から作られている。宇宙を作っている物質は私たちを作っているものと同じなのか？
- 宇宙の歴史
宇宙の始まりは今とは全く異なる状態だった。どのようにして、銀河が生まれ、今のような宇宙になったのだろうか？
- 宇宙の将来
現在、宇宙は膨張しているが、どこかで収縮に転じるのか？

本講義では、銀河団と呼ばれる天体に注目して、宇宙を構成している物質について考える。宇宙は私たちの体を作っている物質と同じものから作られているのだろうか？

人間、地球、太陽 私たちの体を細かく分割していくと、いずれ、原子に到達する。人間を含む動植物、岩や川の水、大気など地球上に存在するものは全て原子により作られている。

原子は、原子核と電子からなる。原子核はプラスの電荷をもち、電子はマイナスの電荷を持っている。通常は原子核のプラスの電荷を打ち消すのに必要な数だけの電子が存在し、原子は全体として中性になっている。さらに、原子核はほぼ同質量のプラスの電荷を持つ陽子と、中性の中性子からなり、原子核中の陽子の数によって原子を分類する。例えば、陽子を1つ持つ原子核からなる原子は水素と呼ばれる。水素の原子核には陽子1つだけから成るものと、陽子1つと中性子1つをもつものなどがある。また、原子核中に陽子が2つある原子をヘリウム、3つのもをリチウム…と呼ぶ。

地球上のものだけでなく、太陽、月、多の惑星、彗星、隕石なども全て陽子、中性子、電子から作られている。また、太陽以外の恒星も陽子、中性子、電子からなることがわかっている。

それでは、宇宙は全て、陽子、中性子、電子から出来ているのだろうか？

準備 宇宙物理が対象とするものの長さ、質量などは日常生活で扱うものと桁違いに異なり、日常生活では便利な cm, m, km や g, kg などの単位を使うと不便なことが多い。そこで、特殊な単位を使うことにする。

距離 例えば、太陽と地球の間の距離は $1.5 \times 10^{11} \text{m} = 1.5 \times 10^8 \text{km}$ である。いちいち、 10^{18} とか 10^{11} などをつけるのは煩わしいし、こう書いたからといって感覚的に理解できるわけではないので、この太陽と地球の間の距離を改めて 1 天文単位と定義し、これを基準に長さを測ることにする。天文単位を使うと、太陽と水星の間の距離は 0.39 天文単位、太陽と冥王星の間の距離は 40 天文単位となる。

しかし、天文単位を使っても、太陽と恒星の間の距離を表すには不便だ。太陽に一番近い恒星はケンタウルス座アルファ星 $\alpha \text{ Cen}$ と呼ばれている星だが、その星までの距離は $4.1 \times 10^{13} \text{km}$ である。天文単位を使うと 2.7×10^5 天文単位となり、使いづらい。そこで、パーセクという距離を導入する。

これは、恒星までの距離を三角視差で測ることから導入された量で、年周視差が 1 秒角になる距離を 1 パーセク (pc) と定義する。pc を単位とする距離 d と年周視差 p (秒) の間には

$$d = \frac{1}{p} \quad (1)$$

という関係がある。1 pc は 2.1×10^5 天文単位、 $3.1 \times 10^{13} \text{km}$ である。

pc を使うと、ケンタウルス座アルファ星までの距離は 1.3 pc となる。この 10^3 倍の距離を kpc, 10^6 倍の距離を Mpc という。

ヨーロッパが 1989 年に打ち上げたヒッパルコス衛星によって $\sim 1 \text{kpc}$ 以内の星の距離を年周視差により測れるようになった。例えば、北極星までの距離は $p = 7.56 \text{ msec}$ から $d = 143 \text{ pc}$ と求めた。

質量 地球の質量は $6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$, 木星は $1.9 \times 10^{27} \text{ kg}$, 太陽は $2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$ である。一般には質量は太陽質量を基準にして測ることにする。全天でもっとも明るい星であるシリウスの質量は 2.1 太陽質量である、などのように使う。

2 銀河団

銀河団とはどういう天体なのかを簡単に見ておこう。

我々の住んでいる地球は太陽の周りを金星、木星などの惑星とともに回り、太陽系を作っている。夜空に輝く星は月、惑星、彗星を除いて太陽のように自ら輝いている恒星である。恒星は集まって銀河を作っている。

2.1 電磁波

私たちが普通、光と呼んでいるのは、眼で見ることの出来る可視光のことを指している。可視光は電磁波の一種で、波長にして $0.38 - 0.77 \mu\text{m}$ の範囲にあるものである。青い光は波長が短く、赤い光は波長が長い。可視光の範

円よりも波長が短い電磁波は、紫外線、X線、 γ 線と呼ばれる。また、可視光よりも波長が長い電磁波には赤外線、電波がある。

2.2 銀河団

天体に関する多くの情報は可視光から得られる。これは、太陽のような星が、主に可視光を放出していること、また、可視光は人間の眼で観測できるため、古くから観測されてきたなどの理由による。

そこで、銀河団という天体を可視光の情報を使って定義する。

- 銀河団とは銀河が数十個から千個ほど集まって出来た集団
- 大きさは差し渡し 1-5 Mpc 程度
- 銀河団の数はわれわれを中心として、半径 500 Mpc (赤方偏移が 0.2) の球内に 4000 個程ある

銀河の中の星のように、銀河団中の銀河は重力で結び付けられていると考えられる。

3 暗黒物質

宇宙を作っている物質が私たちを作っている物質と同じく陽子、中性子、電子から作られているのかを調べるのが目的だった。そこで、銀河団について、その質量を評価することを通して、この問題を考えたい。銀河団は銀河が多数、集まって出来ている。銀河は星、ガスが集まって出来たもので、星やガスなどは私たちの体を作っているものと同じ物質から出来ている。そこで、銀河団の質量とその中にある星とガスの質量を比べよう。もし、銀河団の質量が全て星とガスで説明できるのであれば、銀河団も私たちの体を作っている物質と同じものから出来ていると考えて良い。

質量はどうやって測ったら良いだろうか？

等速円運動 太陽 (質量 M) の周りを惑星 (質量 m) が速度 v で等速円運動をしている。両者の間には万有引力が働いている。太陽と惑星の間の距離を R とすると

$$\frac{GMm}{R^2} = \frac{mv^2}{R} \quad (2)$$

という関係式が成り立つ。ここで、 G は重力定数である。速度 v と半径 R がわかれば、この式から太陽の質量を

$$M = \frac{Rv^2}{G} \quad (3)$$

と求めることができる。太陽-地球で考えれば $R = 1.5 \times 10^{11}\text{m}$, $v = 3.0 \times 10^4\text{m/s}$, $G = 6.7 \times 10^{-11}\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ から $M = 2.0 \times 10^{30}\text{kg}$ と求まる。

銀河団中の銀河は等速円運動をしていなかったり、太陽系の場合の太陽のように質量の大部分を持つような天体があるのではなく同じような質量の銀河が多数存在するなどといった違いはあるが、一般に、重力により平衡状態にある系では

$$M \sim \frac{Rv^2}{G} \quad (4)$$

という関係が成り立つ。この場合、 R や v はその系を特徴づける大きさや速度となる。従って、銀河団でも銀河の速度や銀河団中心からの距離を求めることができれば、銀河団の質量を求めることが出来る。

ドップラー効果 速度を直接観測できる方法がある。それはドップラー効果を使う方法である。

まずは、音で考える。

周期 T の音を出し続ける音源があるとする。音速を c_s 、音源と観測者の間の距離を L とする。音源と観測者の両方が静止している場合には、観測者は周期 T の音を観測することになる。

音源が速度 v で観測者に近づいている場合を考える。 $t = 0$ に音源を出した音は $t_0 = L/c_s$ に観測者のところに届く。一周期後、 $t = T$ には音源の位置は vT だけ、観測者の方に近づいているので、そのときの音源と観測者の間の距離は $L - vT$ になる。従って、一周期後に音源を出した音は観測者に $t_T = T + (L - vT)/c_s$ に届く。従って、観測者はこの場合、周期

$$T_{\text{obs}} = t_T - t_0 = \left(1 - \frac{v}{c_s}\right) T \quad (5)$$

の音を観測したことになる。周波数 f で書くとこれは

$$f_{\text{obs}} = \left(1 - \frac{v}{c_s}\right)^{-1} f = \frac{c_s}{c_s - v} f \quad (6)$$

となる。観測される周期は短くなっているため、観測者は高い音を聞くことになる。速度が大きいほど、変化も大きくなる。

逆に音源が観測者から遠ざかっているときには、観測者は低い音を聞くことになる。

このことは、救急車などがサイレンをならしながら近づき、遠ざかる場合の音の変化として日常生活で経験している。

光の場合にも、音の場合と同じようなことが起る。光源が近づく場合には、周波数は大きくなり、観測される光は青くなる。一方、光源が遠ざかる場合には、周波数は小さくなり、赤くなる。

銀河を観測して、光が青くなっているのか、赤くなっているのか、また、その変化の割合を知ることが出来れば、銀河の速度を知ることが出来る。ただし、この方法では視線方向の速度しかわからない。

救急車の場合には、サイレンの音の高さが一定だったので音を聞いただけで、救急車が近づいてくるのか、遠ざかるのかがわかった。銀河の場合には、どの光をみれば良いのだろうか？ある波長 λ_0 の光を観測したとしよう。これは、静止した銀河が λ_0 の波長の光を出したのか、それとも銀河は λ_1 の光を出したのだけど、速度 v で動いているために λ_0 で観測されたのか、区別ができるだろうか？

輝線、吸収線 白色光のように広い範囲の光を出しているものの他に、ある特定の波長でのみ光るナトリウムランプのようなものもある。銀河のスペクトルにもそのような波長が特定できる特徴的な吸収線、輝線があり、これらを用いてドップラー効果を調べることができる。

銀河団の質量 銀河団の質量を見積もる。

ここでは例としてかみのけ座銀河団を取り上げる。かみのけ座銀河団はかみのけ座にあって、およそ 100 Mpc の距離のところにある。近くにある、大きいことから良く観測されている銀河団の1つである。

銀河団の端をはっきりと定義するのは難しいので、ここでは中心から 2.1 Mpc 内の質量を考える。

銀河の質量の和 最初に、銀河団中にある銀河の質量の和がどれくらいになるか評価しておく。例えば、太陽と同じ星が多数集まった天体があるとする。この天体の質量を測るのは簡単ではないが、明るさはその天体までの距離さえわかれば求めることができる。明るさが L と求めれば、一つ一つの星の明るさが太陽の明るさ L_\odot だということから、 L/L_\odot で星の数を評価できる。これに太陽の質量 M_\odot を掛けた $L \times (M/L)_\odot$ がこの天体の質量である。

この考え方を使って、銀河の質量の和を求めよう。つまり、銀河の明るさの和をまず求め、その値に銀河の典型的な M/L の値を掛けることで、銀河の質量の和を求めようというのである。

M/L の値は大体、

$$\left\langle \frac{M}{L} \right\rangle \sim 4.5 \left(\frac{M}{L} \right)_\odot \quad (7)$$

となることがわかっている。ここで、 \odot は太陽を意味する。

かみのけ座銀河団の中にある銀河の明るさを全て足しあげると

$$L_B = 3.7 \times 10^{12} L_\odot \quad (8)$$

となる。よって

$$M_{\text{gal}} = L_B \times \left\langle \frac{M}{L} \right\rangle = 1.7 \times 10^{13} M_\odot \quad (9)$$

銀河の速度から求めた銀河団の質量が、この値と一致するのか、大きいのか、小さいのかが興味の対象である。

銀河団の質量 観測から各銀河の速度 v_i を求めて、それから速度分散

$$\frac{1}{N} \sqrt{\sum_i (v_i - \bar{v})^2} \quad (10)$$

を見積もる。ここで、 N は銀河の数、 $\bar{v} = \sum_i v_i / N$ は平均速度である。速度分散を銀河団の典型的な速度とみなして銀河団の質量を評価する。この質量のことを特に重力質量と呼んでおこう。

観測からかみのけ座銀河団での速度の大きさは 1000 km/s 程度と求まる。これを用いて重力質量を評価すると

$$M \sim \frac{v^2 r}{G} = 5.0 \times 10^{14} M_\odot \left(\frac{v}{1000 \text{ km/s}} \right)^2 \left(\frac{r}{2.1 \text{ Mpc}} \right) \quad (11)$$

となる。より詳しい解析を行うと、結果は、

$$M_{\text{tot}} = 1.6 \times 10^{15} M_\odot \quad (12)$$

となる。これは、先ほど求めた、銀河の質量の和の 100 倍も重い。これはどう考えたら良いだろうか？

いくつかの可能性が考えられる。

- 銀河以外に物質がある。でも、可視光の観測では見つかっていない。候補は？
 - 星になっていない普通の物質 → どうやったら観測できるだろうか？
 - 普通の物質でないもの。
- 質量の求め方が間違っている。

ガス まずは、ガスがあるかどうかを調べてみよう。

プラズマ 密度が薄いので星になれなかったガスが銀河団中に分布しているとする。ガスの温度はどの程度だろうか？ 銀河と同じように運動しているとする。ここでは、気体の圧力と原子の速度の間の関係を使って、予想される温度を求めてみよう。1 モルの気体では、圧力と温度の間には

$$PV = RT \quad (13)$$

という関係があった。 R は気体定数である。この式を以下で使うのに便利ないように書き換える。 V として単位体積をとる。すると、

$$P = nk_B T \quad (14)$$

と書ける。ここで、 n は原子の数密度、 $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ はボルツマン定数と呼ばれる定数で、気体定数 R とアボガドロ数 N_A を使うと $k_B = R/N_A$ である。

原子が壁に衝突して、跳ね返されるときに、原子は運動量の変化に等しい力積を受ける。その反作用として壁は原子が衝突するたびに力積を受ける。多数の原子による力積の寄与が圧力となる。

簡単のために、原子は一方向にのみ動いていると仮定する。壁の面積を 1 とし、原子の数密度を n とする。原子の運動量は壁に衝突する前には mv 、衝突後は $-mv$ となるから、運動量の変化、すなわち力積は

$$\Delta p = -2mv \quad (15)$$

となる。壁が受けた力積は反対方向になるので、 $2mv$ となる。単位時間に壁に衝突する原子の数は nv なので、壁が受ける力積は

$$P = 2mv \cdot nv = 2nmv^2 \quad (16)$$

となる。これと $P = nk_B T$ を比較すると

$$2mv^2 = k_B T \quad (17)$$

$$T \sim \frac{mv^2}{k_B} \quad (18)$$

という関係が求まる。 $v = 1000 \text{ km/s}$ とすると、ガスの温度は $T \sim 10^8 \text{ K}$ 程度と予想される。このような高温のガスはどのような状態にあるだろうか？

水素原子を考える。原子から電子を剥ぎ取り、イオンにするのに必要なエネルギーが電離ポテンシャルで、水素の場合 13.6 eV 、 $2.2 \times 10^{-18} \text{ J}$ である。これを $E = k_B T$ で温度に換算すると $1.6 \times 10^5 \text{ K}$ 程度になる。今、銀河団にあると思われるガスの温度はこれよりもずっと高温になっているので、原子は電離していると思われる。この状態をプラズマという。

X 線 銀河団に存在するガスでは陽子と電子がバラバラに存在し、高速で動いている。陽子と電子は衝突することがあり、そのときに光を放出する。この時放出される光のエネルギーは大体、ガスの温度をエネルギーに換算したのと同程度になる。 10^8 K のプラズマから放出される光のエネルギーは 6 keV 程度と見積もれる。これは X 線の領域である。従って、ガスがあるとする X 線を放出していると思われる。X 線で銀河団を観測すれば、高温ガスが存在しているかどうかわかる。

X 線観測結果 X 線で銀河団をみると、銀河団全体から X 線が来ていることがわかる。銀河団全体をガスが満たしていると考えられる。

銀河団がどれくらいの量のエネルギーを毎秒出しているかは、観測された量と距離からわかる。かみのけ座銀河団の X 線光度は

$$L_X = 3.1 \times 10^{37} \text{ W} \quad (2 - 10 \text{ keV}) \quad (19)$$

となる。

次にスペクトルをみる。スペクトルを見ると、ガスの温度がわかる。かみのけ座銀河団では

$$k_B T_X = 8.1 \text{ keV} \quad (20)$$

と求まった。

ガスの質量 X 線は陽子と電子が衝突することで放出されていた。陽子と電子の数密度 n が大きければ大きいほど X 線は放出されやすいし、また、数密度が同じであれば、体積 V が大きいほど放出される X 線の量は多くなる。そこで、X 線光度は大雑把に

$$L_X \sim n_e n_p \epsilon(T) V \quad (21)$$

と書ける。 $\epsilon(T)$ は温度の関数で、理論的に評価出来る。銀河団の半径が角度で θ と観測されれば、距離 D を使って、実際の半径は $D\theta$ となるので、体積 V は

$$V = \frac{4\pi}{3} (D\theta)^3 \quad (22)$$

と求まる。ガスが水素だけからなると仮定すれば、 $n_e = n_p$ 。 L_X, V, T が観測から求まっているので、これから、 $n_p = n_e$ の値が

$$n_p = n_e \sim \left(\frac{L_X}{\epsilon(T)V} \right)^{1/2} \quad (23)$$

と求まる。すると、ガスの質量は

$$M_{\text{hot gas}} \sim m_p n_p V \quad (24)$$

で求まる。

かみのけ座銀河団のガスの質量を評価すると、

$$M_{\text{hot gas}} = 9.4 \times 10^{13} M_\odot \quad (25)$$

となる。これは銀河の質量の 10 倍である。つまり、可視光でみることの出来ない物質の方が多かったということになる。

しかし、銀河とガスを合わせた質量は $10^{14} M_\odot$ で、重力質量 $M_{\text{tot}} = 10^{15} M_\odot$ の 1 割程度しかない。

星でも高温ガスでもないとする、他にどのような可能性があるだろうか。可視光、X 線など電磁波で捜しても見つからない物質ということで、この見つからないものを暗黒物質と呼んでいる。

結局、銀河団の重力質量 $10^{15}M_{\odot}$ のうち、私たちの体を構成しているのと同じものから出来ている星やガスの質量の和は $10^{14}M_{\odot}$ しかなく、重力質量の全てを説明することは出来ない。これはかみのけ座銀河団だけではなく、観測された全ての銀河団について成り立つことである。

最後に、質量の求め方が間違っているという可能性もあった。しかし、X線観測されたガスを使って質量を求める方法や、重力レンズ効果を用いた方法でも、同じような質量が得られ、大きな間違いがないことがわかっている。

そこで、銀河団の質量の大部分は、我々の体を作っているものとは別のものであると考えられている。

4 まとめ

宇宙が私たちの体を作っている物質（陽子、中性子、電子）から出来ているのかどうかを調べるために、銀河団に注目した。私たちの体を作っていると同じ物質から出来ている銀河と高温ガスの質量の和は銀河の速度を使って求めた重力質量の1割程度しかなかった。これは宇宙には私たちの体を作っているのとは異なる物質があり、しかも、その物質の方が多いことを示している。

さらに、今回話さなかったが、実際に宇宙が私たちの体を作っている物質だけから出来ているとすると、説明することが困難な問題がいくつかある。

- ヘリウムの存在比から評価された普通の物質の存在量
- 宇宙マイクロ波背景放射のゆらぎの大きさと銀河の存在

最後に現状について述べておこう。

理論では、素粒子物理学の研究からいくつかの粒子が暗黒物質の候補として挙げられてきたが、現在、超対称性粒子の一つであるニュートロラリーノとアキシオンと呼ばれる粒子のどちらかではないかと考えている研究者が多い。しかし、この他の可能性も追求されている。

実験では、加速器実験で未知の粒子の兆候が現れていないかが調べられている。

さらに、暗黒物質が宇宙の主成分であるならば、それが地上にも大量に降り注いでいるはずである。そこで、地上にやってくる暗黒物質を直接捕らえようという実験や、暗黒物質同士が衝突して放出するガンマ線を見つけようという観測が行われている。

表 1: 距離

単位	SI	意味
1 天文単位 (AU)	$1.5 \times 10^{11} \text{m}$	地球と太陽の平均距離
1 パーセク (pc)	$3.1 \times 10^{16} \text{m}$	年周視差が 1 秒に相当する距離
1 光年	$9.5 \times 10^{15} \text{m}$	光が 1 年かかって到達する距離

年周視差: 天体から地球の軌道の長半径を見る角度

表 2: 質量

単位	SI
1 太陽質量 (M_{\odot})	$2.0 \times 10^{30} \text{kg}$
1 木星質量 (M_J)	$1.9 \times 10^{27} \text{kg}$

表 3: 角度

単位	SI	意味
1 ラジアン (rad)		円の半径に等しい弧に対する中心角
1 度 (degree, $^{\circ}$)	$\pi/180 \text{ rad}$	
1 分 (minute, $'$)	$1' = (1/60)^{\circ}$	
1 秒 (second, $''$)	$1'' = (1/60)'$	

表 4: 10 の整数乗倍を表す SI 接頭語

名称	記号	大きさ	名称	記号	大きさ
ヨタ (yotta)	Y	10^{24}	デシ (deci)	d	10^{-1}
ゼタ (zetta)	Z	10^{21}	センチ (centi)	c	10^{-2}
エクサ (exa)	E	10^{18}	ミリ (milli)	m	10^{-3}
ペタ (peta)	P	10^{15}	マイクロ (micro)	μ	10^{-6}
テラ (tera)	T	10^{12}	ナノ (nano)	n	10^{-9}
ギガ (giga)	G	10^9	ピコ (pico)	p	10^{-12}
メガ (mega)	M	10^6	フェムト (femto)	f	10^{-15}
キロ (kilo)	k	10^3	アト (atto)	a	10^{-18}
ヘクト (hecto)	h	10^2	ゼプト (zepto)	z	10^{-21}
デカ (deca)	da	10	ヨクト (yocto)	y	10^{-24}