

Observational Cosmology

Stephen Serjeant

東京大学理学部天文学科 4 年

安藤 亮

平成 26 年 4 月 21 日

3 The local Universe

3.1 Evidence for dark matter

ダークマターの最も直接的な証拠は局所銀河にある。渦巻銀河のある半径 r の位置での銀河の回転速度 $v(r)$ から、半径 r より内側に存在する質量 $M(r)$ を推定できる¹。銀河内部の星やガスの速度 $v(r)$ を半径 r の関数として表したものは、銀河の回転曲線と呼ばれる。仮にダークマターが存在しなければこの回転曲線は、可視光や電波で観測可能な星とガスの質量から推測される値と一致するはずである。しかし実際の回転曲線には、星とガスの質量から導かれる曲線とは有意な差が存在しており、半径が大きくなるほど増大するようなダークマターの存在が示唆されている。いずれ我々の銀河系においてもダークマターの存在を示す証拠が見つかるはずであり、ESA の Gaia ミッションではダークマターの分布の特徴も明らかにされることが期待される。

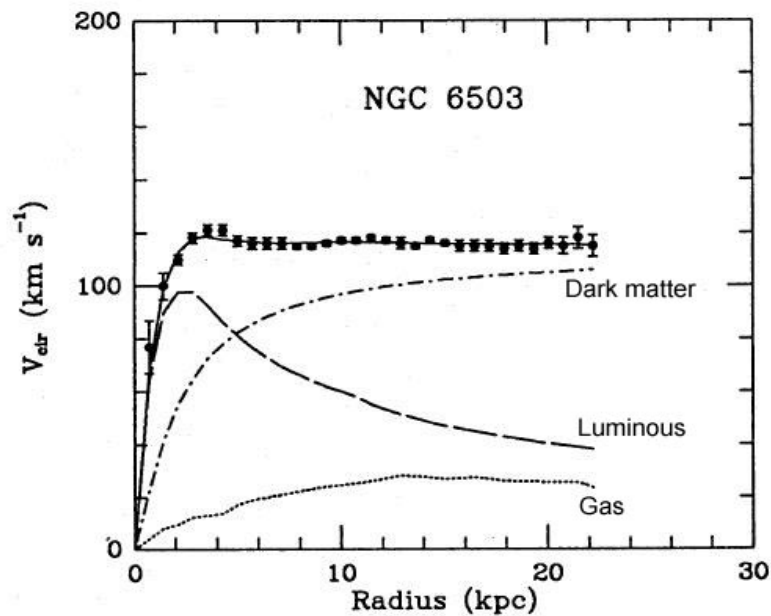


図 1: NGC 6503 銀河の回転曲線 (Begeman, Broels and Sanders (1991))

¹ 重力と遠心力の釣り合いから $\frac{v(r)^2}{r} = \frac{GM(r)}{r^2}$ が成り立つことによる。

銀河の外側ではダークマターが支配的になるという結論を回避する一つの方法は、銀河の中心から離れた領域で重力法則が異なってくると考えることである。もっとも、銀河団内の銀河の運動や重力レンズ効果、さらには宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の共鳴の強度など、ダークマターの存在を示す証拠はますます増えている。

現在の宇宙における星とガスの密度は、宇宙初期の元素合成や CMB の共鳴ピークから推測されるバリオン密度 $\Omega_{b,0}$ よりも低いことから、ダークマターはバリオンのみでなければならず、例えば中性ガスや褐色矮星、MACHO² の可能性が示唆される。しかしながら、物質密度 $\Omega_{m,0}$ の中でバリオンが支配的であることは起こりえず、さもなければ初期宇宙の元素合成からの制限と反することになる。現在ではニュートリノが質量を持つことが分かっているものの、その質量は非常に小さくダークマター全体の質量は到底説明できない。

ダークマターの成分としての有力な候補は、ニュートラリーノとアクシオンである。ニュートラリーノはニュートリノの超対称性粒子³であり、標準模型を拡張した超対称性理論において存在が予測されている。WIMP⁴の一種として知られており、仮に有為な量のニュートラリーノが存在すれば、WIMP に核子を衝突させた跳ね返りを調べることで検出が可能になる。WIMP と一般の物質との相互作用は非常に弱いと予想され、もし十分な量の粒子が地球に降り注いでいれば、ごく稀に衝突が検出できる可能性があるもの、今のところ WIMP を検出したという有力な結果は出ていない。一方アクシオンは、量子色力学において提唱される超低質量の粒子で、非常に弱い電磁気力相互作用のみを及ぼすと考えられている。強磁場中では2つの光子に壊変するとされ、この壊変を利用してアクシオンの検出に成功したという例もあったが、残念ながら再現性はなかった。

2008年にはPAMELA衛星と気球に搭載されたATICによって、宇宙線の陽電子が検出されるという驚くべき発見があった。両実験では宇宙線中の電子スペクトルのピークが500 GeV程度であったが、これはダークマターの対消滅を表すものなのであろうか。Fermiガンマ線望遠鏡⁵では、この信号を確認することができなかった。確かに銀河系内での宇宙線伝播と比較するとこのエネルギーは高いものの、何らかの天体物理学のプロセスにより似たような現象は起こりうる。もっとも、宇宙線の観測からダークマターの対消滅が検出される日が来る可能性もないわけではない。

ダークマターは重力のみと相互作用すると一般には考えられているが、ダークマターのみ働くような力の存在を否定することはできない。例えば”暗黒”電磁気力という概念が提唱されており、このモデルでは等量の dark-negative な粒子と dark-positive な粒子とが存在して、”暗黒”微細構造定数が十分に小さい場合にのみ対消滅が起こるとされている。オッカムの剃刀⁶を用いればこの仮想的な説は切り捨てられてしまうだろうが、ダークマターについて我々が知っていることの少なさを際立たせる一つの例ではある。

²Massive Compact Halo Object の略で、電磁波を放出しているが暗すぎて検出できない天体のこと。スペイン語で「男性」を意味する単語 (英語では「男らしい」の意) で、「弱虫」を意味する WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) との対比の意味もある。

³ボソンに対するフェルミオンの超対称性粒子は、元のボソンの名前に -ino をつける。photino, higgsino, gravitino など。逆にフェルミオンに対するボソンの超対称性粒子は、元のフェルミオンの名前の頭に s- をつける。squark, selectron など。

⁴電磁気的な相互作用をほとんど起こさず、電磁波では検出できない粒子のこと

⁵ガンマ線望遠鏡においては、受かってしまう宇宙線はノイズとして取り除かねばならないが、この場合は逆に受かってしまう宇宙線を利用してはいた。

⁶ある事柄を説明するためには必要以上に多くを仮定するべきでない、とする考え方。William of Ockham による。

3.2 The Hubble tuning fork

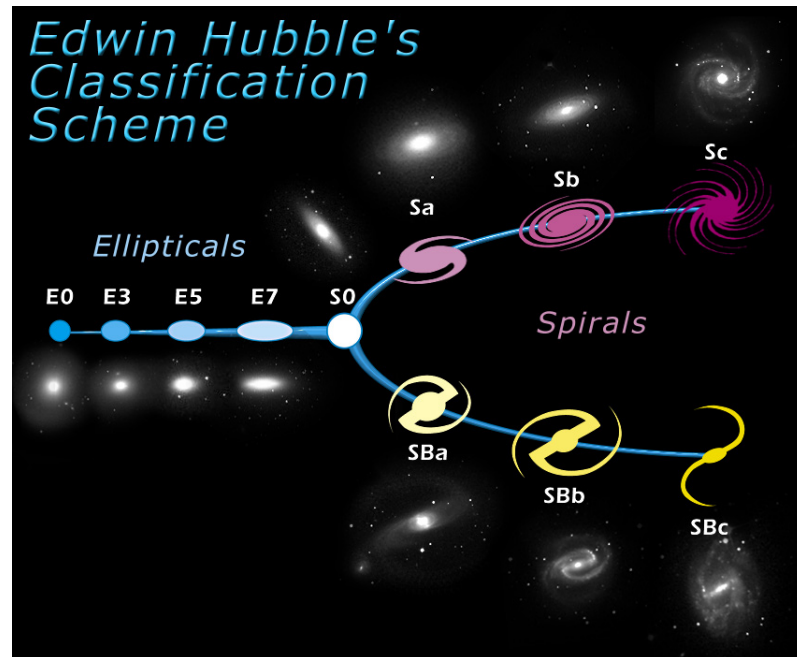


図 2: 銀河の Hubble 分類 (Sloan Digital Sky Survey)

宇宙膨張の発見者 Edwin Hubble は、銀河を形態で分類しようとする最初の試みを為した人物としても知られている。彼は渦巻銀河と楕円銀河を、図 2 のような仮想的な音叉型の分類にまとめ、楕円銀河を早期型、渦巻銀河を晩期型と呼んだ。ただし、この図は必ずしも銀河の進化の順番を表しているわけではない。早期型、晩期型という誤解を招きかねない名称は、慣例的に用いられているに過ぎない。実際に、渦巻銀河どうしの衝突で楕円状の銀河になることもあるように、形態分類を逆向きに進むこともある。形態の異なる両者の銀河は、決して進化の程度が異なるわけではなく、見つかる場所や色、要素が異なるのである。

銀河の分類は専門家によってなされてきたが、興味深い進展は人工的なニューラルネットワーク⁷が銀河分類に用いられたことである。これは、人間による分類と比較しながら銀河の分類を行い、人間による分類と一致するまで何度も反復して変更を加えるようなコンピュータアルゴリズムを指定する方法である。ニューラルネットは人間同士による分類の不一致と同程度までには分類を再現でき、実際には人間よりも優秀なのかもしれない。ニューラルネットで用いられるアルゴリズムは難解なものであるが、機械学習のアプローチを用いれば理解可能な分類法を知ることができる。言うまでもなく、機械的な分類法は未だ十分に信頼できる方法ではなく、特に不規則銀河や相互作用銀河の分類には心許ない。The Galaxy Zoo プロジェクトでは、Sloan Digital Sky Survey のデータに含まれる約 100 万個もの銀河全てを形態分類するために、一般の人々を参加者として登録した。このプロジェクトをはじめ、超新星や彗星の発見、SETI@Home⁸ など、アマチュアの人々が科学的に重大な発見をしているという点で、天文学は特異的な学問であると言える。

⁷ 脳神経系をモデルにした情報処理システムのこと。学習能力を持ち、必要とされる機能を、提示されるサンプルに基づき自動形成することができる。文字認識や、音声認識など、コンピュータが苦手とされている処理に対して有効であるとされる。

⁸ SETI(Search for ExtraTerrestrial Intelligence) は、地球外知的生命体による宇宙文明を発見するプロジェクトの総称。SETI@Home は、カリフォルニア大学バークレー校が運営するボランティアコンピューティングプロジェクトで、インターネットに接続可能なコンピュータさえ持っていれば、誰でもアレスポ天文台の観測データをダウンロードして分析するプログラムを実行し、このプロジェクトに参加できる。これまでに全世界で 500 万人以上が参加している。

天体の面輝度は $(1+z)^4$ に反比例して減少することから、もし赤方偏移が宇宙論的ならば銀河の面輝度はそれぞれ異なるはずであるが、仮に”tired light”モデルを採用するならこの面輝度の差異は見られなくなると考えられる。これは Tolman の面輝度テストと呼ばれるもので、このテストの利点は $(1+z)^4$ のファクターが他の宇宙論パラメータに依存しないことである。このテストの結果、楕円銀河の面輝度は $z=0$ から $z=0.85$ にかけて、R バンド (550 - 750 nm) で $(1+z)^{2.80\pm0.25}$ に反比例、I バンド (700 - 900 nm) で $(1+z)^{3.48\pm0.14}$ に反比例して減少することが分かった。しかし、この時間間隔は銀河における恒星の種族の進化をも考慮すべき期間であり、面輝度の z に対する変化の色依存性は、 $(1+z)^4$ に反比例する分と、恒星の種族の進化モデルとを組み合わせると一致する。

Hubble の分類では完全に見落とされていた銀河は、そして Hubble 自身もその存在を知らなかった銀河は、低表面輝度銀河 (LSB 銀河) である。LSB 銀河は面輝度が 1 平方秒あたり 22.5 等以下の銀河と定義され、その回転曲線は典型的な銀河と比較してかなり高い質量光度比⁹を示すことが知られている。また、どの半径においてもダークマターが支配的であることも多く、この点は球状星団などとは大きく異なる。LSB 銀河はガスが多く金属量¹⁰が低いとともに、ガスの存在量に対して低い星形成率を示すことが多い。このことは、今後主要な星形成が始まるか、何らかの理由で星形成が抑制されていることを意味する。

3.3 Spiral galaxies and the Tully-Fisher relation

渦巻銀河の渦巻腕の回転は、渦巻銀河の他の性質とも密接に結びついている。Tully と Fisher は渦巻銀河の速度幅 Δv と B バンド (400 - 500 nm) での光度との間に強い相関を見出した。速度幅は吸収線の Doppler シフトを利用した可視光や、中性水素 21cm 線を用いた電波の分光によって測定される。この Tully-Fisher 関係と呼ばれる相関は、光度が $L \propto (\Delta v)^\alpha$ を満たすというもので、他の波長でも見つかり特に K バンド (2 - 2.5 μm) などの近赤外領域で強い相関が見られる。なお α は波長により異なるが、典型的には 3 から 4 の間の値をとる。

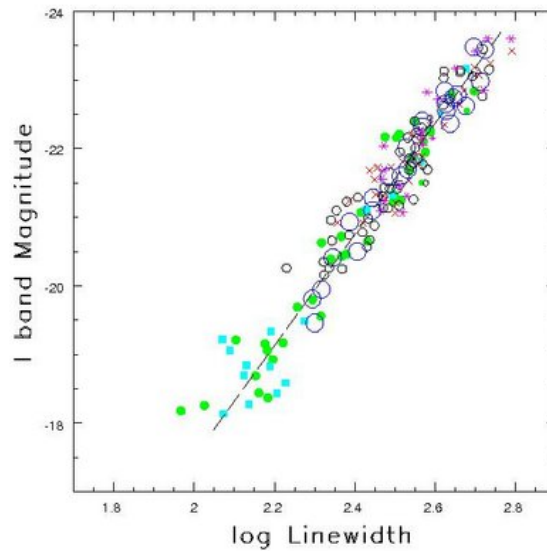


図 3: Tully-Fisher 関係 (Wikipedia)

⁹ 質量を光度で割った値。太陽質量を太陽光度で割った値 $\gamma_{\odot} = 5133 \text{ kg W}^{-1}$ を基準に表されることも多い。

¹⁰ 水素とヘリウム以外の元素の割合のこと。天文学では水素とヘリウム以外は金属と総称される。

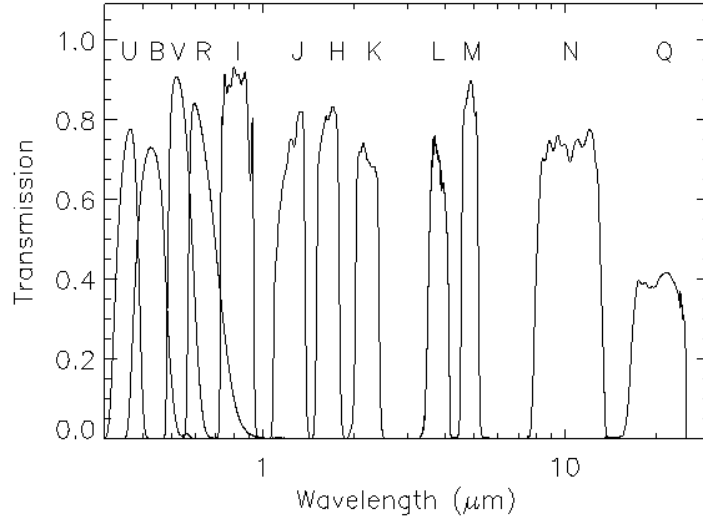


図 4: 天文学で用いられるフィルターの種類と帯域 (UC Barkley Astronomy Department)

図 4 に示されるように、天文学では多くのフィルターが用いられており、可視だけでなく赤外のフィルターも多く存在する。地上の望遠鏡ではフィルターの名前がアルファベットで呼ばれることが多いが、宇宙望遠鏡による中間赤外観測が始まったことで、フィルターの帯域を単にミクロン単位で表した波長で呼ぶことも多くなった。なお、“近”赤外や“中間”赤外という呼称に対しては、明確な波長の範囲が定められているわけではない (3 - 5 μm 付近が境界となる)。

Tully-Fisher 関係を導くために、まず銀河の回転を Kepler 回転と仮定する。すなわち、銀河の端 (半径 R) での銀河回転周期 P が

$$P^2 \propto \frac{R^3}{M} \quad (1)$$

を満たすとする。ただし M は銀河の質量である。銀河の回転速度は

$$v = \frac{2\pi R}{P} \quad (2)$$

と表され、このときの回転速度幅は $\Delta v = 2v$ となる。これより

$$M \propto \frac{R^3}{P^2} \propto R \left(\frac{R}{P} \right)^2 \propto R(\Delta v)^2 \quad (3)$$

が成り立つ。観測から、多くの渦巻銀河では質量光度比がほぼ定数になる ($\frac{M}{L} = \text{const.}$) ことが知られているので、 $L \propto M$ である。ここで銀河が一定の面輝度を有していると仮定すれば、 $\frac{L}{R^2}$ が定数となるので $L \propto R^2$ となるが、これと

$$L \propto M \propto R(\Delta v)^2 \quad (4)$$

から $R \propto (\Delta v)^2$ が成り立ち、以上より

$$L \propto (\Delta v)^4 \quad (5)$$

という関係が得られる。実際には銀河の面輝度が光度に多少の依存性を持っていることから、一般的な渦巻銀河では B バンドで $L \propto R^{2.8}$ となるので、この場合 Tully-Fisher 関係は $L \propto (\Delta v)^{3.1}$ となる。

問題は、この導出における仮定がそもそも間違っていることである。銀河の質量において星の存在が支配的であれば、確かに質量光度比はほぼ一定になるが、実際には銀河の質量の大部分を占めるのはダークマターである。また LSB 銀河のように、面輝度が低い銀河も存在している。このような銀河は大まかには Tully-Fisher 関係に従うが、やはりずれが大きくなる。したがって、高輝度の銀河においてこの関係がよく満たされるのは驚くべきことであり、観測された Tully-Fisher 関係を用いれば、渦巻銀河の円盤のモデルに有意な制限を与えることができる。経験的には銀河面の星形成率はガスの密度の 1 から 2 乗に比例する (Schmidt 則と呼ばれる) が、星形成は非常に複雑なプロセスであり、この関係性は未だ理論的には説明しきれていない。もっとも、Tully-Fisher 関係は銀河の光度距離を求めるのに利用できる便利な関係式で、ここから Hubble パラメータを導くこともできる。

渦巻銀河の特徴として、面輝度 I が

$$I \propto \exp\left(-\frac{r}{r_{\text{scale}}}\right) \quad (6)$$

を満たすことが知られている。ここで r は半径、 r_{scale} はスケール長である。同様に、銀河系の星の密度は銀河面からの高さ h に対し指数関数的に減少し、その面輝度は

$$I \propto \exp\left(-\frac{h}{h_{\text{scale}}}\right) \quad (7)$$

を満たす (h_{scale} はスケールハイト)。このスケールハイトは星の種類により異なり、最も若い星では 100 pc、最も古い星では 1.5 kpc ほどである。後者の星の存在は thick disc として知られており、これらの星は金属量が少なく銀河形成の初期段階に生まれたか、あるいは銀河系がかつて他の銀河から分裂したことを示しているとも考えられるが、実際のところ thick disc がどのように形成されたかは分かっていない。また銀河のハローには、重元素量が少なく銀河形成の初期に生まれたと考えられる星が見つかっている。

渦巻銀河には楕円銀河よりもずっと多くのガスが存在する。このガスの大部分は水素¹¹ であるが、電波で観測しやすい一酸化炭素 (CO) の成分はよく利用される。CO 分子には 115 GHz で $J = 1 \rightarrow 0$ の遷移があり、他の遷移の周波数もこの整数倍となる。H₂ に対する CO の存在比は、銀河系以外の銀河でもしばしば一定値とされるが、実際には CO-to-H₂ の換算係数 X_{CO} は大きな誤差を持っている。

3.4 The fundamental plane of elliptical galaxies

楕円銀河の場合にも、速度分散 σ_v と光度 L との間には $L \propto \sigma_v^\alpha$ という似たような関係があり、これは Faber-Jackson 関係と呼ばれる。この式の冪指数 α は 3 から 4 程度の値である。ただし、楕円銀河の場合の速度は単純に円盤の回転速度というわけではなく、むしろ重力的に束縛された粒子からなるガスの速度に相当する。

実は Faber-Jackson 関係は、楕円銀河に関するより一般的な関係である fundamental plane の特殊な場合である。この関係式は $L \propto I_0^x \sigma_v^y$ で与えられ、ここで I_0 は half-light radius (全光度の半分が生み出される範囲に相当する半径) の内側での面輝度を表し、 $x \simeq -0.7, y \simeq 3 - 4$ である。

¹¹ 水素分子 H₂ や、中性水素 HI、電離水素 HII の形態で存在している。

経験的に、楕円銀河の中心からの半径 r における面輝度 $I(r)$ は、de Vaucouleurs 則 (de Vaucouleurs profile)

$$I(r) = I_0 \exp - \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

に従うことが知られている。ここで I_0 は銀河ごとに異なる定数で、 r_0 はその銀河に特徴的なスケール長である。この式を積分すると、全輝度が

$$L \propto I_0 r_0^2 \quad (9)$$

を満たすことが分かる。なお half-light radius も r_0 に比例する。式 (8) の冪指数 $\frac{1}{4}$ を、変数 n を用いて $\frac{1}{n}$ としたものは、Sérsic profile と呼ばれるが、この場合も $L \propto I_0 r_0^2$ の関係式は成立する。

Exercise 3.1

面輝度が

$$I(r) = I_0 f \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (10)$$

の形で表される場合に、全輝度 L が $I_0 r_0^2$ に比例することを示す。

半径が r から $r + dr$ の範囲であるような部分からの光度への寄与は、 $I(r)2\pi r dr$ と表される。これより全輝度は

$$L = \int_0^\infty I_0 f \left(\frac{r}{r_0} \right) 2\pi r dr \quad (11)$$

と表される。ここで $x \equiv \frac{r}{r_0}$ と変数変換すれば、

$$L = I_0 r_0^2 \int_0^\infty I_0 f(x) 2\pi x dx \propto I_0 r_0^2 \quad (12)$$

となり、全輝度は $I_0 r_0^2$ に比例する。

楕円銀河の面輝度が式 (8) のように 2 つのパラメータ I_0, r_0 を用いて表せることを既知とすると、fundamental plane の存在を示すことができる。まず、銀河が重力的に束縛されているとすれば、次元解析あるいはピリアル定理から

$$\sigma_v^2 \propto \frac{M}{r_0} \quad (13)$$

が示される。次に質量光度比が質量の冪乗則に従う、すなわち

$$\frac{M}{L} \propto M^a \quad (14)$$

を仮定すると、式 (8) と合わせて

$$\begin{aligned} L &\propto I_0 \left(\frac{M}{\sigma_v^2} \right)^2 \propto \frac{I_0 L^{\frac{2}{1-a}}}{\sigma_v^4} \\ L^{1-\frac{2}{1-a}} &\propto I_0 \sigma_v^{-4} \\ L^{1+a} &\propto \sigma_v^{4-4a} I_0^{a-1} \end{aligned} \quad (15)$$

となり、 $a \simeq \frac{1}{4}$ とすれば観測結果と一致するというものである。

fundamental plane はしばしば $D_n - \sigma$ 関係として知られている。 D_n は銀河の面輝度が一定値よりも大きくなるような半径を表すパラメータで、これは前述の 2 つのパラメータを用いて

$$D_n \propto r_0^\alpha I_0^\beta \quad (16)$$

という冪乗則で表せる (α, β は定数)。 I_0 をうまくとれば D_n は σ_v の冪乗になるように定義することができ、この $D_n - \sigma$ 関係を用いれば、楕円銀河の速度分散 σ_v と銀河の視直径から、銀河までの角径距離を求めることが可能である。

3.5 Clusters of galaxies

宇宙の中で最も大きい自己重力系は銀河団である。このような銀河の集団はビリアル化されている、すなわちビリアル定理が成り立つような安定した自己重力系になっている。このとき運動エネルギーの平均はポテンシャルエネルギーの平均の $-\frac{1}{2}$ 倍となっている¹²。銀河団内で”見えている”物質の重力ポテンシャルエネルギーに対して、銀河団を構成する銀河の平均運動エネルギーがあまりにも大きいことから、ビリアル定理はダークマターの存在を示す直接的な証拠になり得る。

驚くべきことに、銀河団 (10^{10-15} オーダー) のバリオンにおいて支配的なのは、銀河ではなくプラズマ状態のガスである。銀河団のポテンシャルが非常に深いことから、そこに落ち込んだガスはかなりの高温 ($kT \sim 10$ keV) まで加熱され、制動放射¹³ によって光度 10^{35} W を上回る強力な X 線を発する。これは、電子とイオンの衝突によりこれらの粒子が加速あるいは減速され、その過程で電磁波が放出されることによる。熱放射は粒子同士の衝突に起因しているので、この X 線光度は粒子の数密度 n の 2 乗に比例し、またガスの体積にも比例する。したがって、銀河団の特徴的大きさを r_0 とすれば、X 線光度は

$$L_X \propto n^2 r_0^3 \quad (17)$$

を満たす。一方バリオンガスの質量 M_{gas} は、密度と体積の積で表されることから

$$M_{\text{gas}} \propto n r_0^3 \propto r_0^{\frac{3}{2}} L_X^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

が成り立つ。

銀河団の全質量 ($10^{14-15} M_\odot$) は静水圧平衡によって維持されている。この静水圧平衡から、等温圧力平衡において $M_{\text{total}} \propto r_0$ の関係が満たされる。これより、銀河団中のバリオンガスの質量比は

$$\frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{total}}} \propto \frac{r_0^{\frac{3}{2}} L_X^{\frac{1}{2}}}{r_0} \propto r_0^{\frac{1}{2}} L_X^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

と表されることから、銀河団までの距離が分かれば銀河団の距離と X 線光度、さらにバリオンの質量比を導出することができる。ここから導出したガスの質量は、銀河団全体の静水圧平衡を支えるのに足るものではないことから、ダークマターの存在の証拠になり得る。バリオンかダークマターかに関わらず、銀河団への質量降着は純粋に重力によるものなので、バリオンの質量比は赤方偏移に依存しないと仮定されることが多いが、このことから宇宙論パラメータに制限を与えることができる。銀河団の視直径を θ_0 とすると、これは角径距離 d_A を用いて

$$\theta_0 = \frac{r_0}{d_A} \quad (20)$$

¹²一般にビリアル定理とは、他粒子系のポテンシャルエネルギーが座標に関する k 次の同次関数 ($U(\lambda \mathbf{r}) = \lambda^k U(\mathbf{r})$) であり、これらの粒子が有限の空間領域を運動している場合に、系の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの長時間平均 $\bar{T}$ と $\bar{U}$ に対して、 $2\bar{T} = k\bar{U}$ が成り立つということを意味する。重力ポテンシャルは $k = -1$ の場合に相当する。

¹³術語としてドイツ語の名称 bremsstrahlung が用いられる。brake + radiation の意。

と表される。一方放出される X 線のフラックスを F_X とすると、X 線光度は光度距離 d_L を用いて

$$L_X \propto F_X d_L^2 \quad (21)$$

を満たす。もしバリオンの存在比 $\frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{total}}}$ が定数なら、式 (21) から

$$\sqrt{r_0 L_X} = \sqrt{\theta_0 d_A F_X d_L^2} = \sqrt{\theta_0 (1+z) r F_X (1+z)^{-2} r^2} = \sqrt{\theta_0 F_X} (1+z)^{\frac{1}{2}} r^{\frac{3}{2}} \quad (22)$$

も定数になる。ただし r は固有運動距離¹⁴ であり、

$$d_L = (1+z)r = (1+z)^2 d_A \quad (23)$$

の関係式を用いた。 r は宇宙論パラメータに依存するので、バリオンの存在比 $\frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{total}}}$ を定数と仮定すれば、宇宙論パラメータの導出に利用できる。

銀河団が最初に見つかったのは、可視光での写真を用いたサーベイにおいてであった。Abell カタログは写真甲板から目で見て銀河団を探すという多大な労力の賜物である。このカタログでは、銀河団はその”richness”¹⁵、すなわち銀河の密度によって分類されている。Abell カタログは高赤方偏移や低い richness の銀河団については不完全であるが、近年の X 線サーベイや可視のデジタルサーベイによって、より高赤方偏移の銀河団が見つかってきており、また今後 Sunyaev-Zel’dovich 効果を利用した次世代の CMB マップにおいて、さらなる発見が期待されている。

銀河団の計数もまた宇宙論パラメータの制限を与える。ダークマターのビリアル化されたクランプの形成は、物質のパワースペクトルと宇宙論モデルを用いて計算できる。仮に宇宙が近い過去 ($z > 0.5$) に加速膨張をしていたなら、クランプは重力崩壊を起こして、銀河団の質量関数はダークエネルギーパラメータ $w(z)$ に強く依存することになる。

銀河団の中心にはたいてい巨大な銀河が存在し、それは銀河団の中で最も明るい銀河 (BCG, brightest cluster galaxy) であることが多い。この銀河はしばしば巨大な楕円銀河であるか、あるいは D 銀河¹⁶ と呼ばれる巨大な S0 銀河か cD 銀河 (D 銀河よりもさらに大きい S0 銀河) である。このような銀河は多数のコアを有していることがあり、これは進行中の銀河衝突によって形成されたと考えられる。

¹⁴平坦な時空の宇宙を仮定すれば共動距離に相当する。

¹⁵最も銀河が疎なのは richness class 0、最も銀河の密度が高いものは richness class 5 と分類される。

¹⁶D は diffuse、すなわち散乱を意味し、広がったエンベロープを有していることが多い。