

〈前回の復習〉

- ・ **lookback time** : 宇宙年齢 $t = t(z)$ のこと。

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)^2 = H_0^2(1+z)^2[(1+z)^2(1+z\Omega_{m,0}) - z(1+z)\Omega_{\Lambda,0}] \quad (1.34)$$

を積分して求める。現在は $t(z = \infty) = 138$ 億年。

- ・ **fine-tuning problems** : 初期宇宙 ($z \rightarrow +\infty$) で $\Omega_k \rightarrow 0$ 。インフレーション理論によって解決？
- ・ 共動距離と固有距離 : 共動距離は天体が現在いる位置までの距離のことで、

$$d_{\text{comoving}} = R_0 \int_0^r \frac{1}{\sqrt{1-kr^2}} dr' = -c \int_z^0 \frac{dz'}{H(z')}. \quad (1.37, 1.43)$$

一方固有距離は任意の時刻における天体までの距離のことで、

$$d_{\text{proper}} = R(t)r = \frac{d_{\text{comoving}}}{1+z}.$$

- ・ 宇宙の果てと膨張速度 : 観測可能な宇宙の大きさは

$$d_{\text{proper}} = d_{\text{comoving}} = \frac{3.53c}{H_0} = 14.7 \text{ Gpc}.$$

また宇宙の膨張速度は $H \times (Rr)$ で、現在の値は $H_0 \times (3.53c/H_0) = 3.53c$ 。

- ・ 3 つの “距離” :

$$d_A = \frac{D}{\theta} \quad \text{角直径距離 (固有距離に等しい),} \quad (0.47)$$

$$d_M = \frac{u}{\dot{\theta}} \quad \text{固有運動距離 ($k = 0$ のとき共動座標に等しい),} \quad (0.48)$$

$$d_L = \left(\frac{L}{4\pi S}\right)^{1/2} \quad \text{光度距離.} \quad (0.49)$$

これらの z 依存性を使って宇宙論パラメータの値を決定する。互いの関係は

$$d_L = (1+z)d_M = (1+z)^2 d_A. \quad (0.50)$$

- ・ 共動体積 : 赤方偏移 z の所にある固有面積 δA 、固有厚さ $Rdr/\sqrt{1-kr^2}$ の共動体積は

$$V(d_M) = \begin{cases} \frac{4\pi D_H^3}{2\Omega_{k,0}} \left[\frac{d_M}{D_H} \sqrt{1 + \Omega_{k,0} \left(\frac{d_M}{D_H}\right)^2} - \frac{1}{\sqrt{|\Omega_{k,0}|}} \sin^{-1} \left(\frac{d_M}{D_H} \sqrt{|\Omega_{k,0}|} \right) \right] & (k = +1), \\ \frac{4}{3} \pi d_M^3 & (k = 0), \\ \frac{4\pi D_H^3}{2\Omega_{k,0}} \left[\frac{d_M}{D_H} \sqrt{1 + \Omega_{k,0} \left(\frac{d_M}{D_H}\right)^2} - \frac{1}{\sqrt{|\Omega_{k,0}|}} \sinh^{-1} \left(\frac{d_M}{D_H} \sqrt{|\Omega_{k,0}|} \right) \right] & (k = -1). \end{cases} \quad (0.55)$$

$V_{\text{comoving}}(z)$ は dV_{comoving}/dz を z について数値的に積分すればよい。 d_M の z 依存性は

$$d_M = \begin{cases} \frac{D_H}{\sqrt{|\Omega_{k,0}|}} \sin \left\{ \sqrt{|\Omega_{k,0}|} \int_0^z [(1+z)^2(1+z\Omega_{m,0}) - z(2+z)\Omega_{\Lambda,0}]^{-1/2} dz \right\} & (k = +1), \\ d_{\text{comoving}} & (k = 0), \\ \frac{D_H}{\sqrt{|\Omega_{k,0}|}} \sinh \left\{ \sqrt{|\Omega_{k,0}|} \int_0^z [(1+z)^2(1+z\Omega_{m,0}) - z(2+z)\Omega_{\Lambda,0}]^{-1/2} dz \right\} & (k = -1). \end{cases} \quad (0.56)$$

- ・ **de Sitter** 時空 : 宇宙は膨張していき、 $\Omega_m \rightarrow 0$, $\Omega_\Lambda \rightarrow 1$, $H \rightarrow c\sqrt{\Lambda/3}$ となる。このとき $R \propto e^{ct\sqrt{\Lambda/3}}$ 。
- ・ 宇宙の地平線 : 光が到達できるのは共動距離 $R_1 r = \sqrt{3/\Lambda} = (4.9 \pm 0.3) \text{ Gpc}$ まで。

「わしがあることばを使うときにはだな」ハンプティ・ダンプティは、小ばかにしたような調子でいいました。「わしがいいあらわしたいと思うことをきちんと意味するんだ—それ以上でも、それ以下でもない」

「問題は、あることばに、そんなにいろいろな意味をもたせることができるかということでしょ」と、アリス。

「問題は、どっちが主人になるかっていうことさ—それだけだ」

ルイス・キャロル『鏡の国のアリス』（高杉一郎訳）

3 近傍宇宙

第2章を読んだ読者は、初期宇宙でまだ分かっていないことの多さに驚かれたであろう。この章では、我々の近くにある宇宙について分かっていることを明らかにし、銀河系のような銀河がどのように誕生したのかを探索しよう。

3.1 ダークマターは存在するか？

ダークマターが存在することの直接的な証拠は近傍宇宙にある。例えば渦巻銀河の回転速度 $v = v(r)$ (回転曲線) から、

$$\frac{v^2}{r} = \frac{GM(r)}{r^2} \quad \left(\begin{array}{l} r \text{ は銀河中心からの距離,} \\ G \text{ は万有引力定数} \end{array} \right)$$

を通して r より内側の質量 $M(r)$ を推定することができる。逆に星とガスの質量から上の式を用いて回転曲線を求めると、それは実際に直接観測した回転曲線と普通は一致するはずである。しかし図 3.1 を見ると、実際の回転曲線と星 + ガスを用いた測定値は有意にずれていることが分かる。これはダークマターが存在し、特に外側に行くほど増えていくことを示している。我々の銀河系においてもそのうち有力な証拠は見つかるはずであり、例えば ESA ^{*1} の **Gaia** 計画 (2013 年に打ち上げ) は銀河系内の恒星の運動を調べ、ダークマターの分布をも明らかにする計画である。

ダークマターが存在すると結論したくないのであれば、外側に行けば重力法則が変化すると考えればよい (第7章)。しかし銀河団内での銀河系の運動や重力レンズ効果、宇宙背景放射 (CMB) の共鳴 ^(?) など、ダークマターが存在する証拠は他にも揃っている。

現在の星やガスの密度の観測値は、宇宙初期の元素合成理論や CMB の共鳴から予想されるバリオン密度よりも小さい。このことからダークマターのいくらかはバリオンのためであり、例えば中性ガスや褐色矮星、**MACHO** ^{*2} のようなものと考えらる。しかしダークマターのほとんどがバリオンのとしてしまうと、元素合成理論に反してしまう。またニュートリノも質量を持っている事が分かっているが、その密度は高々

$$\Omega_\nu h^2 \simeq \frac{\sum m_i}{93.5 \text{ eV}} < 0.0076 \quad (\text{和は全ニュートリノに渡ってとる}) \quad (3.1)$$

なので、ダークマターの全質量を説明するには程遠い。

ダークマターの正体として可能性があるのは、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超対称性理論から存在が予想されているニュートリノの相方であり、**WIMP** ^{*3} の一つである。もしニュートラリーノがそれなりの数存在しているのであれば、WIMP と衝突した原子核を調べることで WIMP が直接検出できるであろう。また WIMP と通常の物質の相互作用は非常に小さいと考えられているが、もし十分な数の粒子が地球を通過していれば、ごく稀に衝突が検出されるかもしれない。しかし WIMP が検出されたという決定的な報告は、今もってなされていない。

一方のアクシオンは電磁気的な相互作用をほとんどしない極小質量 (10^{-39} – 10^{-40} kg) の粒子であり、量子色力学により存在が予想されている。アクシオンは強い磁場があると2つの光子に崩壊すると言われており、この崩壊を検出したと

^{*1} European Space Agency: 欧州宇宙機関。

^{*2} MAssive Compact Halo Object. 電磁波を放出してはいるが、暗すぎて地球からは観測できない天体のこと。

^{*3} Weakly Interacting Massive Particles. 電磁気的な相互作用をほとんど起こさない粒子で、「冷たいダークマター」と呼ばれる。macho (男らしい) と wimp (弱虫) で対になっている。

いう実験もあるが、残念ながら後になって否定されている。

2008 年には PAMELA 衛星や ATIC 気球観測^{*4}において宇宙線に陽電子が含まれていることが発見された。宇宙線のスペクトルには 500 GeV の所にピークがあることも分かり、当初これはダークマターの対消滅によるものと考えられた。しかしながら Fermi ガンマ線望遠鏡は PAMELA と ATIC の検出した信号を確認には失敗し、そもそもこのピークは銀河系内の宇宙線の広がり比べると大きくはあるが、他の天体物理学的な過程で再現できてしまうものであった。とは言え将来、宇宙線観測によってダークマターの対消滅が検出される可能性は残っている。

ダークマターはふつう重力とのみ相互作用すると考えられているが、逆にダークマターのみにはたらく力があってもよいだろう。そのような理論として提唱されているのが「暗黒電磁気学」であり、それによれば“dark-negative”な粒子と“dark-positive”な粒子が存在し、「暗黒」微細構造定数が小さければ対消滅は起きなくなるという。また銀河のダークハローは、このモデルにおいては「暗黒」プラズマと見なされる。この説は幾分空想的だが、我々がいかにダークマターの事を理解していないかを際立たせる話ではある。

3.2 Hubble の音叉図

宇宙論に関係があるのは渦巻銀河だけではない。宇宙膨張を見つけた **Edwin Hubble** は、銀河の形態を最初に分類した人としても知られている。彼は銀河の仮想的な並び (**Hubble の音叉図**) を作り、楕円銀河を早期型、渦巻銀河を晩期型と呼んだ (図 3.2)。この呼び方は歴史的な理由でまだ現役であるが、早い遅いの観測的な証拠は ない ことに注意しよう！ それどころか実際の進化の順は逆であり、渦巻銀河どうしの合体が楕円銀河を生むことが分かっている。渦巻銀河と楕円銀河は見つかる場所も、色も、構成要素も異なるのである。

銀河の分類はふつう専門家によって行われるが、最近では人工神経回路による分類もなされるようになってきた。これはコンピュータに銀河を何回も分類させ、人間による分類と一致するまで反復するという方法である。この方法で分類の不一致が起きる頻度は人間どうしでのそれと同程度であり、回路の方が人間よりも賢いかもしれない。とは言え自動分類はまだ完全に信頼が置ける訳ではなく、特に不規則銀河や散乱銀河があるときには分類が不正確になってしまう。具体的なプロジェクトとしては例えば **Zoo Galaxy** プロジェクトがあり、これは SDSS ^{*5} が公開している百万個の銀河のデータを、一般の人々に分類してもらうものである。

ところで我々は 1 章の問 1.6 で、天体の面輝度が $\propto (1+z)^4$ で減っていくことを見た。したがってもし赤方偏移が宇宙論的であるならば、銀河の面輝度も $\propto (1+z)^4$ に従って変化せねばならない。しかし仮に赤方偏移が「疲れた光」モデルなどで説明されるのであれば、面輝度は変化しない。これを **Tolman の面輝度テスト** といい、結果は宇宙論的パラメータに依存しない。実際に観測結果をテストしてみると、 $0 < z < 0.85$ にある銀河の面輝度変化は R バンドで $\propto (1+z)^{2.80 \pm 0.25}$ 、I バンドで $\propto (1+z)^{3.48 \pm 0.14}$ であった。しかしこれらの宇宙年齢では銀河内の構成進化も考慮しなくてはならず、実際面輝度変化の色依存性は $\propto (1+z)^4$ と恒星進化モデルの組み合わせによる予測と正確に一致している。

Hubble の時代には見逃されていた銀河のメンバーの一つに、面輝度が 1 arcsec^2 あたり 22.5 等よりも暗い低表面輝度銀河 (low surface brightness galaxy: **LSB**) がある^{*6}。LSB の回転曲線からは LSB の質量光度比が他の銀河に比べて非常に大きく、内部は至る所にダークマターが詰まっていると考えられている。また金属量が小さく、ガスが豊富にある割には星形成率が小さい。これは星形成がまだ始まっていないか、抑制されているためと考えられている。

3.3 渦巻銀河と Tully-Fisher 関係

渦巻銀河の回転からはまだ分かる事がある。1977 年に Tully と Fisher は、速度幅 Δv と B バンドにおける光度 L が極めて強く相関していることを発見した。この相関は K バンドなどの近赤外領域を中心にすべての波長帯で観測され、その形は

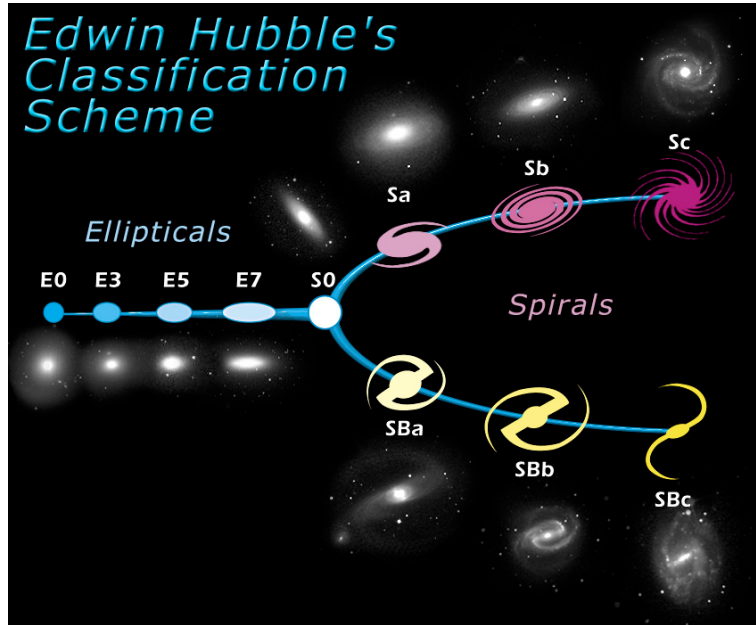
$$L \propto (\Delta v)^\alpha \quad (\alpha \text{ は波長帯によって } 3\text{--}4)$$

であった。これを **Tully-Fisher 関係 (TF 関係)** という。

^{*4} それぞれ Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics, Advanced Thin Ionization Calorimeter.

^{*5} Sloan Digital Sky Survey.

^{*6} 見かけの等級 (AB 等級) の定義は、 S_ν をフラックス密度として $m = -2.5 \log S_\nu - 48.60$ 。



補足図 1 Hubble の音叉図。これらの他に不規則銀河 (Irr) がある。(SDSS)

補足表 1 銀河の分類と規則性。(「銀河天文学」)

	楕円	S0	渦巻	不規則
質量	重い	←		軽い
光度	明るい	←		暗い
質量光度比	大きい	←	小さい	?
バルジの比率	大きい	←		小さい
色	赤い	←		青い
重元素	少ない	→		多い
角運動量	小さい	→	大きい	
星形成活動	見られない	→		活発
銀河の分布	密	←		疎

ところで今まで沢山のフィルターの名前が出てきたので、ここで一覧を示しておこう (図 3.3)。登場済みのフィルターの他に中間赤外より外側のフィルターもあるが、これらは名前の代わりに単に波長で指定される。近赤外と中間赤外には明確な境目はないが (3-5 μm 周辺)、60 μm まで行くとふつうは遠赤外と呼ばれる。

では TF 関係は何に由来するのだろうか？ ここで銀河の回転を Kepler 回転とし、銀河の端での回転周期 P が

$$P^2 \propto \frac{R^3}{M} \quad \left(\begin{array}{l} R \text{ は半径,} \\ M \text{ は銀河の質量} \end{array} \right)$$

を満たしているとする。回転速度は $v = 2\pi R/P$ なので、上の式は回転速度の幅 $\Delta v = 2v$ を用いて $M \propto R(\Delta v)^2$ と書き換えられる。また多くの渦巻銀河の質量光度比は $M/L \simeq \text{const}$ なので、 $L \propto R(\Delta v)^2$ である。さらに銀河の面輝度がすべて同じと思うと $L/R^2 = \text{const}$ より $L \propto R^2$ であり、 $L \propto R(\Delta v)^2$ と合わせると $R \propto (\Delta v)^2$ を得る。したがって $L \propto (\Delta v)^4$ である。実際には面輝度は光度に (弱いながらも) 依存しているので上のようにはならず、渦巻銀河の観測から経験的に、B バンドで $L \propto R^{2.8}$ 、 $L \propto (\Delta v)^{3.1}$ であることが分かっている。

上の計算にまだ問題がある。質量光度比は質量のほとんどが星であるならば大雑把には定数であるが、既に見たように質量の大部分はダークマターである。また LSB のような銀河は同じ TF 関係には従うものの、そのばらつきは大きい。しかしそれゆえに、TF 関係がそれでも成り立っているのは驚きであり、TF 関係を観測することは銀河円盤のモデルを決める重要な鍵になっている。一方で円盤における星形成率は ρ^{1-2} (ρ はガスの密度) に比例する事が経験的に分かって

はいるが (**Schmidt の法則**)、その過程は複雑で、理論的裏付けはまだできていない。

銀河円盤の面輝度 I はスケール長 r_{scale} を用いて

$$I \propto \exp(-r/r_{\text{scale}})$$

という分布をしている。同様に星の 密度 ^(?) は円盤と垂直な方向にも

$$I \propto \exp(-h/h_{\text{scale}})$$

と分布しており、こちらの h_{scale} はスケールハイトという。スケールハイトは星の種類によって異なり、生まれたばかりの星では $h_{\text{scale}} \sim 100$ pc、寿命の近い星では ~ 1.5 kpc (**thick disk**) である。Thick disk ができた理由は、金属量の小ささを見るに星形成初期の名残りだろうとか、銀河系が他の銀河の傍を通るときに崩壊した影響だとか言われているが、はっきりとは分かっていない。一方銀河系の中で星がまばらに散っている部分をハローというが、ハローは重元素に富み、銀河系形成のかなり早い時期に形成されたと考えられている。

渦巻銀河の円盤は楕円銀河の円盤に比べると、ガスの量が圧倒的に多い。ガスの大部分は水素（大半は分子）だが、ガスの組成を調べるにはふつう、水素よりも観測がしやすい一酸化炭素 (**CO**) が用いられる。CO 分子は 115 GHz の電波帯で $J = 1 \rightarrow 0$ の回転遷移をし、他の遷移もこの整数倍の周波数で起きる。H₂ に対する CO の量 X_{CO} は系外銀河でも一定とされているが、 1σ で $\pm 50\%$ という大きな不確かさをもつ。ガスに対してダストは遠赤外で強烈に輝いているが、これは後の章に回す。

3.4 楕円銀河の基本面

前節で渦巻銀河には TF 関係が成り立っていることを見たが、楕円銀河では速度分散 σ_v と光度 L の間に似たような関係

$$L \propto \sigma_v^\alpha \quad (\alpha \simeq 3-4)$$

が成り立っている。これを **Faber-Jackson 関係 (FJ 関係)** という。ただしここで言う速度は円盤の回転速度に限らず、むしろ重力的に束縛されたガスの速度を指す。

FJ 関係にはさらに一般的な形があって、**基本面**の関係式

$$L \propto I_0^x \sigma_v^y \quad \left(\begin{array}{l} I_0 \text{ は全光度の半分が放出される部分 (half-light radius)} \\ \text{の面輝度; } x \simeq -0.7, y \simeq 3-4 \end{array} \right)$$

が成り立つ。また面輝度 $I(r)$ は **de Vaucouleurs の法則**

$$I(r) = I_0 \exp[-(r/r_0)^{1/4}] \quad \left(\begin{array}{l} I_0 \text{ は定数, } r \text{ は銀河中心からの距離,} \\ r_0 \text{ はその銀河のスケール長} \end{array} \right) \quad (3.2)$$

に従うことが知られている（定義によって [] の中身が $-(r/r_0)^{1/4} - 1$ になっていることもある）。これを積分すると、光度は $L \propto I_0 r_0^2$ と表される。指数の $1/4$ を $1/n$ (n は実数) に一般化したものは **Sérsic 分布** と呼ばれるが、その分布でも $L \propto I_0 r_0^2$ は結局成り立つ。

問 3.1 面輝度 $I(r)$ が一般に

$$I(r) = I_0 f(r/r_0)$$

の形をしている場合、光度 L は $I_0 r_0^2$ に比例することを示せ。

解答 $r-r+dr$ の範囲の光度は $I(r) \times 2\pi r dr$ なので、光度はそれを積分すればよい。

$$L = \int_0^\infty I(r) 2\pi r dr = 2\pi I_0 \int_0^\infty f(r/r_0) r dr$$

で $x \equiv r/r_0$ とおけば

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

が示された。■

正確には面輝度は単位平方角あたりのフラックスであったから、面積で積分しても光度にはならない。それでも適当な変数で積分すればやはり $L \propto I_0 r_0^2$ は成り立つ。混乱しないように、ここでエネルギーに関する量の定義をまとめておく。

補足表 2 エネルギーに関する量の定義（輻射輸送に関する量は省略）。単位は SI。下の定義は「銀河天文学」「天体輻射論 I」の講義と「シリーズ現代の天文学」から抜粋したものであるが、Wikipedia は言っている事が全然違う。

日本語	英語	記号	定義・単位
(輻射) エネルギー	energy	E, U	J
(全輻射) 光度	(bolometric) luminosity	L	W
単色光度	monochromatic luminosity	L_ν	W/Hz
単色光度	monochromatic luminosity	L_λ	W/m
フラックス*7	flux	f, F, S	W/m ²
フラックス密度	flux density	f_ν, F_ν, S_ν	W/m ² /Hz, Jy*8
フラックス密度	flux density	$f_\lambda, F_\lambda, S_\lambda$	W/m ² /m
輻射密度、エネルギー密度	radiation/energy density	u_ν	J/m ³ /Hz
全輻射密度、全エネルギー密度	net radiation/energy density	u	J/m ³
(輻射) 強度	intensity	I	W/m ² /sr
(表) 面輝度、比強度	surface brightness/specific intensity	I_ν	W/m ² /Hz/sr
(表) 面輝度、比強度	surface brightness/specific intensity	I_λ	W/m ² /m/sr
等級	magnitude	m, M	mag
表面輝度*9	surface brightness	I, S	mag/arcsec ²

面輝度が式 (3.2) のように 2 つのパラメータを用いて表せると仮定すると、基本面の存在を示す事ができる。まず銀河が重力的に束縛されているとすれば、 $\sigma_v^2 \propto M/r_0$ である。ここで質量光度比が $M/L \propto M^a$ と表されると仮定すると、 $L \propto I_0 r_0^2$ と合わせて

$$L \propto I_0 r_0^2 \propto I_0 \left(\frac{M}{\sigma_v^2} \right) \propto I_0 \frac{L^{2/(1-a)}}{\sigma_v^4},$$

$$\therefore L^{1+a} \propto I_0^{1-a} \sigma_v^{4-4a} \quad (3.3)$$

を得る。観測結果には $a \simeq 1/4$ としたものが良く一致する。

基本面の関係式は D_n - σ 関係と呼ばれる事もある。 D_n は銀河の面輝度がある値よりも大きくなるような直径であり、

$$D_n \propto r_0^\alpha I_0^\beta \quad (\alpha, \beta \text{ は定数})$$

で与えられる。 I_0 を適当に選べば D_n が σ_v の冪乗に比例するようにでき、 $L \propto I_0^x \sigma_v^y$ の近似として使える。実際天体の σ_v と視直径が分かれば、 D_n - σ 関係を用いてその天体までの距離を決めることができる。

3.5 銀河団

銀河団とは、自己重力で束縛している中で最大の系である*10。銀河団ではビリアル平衡

$$(\text{運動エネルギー}) = -\frac{1}{2} \times (\text{ポテンシャルエネルギー})$$

が成り立っているが、観測される運動エネルギーは目に見える物質の重力ポテンシャルに対して大きすぎる。これはダークマターの直接的な証拠である。

*7 1 Jy = 10⁻²⁶ W/m²/Hz。

*8 カタカナを遣わないならば「流束」。頭に「エネルギー」や「輻射」を付けてエネルギーフラックス（輻射流束）といってもよい。

*9 この教科書では一貫して、単位立体角あたりのフラックス（単位は W/m²/arcsec²）を surface brightness と呼んでいる。

*10 さらに上の階層は存在し、超銀河団という (3.11 節)。

銀河団のバリオンの主成分は、驚くべきことに銀河自身ではなく**プラズマ**である。ガスは銀河団の深いポテンシャル井戸に落ち込んでいく過程で $\sim 10^8$ K (10 keV) まで熱せられ、制動放射として X 線を放出し、 $> 10^{35}$ W で強烈に輝く。この放射は粒子どうしの衝突によるものなので、X 線光度は n^2 (n は粒子の個数密度) とガスの体積 r_0^3 (r_0 は銀河団の特徴的な距離) に比例する: $L_X \propto n^2 r_0^3$ 。一方でガスの質量 M_{gas} は $M_{\text{gas}} \propto n r_0^3$ を満たすので、これら 2 式より

$$M_{\text{gas}} \propto \left(\frac{L_X}{r_0^3} \right)^{1/2} r_0^3 = r_0^{3/2} L_X^{1/2}$$

を得る。

一方で銀河団の全質量 ($\sim 10^{14}$ – $10^{15} M_\odot$) は静水圧平衡に支配されている。詳しい計算は 7.4 節で扱うが、結果だけ引用すれば等温・圧力平衡下で $M_{\text{total}} \propto r_0$ である。したがって全質量に占めるガスの比は

$$\frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{total}}} \propto \sqrt{r_0 L_X}$$

であり、銀河団までの距離が分かれば r_0 , L_X , $M_{\text{gas}}/M_{\text{total}}$ が求められる (ガスだけでは静水圧平衡を保つことができないので、これはダークマターの証拠にもなる)。また質量は見える見えない関わらず重力的にのみ束縛されているので、 $M_{\text{gas}}/M_{\text{total}}$ は赤方偏移到依存しないと考えられている。ここで視直径は $\theta_0 = r_0/d_A$ (d_A は角径距離) を満たし、X 線光度は $L_X \propto F_X d_L^2$ (F_X は X 線でのフラックス, d_L は光度距離) を満たすことを考えよう。すると $M_{\text{gas}}/M_{\text{total}}$ が一定ならば、 d_A と d_L が固有運動距離 d_M と

$$d_L = (1+z)d_M = (1+z)^2 d_A \quad (1.50)$$

の関係を満たしていたことより、

$$\frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{total}}} \propto \sqrt{r_0 L_X} \propto \sqrt{\theta_0 F_X d_A d_L^2} = \sqrt{\theta_0 F_X \times (1+z)^{-1} d_M \times [(1+z)d_M]^2} = \sqrt{\theta_0 F_X} (1+z)^{1/2} d_M^{3/2}$$

が成立する。平坦な宇宙では d_M は共動距離 d_{comoving} に等しく、

$$d_{\text{comoving}} = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{(1+z')^2 (1+z' \Omega_{m,0}) - z'(2+z') \Omega_{\Lambda,0}}} \quad (1.44)$$

で宇宙論パラメータに関係しているので、 $M_{\text{gas}}/M_{\text{total}}$ の観測は逆に宇宙論パラメータの決定に利用できる。

ところで銀河団が最初に発見されたのは、Abell 銀河団カタログの写真乾板を目で探すことによってであった。その銀河団たちは密集具合 (**richness** という) によって、クラス 0 (もっとも疎) からクラス 5 (もっとも密) に分類された。Abell が見た範囲は $z \sim 0.2$ にも及ぶが、 z が高いものや richness が低いものには見落としがあった。現代では X 線や可視での観測がより高い z の銀河団の発見に使われており、将来的には CMB の地図に Sunyaev-Zel'dovich 効果を適用することでより多くの銀河団が見つかるだろう。

宇宙論に制限を与える量には、銀河団の number counts: dN/dS もある。物質のエネルギースペクトルと宇宙論モデルを用いれば、ビリアル平衡にあるダークマターの塊の形成が計算できる。例えば宇宙が最近 ($z < 0.5$) に加速膨張していたとすると、塊は重力的に崩壊することが分かる。すると銀河団の質量関数は、ダークエネルギーのパラメータ $w(z)$ に強く依存することになる。

銀河団の中心にはふつう巨大な銀河があり、これはふつうその銀河団の中でもっとも明るい。このような銀河は **brightest cluster galaxy: BCG** といい、大抵は巨大な楕円銀河か S0 銀河である (後者は **D** 銀河とか **cD** 銀河とかいう)。BCG は稀に 2 重のコアをもっているが、これは BCG が現在合体の途中にある銀河であることを示唆している。

3.6 Sunyaev-Zel'dovich 効果

銀河団を通過する CMB 光子は、ガス中の電子によって Compton 散乱する。すると、元々のスペクトルの高波長側で光子の温度 T が

$$\frac{\Delta T}{T} \propto \int n_e d\ell \sim n_e \Delta \ell \quad \left(\begin{array}{l} n_e \text{ は電子の個数密度,} \\ \Delta \ell \text{ は光路長} \end{array} \right)$$

だけずれる。一方 X 線光度 L_X が n_e に比例したことを思い出すと

$$L_X \propto \int n_e^2 d\ell \sim n_e^2 \Delta \ell$$

なので、この2式から n_e を消去して $\Delta\ell$ を求められる。特に銀河団が球対称ならば $\Delta\ell$ は視直径に等しいので、その銀河団までの角距離も分かる。この手法より Hubble パラメータの値も求められるが、無作為な分布で $61 \pm 3 \text{ km/s/Mpc}$, 球対称な分布で $61 \pm 18 \text{ km/s/Mpc}$ と不確かさが大きく、検算としての意味合いが強い。

Compton 散乱では光子の個数は保存される一方、エネルギーは再分配される。すると高波長側の光子数が減って短波長側の光子数が増える。これは **Sunyaev-Zel'dovich 効果 (SZ 効果)** と呼ばれ、全天の銀河団探索のための次世代 CMB 地図を作る武器とされている。

銀河団が宇宙静止系に対して運動し電子が余分な運動エネルギーをもっているのであれば、光子はその電子と相互作用する。これを動力的 **SZ 効果** というが、これは前述の熱的 **SZ 効果** に比べると格段に小さい (図 3.4)。また、一般の SZ 効果は

$$\frac{\Delta T}{T} = f(x) \int n_e \frac{k_B T}{m_e c^2} \sigma_T d\ell \quad \left(\begin{array}{l} n_e \text{ と } m_e \text{ は電子の個数密度と質量,} \\ k_B \text{ は Boltzmann 定数, } c \text{ は光速} \end{array} \right) \quad (3.4)$$

と表される。ここに

$$f(x) \equiv \left(x \frac{e^x + 1}{e^x - 1} - 4 \right) \left(\frac{x e^x}{e^x - 1} \right), \quad x \equiv \frac{h\nu}{k_B T} \quad \left(\begin{array}{l} h \text{ は Planck 定数,} \\ \nu \text{ は光子の周波数} \end{array} \right) \quad (3.5)$$

であり、

$$\sigma_T = \frac{8}{3} \alpha^2 \times \pi \lambda_C^2; \quad \alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}, \quad \lambda_C \equiv \frac{\hbar}{m_e c} \quad \left(\begin{array}{l} e \text{ は素電荷, } \epsilon_0 \text{ は真空の} \\ \text{誘電率, } \hbar \equiv h/(2\pi) \end{array} \right)$$

は Thomson 散乱の全断面積、 $y \equiv \int \dots d\ell$ は **Compton の y パラメータ** である。SZ 効果は z に依存 しない ことに注意しよう！

〈今日のまとめ〉

・ **ダークマター** の存在：渦巻銀河の回転曲線の矛盾によって示唆される。それ以外にも、ダークマターが存在しないとおかしいという証拠はいくつかある。その正体はニュートラリーノやアクシオンか？

・ **Hubble** の音叉図：楕円銀河 (E0-E7)、レンズ状銀河 (S0)、渦巻銀河 (Sa-Sc)、棒渦巻銀河 (SBa-SBc) を並べたもの。これらの他に不規則銀河 (Irr) が加わる。楕円銀河を早期型、渦巻/棒渦巻銀河を晩期型というが、楕円銀河のほうが早く生まれた訳では ない。

・ **Tully-Fisher 関係**：

$$L \propto (\Delta v)^\alpha \quad (\alpha \text{ は波長帯によって } 3-4).$$

・ **Faber-Jackson 関係**：

$$L \propto \sigma_v^\alpha \quad (\alpha \simeq 3-4).$$

より一般には、基本面の関係式

$$L \propto I_0^x \sigma_v^y \quad (x \simeq -0.7, y \simeq 3-4).$$

・ **銀河団**：最大の自己重力系。ビリアル平衡

$$(\text{運動エネルギー}) = -\frac{1}{2} \times (\text{ポテンシャルエネルギー})$$

が成り立っている。主成分はプラズマ。中心には極めて明るい **brightest cluster galaxy: BCG** がいる。 $M_{\text{gas}}/M_{\text{total}}$ や dN/dS を用いると、宇宙論的パラメータに制限をかけられる。

・ **Sunyaev-Zel'dovich 効果**：Compton 散乱により高波長側の光子数が減って短波長側の光子数が増える。これは狭義には熱的 **SZ 効果** といい、CMB 光子が銀河団の電子と相互作用する動力的 **SZ 効果** よりも格段に大きい。一般の SZ 効果は

$$\frac{\Delta T}{T} = f(x) \int n_e \frac{k_B T}{m_e c^2} \sigma_T d\ell, \quad (3.4)$$

ただし

$$f(x) \equiv \left(x \frac{e^x + 1}{e^x - 1} - 4 \right) \left(\frac{x e^x}{e^x - 1} \right), \quad x \equiv \frac{h\nu}{k_B T}. \quad (3.5)$$

〈単語リスト〉

p.92

- in due course 「そのうち」
- compelling evidence 「有力な証拠」

p.93

- recoil (n.) 「反動」 (v.) 「跳ね返る」
- flurry 「興奮、混乱；俄か雨、突風」

p.94

- nuisance 「邪魔、妨害」
- propagation 「伝播、増殖」 → propagate (v.)
- rule out 「～を排除する、妨げる」
- preclude 「～を除外する、不可能にする」
- neural network 「神経回路」

p.96

- advent 「到来」
- supersede 「～に取って代わる」

p.97

- underpinning 「基礎、土台」 → underpin (v.)
- sketchy 「未完成の；大雑把な」

p.98

- relic 「遺跡、遺物」
- further out 「さらに」

p.99

- assemblage 「集合、集まり；組み合わせ」 cf. assembly
- lengthy 「冗長な」

p.100

- foreground 「前景」
- entrain 「電車に乗る；～を引きずる、取り込む」