

## 11. 銀河と膨張宇宙

### 11-1 銀河

#### 銀河とは

もともとは天の川を意味する<sup>1</sup>。望遠鏡が発明されて、天の川が恒星の集団であることが判明した。後の観測の進歩によって、星雲状に見える天体の多くが、天の川の外側にある多数の恒星が集まった天体であると確認された。天の川を作っている星の集団とこれらの天体は、同様のものと考えられることから銀河と総称する。天の川を作っている銀河のことを特に銀河系、天の川銀河、あるいは我々の銀河 (our Galaxy) と呼ぶ。またそれ以外の銀河を総称して系外銀河と呼ぶ。観測可能な範囲にある銀河の総数は約 2 兆個と推定されている<sup>2</sup>。

#### 銀河系の構造

銀河系の構造は、星の分布や運動の観測に加え、21cm 線<sup>3</sup>を用いた中性水素の分布の観測などをもとに解明されてきた。銀河系は約 2 千億から 4 千億個の恒星を保有し、それらは主に中心部の膨らんだバルジとその周辺の円盤に分布している。銀河系の全体の直径は約 10 万光年である。

バルジには比較的年老いた星が多く、星の運動の観測から中心には太陽質量の約 400 万倍に達する重力源<sup>4</sup>が存在すると推定されている。円盤は星形成が活発で相対的に若い星が多い。銀河系の中心に対して同一方向に回転運動をしており、その速度は中心からの距離によらず 210~240 km/s である。この回転運動から、銀河系の全質量は太陽の約 1 兆倍と推定でき、星や星間ガスの質量では説明しきれない。銀河系を作っている物質の約 95 パーセントは電磁波を放出しない何らかの物質であり、これをダークマターと呼ぶ<sup>5</sup>太陽系は円盤に属し、銀河中心から約 3 万光年の距離にある。さらに円盤には星の粗密があり、らせん状の渦状腕に沿って星の密度が高い。銀河系では 4 本の渦状腕が認められている。

<sup>1</sup>英語の galaxy も同様。ミルクを表すギリシャ語にちなむが、これは天の川をミルクの川に例えていたことに由来する

<sup>2</sup>最近の研究で従来の推定値 2000 億個から約 10 倍になった。Conselice et al., 2016, Ap. J. 830:83 (17pp)

<sup>3</sup>水素原子の発する波長 21cm の電波

<sup>4</sup>おそらく超巨大ブラックホール

<sup>5</sup>ダークマターが何からできているのかは現時点では不明だが、大部分は未知の素粒子である可能性が高い。

バルジとディスクはさらに年老いた星や、それらの集団である球状星団が散在するハローに囲まれている。ハローを構成する天体の大半は銀河中心から 10 万光年の範囲に分布する。

## 系外銀河までの距離測定

系外銀河の年周視差は非常に小さく、年周視差法では距離測定が困難である。そこで用いられるのが、変光周期と絶対等級の間に一定の関係性があるセファイド変光星である。スペクトルタイプと変光周期から、系外銀河に属するこれらの変光星を見出し、その見かけの等級から系外銀河までの距離を測定する。この方法はまずマゼラン雲（天の川銀河に寄り添う小銀河の一つ、地球から約 20 万光年の距離にある）に適用されて成功し、後にアンドロメダ銀河（約 250 万光年）など、より遠方の銀河にも適用されていった。ただし、この方法で測定できるのは、含まれるセファイド変光星を観測できる約 6000 万光年までの銀河にとどまる。

より遠くの銀河については Ia 型超新星の見かけの等級を用いる。Ia 型超新星は、隣接する恒星からの質量供給などが原因となって、白色矮星で新たな核融合反応が暴走的に起こることにより発生する。発生の仕組みが共通なため、このタイプの超新星は絶対等級がほぼ等しいという特徴がある。Ia 型超新星は最大光度に達したときにケイ素の吸収線が明瞭にみられる一方、水素の吸収線が見られないといった特徴から他の超新星と区別できる。Ia 型超新星をもちいることで、最大で 100 億光年先の銀河まで距離測定が可能になった。

系外銀河の位置を求めることで、銀河の分布が一様ではなく、互いに重力を及ぼしあって群れを成していることが分かってきた。銀河が数百から数千個集まった群れのことを銀河団とよび、銀河系はおとめ座銀河団に属する。おとめ座銀河団は名のとおりおとめ座の方角に多くの構成銀河が観察される。銀河の集まり方には空間的な階層性があり、おとめ座銀河団はさらに大きな局部超銀河団の中心部に位置する。また個々の銀河団の内部にも銀河の粗密があり、数十個程度の銀河の集まりを銀河群と呼ぶ。銀河系の属する銀河群を局部銀河群と呼び、この中にはアンドロメダ銀河が含まれる。

## 11-2 膨張宇宙

### 銀河の後退速度

系外銀河の光を分光すると、水素原子等による吸収線が観測される。光源と観測者の間に視線方向の相対運動があると、ドップラー効果が生じて吸収線の波長  $\lambda$  が次式にしたがって変化する。

$$\lambda = \lambda_0 \frac{c}{c - v} \quad (1)$$

ここで  $\lambda_0$  は相対運動のない時の波長,  $c$  は光速,  $v$  は視線速度 (遠ざかる場合を正に取った) である. すなわち吸収線波長の偏移から, 視線速度を測定することができる.

多数の系外銀河について距離と視線速度を求めたところ, 遠方の銀河ほどより高い速度で遠ざかっていることが判明した. これを発見者にちなみハッブルの法則と呼び, 概ね次式に従う.

$$v = H_0 d \quad (2)$$

ここで  $H_0$  は比例係数 (ハッブル定数),  $d$  は距離である. 最新の観測によればハッブル定数は  $67.15 \pm 1.2$  km/s/Mpc (Mpc= $10^6$  パーセク) である. この定数は時間の逆数の次元を持つ.

ハッブルの法則は宇宙が膨張していることを示す. 一見, この膨張は銀河系を中心に起きていると感じられるかもしれないが, そうでなくても説明できる. 宇宙が等方かつ一様に膨張していれば, どの銀河から観測しても同様の観測結果が得られる. 宇宙が一様等方であるとする考えを宇宙原理と呼び, 合理的な考え方として受け入れられている.

時間をさかのぼって考えると, 宇宙にはかつて物質が高密度に集まった状態であったことが示唆される. その状態から現在までの経過時間を  $t$  とすると, ハッブルの法則から

$$t \doteq \frac{d}{v} = \frac{1}{H_0} \quad (3)$$

ここにハッブル定数を当てはめるとおよそ 140 億年という値になる.

宇宙が高密度だったとすると, 当時は極めて高温の状態でもあったと推定される. 宇宙の遠方からは, ほぼ等方的に 3K の黒体放射 (宇宙背景放射) が届いていることが観測されており, これは宇宙全体が 3000K 程度の温度<sup>6</sup>であったときの黒体放射が, 宇宙膨張とともにドップラー偏移をしたものと解釈される. また宇宙背景放射は, 観測方位によらずほぼ一様である. 同時にごくわずかな揺らぎも存在することもわかってきた. これらは宇宙が量子力学が重要となるような極めて高密度かつ高温の状態から急激に膨張したことを示唆する. この高密度状態の宇宙の急膨張のことを, 爆発現象になぞらえてビッグバンと呼ぶ. そしてこれを宇宙の始まりとする仮説をビッグバン宇宙論と呼ぶ.

ビッグバン宇宙論は多くの観測事実を合理的に説明することができ, 広く受け入れられている. 宇宙の膨張は, 相対性理論を用いて記述することができ, 最新の観測的なデータを当てはめると宇宙の年齢はおよそ 138 億年と推定される. 恒星はこれよりも若いはずだが, 今のところ矛盾する観測は存在していない.

<sup>6</sup>これ以上の温度では陽子と電子がばらばらに分かれてプラズマ状態になる. そのため放射が効率よく吸収され, 遠方まで放射が伝わるできない. この温度以下になって初めて, 放射が遠方まで伝わるようになる. これは宇宙の晴れ上がりと呼ばれており, このときの放射が宇宙背景放射として観測されているものと考えられている.