

2016年度 春学期 火V限

地学概論

1. 銀河の分類と性質
2. 銀河の集団と宇宙の大規模構造
3. ダーク・マター

- ・西浦担当分については、受講態度・試験結果から総合的に評価する。
- ・講義資料は、以下のWEBページ上で公開しているため、事前・事後にダウンロードし、参考にすることを推奨する。

→ <http://astro.u-gakugei.ac.jp/~nishuira/>
 → 「西浦クンの講義室」からPDF版をDL可



東京学芸大学 自然科学系
宇宙地球科学分野 講師
西浦 慎悟

1. 銀河の分類と性質 (東京大学木曾観測所提供)

ハッブルの形態分類 (1936年~)

「ハッブルの音叉図」「ハッブル系列」などとも呼ばれる。



銀河系の構造

1. 銀河の分類と性質

銀河系は典型的な渦巻銀河。ハロー 極めて物質が希薄な領域。球状星団 (非常に高齢な恒星のみからなる星団) が存在している。

バルジ

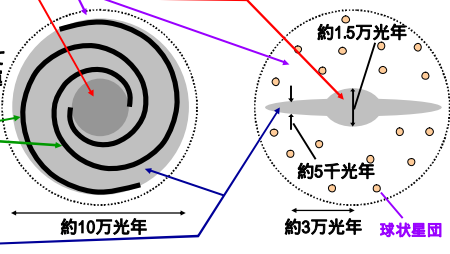
ガスやチリ (恒星の材料) はほとんど存在せず、比較的年老いた恒星が分布している。速度分散 (ランダム運動) で構造を支持している。

アーム (渦状腕)

ディスク上に形成される。ガスやチリが集中し、若い恒星が多く分布している。

ディスク (銀河円盤)

ガスやチリ (恒星の材料) といった星間物質が豊富にあり、年老いた恒星から非常に若い恒星までが存在している。散光星雲や暗黒星雲、散開星団や惑星状星雲、超新星残骸などの恒星の一生に関わる天体が分布している。回転運動によって、構造を支持している。



1. 銀河の分類と性質 (東京大学木曾観測所提供)

銀河の明るさの分布 (表面輝度分布)

銀河の中心から外側に向けて明るさの変化を調べる。



楕円銀河では、明るさは半径の1/4乗に比例する ($r^{1/4}$ 則、ド・ヴォークルルール)。

楕円銀河と渦巻銀河の構造は異なっている。



渦巻銀河のバルジの明るさは半径の1/4乗、円盤 (ディスク) の明るさは半径の指数に比例する (指数法則)。

楕円銀河と渦巻銀河のバルジは似ている。

銀河の形態

1. 銀河の分類と性質

典型的には数1000億の恒星からなる巨大な天体だが、実際には様々な形態・サイズ、性質を持つ。



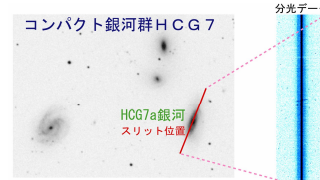
我々が住む銀河系 (天の川銀河) も渦巻銀河の一つ。

(東京大学木曾観測所提供)

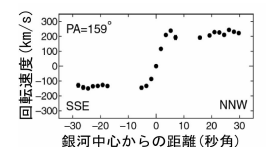
銀河の内部運動

1. 銀河の分類と性質

渦巻銀河 → 円盤部の恒星とガスは回転運動、バルジの恒星はランダム運動。 } 実際には、回転運動の方が支配的。



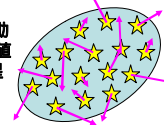
可視光 → 散光星雲の H
電波 → 水素原子の 21cm 線



(Nishuira et al. 2000, AJ, 120, 1691)

楕円銀河 → 銀河内の恒星はランダム運動。

速度分散 = 恒星のランダム運動の大きさを示す物理量で、この値が大きいほど、銀河内部の恒星の平均的な運動は激しくなる。




楕円銀河と渦巻銀河は、異なる運動状態にある。

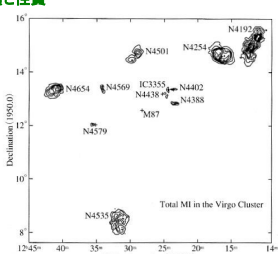
1. 銀河の分類と性質

銀河の存在環境

銀河団: 数10個から数1000個の銀河からなる巨大な銀河集団。



かみのけ座銀河団の中心部
(東京大学木曾観測所提供)



電波21cm線(中性水素)で観た
おとめ座銀河団の渦巻銀河。

銀河団中心に近い渦巻銀河ほど
中性水素ガスが少ないように見える。
→ 銀河と高温プラズマガス(銀河団
ガス)、または、銀河どうしの相互作用
でガスが剥ぎ取られる。

1. 銀河の分類と性質

活動性による銀河の分類

【活動銀河中心核】

- ・ **セイファート銀河:** 銀河中心部の明るさが卓越しており、中心部に**大質量BH**が存在していると考えられている。早期型渦巻銀河であることが多い。
- ・ **クェーサー:** セイファート銀河以上に中心が明るく、**超大質量BH**を持っていると思われる。楕円銀河であることが多い(?)
- ・ **電波銀河:** 普通の銀河よりも強い電波を放射する銀河。中心に**大質量BH**を持っていると考えられている。楕円銀河・合体銀河に多い。
- ・ **【星生成活動】**
- ・ **スターバースト銀河:** 普通の銀河よりも活発な星生成活動を行っている銀河。渦巻銀河または不規則銀河に多い。
- ・ **赤外線銀河:** 普通の銀河よりも強い赤外線を放射する銀河。渦巻銀河や不規則銀河、合体銀河、相互作用銀河に多い。

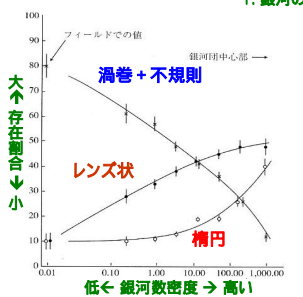


電波銀河NGC5128(=ケンタウルスA)
可視光では楕円銀河、電波では
巨大な双極電波ジェットに観える。

銀河の活動性は、中心部分の
超巨大BHに起因する**活動銀河中心核**によるものと、**活発な星生成活動**によるものに大別される。

1. 銀河の分類と性質

サイズによる銀河の分類

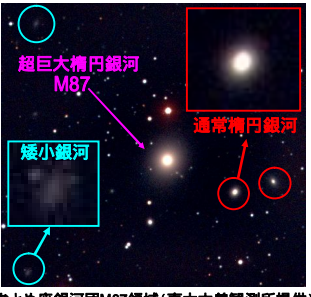


渦巻+不規則
レンズ状
楕円

低←銀河数密度→高い

楕円・レンズ状銀河 → 銀河数密度高
渦巻銀河 → 銀河数密度低

銀河の形態・密度関係: 銀河の形成・
進化と存在環境の間には、何らかの関
係が存在している。→ 詳細は不明



おとめ座銀河団M87領域(東大木曾観測所提供)

超巨大銀河 > 巨大銀河 > 通常銀河 > 矮小銀河

区別は曖昧

1. 銀河の分類と性質

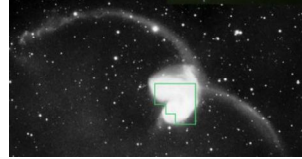
銀河の形態と基本的な性質

楕円銀河	レンズ状銀河 (S0銀河)	渦巻銀河 棒渦巻銀河
赤っぽい	色	青っぽい
少ない	恒星に対するガスの相対量	多い
大きい	バルジの明るさの割合	小さい
無秩序運動が大きい	内部運動	回転運動が大きい
高い銀河数密度	環境	低い銀河数密度

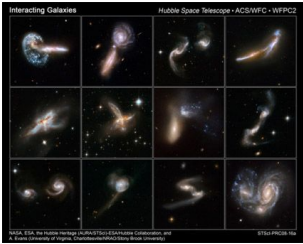
銀河のサイズ: 超巨大銀河 > 巨大銀河 > 通常銀河 > 矮小銀河
銀河の活動性: 活動銀河中心核: クェーサー > セイファート銀河、電波銀河
星生成活動: 赤外線銀河、スターバースト銀河

1. 銀河の分類と性質

銀河衝突と銀河間相互作用




アンテナ銀河(NGC4038/39)(DSSより)



ハッブル宇宙望遠鏡が捉えた様々な合体
銀河・衝突銀河・相互作用銀河

銀河衝突・合体や相互作用によって、
互いの銀河のガス同士が圧縮されて盛
んな星生成が起こったり、反対に、ガス
の剥ぎ取りによって星生成が抑制され
たりする。




NGC4650A: 銀河中心を他の銀河が通り
抜ける例(NASAハッブル宇宙望遠鏡撮影)

2. 銀河の集団と宇宙の大規模構造

銀河団 数10個から数1000個以上の銀河が集まった大規模な銀河集団。
大雑把には、銀河の5~7割は銀河団や銀河群(後述)など、何らかの
銀河集団に属していると言われている。



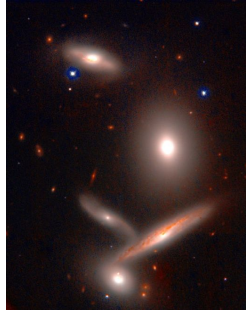
かみのけ座銀河団の中心部



おとめ座銀河団の一部
(東京大学木曾観測所提供)

2. 銀河の集団と宇宙の大規模構造

銀河群 銀河団よりも銀河の数が少ない小規模な銀河集団だが、銀河団と銀河群の間に物理的な区別はない。



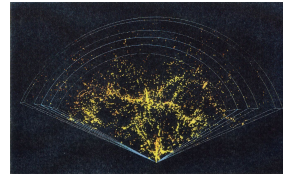
ヒクソン・コンパクト銀河群40 (HCG40)
(国立天文台提供)



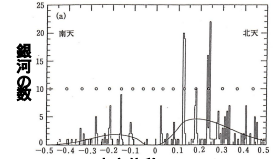
ステファンの五つ子 (HCG92)
(東京大学木曾観測所提供)

2. 銀河の集団と宇宙の大規模構造

1981年: マーガレット・ゲラーとジョン・ハラのグループは、CfA (= Center for Astrophysics, ハーバード大) サーベイと呼ばれる、天球の広い領域に存在する銀河の後退速度を調べる観測を行った。そして、ボイドと銀河がフィラメント状に分布した構造が、宇宙において一般的であることを裏付けた。このような構造は、「ボイド・フィラメント構造」(宇宙の)泡構造、などと呼ばれている。



CfAサーベイによる銀河の空間分布図。黄色の点は全て銀河。扇形の中心が我々の銀河系。



赤方偏移 $z (= v/c)$

ペンシル・ビーム探査による銀河の空間分布 (Broadhurst et al. 1990, Nature, 343, 726より一部を改変 [岡村1999, 銀河系と銀河宇宙, 東京大学出版会])

1990年: ブロードハースト達は、極めて深いペンシル・ビーム探査を行い、128Mpcの周期で、銀河が集中する領域が存在することを発見したが、これらは既知の銀河団・超銀河団であった。

局所銀河群

2. 銀河の集団と宇宙の大規模構造

局所銀河群 = 局部銀河群ともいう。銀河系とアンドロメダ銀河 (M31) を中心に大マゼラン銀河など数10個の銀河からなる銀河群。

(M31・M33の画像: 東京大学木曾観測所提供)



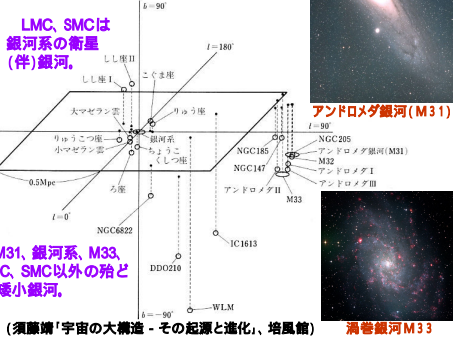
アンドロメダ銀河 (M31)



大マゼラン銀河 (LMC)



小マゼラン銀河 (SMC)
(アングロ・オーストラリア天文台 [AAO] 提供)



LMC, SMCは銀河系の衛星(伴)銀河。

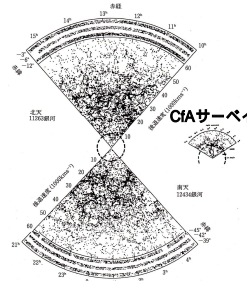
M31, 銀河系, M33, LMC, SMC以外の殆どは矮小銀河。

(須藤博「宇宙の大構造 - その起源と進化」, 培風館)

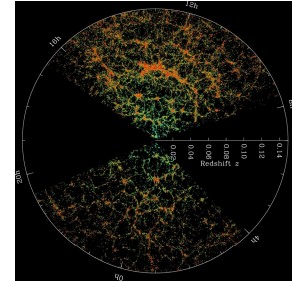
渦巻銀河 M33

2. 銀河の集団と宇宙の大規模構造

・「ラス・カンパナス・サーベイ」と「SDSS」



ラス・カンパナス・サーベイ (岡村1999, 銀河系と銀河宇宙, 東京大学出版会)



SDSS = スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS ホームページより)

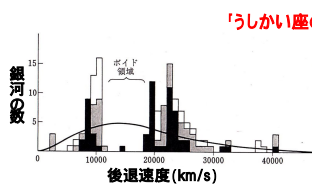
銀河団を超える空間スケールの構造は、まだ力学的平衡状態に達しておらず、大規模構造の形成過程や宇宙初期の密度ゆらぎの情報が保存されている。

2. 銀河の集団と宇宙の大規模構造

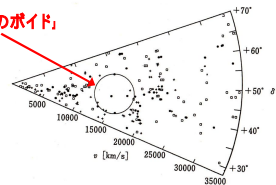
銀河の空間分布

現在の宇宙は、銀河で満ち溢れている。

1981年: カーシュナー達は天球の狭い領域に存在する銀河の後退速度を深いところまで調べた(ペンシル・ビーム探査法)。その結果、銀河がほとんど存在しない領域(ボイド)を発見した。



「うしかい座のボイド」



Kirshner et al. (1981, ApJ, 248, L57)より一部を改変(須藤, 1992, 「宇宙の大構造 - その起源と進化」, 培風館)。

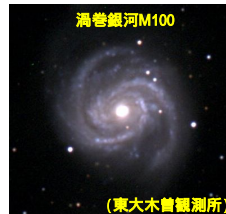
Kirshner et al. (1987, ApJ, 314, 493)より一部を改変(須藤, 1992, 「宇宙の大構造 - その起源と進化」, 培風館)。

このような構造は、宇宙において稀なのか? 一般的なのか?

3. ダーク・マター

ダーク・マター (Dark Matter)

現在まで、あらゆる光(電磁波= 線, X線, 紫外線, 可視光線, 赤外線, 電波)の観測によって直接検出されないが、重力には作用し、間接的には存在が示されている物質の総称。その正体は未だ不明である。1933年: ツヴィッキーが「おとめ座銀河団」の銀河の速度分散が、目で見える銀河の総質量よりも大きいことを発見する。



渦巻銀河 M100

(東大木曾観測所)

おとめ座銀河団の一部



(東大木曾観測所)

1971年: ホールが、渦巻銀河を数値計算で再現する際、銀河のまわりをもっと大きな質量の物質が取り巻いている、とすると、その構造が安定化することを見出す。

1974年: 今までケース・スタディの結果に過ぎなかったダーク・マターについて、オストライカー、ピープルス、ヤヒルが、その存在を明確に主張した。

3. ダーク・マター

1970年代: ヴェラ・ルービン等による渦巻銀河の回転速度の観測から、渦巻銀河に普遍的にダーク・マターが存在する可能性が示唆された。

1978年: アインシュタイン衛星 (NASA) が、楕円銀河や銀河団に、これらを包むような大量の高温プラズマを検出。これらから楕円銀河や銀河団が可視光から予測される以上の質量を有することが確認された。



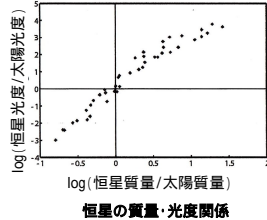
アインシュタイン衛星 (NASA)

銀河・銀河団の可視質量の導出:

銀河・銀河団の観測から直接得られる物理量は光度 (単位時間あたりに天体が放射するエネルギー量) である。

銀河団: 銀河の集団
銀河: 恒星の集団

→ 恒星の質量・光度関係を銀河に応用して、その質量 (可視質量) を算出する。

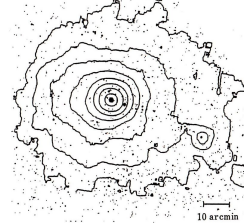


恒星の質量・光度関係

3. ダーク・マター

銀河団の力学質量の導出 2:

銀河団は巨大な重力ポテンシャルを有するため、数1000万~数億Kにもなる高温プラズマを捉えておくことが可能である。高温プラズマは強いX線を放射するため、X線観測からその温度を推察することができる。より深い重力ポテンシャル (つまりより大きい質量) を持つ銀河団ほど、より高い温度のプラズマを閉じ込めることができる。



ペルセウス座銀河団の可視画像 (グレー) およびX線画像 (等輝度線)。(小山 (1992), 'X線で探る宇宙', 培風館)

(仮定)

- 銀河団の高温プラズマは静水圧平衡 (圧力勾配と重力が釣り合った) 状態にある。
- 高温プラズマは球状に分布し、動径R方向の温度、電子密度を $T(R)$ 、 $n_e(R)$ とする。

→ 半径R内の質量 $M(R)$ は、以下のようになる。

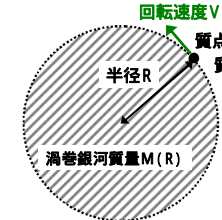
$$M(R) = -\frac{kT(R) \cdot R}{G \mu m_p} \left(\frac{d \ln n_e(R)}{d \ln R} + \frac{d \ln T(R)}{d \ln R} \right)$$

(力学質量) > (可視質量)
約10倍

3. ダーク・マター

渦巻銀河の力学質量の導出:

(仮定) 渦巻銀河の回転は等速円運動。



渦巻銀河中心から、距離 R を回転速度 $V(R)$ で、等速円運動する質量 m の質点を考える。

$$G \frac{M(R)m}{R^2} = m \frac{V(R)^2}{R}$$

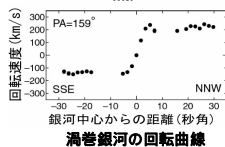
これを整理して、

$$M(R) = \frac{RV(R)^2}{G}$$

渦巻銀河の回転曲線からは、ほぼ $V(R) = \text{一定}$ とみなせる。すると、

$$M(R) \propto R$$

となり、非常に淡くみえる銀河の外側にも、大量の質量が存在することになる。

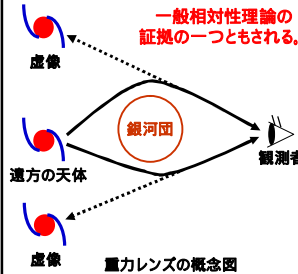


渦巻銀河の回転曲線

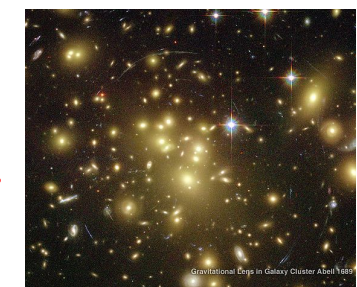
3. ダーク・マター

重力レンズ:

天体から放射された光の進路が、途中に存在する天体の重力によって曲げられることで、あたかもレンズによる像の歪曲や集光が生じたように観測される現象。



重力レンズの概念図



ハッブル宇宙望遠鏡による銀河団Abell 1689の画像
銀河団の像と重なって、各所に引き伸ばされた弓状の銀河の像が観測される。

→ 詳細な解析から、銀河団の質量やその空間分布などの情報が得られる。

3. ダーク・マター

銀河団の力学質量の導出 1: (仮定)

- 銀河団は質量M、半径Rの球形。
- 銀河団中心に対する銀河の「平均」の運動速度の大きさは、 V_{3D} 。
- 銀河団銀河の「平均」の質量はm。
- 銀河団はピリアル平衡状態。

銀河団が個々の銀河を捕まえようとする万有引力によるポテンシャル・エネルギーUの大きさは、

$$U = G \frac{Mm}{R}$$

個々の銀河が銀河団全体の万有引力に逆らって、飛び散ろうとする運動エネルギーTは、

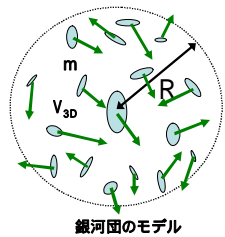
$$T = \frac{1}{2} m V_{3D}^2$$

観測で測定される速度成分は V_{3D} では無く、その視線方向成分 V_{los} のみ。統計的に、 $V_{3D} = 3V_{los}$ から、

$$M = \frac{3RV_{los}^2}{G}$$

(気体の状態方程式の導出方法を参照のこと)

注) los = line of sight



銀河団のモデル

ピリアル平衡状態では、 $U = 2T$ が実現する。また、

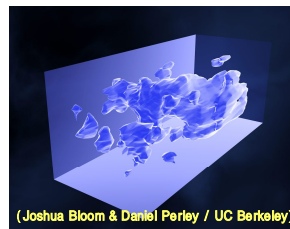
$$M = \frac{RV_{3D}^2}{G}$$

3. ダーク・マター

現在では、電磁波による観測では、直接検出できない暗黒物質 (ダーク・マター) が、銀河内部、銀河周辺部、銀河団内の銀河と銀河の間、などに存在すると考えられている。

ダーク・マターの候補:

- ニュートリノ
 - 僅かに質量を持つことが分かったが、現在では主要な候補ではない。
- ニュートラリーノ
 - 電氣的に中性の超対称性粒子だが、理論上の存在で未発見。ただし、ダーク・マターの最有力候補の一つ。
- アクシオン
 - 未発見の素粒子。強い磁場の中で光子に変わると考えられている。
- 白色矮星、中性子星、ブラックホール
 - 超高密度天体。一般に暗いため、検出が難しい。
- 褐色矮星
 - 質量が小さく、恒星にならなかったガス状天体。
- 惑星



(Joshua Bloom & Daniel Perley / UC Berkeley)

重力レンズから求められたD.M.の空間分布

→ 未発見の素粒子の可能性が高い。他に「修正ニュートン力学」も主張されている。