

2019年度(秋金4) ①

宇宙地球と生命



第11回目

「活動銀河と超巨大ブラックホール」

「ダーク・マター」

東京学芸大学 自然科学系
広域自然科学講座 宇宙地球科学分野
(教育学部・理科・地学教室)

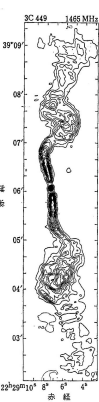
講師・西浦 慎悟

1

④

9. 活動銀河と超巨大ブラックホール

電波ジェットと電波ローブについては、中心核の近から強力な電波を放射する**FR I型**電波ジェットと、ローブの端の方から強力な電波を放射する**FR II型**電波ジェットに分類される。電波ジェット/ローブの形状は、親銀河やその環境と関係があると考えられている。



↑電波銀河Cyg A (3C405)の電波画像

	VPRG	PRG
電波強度	非常に強力	強力
電波ジェット/ローブ	FR II型 (one-side)	FR I型 (two-side)
親銀河	合体銀河	巨大楕円銀河
親銀河の環境	フィールド	銀河団

↑電波銀河3C449の電波画像

4

②

9. 活動銀河と超巨大ブラックホール

9.1 活動銀河の分類・種類

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、**活発な星形成活動**によるものに大別される。

【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。

【星形成活動】

- ・**スターバースト銀河**：普通の銀河よりも活発な**星形成活動**(10-100 M_{\odot}/yr)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。
- ・**超高光度赤外線銀河**：赤外線銀河の中でも、特にクェーサー級のエネルギーを遠赤外線で放射する銀河。ほぼ全てが合体銀河と考えられている。


2

⑤

9. 活動銀河と超巨大ブラックホール

9.3 セイファート銀河

一見、普通の渦巻銀河だが、中心部分が非常に明るい。1940年代に、セイファート(Seyfert)が、これらの中心核領域のスペクトルに強い輝線を発見したことによる命名。中心核領域に $10^6-7 M_{\odot}$ の巨大なブラックホールを持つと考えられている。






セイファート銀河(左) NGC1068 と、(右) NGC 4051 の可視光画像 (skyviewによる、DSS1 redprint から)

5

③

9. 活動銀河と超巨大ブラックホール

9.2 電波銀河

↑電波銀河NGC5128(= Cen A) ↑電波銀河M87(= Vir A) [6cm 電波画像@VLA]

多くの電波銀河は、銀河の「中心核部分」と、そこから双極方向に伸びたジェット構造に付随した「ローブ部分」から強力な電波が放射されている。

電波銀河は、楕円銀河であることが多いが、特に強力な電波を放射する Very Powerful Radio Galaxy (=VPRG)は、そのほとんどが合体銀河である。

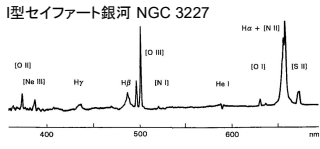
3

⑥

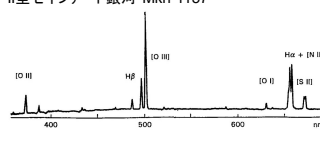
9. 活動銀河と超巨大ブラックホール

幅の広いバルマー輝線を持つものを**I型セイファート銀河**、または、I型セイファート銀河中心核、幅の狭いバルマー輝線を持つものを**II型セイファート銀河**、または、II型セイファート銀河中心核、と呼ぶ。

I型セイファート銀河 NGC 3227



II型セイファート銀河 Mkn 1157



輝線の幅は、それを放射する電離ガスの運動速度を示しており、I型セイファート銀河中心核の輝線の幅は、数1000 km/s から 10000 km/s もの高速運動を示唆していた。

→ 非常に明るい中心核、常識を越えた高速運動を実現するシステムとして、**超巨大ブラックホール**が考案された。

偏光観測から、II型セイファート銀河中心核にも、幅の広いバルマー輝線が発見された。偏光は可視光の反射によって生じる現象のため、中心核領域に、反射物質の存在が示唆された。

6

9.4 クェーサー (7)

9. 活動銀河と超大ブラックホール

非常に強力な電波を放射することで見つかった。かつては「準恒星状電波源」や「準星」と呼ばれた。今では、銀河であることが分かっており、電波が弱いものも見つかっている。

↑クェーサー3C273の可視光画像 (skyviewによる、DSS1 redprint から)

↑クェーサー3C273の可視光画像 (HSTによって、明るい中心領域をマスクして撮影)

セイファート銀河よりケタで大きな超大質量BHを持つと考えられている。また、スペクトルからI型とII型に分けられるが、II型は数が希少である。

7

9.7 スターバースト銀河 (10)

9. 活動銀河と超大ブラックホール

可視光
木曾観測所可視光カメラ

近赤外線
木曾観測所近赤外線カメラ

国立天文台すばる望遠鏡

銀河系に最も近いスターバースト銀河M82。
可視光：複雑なガス・ダスト分布。
近赤外線：ほぼ円盤銀河と思われる構造。
可視光(輝線)：円盤から垂直方向に吹き出す水素イオン・ガス。

10

9.5 活動銀河中心核の統一モデル (8)

9. 活動銀河と超大ブラックホール

ダストによるトラス(ドーナツ状)構造と、観測方向によって、クェーサーやセイファート銀河、電波銀河を統一的に理解できる。

8

9.6 銀河のバルジとAGNの共進化 (9)

9. 活動銀河と超大ブラックホール

左) 銀河の構造と、右) マゴリアン関係

バルジの質量と中心核の超大ブラックホールの質量の相関関係は、両者が互いに関係し合いながら形成・進化してきたことを示している。しかし、その具体的なプロセスは謎のままである。

9

M82の「二つ目玉」の正体は何か? (12)

9. 活動銀河と超大ブラックホール

水素原子ガス

観測者

一酸化炭素分子ガス

ガス多い

ガス少ない

水素原子ガスと一酸化炭素分子ガスのリング状構造

→ リング状に集まった水素原子ガスと一酸化炭素分子ガスを、ほぼ真横から見た構造だと考えられる。

12

9. 活動銀河と超大ブラックホール (13)

X線で見たM82

可視光 X線

超新星残骸やブラックホール

高温プラズマの激流

チャンドラ衛星撮影

M82のX線観測からは、中心から外側に向かう高温プラズマの激しい流れと、中心部に存在する数10個ものブラックホールや中性子星と思われる高密度天体が見つかった。このブラックホールは、数1000太陽質量の中間質量ブラックホールと考えられている。

13

9. 活動銀河と超大ブラックホール (16)

・超光度赤外線銀河 (ULIRG) の渦巻銀河合体シナリオ

渦巻銀河 渦巻銀河

銀河衝突!

さらに銀河合体!!

豊富なガスとチリを持つ

紫外線

真大なチリ

ウルトラ・スターバースト

遠赤外線

中心部では...

超光度赤外線銀河の完成

16

9. 活動銀河と超大ブラックホール (14)

M82で何が起きているのか?

物質多い 物質少ない

高温プラズマ

水素イオン(プラズマ)ガス

一酸化炭素分子ガス

水素原子ガス

中小質量星

大質量星 + 超新星爆発

観測方向

プラズマの嵐が、物質の少ない銀河円盤垂直方向に吹き出す!

スターバーストによる大規模な星形成 → 大質量星の同時形成 → 超新星爆発の同時発生 → スーパーウィンド

14

9. 活動銀河と超大ブラックホール (17)

・超光度赤外線銀河 (ULIRG) の多重合体シナリオ

ULIRGの膨大なガスとチリの起源を説明できる

↑ハッブル宇宙望遠鏡による超光度赤外線銀河画像

→ 遠方のULIRGの殆どが多重合体銀河であることが示された。

17

9. 活動銀河と超大ブラックホール (15)

9.3 超光度赤外線銀河(ウルトラ・スターバースト銀河)

赤外線観測衛星アイラス(1980年代後半)

→ 遠赤外線ですターバースト銀河の数10倍から数100倍のエネルギー(キューサーなみ)を放射している10個の銀河を発見。

超光度赤外線銀河(Ultra Luminous Infrared Galaxy = ULIRG)

ARP220

UGC05101

IRAS22491-1808

10個全て(100%)が衝突銀河だった!

→ 銀河の進化に対する銀河衝突/銀河間相互作用の大きな影響力を示唆

発見当初は、内部でキューサーが形成されている、つまり、キューサーの銀河衝突起源の証拠と考えられた。→ 後の研究から、それほど単純ではないことが分かってきた。

15

9. 活動銀河と超大ブラックホール (18)

● 銀河衝突と銀河間相互作用

↑アンテナ銀河 (NGC4038/39) (DSSより)

↑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)

Interacting Galaxies

Hubble Space Telescope - ACS/WFC - WPC2

↑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。超大BHどうしの合体もあり得る。

18

10. ダーク・マター

19

● ダーク・マター (Dark Matter)

現在まで、あらゆる光(電磁波=γ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ていないが、重力に作用し、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)

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。



おとめ座銀河団の一部

(東大木曾観測所)

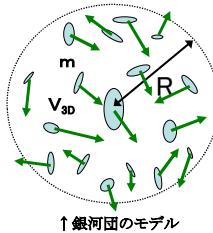
19

10. ダーク・マター

22

● 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。
- ・ 銀河団はビリアル平衡状態。



↑ 銀河団のモデル

- ① 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、
- ② 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、

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

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

- ③ ビリアル平衡状態では、 $U = 2T$ が実現する。また、①、②から、

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

- ④ 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、

(高校物理などの気体の状態方程式の導出方法を参照のこと)

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

注) los = line of sight

22

10. ダーク・マター

20

1970年代: ヴェラ・ルービン等による多数の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。



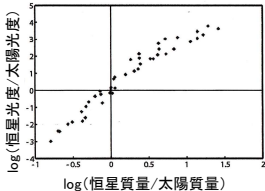
↑ アインシュタイン衛星(NASA)

● 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

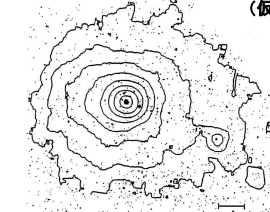
20

10. ダーク・マター

23

● 銀河団の力学質量の導出 2:

- (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。



↑ 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)。

→ 半径R内の質量M(R)は、本頁最下段のようになる。

(力学質量) > (可視質量) 約10倍

→ 渦巻銀河の外側、銀河団銀河間空間にダーク・マターが存在することを示唆。

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

k: ボルツマン定数、G: 万有引力定数、 m_p : 陽子質量、 μ : 平均の粒子質量

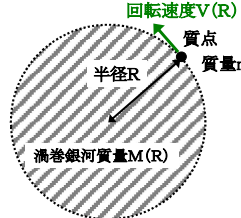
23

10. ダーク・マター

21

● 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。

(万有引力) = (遠心力)、より

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

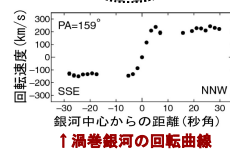
これを整理して、

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

渦巻銀河の回転曲線からは、ほぼ「V(R)=一定」とみなせる。すると、

$$M(R) \propto R$$

となり、非常に深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

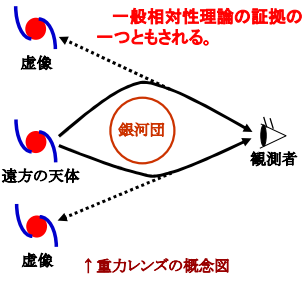
21

10. ダーク・マター

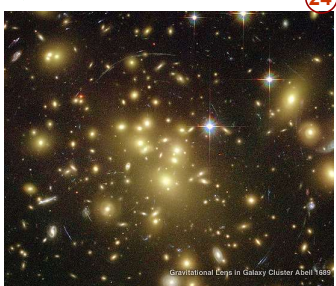
24

● 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。

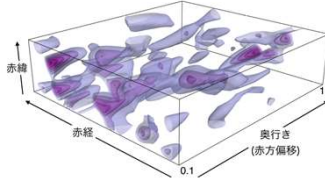
→ 詳細な解析から、銀河団の質量やその空間分布などの情報が得られる。

24

10. ダーク・マター

(25)

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。**



↑「すばる」による重力レンズ観測から求められた約10億光年×約2.5光年×奥行き約10億光年のD.M.の空間分布図。

→ 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。

● 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、恒星になれなかったガス状天体。
- ・ 惑星

25

【参考文献】

(26)

- 1) 富田晃彦 (2010), "活きている銀河たち 銀河天文学入門", 恒星社厚生閣.
- 2) 岡村定矩 (1999), "銀河系と銀河宇宙", 東京大学出版会.
- 3) 谷口義明 (2004), "クエーサーの謎 宇宙でもっともミステリアスな天体", ブルーバックス B-1458, 講談社.
- 4) 横置慎 (2010), "ブラックホール天文学", 新天文学ライブラリー, 日本評論社. (画像: 銀河とマコリアン関係)
- 5) 谷口義明 (2000), "不思議な銀河の物語 銀河は例外をつくらない", ポピュラー・サイエンス 219, 養老房. (画像: M82中心部の構造)
- 6) アメリカ国立電波天文台HP (画像: Cen A, Vir A)
- 7) 赤羽賢司・海部宣男・田原博人 (1988), "宇宙電波天文学", 共立出版. (画像: 3C449, 3C405)
- 8) Skyview (<https://skyview.gsfc.nasa.gov/>) (画像: DSS1によるNGC1068, NGC4051, 3C273, アンテナ銀河)
- 9) Robson, I. (1996), "ACTIVE GALACTIC NUGLEI", WILEY. (画像: N3227の可視光スペクトル, Mkn 1157の可視光スペクトル)
- 10) NASA HP (画像: HSTによる3C273, M82のX線画像, HSTによる多重合体銀河, NGC4650A様々な合体銀河, アインシュタイン衛星, Abell 1689に見られる重力レンズ.)
- 11) 岡村ほか編 (2012), "天文学辞典", シリーズ 現代の天文学 別巻, 日本評論社. (画像: AGN統一モデル)
- 12) 東京大学木曾観測所HP (<http://www.ioa.s.u.-Tokyo.ac.jp/kiso/hp/>, 画像: M82可視画像, M82近赤外画像, M100, おとめ座銀河団[一部])
- 13) 国立天文台HP (<http://www.nao.ac.jp/>, 画像: M82可視光[輝線]画像, D.M.分布図)
- 14) Weliachew, Fomalont & Greisen (1984), A&A, 137, 335-342. (画像: M82のHI画像)
- 15) Nakai et al. (1987), PASJ, 39, 685-708. (画像: M82のCO画像, M82中心部のイメージ図)
- 16) Sanders et al. (1988), ApJ, 325, 74. (画像: ULIRGsの可視光画像[3圖])
- 17) 中嶋浩一 (2009), "天文学入門 一星とは何か", 丸善. (画像: 恒星の質量・光度関係)
- 18) Nishiura et al. (2000), AJ, 120, 1691 (画像: 渦巻銀河ICG7aの回転曲線)
- 19) 小山 (1992), "X線で探る宇宙", 培風館. (画像: ペルセウス座銀河団のX線画像)

26