

アンドロメダ銀河 (M31) の球状星団

家 正 則*・渡 部 潤 一**

1. 系外銀河の球状星団

球状星団を見たことがありますか。本誌の読者なら、我が銀河系内の球状星団 M13 や ω Cen などの美しい写真をごらんになった方も多いいことでしょう。数 10 万個もの恒星が直径約 100 光年の空間に丸く集まった様子は、神秘的な感じさえします。

ところで、球状星団はなにも我が銀河系だけの特産物というわけではありません。図 1 は我が銀河系のお供をしている大マゼラン星雲の中にある星団の写真です。大マゼラン星雲には、我が銀河系の球状星団より若くて、球状星団と散開星団の中間的な性質の星団があります。図 1 中の NGC 1846 は、見かけは球状星団ですが、その色等級図などからこの中間的星団と分類されています。大マゼラン星雲の距離 (15 万光年) では、球状星団の角直径も 1 分角程度はあり、図 1 のように星団周辺の明るい星々は個々に分離してみえます。

お隣の渦巻銀河であるアンドロメダ銀河 (M31) の距離 (210 万光年) になると、球状星団の直径は 10 秒角以下となるため、個々の星々を見分けることはできなくなります。それでも観測条件の良い時に撮影された写

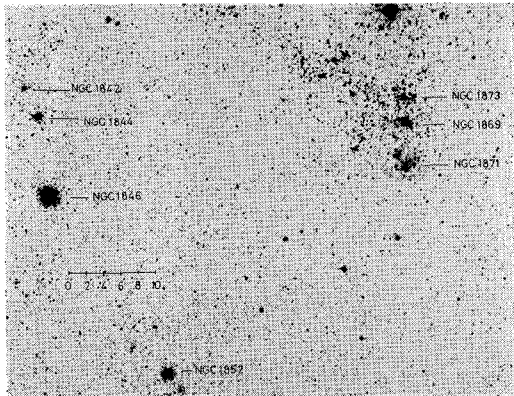


図 1 大マゼラン星雲中の星団。大マゼラン星雲の北側の一部の拡大図である。大マゼラン星雲には、年齢や色等級図から球状星団と散開星団との中間的な星団と分類されている星団がいくつかある。NGC 1846 はその一例である。右側の三つの星団は散開星団である。(上が北、右が東。アングロ・オーストラリア天文台撮影。)

真原板をよく見ると、恒星の像に較べて拡がった天体として写っていることから球状星団であることに気づきます。宇宙膨張の発見で有名なハッブルが 1932 年に書いた論文には、M31 中の球状星団と思われる 140 個の拡がった天体が初めてリストアップされています。図 2 は東京天文台木曾観測所のシュミット望遠鏡で撮影した M31 の一部分の写真です。この領域中で現在確認されている球状星団をそのカタログ番号 (Sargent 他, 1977 年) とともに図中に示しました。原板から数度転写操作をしたため、残念ながらプリント上では拡がり確認できません。むしろ M31 の距離では球状星団も殆んど点像にしか見えないという感じをつかんでもらえるでしょう。

M31 でさえこんな状態ですから、より遠くの銀河では球状星団を一つ一つ同定することは、殆んど不可能です。それでもおとめ座銀河団 (6200 万光年) の中心にある巨大楕円銀河 M87 には、数千個の球状星団があるということが分っています。これは、M87 の周囲にある点光源の数密度が M87 の中心に近づくにつれて明らかに増大していることから、その増加分を統計的に M87 の球状星団とみなすと得られる数なのです。従って M87 の球状星団の場合には、どれが球状星団だと特定することはできません。

銀河団中心にある巨大楕円銀河では、他にも球状星団

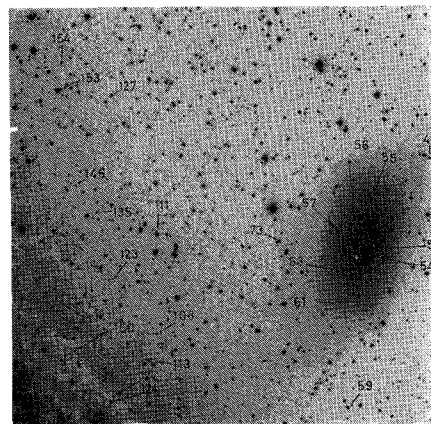


図 2 アンドロメダ銀河 M31 の球状星団の同定図。M31 の北側の領域の一部である。右側にみえる楕円銀河は NGC 205。このプリントでは個々の星団の拡がりは明らかではないが、原板で確認された球状星団について Sargent らのカタログ番号を示した。(上が北、右が西。木曾観測所撮影。)

* 東京天文台 Masanori Iye, ** 東大理学部 Junichi Watanabe: Globular Clusters in the Andromeda Galaxy M31

が異常に多く検出されている例があります。巨大楕円銀河が近くを通りかかった銀河から球状星団をはぎとったためという捕獲説と、銀河中心では初めから球状星団が多く生まれたとする多産説とが対立していて、この問題も大変面白いのですが、本稿では以後話題を M31 の球状星団に絞ることにします。

M31 では、近年、系統的な球状星団サーベイが行なわれ、発見された球状星団候補の数も 500 個に及ぶようになりました。個々の球状星団の UB_V 測光やスペクトル観測も着実に進められており、その結果 M31 の球状星団の数、分布、色、金属量などについて定量的な研究ができるようになってきました。またこれらの研究の副産物として、M31 の星間吸収塵の特性や渦状腕構造についてもいくつかの新事実が浮かび上がってきました。次節以下で、これらの話題について解説することにしてしま

2. M31 の球状星団探し

最近行なわれたサーベイ観測の代表的なものをまとめたのが表 1 です。1977 年の Sargent らのサーベイは、M31 についての初めての本格的な探査観測です。その結果は「Atlas of the Andromeda Galaxy」として出版されました。球状星団かどうかの判定は、撮影した乾板上の像を目で見て行ないました。数あるサーベイのうち今でもこれが最も広い領域をカバーしたのとなっていて、登録数は 355 個です。図 2 のカタログ番号もこの観測によるものです。

1980 年の Battistini らのサーベイも直接撮像観測によるものです。サーベイ領域は M31 の中心部に限定されていますが、それまで見落とされていた球状星団をかなり見つけたことと、検出した球状星団候補の大きさを精密に測定したという点で高く評価されています。

最も新しいのは Crampton らによるサーベイです。このサーベイは、グレンズというグレーティング(回折格子)とレンズの合の子のような対物分光光学系を用いて、0.6 平方の領域内にある全ての天体の 1000 A/mm

の低分散スペクトルを撮っているのが特徴です。星より広がった天体ではこのスペクトルの幅も広がるので検出が容易になるというわけです。検出された幅の広いスペクトルをもつ天体について最終的には Sargent らのサーベイで使われた乾板上で直接像をみて、球状星団候補を選別しています。サーベイ領域は M31 の長軸方向に沿っていて、Sargent らのサーベイ領域に含まれています。それでも新たに 100 個を超える球状星団候補が検出されました。今までの全てのサーベイ結果を合わせて作った最新カタログには、509 個の球状星団候補が登録されています。

これらのサーベイは全て目で見た形から球状星団候補を選び出したものですので、中には丸い形の散開星団や大マゼラン星雲中にみられる NGC 1846 のような中間的星団、それに遠方の銀河が若干含まれている可能性が残っています。実際、Battistini らのカタログ中の球状星団候補の色分布を示したのが図 3 ですが、193 個のうちの 14 個については我々の銀河系の球状星団よりもかなり青い色 ($B-V < 0.6$) を持った天体であることが分ります。これらは恐らく若い散開星団か中間的星団であると思われます。一方非対称な形状の天体は排除され易いので、NGC 5128 (Cen A) で見つかったような非常に歪んだ球状星団が M31 にあるとすると、それは数え落とされている可能性があります。

いづれにせよ、M31 の球状星団数は約 400 は下らないものと考えられます。一方我が銀河系の球状星団はまだ見つかっていないものがあるとしても 200 個以下と考

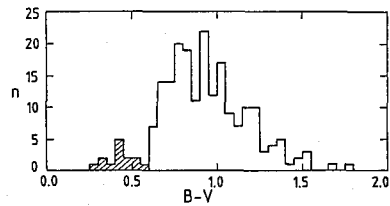


図 3 球状星団候補天体の色分布。Battistini らのカタログによる。斜線を施した天体は、 $B-V \leq 0.6$ と色が青すぎるので球状星団でない可能性が高い。

表 1 M31 の球状星団のサーベイ

	Sargent et al. (1977)	Battistini et al. (1980)	Crampton et al. (1985)
観 測	KPNO 4 ^m direct	Loiano 1.5 ^m direct	CFHT 3.6 ^m "grens."
領 域	長・短 軸	中 心 部	長 軸
判 定	inspection	inspection	inspection
新しく同 定した数	124	39	109
Total 数	335	(240)*1	509

*1 サーベイ領域内のみ

えられますので、M31 が我々の銀河系よりも多くの球状星団をかかえているということは確実です。一般に球状星団の数はその銀河の明るさ（特に種族Ⅱの古い天体からなるバルジ成分の明るさ）に比例することが、若松（1977）らによって指摘されています。実際、運動力学的な証拠から M31 の総質量は、我が銀河系の約 2 倍と推定されているので、発見された球状星団数はつじつまが合います。

3. 球状星団の空間分布

球状星団は銀河中心のまわりに球状に分布すると一般に考えられています。果して本当にそうでしょうか。我々の銀河系の球状星団の分布を調べるのは森の中から森全体の形を推定するのに似ていて簡単ではありません。M31 の球状星団の方がこのような研究には向いています。

最も包括的と思われる Crampton らのカタログを用いて、まず球状星団の分布中心が M31 の中心核と一致するかどうかを確かめてみました。サーベイ領域が限られているために、球状星団の位置座標の平均値を分布の中心とみなすのは早計です。真の分布中心でなく、サーベイ領域の中心が求まってしまう恐れがあるからです。渡辺と山縣（1986）は、図 4 のようにある円形領域内での分布中心を求め、求めた点を中心に新たに円形領域を設定し直して、再びその中で分布中心を求めるという繰り返し操作で、真の分布中心を求めました。この方法なら、サーベイ領域内に真の分布中心があれば、そこへ収束してゆくはずですが。図 5 に初期中心を M31 の中心核から、わざと赤経で $\pm 2^m$ 、赤緯で $\pm 30'$ ずらしたところから始めた場合の収束の様子を示します。この結果から M31 の球状星団の分布中心は M31 の中心核に確かに一致することが分かりました。

では球状星団の分布は本当に球状なのでしょうか。分布図を作ってみると M31 の長軸方向に沿ってより多くの球状星団があるようにみえます。de Vaucouleurs⁴と Buta（1979）は、このことに気づきましたが、サーベイ

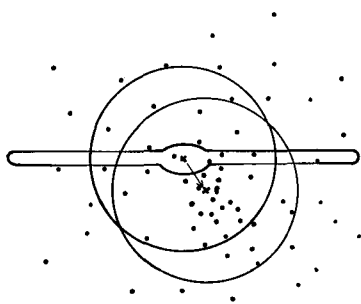


図 4 分布中心を求めるための調査領域の設定法。

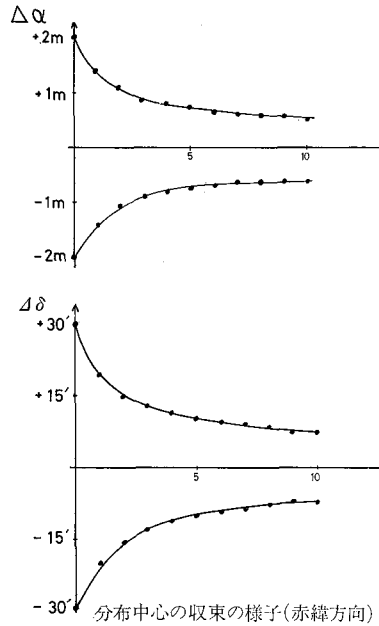


図 5 分布中心の収束の様子。縦軸は M31 の銀河中心からのずれ、横軸は繰り返し調査の回数。（調査領域半径が $0.7'$ の場合）。

領域が長軸に沿って重点がおかれているための見かけの効果だと述べています。M31 の場合、半径 1° 以内の領域の球状星団は、ほぼ検出し尽くされていると考えられます。従って Crampton らのカタログに基づいて、半径 1° 以下の調査領域を設定し、分布の二次モーメントを求めてみることにしました。得られた結果を表 2 に示します。中心から半径 1° までについては、球状星団はみかけの軸比が約 4 対 3 の楕円体状に分布していることが分ります。分布が楕円体状であることだけでなく、分布の長軸方向が M31 の円盤の長軸方向とたいへん良く一致することも確かめられました。

球状星団がこのようにつぶれた分布を示す例は M87 でも確認されています。我々の銀河系でも金属量の多い球状星団だけに注目すると、同じような傾向がみられます。球状星団が銀河形成の早い時期に生まれた古い天体

表 2 計算領域内での二次モーメント計算結果

半径	長軸の位置角	長短軸比	球状星団数
0.94	32.1	1.48	372
0.75	35.3	1.35	313
0.56	38.8	1.28	251
0.37	34.9	1.30	175
0.18	45.6	1.19	75
disk	37.7	4.0	—

(de Vaucouleurs, 1958)

であることを考えると、このことは銀河形成直後の重力収縮過程での収縮の非等方さの目安を与えるという点で重要な観測事実です。

4. 球状星団の色と銀河円盤の向き

M31 の円盤部はみかけの長軸と短軸との長さの比が約 4 であることから、円盤部は視線方向と約 16° 程傾いていると考えられています。ところが、いったい円盤部の北西側が我々に近い側なのか、それとも南東側が我々に近いのかについては、1950 年代に大論争になったまま明確な決着がついていませんでした。北西側には星間塵吸収による暗黒雲が南東側よりも著しく層をなしています。de Vaucouleurs (1958) はこれを銀河中心部 (バルジ) の星の集団の光を遮っているものと解釈し、北西側円盤部が手前であると主張しました。一方渦状腕理論の元祖 Lindblad (1934) は、これを渦状腕の内側に集まった星間塵が渦状腕部の星の光を遮っているものと解釈し、北西側円盤部は中心核より向う側にあるという従来の主張を譲りませんでした。その後、あとで述べるような状況証拠もあり de Vaucouleurs 説が一般に受け入れられているようですが、その観測的根拠は必ずしも明確ではありませんでした。この論争自体は、両者とも決定打を欠いたまま平行線をたどり、うやむやのままになっています。

どちらが手前でもよさそうなものですが、これが実は渦状腕構造からむ大問題なのです。もし de Vaucouleurs 説が正しくて暗黒雲の著しい側が手前側であるならば、一般の銀河にみられる渦状腕は巻き込み型 (トレーリング) となります。一方 Lindblad 説が正しければ、渦状腕は解け出し型 (リーディング) となります。日本の銀河理論研究者が活躍している分野である N 体シミュレーションやモード解析の手法を用いた銀河の安定性の研究によると、理論的には巻き込み型の渦状腕ができる場合が多いようです。このためもあって近頃は de Vaucouleurs 説の方が受けが良いようです。しかし理論計算でも、モデルによっては解け出し型の渦巻きができることもあり、話は単純ではありません。

一見何の関係も無さそうな球状星団が、この問題に明白な解答を与えてくれました。図 6 のように、銀河円盤の背後にある球状星団は星間吸収による赤化現象を受けるため色が赤くなります。従って北西側と南東側とのどちらにより赤い球状星団が多いかを調べれば、円盤のどちらが手前側にあるかが分るはずで、家と Richter (1985) はこのように考えて球状星団の色の平均値の変化を銀河円盤の短軸に沿って調べました。そして期待される通りの色の違いがあることを見つめました (図 7)。結論として、M31 の銀河円盤は北西側を手前側に

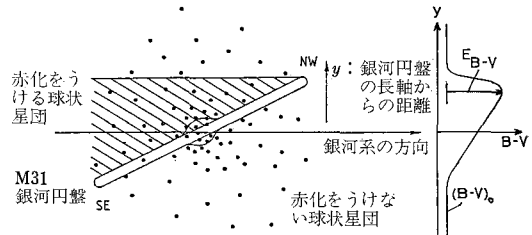


図 6 M31 の銀河面内の星間塵による赤化をうける球状星団 (斜線領域内) とうけない球状星団。球状星団の色の平均値を銀河円盤の短軸方向に沿って調べると右側の曲線のような変化を示すはずである。(図は北西側が手前側の場合)。

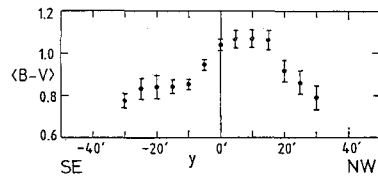


図 7 Battistini らのカタログ値から求めた $B-V$ 値の平均値の分布。図 6 の予想通りの非対称な色分布が確認された。 $U-B$ 値についても同じ傾向が確認された。

して傾いていることが確認されました。つまり M31 では de Vaucouleurs 説が正しいことが証明されたわけです。天球面上での渦巻きのみかけの向き、銀河の短軸上での暗黒雲の著しい側、それと銀河の回転の向きの三者の関係は知られている全ての渦状銀河について例外なく M31 と同じ関係にある。このことから観測される銀河の渦巻きは一般に巻き込み型であることが確認されたこととなります。観測的にこのことが確認されたことによりなぜ解け出し型の渦巻きでなく巻き込み型の渦巻きが出来るのかという問題が、理論屋に対するはっきりした宿題となったわけです。

5. M31 の星間塵の吸収特性

図 8 は、測光精度が高く均質な Battistini らのデータをもとにつくった M31 の球状星団の二色図です。この二色図上での個々の球状星団の位置は、その真の色 $(B-V)_0$, $(U-B)_0$ と星間赤化量 E_{B-V} , E_{U-B} とで決まります。真の色と星間赤化量とを分離するのは簡単ではありませんが、真の色の平均値の空間変化幅が平均赤化量より小さければ、近似的に両者を分離することができます。

球状星団の赤化量を求めると、M31 の円盤部にある星間塵の光吸収特性が分かります。我々の銀河系の太陽系近傍の星間吸収については $E_{U-B}/E_{B-V}=0.72$, $A_V/E_{B-V}=3.1$ という値が標準値とされています。ところが、図 8 などの解析から M31 の星間吸収では $E_{U-B}/E_{B-V}=1.01 \pm 0.11$, $A_V/E_{B-V} \sim 2.5$ という値が得られま

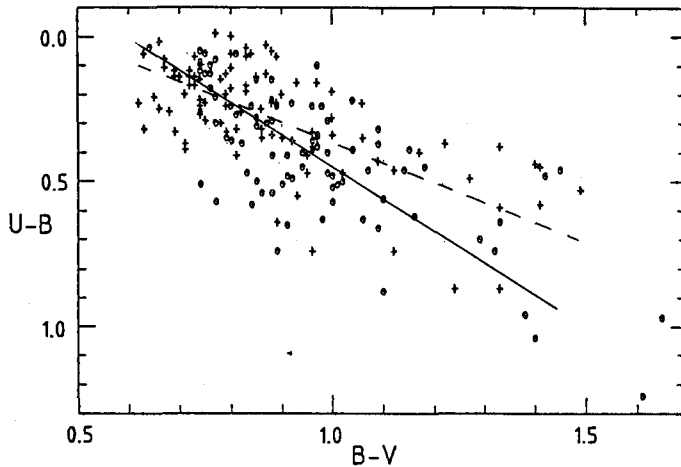


図8 M31の球状星団の二色図. M31の中心から半径5kpc以内の球状星団は○印, 5kpc以上の球状星団は+印で示す. 外部領域の球状星団に対する赤化回帰直線は $E_{U-B}/E_{B-V}=0.68\pm0.23$ (破線) となり, 太陽系近傍の星間赤化の値と大差ないが, 内部領域の球状星団については $E_{U-B}/E_{B-V}=1.04\pm0.17$ (実線) となる.

した. どうやら M31 の星間塵の組成やサイズ分布などの特性は太陽近傍の星間塵のものとは異っているようです. さらに面白いことに, M31 の円盤部を半径 5 kpc 以内の領域と, その外側の領域とに分けて調べてみると, 外側の領域での星間吸収の特性は我々の銀河系の太陽近傍でのものと大差ないことが分かりました. 星間吸収の様子が異なるのは, どうやら半径 5 kpc 以内の銀河中心部領域での現象らしいのです (図 8 参照). この半径 5 kpc 以内の中心領域は中性水素ガスの量も著しく少ない領域です. ここでは星間ガスの量や組成が, 中性水素ガスの多い 5 kpc 以遠の領域や我々が銀河系の太陽近傍とはかなり違って, 星間塵の出来方が異なることは充分考えられそうです. 星間吸収特性の異常が他の波長域の観測でも認められるかどうか今後の観測が期待されます.

6. 球状星団の金属量

星間吸収による赤化現象を補正した球状星団の真の色

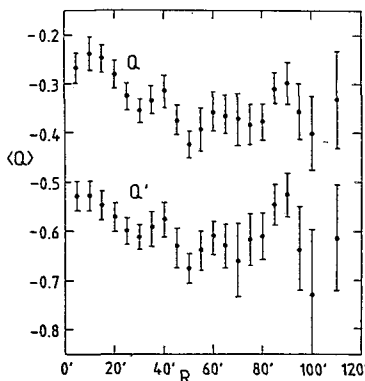


図9 星間赤化量に依らない色指数 Q 及び Q' の分布. どちらの色指数も中心核から $30'$ 以内の領域の球状星団については有意に大きくなっていて, 金属量が多いことを示唆している.

は, 星団の化学組成, 特に金属量の指標となります. 星間赤化の様子が我々が銀河系のものと異なることを考慮して, M31 の球状星団のために, 赤化量に依らない色指数 Q' を $Q'=(U-B)-1.01(B-V)$ と定義することにします. 金属量の指標となる Q' 値の平均値を中心核からの距離の関数として示したのが図 9 です. 中心核に近い球状星団ほど赤くて金属量が多いという傾向があることが分かります. スケールは異なりますが, Q' 指数でなく通常定義による Q 指数を用いても同じ傾向が得られます. この観測事実は球状星団系の収縮過程と化学進化とを結びつける上で重要な手がかりとなると筆者らは考えています.

6. 終わりに

球状星団は銀河の進化史上のいわば生きている化石です. 地上からの観測では大気ゆらぎのため 1 秒角以下の構造を見分けるのは容易ではありませんが, 近々運用が始まる宇宙望遠鏡では 0.04 秒角の空間解像力が期待されています. 宇宙望遠鏡では M87 の球状星団についても個々に特定することができそうです. M31 の球状星団については, 今後は個々の星団の HR 図作りから星団の年齢を決めたり, スペクトル観測から化学組成の定量化や運動の決定などを旨とした観測が進められることでしょう. 我が国で計画中の大型光学赤外線望遠鏡も完成の暁には, これらの観測に利用されるに違いありません.

なお本稿では, M31 の球状星団に関する筆者らの研究成果を軸に話をしましたが, 球状星団そのものについては天文月報 1978 年 8 月号 (有本氏), また M31 自体の電波観測に基づく研究については天文月報 1981 年 10 月号 (祖父江氏), 1982 年 1 月号 (祖父江・沢氏) の解説記事がありますので, 合わせて参考にして下さい.