



い分野だと言えるでしょう。

今回は M 82 を母銀河とする球状星団探査の結果をもとに、系外銀河における球状星団探査の方法を述べていくことにしましょう。M 82 を選んだのは、一つには「近傍の銀河の中では見かけの大きさが小さく、短時間の観測で球状星団探査ができそうである」ということ、さらにもう一つは「M 82 のように中規模の質量をもつ銀河は、われわれの銀河系や M 31 のような比較的大きな質量をもつ銀河と矮小銀河のような小さな質量をもつ銀河をつなぐ研究対象として最適である」というのが理由です。

## 2. 撮像観測による候補探し

球状星団とは銀河系に付随する球状星団をもとに定義されています。よって、本研究では銀河系の球状星団を基準として系外銀河に付随する球状星団を探していかなければなりません。しかし、系外銀河における球状星団探査の第一の困難は球状に星が分布している集団として観測することができないということにあります。すなわちほとんど星のような点源に見えてしまうのです。もちろん、構造を見る方法はいくつかありますが、ここでは効率よく探査を進めるため、点源に近いままの観測から、ある点源が球状星団であるという根拠を示す方法を紹介します。この方法は

Perelmuter ら<sup>2)</sup>が M 82 の隣にある銀河、M 81 の球状星団探査を行った際にも用いられており、彼らの論文の中でも比較的よくまとめられています。本稿で紹介する球状星団探査でも基本的には彼らと同じ方法を用いています。

その方法の第一歩として、まず銀河とその周辺の撮像観測を行い、そこに存在する点源の測光を行います。銀河系の球状星団を基準にすると、球状星団の「明るさ」と「色」はある範囲をもちます。図 1 はそれぞれ銀河系における球状星団の明るさ ( $V$  バンドにおける絶対等級) と色 ( $B$  バンド等級と  $V$  バンド等級の差、すなわち  $(B-V)$ ) の個数分布です。 $V$  バンドでの絶対等級  $M_V$  は  $-9.5 < M_V < -5.5$ 、 $(B-V)$  は  $0.5 < (B-V) < 1.1$  という範囲をもつことがわかります。われわれは測光の結果からこの範囲内にある天体を探し出し、それを球状星団の候補天体とします。他の「色」(例えば  $(V-I)$  や  $(B-R)$  など) も指標として加えるとさらに候補天体を絞り込むことができます。この明るさと色の関係が球状星団を探す絶対的な指標になります。この指標に当てはまらない球状星団はないのか? という素朴な疑問も当然出てくるでしょう。もちろん「ない」とは言えませんが、ここでわれわれが探しているのは銀河系の球状星団と同じ程度の年齢、金属量をもっていると考えると、ひとまず妥当な指標であると考えられま

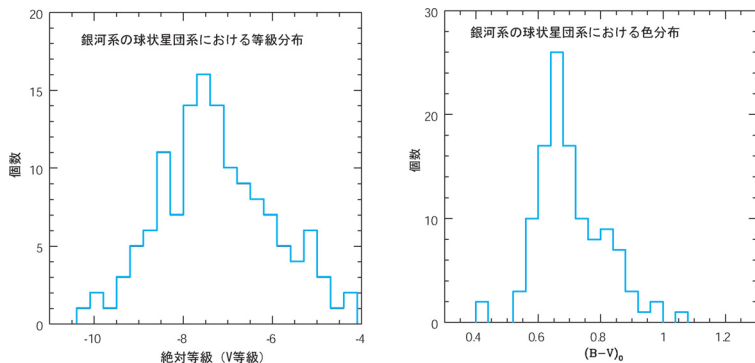


図 1 左は球状星団系の絶対等級分布 (光度関数)、右は色分布 (Harris<sup>1)</sup> をもとに作成)。どちらもある範囲をもって存在することがわかる。ちなみに色分布は銀河系内の吸収を補正している。

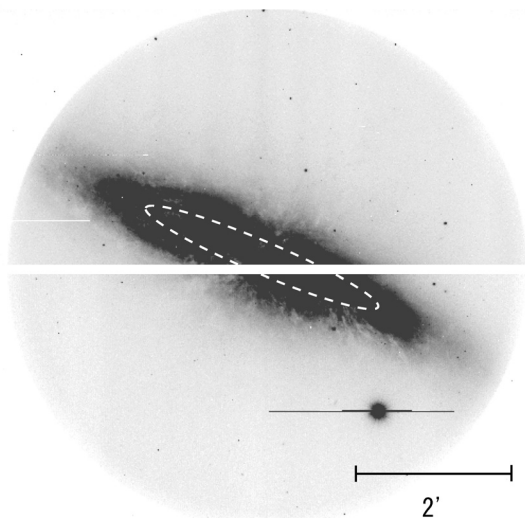


図2 FOCASによって得られた M 82 の撮像データ (V バンド). 中心の点線の楕円は M 82 自体の吸収が大きく, かつ輝度分布が一様ではないため, 候補天体の測光ができなかった領域.

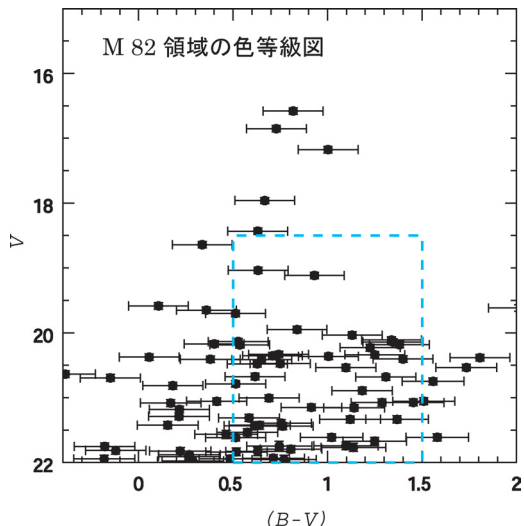


図3 M 82 周辺領域で見つかった天体の色等級図. 点線の領域内にあるのが球状星団候補の天体であることを示す. 色のエラーバーが大きいのは B バンド測光の精度が悪かったためによるものである.

す.

われわれが行った M 82 の球状星団探査で使った撮像データはすばる望遠鏡の観測装置 FOCAS (Faint Object Camera And Spectrograph: 微光天体分光撮像装置<sup>3)</sup>) のファーストライトで撮った画像を使ったものです (図 2). M 82 は距離指数  $D_M$  が  $D_M \sim 27.5$  であることと, M 82 自体の吸収<sup>4)</sup>や銀河系内の吸収<sup>5)</sup>を考慮すると, 球状星団の候補天体は  $18.0 < M_V (M 82) < 23.1$  の範囲の明るさを持ち, かつ  $0.5 < (B-V) < 1.5$  の範囲の色をもつと考えることが妥当です.

この程度の明るさの範囲であれば, すばる望遠鏡クラスの望遠鏡を使うとそれほど時間をかけずに候補天体の撮像データを得ることが可能です. しかし, ファーストライトの撮像データは標準星の質の悪さもあり, 特に B バンドで測光精度が確保できませんでした. よって (B-V) の決定で精度が悪くなっています (図 3). 試験観測期のデータであるため仕方がないという一方で, 球状星団を探さうえではそれほど深刻な問題ではありません

ん. なぜなら球状星団かどうかの決定には次で述べる分光観測に依存する部分が多いからです. ここでの撮像観測における球状星団探査の位置づけは「候補天体探し」ということになります.

もちろん本来なら質の良い撮像結果を得て, 候補天体のカタログを作成し, 撮像観測だけで意味のある結果を出すことが理想ですが, 今回は残念ながらそこまではできませんでした. また, M 82 の中心領域 (長軸 3.2 分角, 短軸 0.5 分角の楕円) は吸収も強く, 銀河自体の輝度分布が一様ではないため, 今回の探査領域には含んでいません.

### 3. 分光による確認

撮像観測で球状星団と思われる明るさと色をもった天体を同定しましたが, 先に述べたようにこれだけでは球状星団であるという決定はできません.

一つは銀河系内の星である可能性が捨てられないこと, もう一つは遠方の銀河である可能性が排除できないことが原因です. 後者の方は天体が点

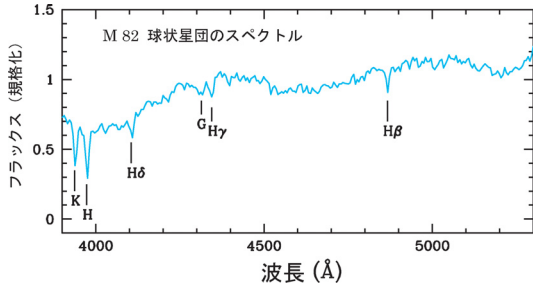


図4 球状星団のスペクトル. このスペクトルは M 82 で見つかった球状星団のものであるが, 銀河系内の球状星団も同様の特徴を示す. 縦軸のフラックスは 4,500 Å の強度で規格化したもの.

源ではなく拡がって見える天体については排除できますが, 完全ではありません. そこで, 球状星団であることの証拠を固めるために, 候補天体に対して分光観測を行います. 分光観測からはその候補天体をもつ視線方向の速度を知ることができます. また, 球状星団に特徴的な吸収線を調べることもできます. 球状星団は特に F7 型くらいの星から K2 型くらいの星と同じような吸収線の特徴をもちます. この吸収線の特徴を見るために分光観測は可視光領域で行います. 図4に M 82 で見つかった球状星団のスペクトルを示していますが, 特にカルシウムの吸収線である H, K (3,968 Å, 3,934 Å), バルマー吸収線である Hδ (4,102 Å) や Hβ (4,861 Å) などの吸収線に特徴が出ます. これがわかれば, 異なるスペクトルタイプをもつ系内の星を排除することができます.

また, 速度がわかれば, 候補天体と同じくらいの等級をもつような銀河は赤方偏移しているので, すぐに取り除くことができます. また, 球状星団探査を行っている母銀河の後退速度が大きい場合も速度の情報から銀河系内の星と区別することができます. 銀河系内の天体は後退速度が大きいものでも 300 km s<sup>-1</sup> 程度だと考えられますので, それよりも大きな後退速度をもった天体は系外の天体であると考えられるでしょう.

星との区別が一番困難なのは母銀河の後退速度が大きくない場合です. 後退速度が大きくなって, M 31 程度に近い銀河になると球状星団が点ではなく, 確実に拡がった像として観測することが可能です. しかし 1 Mpc よりも遠い銀河では天体の拡がりによる区別は容易ではなくなるのです.

本研究で行った M 82 の場合, 後退速度が 203 km s<sup>-1</sup> であり<sup>6)</sup>, さらに質量が  $\leq 4 \times 10^{10} M_{\odot}$  という質量<sup>7)</sup>を考えると M 82 の重力場にとらえられている天体の速度は 14–389 km s<sup>-1</sup> で観測されるはずですが, よって, 候補天体の後退速度だけで球状星団かどうかを決定できる天体とできない天体が存在することになります.

以上のような条件の下で M 82 近傍の候補天体の分光観測を行い, どれくらいの天体を球状星団として確認できるかを調べてみました. M 82 の球状星団候補の分光観測も FOCAS を用いました. このように多数の候補天体を一度に可視光領域で分光したいときには FOCAS の多天体分光の機能が非常に役に立ちます. この多天体分光を候補天体のうち 29 天体について実行しました. さらにその中の 18 天体については天体の判別が可能であり, 2 天体が球状星団であることを確認しました. 球状星団という証拠はまず視線速度がそれぞれ, 382 ± 22 km s<sup>-1</sup>, 275 ± 48 km s<sup>-1</sup> であり銀河系内の星であると解釈するには大きな速度であることと, 吸収線の特徴が銀河系の球状星団のそれと同様であることです. また補足的な証拠として, まず銀河系内の星の空間的分布から<sup>8)</sup>観測した領域に同じ明るさと色をもつ銀河系内の星が混在する個数を予測すると, 0.25 個となり, 星である可能性は低いということも言えます. さらにシーイングが比較的良好な状態 (0.73 ± 0.03 秒角) で得られた今回の撮像データからは球状星団の微妙な空間的拡がりも検出できます<sup>9)</sup>. ただし今回発見された球状星団の拡がりには 0.83 秒角, 0.79 秒角とあまりに微妙な違いであるので, あくまで

補足的な証拠です。最終的には大気の影響を受けない像質が得られる宇宙望遠鏡で調べるか、補償光学系を使って確実に拡がりを検出しなければならないでしょう。

#### 4. M 82 の球状星団系に関する結論

今回の観測では M 82 のハロー領域に 2 個の球状星団と思われる天体を発見しました。これでも M 82 にも球状星団が存在しそうだ、ということがわかりました。一方、銀河に付随する球状星団の個数はその母銀河の明るさ（もしくは質量）や形態に関係がある、という議論があります<sup>10)</sup>。銀河形成と球状星団形成に関係があれば、似たような明るさや形態をもつ銀河に付随する球状星団の個数はほぼ同じであろうという推測によるものです。明るさと質量が比例する場合、母銀河を形成するガス成分から球状星団も形成されると考えると、球状星団の個数は明るさに比例して多くなるでしょう。また形態については、例えば楕円銀河がガスの豊富な銀河同士の衝突によって形成された場合にはその衝突によって球状星団が形成される場合もあるはずで、同じ質量で比べた場合、楕円銀河のほうが渦巻銀河よりも付随する球状星団の個数が多くなるはずで

そのような推測に基づくと、M 82 程度の質量の場合、我々が観測した領域には 6-20 個程度の球状星団が存在するという予測ができます。この個数は今回発見された球状星団の個数を比べると、若干多い気がしますが、大きな違いがあると結論するほどの違いではないでしょう。それは一般にハロー領域の球状星団の存在比は母銀河の中心部に比べて小さく、予測値の不定性が大きいからです。球状星団の分布はその母銀河の中心付近に集中して存在しており、M 82 の場合この領域では可視光は厚いダストで吸収されてしまうので、赤外での観測が必要でしょう。そのような観測はすでに存在しており<sup>11), 12)</sup>、球状星団のような天体が多数見つかっています。「球状星団のよう

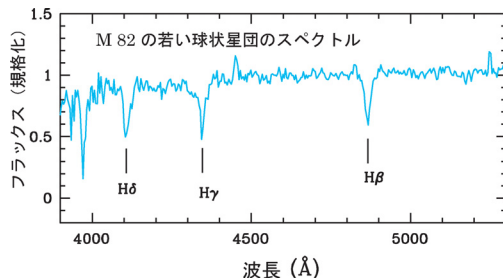


図 5 若い球状星団のスペクトル。バルマー吸収線が卓越しているのがわかる。縦軸のフラックスは 4,500 Å の強度で規格化したもの。

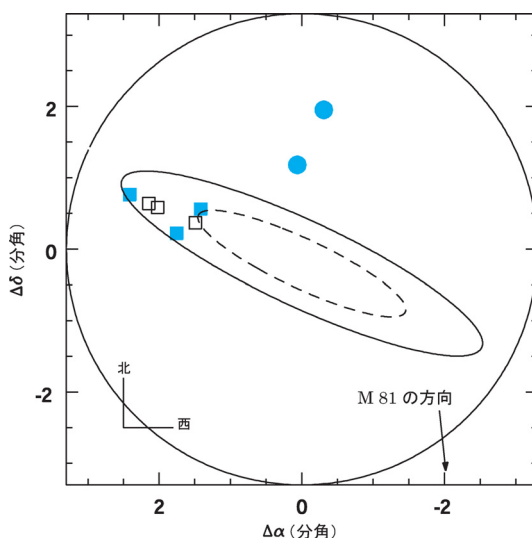


図 6 球状星団と若い球状星団の分布。丸は球状星団、四角は若い球状星団を示している。白抜きのもはおそらく若い球状星団であろうと思われる天体である。

な」と表現したのは、そこで発見された天体は銀河系の球状星団よりもはるかに若い年齢をもつ球状星団であると考えられているため、その多数の天体の中から銀河系で見られるような球状星団がどれだけ存在するかを調べるのは少々困難です。

さらに、そのような若い球状星団はわれわれの観測でも発見されています。図 5 を見ると、そのスペクトルタイプは通常の球状星団とは異なりバルマー吸収線が強いことがわかります。この若い

球状星団は特に、M 82 の本体の北東部分に集中して発見されており（図 6）、これが本当の意味での分布を意味しているのか、それとも南西部分との吸収物質の分布の違いにより、南西部分は単に可視光で見えていないだけなのかは今後調べる必要があります。ただ、M 82 の中心付近だけではなく、比較的ガス成分の希薄な場所にも多くの若い球状星団が見つかったことは、今後他の銀河を調べるうえでも興味深い結果と言えます。

### 5. 将来の展望

今回は M 82 を一つのテーマとして球状星団探索の実際と、そこから得られる結果について述べてみました。ただ、これだけ証拠をそろえてもまだ球状星団であると決定する証拠は不完全だな、と思われる読者の方もおられるかもしれません。それは全く賢明な判断でしょう。せっかく分光の情報があっても、最終的には球状星団としての姿、すなわち空間的に広がった天体であるという証拠がなければ確実に球状星団であるということとは言えません。銀河系の星が混在している確率を示すことも、微妙な空間的な広がりを検出することもあくまで補足的な証拠とだけしか言えません。実はこれこそが、円盤銀河など球状星団の個数が少ない系外銀河における球状星団探索の例が少ない理由の一つなのです。多くの楕円銀河のように付随する球状星団の個数が多ければ、撮像観測で見つけた候補天体のほとんどが球状星団であると結論でき、統計的な議論もしやすいため、楕円銀河の球状星団系については多くの観測例があります。例えば M 87<sup>(13), (14)</sup> や M 49<sup>(15)</sup>, NGC 1399<sup>(16)</sup>, などは豊富な研究結果が存在します。ですが円盤銀河では付随する球状星団の個数も少なく、統計的な議論をするためには混在している銀河系内の星と見分けることは重要な課題です。

先にも述べましたが、最もわかりやすい方法は以上のような撮像分光観測による探索に加えて、宇宙望遠鏡や地上大型望遠鏡の補償光学系を用い

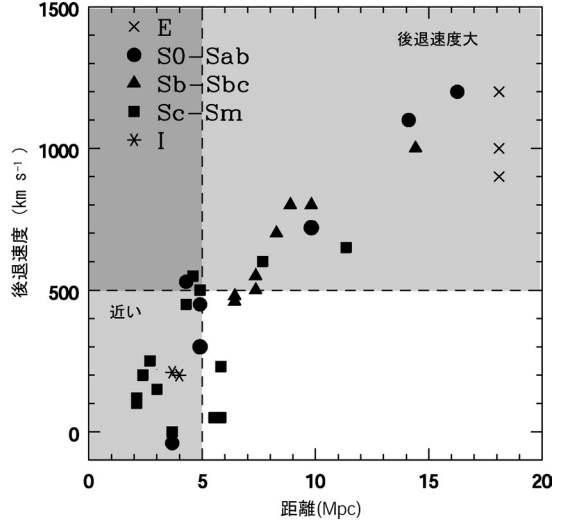


図 7 銀河系近傍に存在する円盤銀河の距離と後退速度の関係。左上の濃いグレーの領域に含まれる銀河は「像の空間的広がり」と「後退速度の大きさ」という二つの視点で球状星団を探すことが可能である。

た高空間分解撮像観測によって根気よく球状星団であることを調べていくという方法です。しかし、これには相当な時間と労力が必要であり、それに見合う成果が得られるのか、という疑問に対してはわれわれが答えていけるようにしなければいけません。

そのためには観測に対する動機づけが最も重要となります。どの観測対象にも言えることですが、当然球状星団という対象の研究そのものにはまだまだアイデアを出す余地は豊富に残されています。以前にわれわれは、われわれの銀河系と M 31 の球状星団系の運動と金属量に関する調査を行い、零次の近似では「球状星団系の回転運動と金属量の関係は、母銀河である銀河系や M 31 が収縮する過程でその回転速度を増していき、その時期に球状星団が形成されていったというシナリオに矛盾しない」ということを調べました<sup>(17)</sup>。

この結果をより発展させることで、球状星団の運動、金属量、年齢とその母銀河の形成との関係を独特な視点で調べることが可能です。これは一つ

の例ですが、観測への理解を得るためにこのような観測に対するアイデアを出し続けるのもわれわれの役目です。

最後に、筆者らが述べてきた手法で今後どれだけの円盤銀河において球状星団系の観測が可能かを示しておきましょう。図7は局所銀河群の銀河を除いた円盤銀河までの距離と視線速度の関係を示しています。距離が近い場合は空間的な拡がりを検出し球状星団であることを決定することが可能ですし、距離が十分遠くなると母銀河の後退速度が大きくなるので球状星団系の後退速度も大きくなり球状星団の検出が可能となります。その検出可能な領域を点線で分けてみましたが、後退速度が大きく、かつ空間的拡がりも検出できそうな銀河で球状星団探索を行えば、後退速度のみで球状星団であることを決定できるので、補足的な証拠である「微妙な空間的な拡がり」の検出がどれだけ妥当であるかを評価できるかもしれません。

いずれにせよこれらの銀河のうち球状星団系の観測が行われているものはせいぜい5,6の銀河に過ぎず、しかもまだどの銀河でも観測は完結していません。観測的な研究はまだこれからと言えそうです。

謝 辞

本稿の研究内容は筆者の博士論文の一部に基づいて書かれています<sup>18), 19)</sup>。長年にわたり指導していただいた家 正則先生に感謝いたします。また、FOCASの試験観測時間を使い本研究を進めることに理解していただいた、FOCASの開発メンバーの皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

1) Harris W. E., 1996, AJ 112, 1487  
2) Perelmuter J., et al., 1995, AJ 110, 620

3) Kashikawa N., et al., 2002, PASJ 54, 819  
4) Bronkalla W., Notni P., Tiersch H., 1980, Astron. Nachr., Bd. 301, 217  
5) Burstein D., Heiles C., 1984, ApJS 54, 33  
6) de Vaucouleurs G., et al., 1991, "Third Reference Catalogue of Bright Galaxies," Springer-Verlag, New York (RC3)  
7) Satyapal S., et al., 1997, ApJ 483, 148  
8) Bahcall J. N., Soneira R. M., 1980, ApJS 44, 73  
9) Blecha A., 1986, A&A 154, 321  
10) Harris W. E., 1991, ARA&A 29, 543  
11) O'Connell R. W., et al., 1995, ApJL 446, 1  
12) de Grijs R., et al., 2001, AJ 121, 768  
13) McLaughlin D. E., et al 1994, ApJ 422, 486  
14) Cohen J. G., 2000, AJ 119, 162  
15) Sharples R. M., et al., 1998, AJ 115, 2337  
16) Kissler-Patig M., et al., 1999, AJ 117, 1206  
17) Saito Y., Iye M., 2002, ApJ 573, 122  
18) Saito Y., 2002, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo  
19) Saito Y., et al., 2005, ApJ 621, 750

Imaging and Spectroscopy of Globular Cluster Candidates around M 82

Yoshihiko SAITO

National Astronomical Observatory of Japan, 650 N. A'ohoku Place, Hilo, Hawaii 96720, U.S.A.

Abstract: We carried out a search for globular clusters in M 82. Since the M 82 is an intermediate mass galaxy, its globular cluster system is a probe for comparing with globular cluster system of our Galaxy or M 31 globular cluster system. We found two bona-fide globular clusters and three young star clusters. Some of the young star clusters are likely to have been produced during the tidal interaction episode with M 81. We introduce the significance and the method of the search for globular cluster in extragalaxies in this paper.