

すばる主焦点カメラ探査による アンドロメダ恒星ハローの構造と種族



田 中 幹 人

〈東北大学大学院理学研究科 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail: mikito@astr.tohoku.ac.jp

銀河を取り巻く恒星ハローに分布する古い星たちは、銀河の成長の歴史を記憶している。それら化石情報の基本的な物理性質を調べることは、銀河形成の理解へとつながるのである。そこで筆者らは、すばる主焦点カメラを用いて、アンドロメダ恒星ハローの構造と種族を調べ、以下の2点の結果を得た。まず、アンドロメダ銀河の中心から南北 100 kpc に及ぶ広い領域において恒星ハローが滑らかに広がっていた。次に、2つの星密度が高い領域（サブ構造）を新しく発見し、同時に既知のサブ構造についても詳しい物理量を求めた。それらの結果をもとに、色等級図を手がかりにして、恒星ハローの構造と形成について今までより強い制限をつける。

1. アンドロメダ銀河の恒星ハロー

銀河を球状に取り巻く恒星ハローには、宇宙初期にできた星々が支配的になって存在している。そのような古い星は古代情報を保持しており、われわれは恒星ハローの観測を通じて銀河形成の歴史を紐解くことができる。また、現在の宇宙に存在する恒星種族を調べることによって、銀河がどのような進化を経て現在の姿形に至ったのか、その歴史を想像することができる。このような学問は“銀河考古学”と呼ばれている。

近年の観測技術や計算機の発展は、人類の恒星ハローに対する描象を飛躍的に変えてきた。つまり、より多くの、そしてより細かな情報を得ることができるようになってきたのである。その結果、宇宙初期に作られた古くて低金属量の星だけが、球状に分布するような恒星ハローではなく、それに加えてもっと金属量が高く、年齢の若い恒星も存在する複雑な構造をしていることが明らかになってきたのである。これらの新しく発見された恒星種族は一様に分布するのではなく、局所的

に集まった構造をしており、われわれ天文学者はサブ構造と呼んでいる。サブ構造ができる理由は、宇宙の階層的構造形成理論に従っており、矮小銀河や球状星団などが母銀河と衝突合体する過程において、潮汐力によって恒星が矮小銀河からはぎ取られるためである。こうして、サブ構造が存在する恒星ハローは、力学緩和が完結しておらず、今もなお形成途中であることを意味している。

恒星ハローの構造を探る研究は、特にわれわれの住む銀河系において進んでいる。近年、数々のサブ構造が発見され、銀河系の恒星ハローは形成途中であることがわかってきた。それでは、お隣のアンドロメダ銀河においてはどうかだろうか？この問い掛けは望遠鏡の発展とともに、実に自然に発想された。アンドロメダ銀河は銀河系の双子姉妹と比喻されるように、その姿形（つまりハッブル分類、明るさ、質量など）が酷似しており、アンドロメダ銀河の形成進化を理解することは、われわれの銀河系の生い立ちを理解することにつながる。また、銀河系と異なり、銀河の

全体像がとらえやすいという事実もアンドロメダ銀河を研究する動機の一つである。

今世紀に入って、Ibata ら¹⁾はアイザック・ニュートン望遠鏡によって、アンドロメダ恒星ハローに、まるでアンドロメダ銀河から流れ落ちる涙のようなサブ構造（ジャイアントサウザンストリーム）を発見した。また、Ibata ら²⁾は、カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡によって、アンドロメダ恒星ハローの別の場所にも、数個のサブ構造を発見した。これらの研究によって、アンドロメダ銀河の恒星ハローは、今も形成途中であることがわかってきたのである。一方、Brown ら³⁾はハッブル宇宙望遠鏡によって、アンドロメダ恒星ハローのサブ構造に存在する星は、古い星だけではなく、80 億歳程度のやや若い星も存在していることを明らかにした。Guhathakurta ら⁴⁾は、ケック望遠鏡によって、アンドロメダ恒星ハローは 160 kpc 以上にわたって広がっていることを発見した。これは天球上において視野直径が約 25 度（満月 50 個分）に対応し、われわれ天文学者を驚かせたのである。

2. これまでの研究の問題点

これまでの研究によって、アンドロメダ銀河の恒星ハローは予想以上に大きく広がっており、いくつかのサブ構造があることがわかった。しかし、まだ解明されていない点が多く、サブ構造の具体的な起源や恒星ハローの体系的な形成史については調べられていない。例えば、Ibata らの観測²⁾ではアンドロメダ恒星ハローの 4 分の 1 の領域を観測したのみでまだ全領域を網羅しているわけではない。さらに、観測に用いた望遠鏡の感度が低いため、サブ構造の金属量や年齢が精度良くわかっていない。一方、Brown らのハッブル宇宙望遠鏡による観測³⁾では、年齢や金属量が非常に精度良く決まるが、観測可能な領域が狭くアンドロメダ恒星ハローの全体構造を調べることは不可能である。

このような巨大なアンドロメダ恒星ハローを効果良く観測するためには、広い視野と良い感度をもつ観測装置が必要であり、世界最大級の視野と感度を誇るすばる主焦点カメラはそのような探索的観測を行うのに非常に適した観測装置である。筆者らのアンドロメダ恒星ハローの研究におけるすばる主焦点カメラの世界的な長は、次の 2 点である。まず、ハッブル宇宙望遠鏡の深さには及ばないが、圧倒的に広い視野を活かし、恒星ハロー外側の非常に表面輝度の低い領域にまでわたる範囲を撮像することで、統計量を稼ぐことができるという利点がある。もう 1 つがカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡の視野には及ばないが、それに比べて圧倒的に感度が良く、各物理量に対してさらに信頼の置ける結果が得られることである。特に、恒星ハロー広範囲に及ぶ、精度の良い金属量分布や年齢分布を調べることができるのは、すばる主焦点カメラならではの。こうして筆者らは、アンドロメダ恒星ハローのいまだかつて観測が及んでいない領域の探索と、既知のサブ構造のより詳しい理解を目指した観測を行った。

3. すばる主焦点カメラによる観測

筆者らは 2004 年から 2008 年の 8 月にかけて、すばる望遠鏡に搭載されたすばる主焦点カメラと V, I バンドパスフィルターを用いて、アンドロメダ恒星ハローの観測を地道に行ってきた。視野直径が満月 1 個分を誇るすばる主焦点カメラといえども、視野直径が満月 50 個分に及ぶアンドロメダ恒星ハローはやはり巨大で、現実的な時間内で観測可能な範囲は限られる。そこで筆者らはアンドロメダ恒星ハローで最も特徴的なサブ構造であるジャイアントサウザンストリームと、研究が活発に行われている南東短軸方向の恒星ハロー、およびそれに対照的な構造を調べるために北西短軸方向の恒星ハローに絞って観測を行うことにした（図 1 参照）。アンドロメダ恒星ハローの北西領域は観測がほとんどなされていない領域であるので

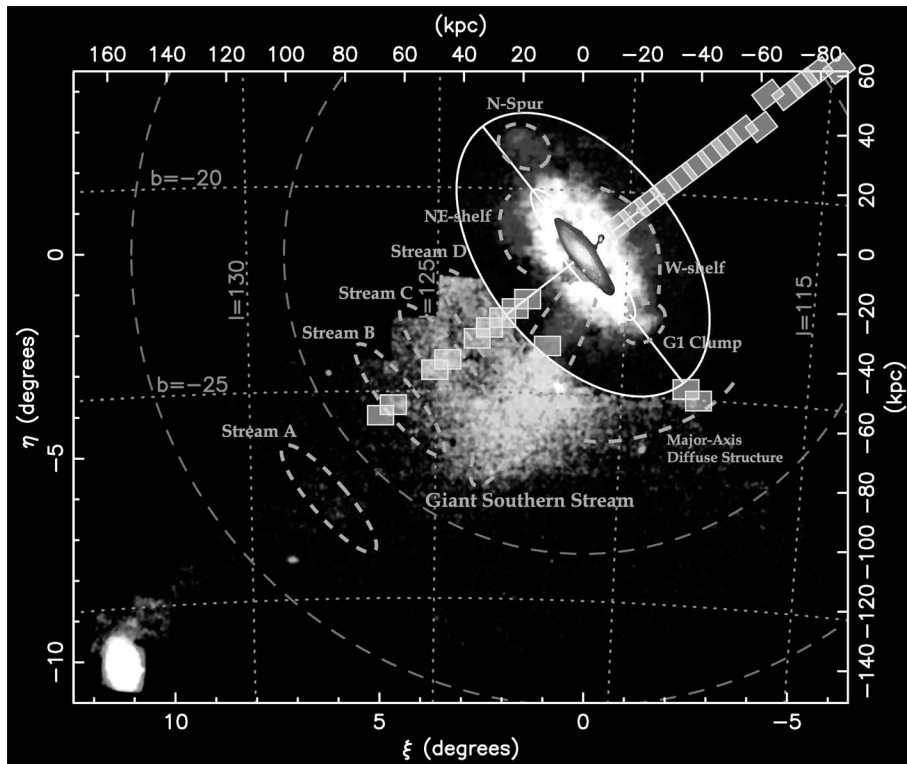


図1 Ibata ら²⁾のアンドロメダ恒星ハローの星密度地図に、筆者らが観測した領域を重ねて示した図。長方形がすばる主焦点カメラによって観測した領域。点線で示された領域は以前の研究で発見されたサブ構造。

非常に興味深い。ただし、北東長軸方向の一部の領域も観測を行った。観測は大気が安定しない日が数日あったが、幸いどの日程も晴れてデータを取得することができた。

筆者らの観測の目的は主に2つに分けられる。1つめは以前の研究と同じ領域を観測することによって、データの比較を行い、統一的手法を確立すること。2つめには、その手法を用いて、今まで観測されていたサブ構造のより詳しい物理量の導出と、今まで観測されていなかった領域のサブ構造の探査である。

4. 先行研究との比較と手法の統一

ジャイアントサウザンストリームの観測を行って先行研究と比較し、物理量を求める手法を統一した。この項で確認する物理量は3つで、距離、金属量そして年齢である。観測した領域は、アン

ドロメダ銀河の中心から約30 kpc 離れているところに位置している(図1参照)。観測から得られた色等級図(図2)は、非常に幅の広い赤色巨星分枝が特徴的である。金属量や年齢に幅がある恒星種族の場合、赤色巨星分枝は広がって見える。ただし、赤色巨星分枝の先端付近は年齢より金属量の影響によって大きく広がる性質がある。

まず、赤色巨星分枝先端法を用いて、観測したジャイアントサウザンストリームの領域までの距離を調べた。その方法は、光度関数(図3)から赤色巨星が急激に増加し始める見かけの等級を求めて、赤色巨星分枝の先端の絶対等級と比べることによって距離を算出するというものである。その結果、 883 ± 45 kpc であると求めた。これはアンドロメダ銀河までの距離としてセフィイドから求められた770 kpc を適用すると、ジャイアントサウザンストリームは本体に対して、視線方向の奥

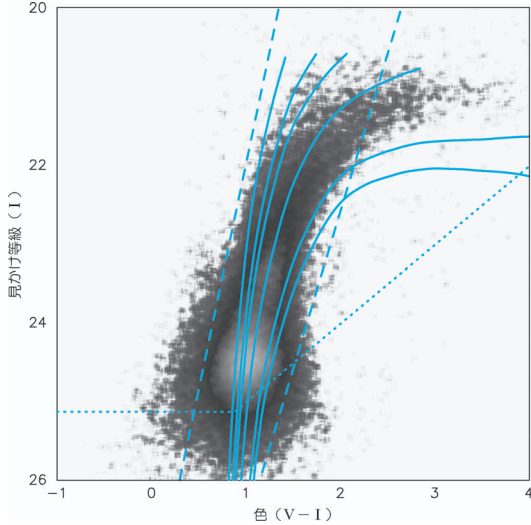


図2 ジャイアントサウザンストリームの色等級図。色が明るいほど星の密度が濃くなる。この色等級図の主な特徴は次の3点。(1) 色等級図が色方向に全体的に広がっており、幅広い金属量範囲の星が分布している。(2) Iバンド見かけ等級が約20.5等に赤色巨星分枝の先端が色等級図のエッジとして見える。(3) Iバンド見かけ等級が約23.5等と約24.5等にそれぞれ漸近巨星分枝の隆起とレッドクランプが星密度の高いピークとして見える。特徴(3)は、年老いたハローには珍しい、比較的若くて高金属量の恒星種族が含まれていることを示唆している。色等級図上の実線はVandenBerg⁹⁾が理論的に導いた星の進化曲線を示している。その進化曲線を計算するために仮定された恒星種族の年齢は120億歳で、金属量範囲は $[Fe/H]$ が-2.14, -1.41, -1.14, -0.71, -0.20, そして0.00である。点線は50%の検出限界を示す。また、斜め縦方向に走る2つのダッシュ線に挟まれた領域の星を使って、色等級図上で赤色巨星分枝の先端とレッドクランプの位置を求めた。

行き方向に広がっていることを示している。この結果はMcConnachie⁶⁾の結果と一致する。

次に、得られた色等級図と、異なる金属量をもった銀河系球状星団や星の等時曲線とを比べることによって、金属量分布(図4)を作成した。ジャイアントサウザンストリームの金属量分布は $[Fe/H]$ が-0.5を超える範囲でピークを示し、平

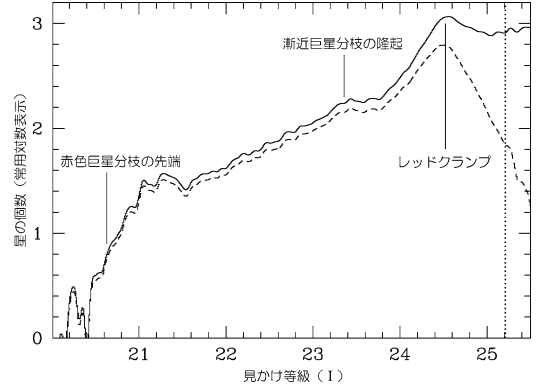


図3 Iバンド見かけ等級で表されたジャイアントサウザンストリームの光度関数。実線が減光と検出効率を補正した光度関数で、ダッシュ線がそれらを補正していない光度関数。Iバンド見かけ等級が約25.2等の縦の点線は50%の検出限界を示している。主な恒星種族の特徴は縦の実線で示されていて、Iバンド見かけ等級が約20.6等の赤色巨星分枝の先端、約23.4等の漸近巨星分枝の隆起点、そして、約24.5等のレッドクランプである。

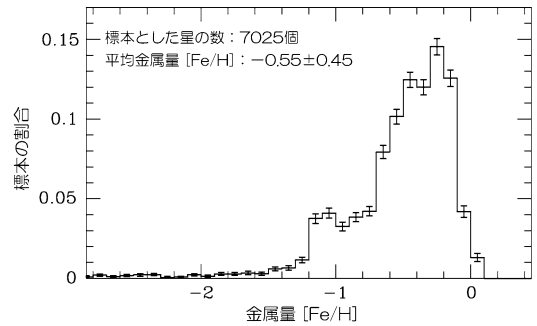


図4 ジャイアントサウザンストリームの金属量分布。金属量分布を作成するために使われた星は7,025個。平均金属量とその標準偏差は、それぞれ-0.55と0.45。

均金属量は $[Fe/H] = -0.7$ 程度であった。これは銀河系ハローに分布する星に比べて、約10倍高い金属量を示すので、ジャイアントサウザンストリームは非常に金属量が高いことがわかる。ここまで求めた2つの物理量(距離と金属量)は、従来と同様な解析を行っても同じような値となることから、本研究で用いている手法は妥当であるといえよう。

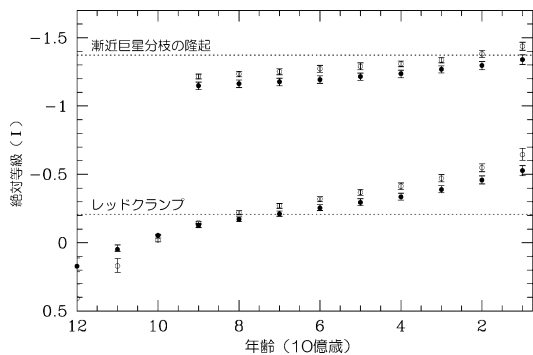


図5 理論的なモデルから予想される、漸近巨星分枝の隆起点とレッドクランプの、Iバンド絶対等級と年齢の関係図。この関係図は、Rejkubaら⁷⁾の前例を参考に、図4の金属量分布を掛け合わせて作成した。黒丸は $[\alpha/\text{Fe}] = +0.3$ と仮定して計算した関係で、白丸は $[\alpha/\text{Fe}] = 0$ と仮定して計算した関係。測定された漸近巨星分枝の隆起点とレッドクランプの絶対等級は水平な点線で示されている。また、本研究では漸近巨星分枝の隆起の年齢は、絶対等級と金属量分布に大きく左右されるので、結果に用いなかった。

最後に、Rejkubaら⁷⁾で開発された手法を用いて、従来の地上望遠鏡では検出が困難であったレッドクランプの絶対等級と金属量分布、そして星の進化曲線から、ジャイアントサウザンストリームは主に約80億歳の恒星種族で構成されていることがわかった(図5)。この結果は、今まで知られていた恒星ハローの年齢(約120億歳)よりやや若く、ハッブル宇宙望遠鏡によって、ジャイアントサウザンストリームの主系列星まで届くほどの深い長時間観測から導かれた結果と非常に一致している。つまり、そのような深い観測を長い時間をかけて行わなくても、年齢に敏感なレッドクランプを用いればより広い範囲の恒星ハローの年齢分布を効率よく導出できるのである。

ここで導出した基本的な物理量と、DekelとWoo⁸⁾によって導出された局所銀河群における矮小銀河の質量-平均金属量関係、および緩和時間を考慮すると、ジャイアントサウザンストリームは 10^7 - 10^9 太陽質量程度の比較的重い矮小銀河

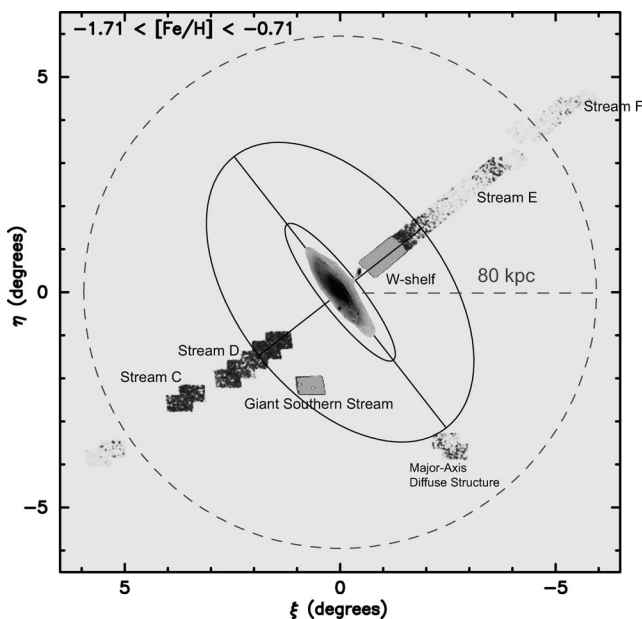


図6 金属量範囲が $-1.71 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.71$ にある赤色巨星の密度地図。今まで発見されていたサブ構造に加えて、恒星ハロー北西部の中心から投影距離にして60 kpcと100 kpcの場所に、新たに2つの密度超過を示す領域(ストリームEとストリームFと名付けた)を初めて発見した。

(例えば M32) が、最近 (数十億年以内) 降着してできた と推測できる。

5. サブ構造の探査

前項でのジャイアントサウザンストリームの解析を通して確立した手法を用いて、次に観測を行ったアンドロメダ恒星ハローの全領域に対して同じように基本物理量を求める。まず、恒星ハローの空間構造を調べるために、色等級図を手がかりにしてアンドロメダ銀河の恒星種族を選び出し、星の密度地図 (図 6) を作成した。その地図から、Ibata ら²⁾が発見した恒星ハロー南東部に存在する 2 つのサブ構造 (ストリーム C とストリーム D) を再確認するとともに、恒星ハロー北西部の中心から投影距離にして 60 kpc と 100 kpc の場所に、新たに 2 つの密度超過を示す領域 (ストリーム E とストリーム F と名付けた) を初めて発見した。同時に、それら 4 つのサブ構造に加え、すでに知られていたが詳しく調べられていなかった、北西の恒星ハロー領域に広がる貝殻構造 (ウェスタンシェルフ) と南西長軸領域に淡く拡散的に広がるサブ構造の基本的な物理量を色等級図から調べた。その結果、表面輝度がより高いサブ構造は、より金属量が高い種族で構成されていることを発見した (図 7)。それは、表面輝度がより高いサブ構造ほど、より明るく金属量の高い矮小銀河を起源とするか、または星形成を伴う最近の降着によってできたことを示唆している。

現在、約 200 kpc のビリアル半径をもつ恒星ハローにおいて、サブ構造が緩和しきっていないことを考慮すると、サブ構造の起源天体は数億年以内 (円盤形成をし終えた赤方偏移 1 以降の宇宙に相当) に降着したものに限られる。図 8 はアンドロメダ恒星ハローのサブ構造の光度関数を示している。灰色の光度関数の最小値が、本観測を含めて今までに発見されたサブ構造の光度関数で、最大値は仮に全領域まで観測したときに期待されるサブ構造の光度関数 (現在の光度関数を単純に 2

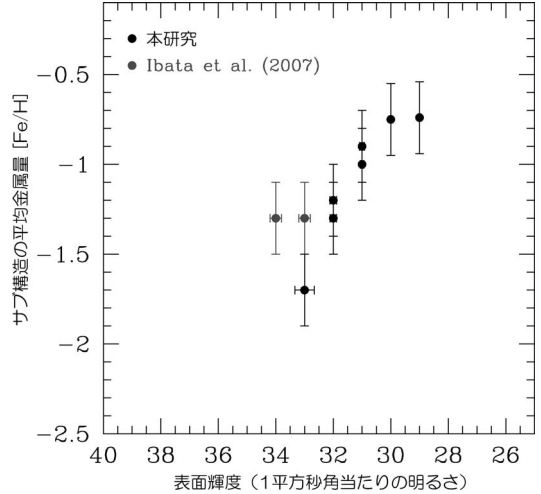


図 7 観測から測定された各サブ構造の表面輝度と平均金属量の関係。灰色の点は本研究では観測を行わなかったストリーム A とストリーム B のデータを Ibata ら²⁾の結果から引用した点。表面輝度が高いサブ構造ほど、より金属量が高い、という傾向を示唆している。

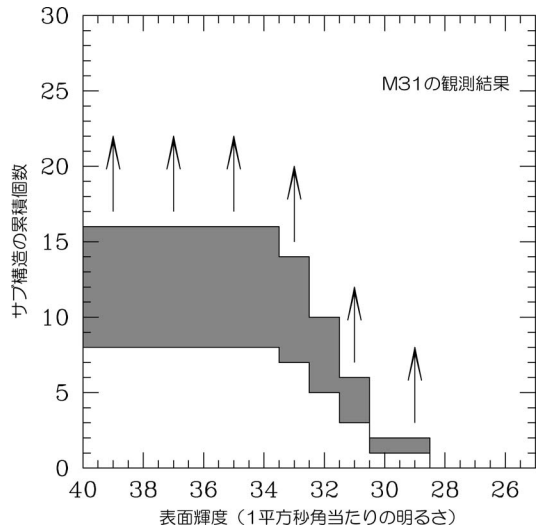


図 8 本研究と Ibata ら²⁾をもとに作成した、アンドロメダ恒星ハローのサブ構造の横軸を表面輝度とした累積分布関数。灰色の領域の底辺が現在の観測に基づく最小値を示し、上底が観測領域を全領域に拡大 (2 倍) したとき、単純に外挿して考えられる最大値を示す。

倍したものを示してある。これは Johnston ら⁹⁾の数値実験と一致し、恒星ハローの外側は矮小銀河の降着によって形成された可能性を示唆している。ただし、現在観測されたサブ構造がそれぞれ別起源であると仮定している。こうして、アンドロメダ恒星ハロー全体で見ると、約 15 個を超える 10^7 - 10^9 太陽質量程度のサブハローが、渦巻円盤を壊さないように静かに降着をし続け、恒星ハローが成長してきたことが推測される。現在のアンドロメダ銀河を取り巻く恒星ハローは、美しく輝く銀河本体に比べて何桁も低い表面輝度のサブ構造によって支配的に構成されており、この描像は冷たい暗黒物質で満ちた宇宙で予想されるシミュレーション結果を支持している¹⁰⁾。

6. 恒星ハローの構造

本研究では、サブ構造の探査と平行して、アンドロメダ恒星ハローの今まで未開拓であった北西領域の研究も行った。恒星ハローの表面輝度分布(図9)を調べたところ、これまでの数値計算からも予想されていた、恒星ハローの構造を表す約 17 kpc のスケール半径をもつ Hernquist モデルによって再現されることがわかった。恒星ハローの大きさは半径 100 kpc 以上に及び、アンドロメダ銀河の恒星ハローは北西領域でも滑らかに広がっていることがわかった。また、 $R^{-2.17 \pm 0.15}$ のべき乗則でも表されることがわかり、アンドロメダ銀河の恒星ハローは銀河系の恒星ハローとよく似た密度分布をしていることがわかった。

一方、一見滑らかに見える表面輝度の領域 (30-40 kpc) もレッドクランプの検出できた領域において年齢を調べてみると、その種族の年齢に 70-100 億年程度の幅の不均一さが見られた。これは、すばる主焦点カメラの検出限界よりもさらに暗いサブ構造が隠れている可能性を示唆しており、今後の分光観測が待たれる。さらに、恒星ハローの平均金属量も半径方向に不均一であることを発見した(図10)。南東短軸方向を調べると、平均金属

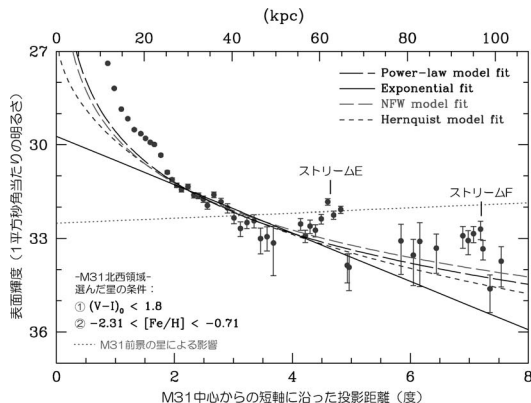


図9 アンドロメダ恒星ハローの北西短軸方向に沿った表面輝度分布。ハローの構造を表す4つの関数を照らし合わせてみたところ、恒星ハローの大きさは半径 100 kpc 以上に及び、アンドロメダ恒星ハローは先行研究のあった南東領域に加え、北西領域でも滑らかに広がっていることがわかった。そして、滑らかなハロー成分に比べて、ストリーム E と F が存在する領域は明らかに表面輝度が高いことがわかる。

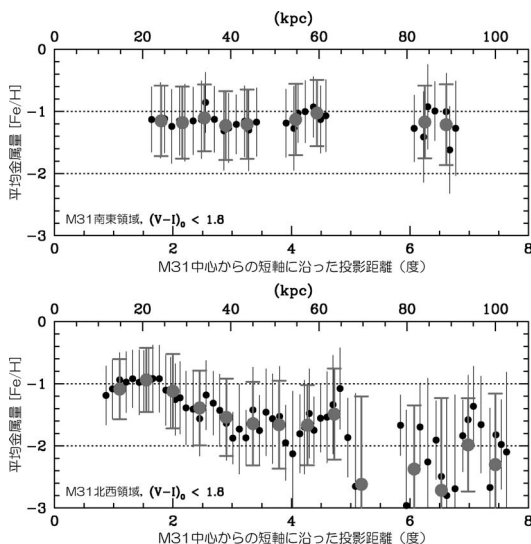


図10 アンドロメダ恒星ハロー南東(上)と北西(下)の短軸方向に沿った平均金属量の変化。大きな灰色丸がすばる主焦点カメラ1視野内の平均値で、小さい黒丸が1視野を4分割したときの各サブ領域内での平均値。南東部は平均金属量が場所によって一定であるのに対して、北西部はアンドロメダ銀河の中心から離れるにつれて金属量が低くなっていく。

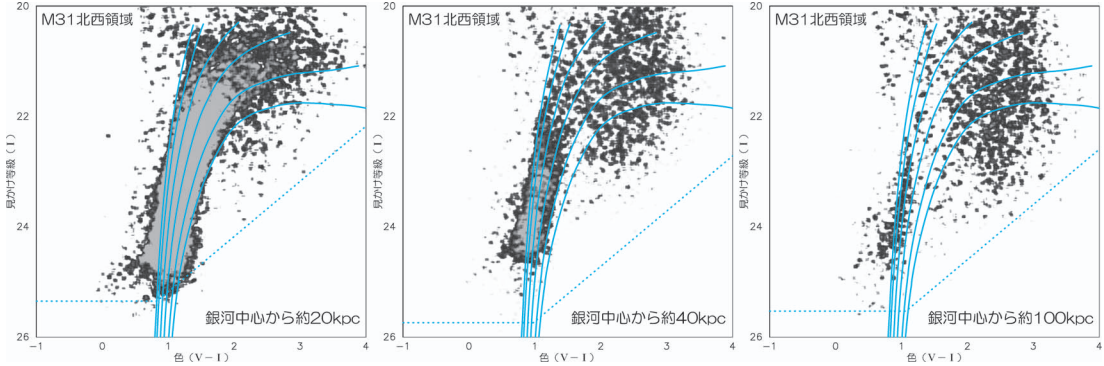


図 11 アンドロメダ恒星ハローの北西短軸方向に沿った色等級図. 重ねて表示された星の進化曲線および 50% 検出限界を表す点線は図 2 と同様. これらの色等級図から外側の恒星ハローでは, 高金属量の赤色巨星分枝が消えていく様子が確認でき, 北西短軸方向の恒星ハローは中心から離れるにつれて平均金属量が低くなっていくことがわかる.

量が半径によって一定であるのに対し, 北西短軸方向の恒星ハローでは中心から離れるにつれて平均金属量が低くなっている. この傾向は, 図 11 に示した色等級図を見るとよくわかり, 外側の恒星ハロー領域では高金属量の赤色巨星分枝が消えていく様子が確認できる. 今後, さらに数億年以上経過すると, 恒星ハローは力学緩和が進み, 冷たい暗黒物質宇宙で予想されるような平たい金属量勾配で表される平衡状態へ達すると考えられ, 本研究で調べた金属量の空間分布は, アンドロメダ銀河の恒星ハローが化学・力学進化をまさに現在行っている様子を反映しているのであろう.

7. 結論と今後

本研究では, アンドロメダ恒星ハローの金属量, 年齢, そして空間構造を詳しく調べることによって, 恒星ハローの全体構造, およびサブ構造という 2 点について今までより厳しい制限が得られた. まず恒星ハローの全体構造に関して, 今回初めて観測を行ったアンドロメダ恒星ハローの北西領域において, 南東部と同じように 100 kpc 以上にわたって恒星ハローが滑らかに広がっていることがわかった. また, 南東部と北西部において平均金属量が不均一な性質が見られ, アンドロメダ銀河の恒星ハローが化学・力学進化の途中であ

ることが示唆された. 次に, 恒星ハローの外側は最近の矮小銀河の降着合体の痕跡を示唆するサブ構造が豊富に存在していることがわかった. 恒星種族はそれぞれのサブ構造で異なっていたので, 仮に起源もすべて異なるとした場合, アンドロメダ銀河の外側の恒星ハローは約 100 億年以内に約 10 個以上の 10^7 太陽質量より重い矮小銀河の降着によって形成された, と推測することができる. ただし観測事実に基づく示唆であるので, 降着してきた矮小銀河の個数は断言できない. それを理解するためには, 今後の理論計算が待たれる.

アンドロメダ恒星ハローは図 1 でも見たように, 非常に大きく広がっている. このため観測効率を上げるためには, より視野が広い観測装置が必要である. 現在開発が進められているすばる望遠鏡の 2 つの広視野観測装置は, 視野直径が 1.5 分角と非常に大きく, アンドロメダ恒星ハローの探査に飛躍的進歩をもたらすことは間違いない. 1 つは撮像装置で **Hyper Suprime-Cam** と呼ばれ, もう 1 つは分光装置で **WFOS** (仮称) と呼ばれる. 例えば, アンドロメダ恒星ハローの明るい赤色巨星を観測する場合, まず **Hyper Suprime-Cam** を使って候補天体を選ぶ, そして, **WFOS** で片っ端から分光観測し, 視線速度や金属量の情報

を得ると、恒星ハロー全体を体系的に調べることができる。その結果、すべての明るい赤色巨星の視線速度や金属量のマッピングができれば、表面輝度の低いサブ構造も検出することができ、サブ構造の軌道要素や質量もわかるので、恒星ハローの形成史についてさらに強固な制限をつけることができる。よって一日でも早い Hyper Suprime-Cam と WFMOS の完成を期待したい。

謝 辞

本稿は筆者の博士論文を要約したものです。博士論文を完成させるにあたり、たくさんの方にお世話になりました。中でも特に熱心な指導をしてくださった、千葉征司教授、小宮山裕さん、また本研究の機会を与えてくださった家正則教授にまずお礼申し上げます。そして、CFHT と Keck のデータの提供および解析の助言をしていただいた、UCSC の Raja Guhathakurta 教授、STScI の Jason Kalirai さんに御礼申し上げます。最後に本稿の執筆の機会を与えてくださった柏川伸成准教授に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Ibata R., et al., 2001, Nature 412, 49
- 2) Ibata R., et al., 2007, ApJ 671, 1591
- 3) Brown T., et al., 2006, ApJ 652, 323
- 4) Guhathakurta P., et al., 2005, astro-ph/0502366
- 5) VandenBerg D. A., et al., 2006, ApJS 162, 375

- 6) McConnachie, A., et al., 2003, MNRAS 343, 1335
- 7) Rejkuba M., et al., 2005, ApJ 631, 262
- 8) Dekel A., & Woo J. 2003, MNRAS 344, 1131
- 9) Johnston K., et al., 2008, ApJ 689, 936
- 10) Bullock J., Johnston K., 2005, ApJ 635, 931

Structure and Population of the Andromeda Stellar Halo from a Subaru/Suprime-Cam Survey

Mikito TANAKA

Astronomical Institute, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: Old stars widely distributed in a stellar halo around a galaxy remember the formation history of the host galaxy. The physical properties of these fossil records are clue to understanding the galaxy formation. We investigate the structure and population of the stellar halo of the Andromeda galaxy using Subaru/Suprime-Cam. Firstly, we find the widespread smooth halo reaching out over 100 kpc along the north-west minor axis. Secondly, we estimate the physical properties of the known substructures as well as the two newly-discovered ones. Based on these results, we discuss the structure and formation of the stellar halo using color-magnitude diagrams.