

# 論文内容の要旨

## STRUCTURE AND POPULATION OF THE ANDROMEDA STELLAR HALO FROM A SUBARU/SUPRIME-CAM SURVEY

(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)

氏名 田中 幹人

すばる主焦点カメラによって、アンドロメダ恒星ハローの広域探査を行い、場所によってハローに分布する恒星種族の表面輝度、金属量そして年齢などの基本的な物理量がどのように異なるかを議論する。

近年の観測技術や計算機の発展は人類のハローに対する描象を飛躍的に変えてきた。つまり、宇宙初期に作られた古くて低金属量の星だけが、単に一枚岩のように分布するようなハローではなく、今もなお形成途中にあって、その一枚岩のようなハローに重なって、異なる密度、金属量そして年齢を持つ恒星種族が、複雑に絡み合ったような構造をしているという描像が、最近明らかになってきたのである。この複雑な構造一つ一つをサブ構造と呼んでいる。ハロー構造を探る研究は、特に我々の住む銀河系において進んでおり、また数値計算による理論的予測も進み、我々は現在の宇宙にある恒星種族を調べることによって、その銀河がどのような進化を経て現在の姿形に至ったのかを想像することができるようになった。このような学問は“銀河考古学”と呼ばれ、近年注目され始めている。

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、実に自然な発想である。アンドロメダ銀河は銀河系の双子姉妹と比喩されるように、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、我々の銀河系の生い立ちを理解することに繋がるのである。また、銀河系と異なり、銀河の全体像が捉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(2001)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から流れ落ちる涙の様なサブ構造は発見した。また、Ibataら(2007)は、カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡によって、さらに外側のアンドロメダ恒星ハローにも、数個のサブ構造を発見した。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にもいくつかのサブ構造があることが分かったが、アンドロメダ恒星ハローの全領域を網羅しているわけではなく、またそれら一つ一つの種族構成も完全に明らかになったとは言えない。Guhathakurtaら(2005)は、ケック望

遠鏡によって、アンドロメダ恒星ハローは 160kpc 以上に渡って広がっていることを発見したが、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、このような巨大なアンドロメダ恒星ハローを観測するためには広い視野が必要であり、世界最大級の視野を誇るすばる主焦点カメラはそのような探査的観測を行うのに非常に適した観測装置である。アンドロメダ恒星ハローの研究に対するすばる主焦点カメラの世界的な位置づけは、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、ハロー外側の非常に表面輝度の低い領域も広い範囲を撮像することで、統計量を稼ぐことが出来る利点がある。一方、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。特に、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出来たのは、すばる主焦点カメラの個性を活かした結果である。こうして、我々はアンドロメダ恒星ハローの未だかつて観測が及んでいない領域の探査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。

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、アンドロメダの涙の観測を行ったところ次の結果を得た。ここで、本研究で観測した涙領域は、アンドロメダ銀河中心から約 30kpc 離れていることに注意しておく (図 1 参照)。その領域の観測から得られた色等級図は、非常に幅の広い赤色巨星分枝が特徴的で、ちょうど図 1 の上段一番左の色等級図に似ている。赤色巨星分枝先端法を用いて、その涙領域までの距離が  $883 \pm 45\text{kpc}$  であることを確認した。これはアンドロメダ銀河までの距離としてセファイドから求められた  $770\text{kpc}$  を適用すると、アンドロメダの涙は本体に対して、視線方向で奥行き方向に広がっていることを示している。次に、得られた色等級図と、異なる金属量を持った銀河系球状星団や星の等時曲線を比べることによって、金属量分布を作成した。アンドロメダの涙の金属量分布は  $[\text{Fe}/\text{H}]$  が  $-0.5$  を超える範囲でピークを示し、平均金属量は  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.7$  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 倍高い金属量を示し、アンドロメダの涙は非常に金属量が高いことがわかる。ここまで求めた 2 つの距離と金属量の 2 つの物理量はこれまでの研究と同じような解析を行うことによって同じような解析結果を得て、本研究で用いている手法は妥当であることを示している。一步進んで、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 Rejkuba ら (2005) で開発されたその 2 つと星の進化曲線をたまたみ込む手法によって、アンドロメダの涙は主に約 80 億歳というやや若い星の種族で構成されていることが分かった。この結果は、ハッブル宇宙望遠鏡によって、アンドロメダの涙の主系列星まで届くほどの深い観測から導かれた結果と非常に良く一致している。つまり、その様な深い観測を時間をかけて行うことなく、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ハローの年齢分布を効率よく導出できるということが本研究の主張の一つでもある。また、ここで導出した基本的な物理量と、Dekel と Woo (2003) 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、アンドロメダの涙は  $10^7$ - $10^9$  太陽質量程度の比較的重い矮小銀河 (例えば M32) が、最近 (数 10 億年以内) 降着してできた可能性が高い、ということをつけ加えておく。

そして、ここまでのアンドロメダの涙の解析を通して確立してきた手法を用いて、今度は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、ハローの空間構造を調べるために、色等級図を手掛かりにしてアンドロメダ銀河の恒星種族を選び出し、その密度地図 (図 1) を作成した。その地図から、Ibata ら (2007) が発見したハロー南東部に存在する 2 つのサブ構造を再確認するとともに、ハロー北西部の中心から投影距離にして 60kpc と 100kpc の場所に、新たに 2 つの密度超過を示す領域を初めて発見した。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、北西の内側ハロー領域に広がる貝殻構造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。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にし、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。このとき、約 200kpc のビリアル半径を持つハローにおいて、現在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の降着に限られる。また、アンドロメダ恒星ハロー全体で見ると、円盤形成をし終えた赤方偏移 1 以降の宇宙で、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、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。

このような複雑なサブ構造に隠れて、半径 100kpc 以上に渡って、ハローがなめらかに広がっている。この成分の表面輝度分布を調べたところ、これまでの数値計算からも予想されていた、約 17kpc のスケール半径を持つ Hernquist モデルによって表されることが分かった。また、 $R^{-2.17 \pm 0.15}$  のべき乗則でも表されることが分かり、アンドロメダ銀河のハローは銀河系の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、一見なめらかに見える表面輝度の領域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 億年程度の均一ではない構造が見られた。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、ハローの平均金属量も半径方向によって不均一であることを発見した。南東短軸方向を調べてみると、平均金属量が半径によって一定であるのに対し、北西短軸方向の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 1 に示した色等級図において、外側のハロー部において高金属量の赤色巨星分枝が消えている様子からも確認できる。今後、さらに数億年以上経過すると、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ハローは達すると考えられ、本論文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。

こうして、初期の宇宙においてバルジや円盤の形成とともに大部分の質量を獲得してきた銀河が、その後時間をかけていくつもの矮小銀河を取り込み成長し、銀河の外縁部にサブ構造として身にまとう様子は、まるで幼少期に言語など大量の知識を獲得し、思春期の記憶を今でも身にまといながら成長を続ける一人の人間の成長を思い起こさせる。この宇宙における生きとし生けるものは、その規模にかかわらず、もしかすると同じような成長過程を経験しているのかもしれない。

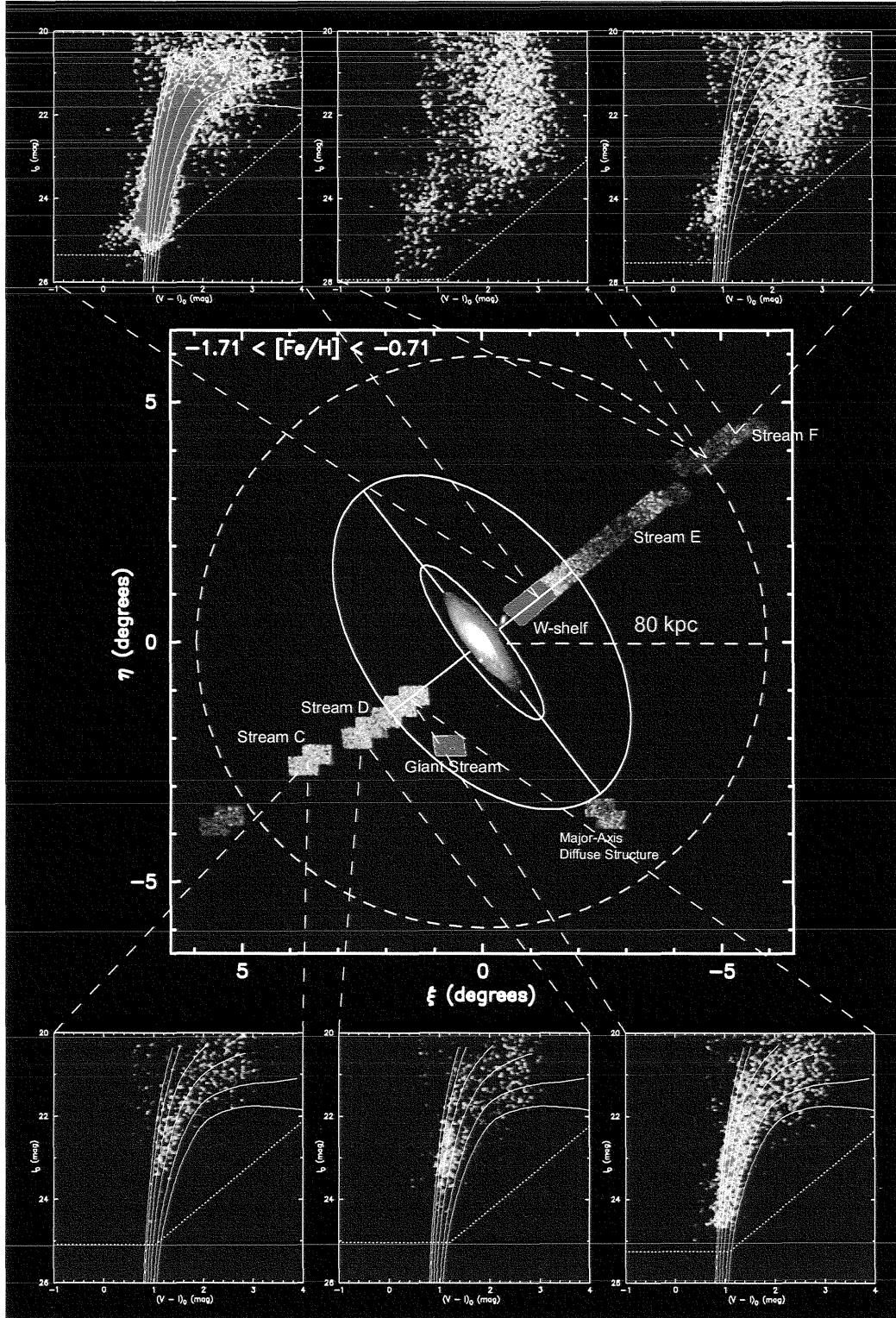


図 1: アンドロメダ恒星ハローの星密度地図と特徴的な領域の色等級図. 星密度地図には色等級図上で金属量範囲が  $-1.71 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.71$  にある星の個数密度が表示されてある. 赤いほど個数密度が高いことを示しており, その関係は色等級図においても同じように示してある. 色等級図に描かれた等時曲線は左から順に  $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.31, -1.71, -1.14, -0.70, -0.30$  そして  $0.00$  を示している.