

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月5日現在

機関番号：62616
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23740162
 研究課題名（和文） 球状星団の化学元素組成に基づく宇宙初期の銀河系形成過程の解明
 研究課題名（英文） Chemodynamical evolution of the Milky Way Galaxy
 as probed by chemical abundances of globular clusters
 研究代表者
 石垣 美歩（ISHIGAKI N. MIHO）
 国立天文台・ハワイ観測所 研究員
 研究者番号：30583611

研究成果の概要（和文）：銀河系の中でも古い成分である恒星系ハローは、おもに金属欠乏星や球状星団からなりたっており、銀河系形成過程の貴重な手がかりとして注目されている。本研究では、恒星系ハローに付随する金属欠乏星および球状星団の化学組成の分光観測にもとづく調査の一環として、①太陽近傍金属欠乏星の化学元素組成と銀河系厚い円盤構造、内部・外部ハロー構造との関係、②潮汐破壊している球状星団Palomar 5の中分散分光観測による視線速度および金属量測定に取り組んだ。

研究成果の概要（英文）：Metal-poor stars and globular clusters are main constituents of the old Milky Way components, the stellar halo. Detailed chemical abundances and kinematics of these objects provide us important insights into the early chemodynamical evolution of our Galaxy. In this study, we studied 1) chemical abundances of metal-poor stars in the solar neighborhood and its correlation with the structure of the thick disk, the inner and outer stellar halos and 2) radial velocity and metallicity measurements of a tidally disrupting Galactic globular cluster Palomar 5.

交付決定額 (金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：天文、銀河系、球状星団、恒星

1. 研究開始当初の背景

銀河系恒星系ハローは、主にヘリウムより重い元素の組成が低い金属欠乏星や、古い星が密に集まった構造である球状星団から成る古い構造成分である。ハローに付随する金属欠乏星および球状星団は、銀河系がではじめて間もないころに誕生したと考えられており、銀河系形成の化石情報を今に伝える手がかりとして注目されている。近年この恒星系ハローのこれまでより広範囲を網羅する測光・分光観測が行われ、恒星系ハローが複雑な副構造を含んでいることが明らかになってきた。

このような副構造をもつハローそして銀河系全体はどのようにして形成されてきたのだろうか。恒星系ハローの形成過程に対する重要な制限として、恒星の化学元素組成が有用であることが、多くの観測から明らかになってきた。というのも恒星表面大気の化学組成は、その星の原料となったガスの組成をほぼ保存していると考えられるためである。

従って古い年齢をもつ金属欠乏星や球状星団の化学組成を調べれば、銀河系ハローの形成過程について、重要な制限が得られると考えられる。しかし先行研究では、星や星団の軌道運動による分類がされておらず、サンプル数も限られていたため、個々の天体の化学組成から銀河系の形成過程を推測するのが困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、恒星系ハローを含む銀河系の古い構成成分の形成過程に対して、金属欠乏星および球状星団の系統的な化学元素組成解析から制限を得ることを目的とした。当初は球状星団の星々を主なターゲットとした高分散分光を実施する計画であったが、球状星団に付随する星々の多くが暗く、新たに化学組成を導出できるほど精度のよいデータを取得するのが困難であった。そこで対象を球状星団だけでなく、同じくハローの主要な構成成分である金属欠乏星にも広げ、以下の二つの課題に取り組んだ。

- (1) これまでに取り組んできた太陽近傍の金属欠乏星の化学組成解析を拡張し、銀河系の厚い円盤、内部ハロー、外部ハローに付随する金属欠乏星について、高分散分光観測にもとづく化学組成解析を行い、系統的な化学組成の違いがあるかどうか明らかにする。また化学組成の類似点や相違点を化学進化の理論モデルと比較し、各構成成分での星形成史に制限をつける。
- (2) 恒星系ハローに付随する球状星団のうち、銀河系の潮汐力を受けてきた恒星ストリームをもつPalomar 5について、化学組成と視線速度の調査を行う。恒星ストリームは、銀河系の重力ポテンシャルの形状を制限するうえで重要なトレーサーとなる。視線速度によってストリームに所属している星を背景のハロー星から分離し、ストリームの化学・力学構造を調べ、銀河系ハローの重力ポテンシャルを制限する。また同定した星団およびストリームに所属する星々に対して、高分散分光観測を行い、詳しい化学元素組成を測定することで、星団の起源についての手がかりを得る。

3. 研究の方法

(1) 金属欠乏星の化学組成解析

サンプル星については、星の位置、太陽からの距離、固有運動、視線速度などがすでに測定されており、そこからそれぞれの星について銀河系中心をまわる軌道運動が計算されている。軌道運動の特徴から、その星が厚い円盤、内部ハロー、外部ハローのどの構成成分に所属している可能性があるか、分類する。分類した厚い円盤星、内部ハロー星、外部ハロー星について、すばる望遠鏡

(ハワイ島マウナケア山)に搭載されている高分散分光器(HDS)で取得された高分散分光データの解析を行い、吸収線強度などから化学組成を導出する(分光データの例を図1に示す)。注目すべき元素としては、重い星の最期であるII型超新星爆発で多く放出されるとされているマグネシウム、シリコンなどの α 元素、超新星爆発の際の爆発的な元素合成で多くが合成されるマンガン、ニッケル、鉄などの鉄ピーク元素、種となる鉄原子核などが中性子を捕獲してできるバリウム、ユーロピウムなどの中性子捕獲元素などがある。

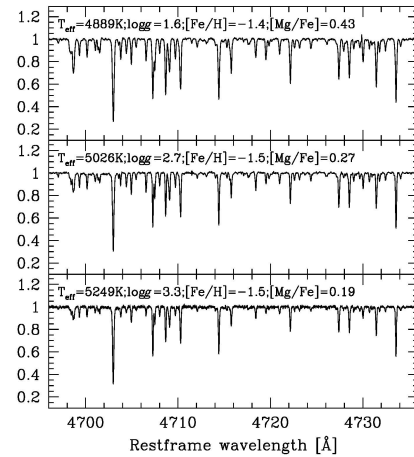


図1：すばる望遠鏡HDSで取得された高分散分光データの例。左上に示してある有効温度、表面重力、元素組成などによって吸収線の強度に違いがあらわれる。

こうした元素の鉄との組成比を求め、各構成成分に所属している星々のあいだで、系統的な組成比の違いが見られるかどうか評価する。

(2) 球状星団Palomar 5の化学力学構造 Palomar 5とそれに付随する恒星ストリームの化学組成と力学構造を調べるために、まず星団とストリームに所属している星を背景の星と区別する必要がある。そのために候補になる星にたいして、中分散分光観測を行い、太陽からみた視線速度が -57 キロメートル毎秒に近い値をもつ星々を選びだす。観測は前述のすばる望遠鏡に搭載されている微光分光装置(FOCAS)を用いた。観測したストリームの領域を図2に示す。

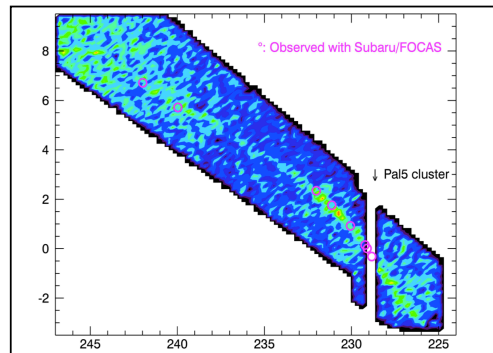


図2：球状星団Palomar5に付随する恒星ストリームの星密度分布(ストリームを見やすくするために、星団自体はマスクしてある)。すばる望遠鏡FOCASで中分散分光を実施した領域も丸印で示す。

4. 研究成果

(1) 銀河系ハロー金属欠乏星の化学組成解析に使用した太陽近傍の金属欠乏星について、3次元速度成分を図3に示す。これらの星々は銀河系のまわりの軌道運動によって特徴づけられる、厚い円盤、内部ハロー、外部ハローの各成分に分類される。これらの軌道運動の特徴によって分類したグループごとに、系統的な化学元素組成の違いが見られるかどうか、さまざまな元素を使って調べた。

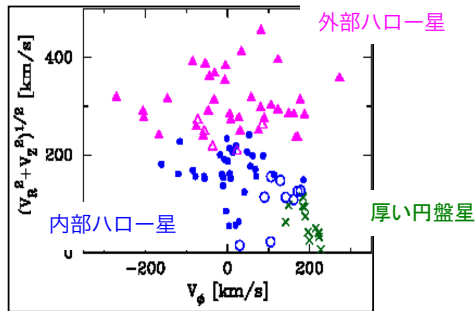


図3：サンプル星の銀河系内の運動速度。横軸に銀河系まわりの回転速度 (V_{ϕ})、縦軸に動径方向と鉛直方向の速度成分 (V_R , V_z) を合成したものをプロットしている。

結果の一部を図4に示す。解析の結果、厚い円盤、内部ハロー、外部ハローのあいだに、マグネシウム、シリコンなど α 元素と呼ばれる元素の組成で違いがみられることが分かった。例えばマグネシウムの組成比では、金属量 $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.5$ で、厚い円盤で高く、内部ハロー・外部ハローでは平均的に低くなっている。マグネシウムを含む α 元素は、重い星が死ぬときに起こすII型超新星爆発によって多くが放出されると考えられている。一方鉄は、II型に加えて低質量星の連星系が最期に起こすIa型超新星でも多く作られる。運動の特徴ごとに分類したグループ間で、 α 元素と鉄の組成比が違うということは、異なるグループ間でII型とIa型の超新星爆発の元素合成への相対的な寄与が異なっていたことを示している。つまり、厚い円盤星は星形成の高い状況下で作られたために、連星系進化の分だけ遅れて元素汚染が始まる鉄の寄与が低い結果、マグネシウムと鉄の組成比が高いと解釈できる。それとは逆に、内部ハローや外部ハローでは、星形成率が低い状況下で星が作られたために、遅れて元素汚染が始まる鉄の寄与が相対的に高くなって、組成比が低くなるのが、銀河の化学進化モデルからは示唆される。また α 元素以外にも、ナトリウム、亜鉛、ユーロピウムなどの組成比で、厚い円盤、内部ハロー、外部ハロー間で組成の違いが見られた。3つのグループの星々それぞれの形成シナリオは、観測されたすべての組成比を矛盾無く説明できるものでなくてはならない。少なくとも本研究では、これらの銀河系の古い成分が同じ星形成ガスから一気に形成されたのではなく、異なるメカニズムでできたという他の観測からの示唆を裏付ける結果が得られた。

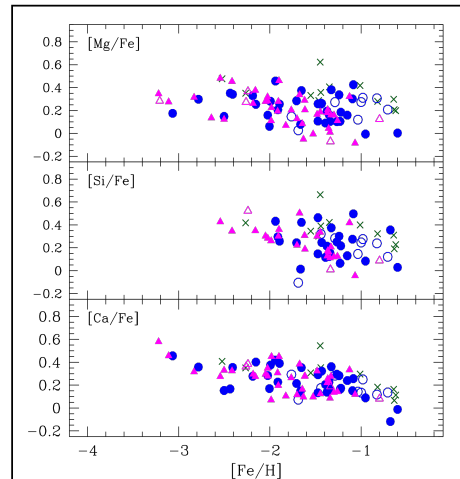


図4：上からマグネシウム、シリコン、カルシウムの鉄に対する組成比を金属量に対してプロットしたもの。異なる運動の特徴をもつグループ(厚い円盤：×、内部ハロー：●、外部ハロー：▲)ごとに異なる化学組成比の分布を示している。

(2) 球状星団Palomar5の化学力学解析すばる望遠鏡での観測により、図2に示した各領域で、星団とストリームに所属している星の候補について中分散分光データを取得した。データから導出したスペクトルの例を図5に示す。スペクトルのなかで一番強いカルシウムの吸収線を用いて視線速度を測定した。その結果、星団中心部については、視線速度から星団本体に所属している可能性の高い星をいくつか同定することができた。しかし星団本体から離れたストリームの領域では、もともと星団に属している星かどうか判別するのが難しかった。より高い精度でこの判別を行うために、2013年5月にKeck望遠鏡でのつい観測を実施し、現在取得したデータの解析途中である。

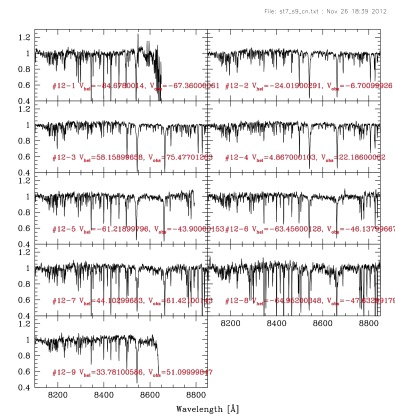


図5：すばる望遠鏡FOCASで取得された中分散分光データと視線速度の測定結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

①M. N. Ishigaki, M. Chiba, W. Aoki,
"Chemical abundances of the Milky Way
thick disk and stellar halo I.
Implications of [alpha/Fe] for star
formation histories in their
progenitors", *Astrophysical Journal*,
査読有, 753巻, 2012年, 64-82頁, DoI:
10.1088/0004-637X/753/1/64

[学会発表] (計2件)

①M. N. Ishigaki, "Chemical
differences and similarities among
the kinematically selected thick
disk, inner halo and outer halo
stars", IAU Symposium No. 298,
Setting the Scene for GAIA and
LAMOST, 2013/5/20-24, Lijiang (China)
②M. N. Ishigaki, "Radial velocity
measurements of the Palomar 5 tidal
tails with Subaru/FOCAS", Subaru
Users meeting, 2013/1/15-17, 国立天文
台 (三鷹市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石垣 美歩 (ISHIGAKI N. MIHO)

国立天文台・ハワイ観測所・研究員

研究者番号: 3 0 5 8 3 6 1 1