

# 円盤星の化学元素分布から紐解く 銀河系恒星円盤の形成史



豊内大輔

〈京都大学大学院理学研究科天体核研究室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: toyouchi@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp

円盤銀河に対して衛星銀河が降着すると、円盤が力学的に加熱され、急激な円盤面動径方向に沿った星の移動（radial migration）が起こる場合がある。私は自身で開発した銀河円盤化学進化モデルを用いてそのような不連続的な radial migration イベントが起きた場合に円盤の構造進化や化学進化にどのような影響があるか調べた。その結果、急速かつ大規模な radial migration が円盤内で起きた場合、円盤内側にある星が密度が低い円盤外側に一気に移動し、そこで超新星爆発を起こすことによって、銀河円盤内での重元素の分布を大きく変化させることがわかった。さらにはこの効果が鍵となり、これまで全く再現できなかった円盤星の  $[\alpha/\text{Fe}]$ - $[\text{Fe}/\text{H}]$  図上での双峰的（bimodal）な分布が、今回のモデル計算では非常によく再現できることが明らかになった。この結果は銀河系が過去に不連続的な radial migration を引き起こすような衛星銀河の降着を経験している可能性があることを示唆している。

## 1. はじめに

夏の夜空を横切る淡い光の帯、日本では天の川と呼ばれるそれは古代から現代に至るまでわれわれ人類を魅了してきた。18世紀にウィリアム・ハーシェルによって初めて天球面上の恒星の分布が調べられてからおよそ300年経った現在、われわれは天の川の正体が円盤状に分布した約1,000億もの恒星（以後、円盤星と呼ぶ）の集まりである銀河系を真横から見た姿であることを知っている。宇宙に存在する多種多様な銀河の中で、銀河系のように巨大な恒星円盤構造をもつ銀河は円盤銀河と呼ばれる。スローン・デジタル・スカイ・サーベイ（Sloan Digital Sky Survey; SDSS）のデータを用いた銀河の形態調査によれば、円盤銀河は現在の宇宙において銀河全体の7割以上を占める代表的な銀河種族であることが知られており<sup>1)</sup>、その形成過程を解明することは現代天文学

における重要課題の一つである。そして、円盤銀河形成を検証する手段として非常に重要なのが銀河系を舞台とした銀河考古学的研究だ。

現状において銀河系は恒星一つひとつを分離して観測し、その恒星系の性質に基づいて形成・進化の過程を追跡することのできる唯一の円盤銀河と言える。これまでの観測から銀河系円盤には年齢が10 Gyr以上の古い星から年齢が1 Gyrに満たない若い星までさまざまな世代が存在することが明らかになっている。そのため各世代の円盤星の性質を調べ比較していくことで銀河系がどのように成長してきたかを推測することができる。このように恒星分離した観測に基づいて、単一の銀河の形成史を探る研究手法は銀河考古学（Galactic Archaeology）と呼ばれたりする。各年代の地層から発掘された化石から、地球上での生態進化の歴史を紐解くように、銀河系を構成する恒星一つひとつの性質を化石情報として銀河系の形成史に

迫るというわけだ。

ここ20年ほどの間に行われるようになった銀河系内大規模サーベイによって大量の円盤星について精度の高い観測データが得られるようになった。そのおかげで、銀河系のさまざまな性質が明らかにされ、われわれは多角的に銀河系の形成史を議論できるようになっている。しかしながら、その形成過程にはまだ多くの謎が残されているのが現状だ。その中でもとりわけ理解が遅れているのは銀河系における『薄い円盤』と『厚い円盤』成分の存在とその化学的性質に関してである。本稿では、この問題に関するこれまでの観測的・理論的背景と私が行った銀河円盤化学進化モデル計算の結果について紹介したい。

## 2. 銀河系における薄い円盤と厚い円盤の観測

### 2.1 薄い円盤と厚い円盤の化学的性質

1980年代初め、いくつかのグループによって銀河系極方向の恒星計数が行われ、銀河系円盤鉛直方向の密度分布が初めて明らかになった<sup>2),3)</sup>。その密度分布は、スケールハイトが300 pc程度と1 kpc程度の二つの指数型プロファイルの重ね合わせでよくフィットされ、前者は薄い円盤成分、後者は厚い円盤成分と呼ばれている。このような厚みの異なる二重円盤成分の存在は系外のエッジオン円盤銀河にも確認される普遍的な構造である。そのため、銀河系はこのような二重円盤成分の本質を直接検証できる非常に貴重な存在である。

では銀河系において薄い円盤と厚い円盤それぞれを構成するのはどのような星だろうか？ 一般に円盤星は銀河系中心に対してほぼ円運動で軌道運動を行い、そのような星々が主に薄い円盤を構成していると考えられる。一方で、厚い円盤成分を構成する星はその軌道運動中に円盤面から高く舞い上がる必要があるため、薄い円盤の星より非円運動が卓越していると期待される。この考えに

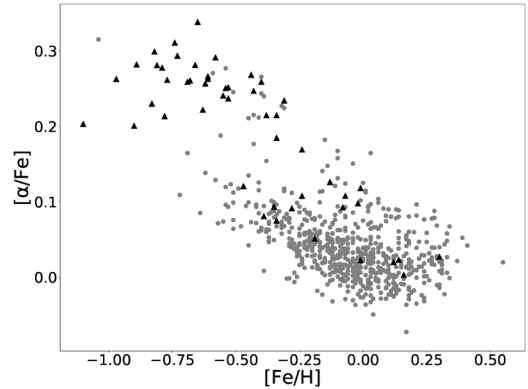


図1 近傍円盤星の  $[\alpha/\text{Fe}]$ - $[\text{Fe}/\text{H}]$  分布. 恒星の運動によって薄い円盤(丸)と厚い円盤(三角)に分けている. 文献4の円盤星サンプルを使用.

基づき、運動と化学組成がわかっている円盤星を円運動からのずれの大きさによって薄い円盤と厚い円盤の候補星に分け、それぞれの化学的性質が調べられている。図1は運動で区別された薄い円盤(丸)と厚い円盤(三角)の星の  $[\alpha/\text{Fe}]$  と  $[\text{Fe}/\text{H}]$  の関係を示している。ここで  $[\alpha/\text{Fe}]$  は  $\alpha$  元素と鉄がそれぞれII型、Ia型という発生タイムスケールが異なる超新星爆発によって主に生成されるという特性から年齢や星形成のタイムスケールの指標となることが知られている。これを踏まえて図1を見ると、厚い円盤は系統的に薄い円盤より高い  $[\alpha/\text{Fe}]$  を示し、つまり円盤形成の初期に短いタイムスケールで形成した円盤成分であることが示唆される。

さらに、ここで注目すべきは  $[\alpha/\text{Fe}]$ - $[\text{Fe}/\text{H}]$  図上の円盤星の分布が双峰的 (bimodal) であり、しかもこの図の上で薄い円盤と厚い円盤成分がおおむねよく区別できるということである。これは、二つの円盤構造が空間・力学進化だけでなく星形成・化学進化の観点でも大きく性質が異なっていることを意味している。なお、この bimodal 分布のうち、 $[\alpha/\text{Fe}]$  が高い側の分布を high- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列、低い側を low- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列と呼ぶ。そして以下では基本的に low- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列=薄い円盤、high- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列=厚い円盤として話を進める。

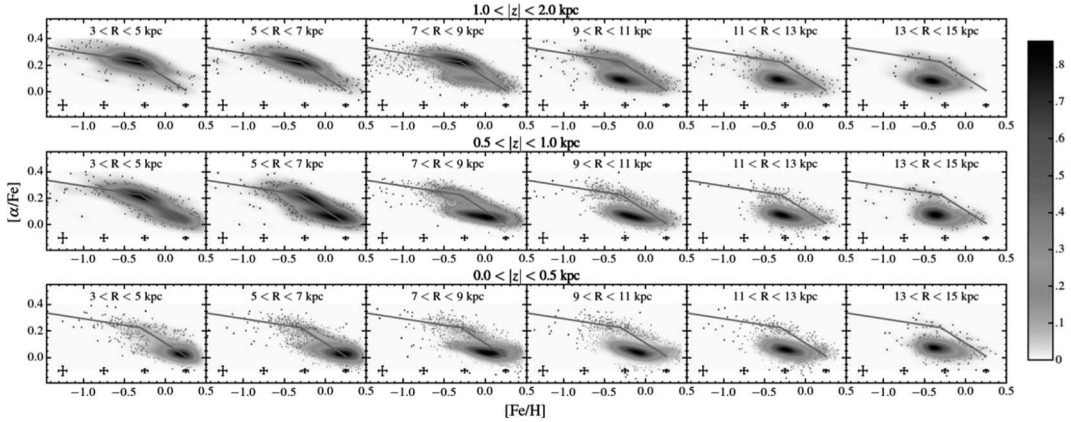


図2 APOGEEサーベイで観測された円盤星の  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  分布の空間依存性. 各領域の分布の違いを明らかにするために、すべての図に共通の折れ線が描かれている. 図は文献5の図4から引用.

### 2.2 円盤星の $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ 分布の空間依存性

図1は太陽近傍のごく狭い範囲にサンプルが限られたものだが、銀河系内の他の場所では  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  図上の円盤星の分布はどうなっているだろうか？ それを調べるには円盤面に沿って非常に広い範囲で星を分光観測する必要があるが、円盤面付近はダスト減光が強すぎて遠くまで見通せないため、円盤星の化学組成の観測は基本的にこれまで太陽近傍のせいぜい1-2 kpcに限られていた。しかし最近になって最新の銀河系内大規模分光サーベイ APOGEE (The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment) によってこの状況は大きく打開された。APOGEEは第3期SDSSプロジェクトの一環として行われた分光サーベイである。その最大の特徴は銀河系円盤星をターゲットとしたサーベイとしては初めて近赤外域 ( $\lambda=1.51-1.69 \mu\text{m}$ ) で高波長分解能 ( $R\sim 22,500$ ) の分光観測を行っていることであり、銀河面付近の星についてもダスト減光の影響を最小限に抑えて高精度のスペクトルを観測することを可能にしている。結果的にAPOGEEでは銀河系中心からの距離3-16 kpcという広い範囲に存在する円盤星およそ10万天体が観測され、それらの  $[\text{Fe}/\text{H}]$  と  $[\alpha/\text{Fe}]$  の値が0.05-0.1 dex (decimal exponent) の高い精度で与えられた。

図2はAPOGEEサーベイで観測された円盤星の  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  図上の分布を銀河中心からの距離  $R$  と銀河面からの高さ  $z$  の関数として示したものである。まず図2の太陽近傍 ( $7 < R/\text{kpc} < 9$ ) の分布を見ると、やはり high- $[\alpha/\text{Fe}]$  と low- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列の存在が確認できる。しかし、二つの系列の存在比率は  $R$  と  $z$  の違いによって大きく変化していることがわかる。

まず  $z$  に対する依存性であるが、基本的に円盤面付近では low- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列が、円盤面から離れた場所では high- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列がそれぞれ支配的であることがわかる。これはやはり low- $[\alpha/\text{Fe}]$  と high- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列がそれぞれ薄い円盤と厚い円盤構造に対応することを示唆している。次に  $R$  依存性である。円盤内側ほど high- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列が、外側ほど low- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列が支配的になることが明らかである。これはつまり厚い円盤のほうが薄い円盤に比べ中心集中度の高い円盤成分であることを表している。

図2からはもう一つ重要な性質が見て取れる。各図に引かれた共通の折れ線との比較から high- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列の位置はほとんど  $R$  に依存していないが、low- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列のピークは円盤外側ほど低金属量側に移動することがわかる。つまり厚い円盤の化学的性質は  $R$  方向で一様だが、薄い円盤

成分についてはR方向に変化するのである。

このように銀河系円盤星は  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  図上でbimodalに分布し、その分布の仕方は銀河系内でRやzの関数として大きく変化する。そして、この性質は銀河系における薄い円盤と厚い円盤の形成過程を理解するうえで極めて重要な手がかりとなるだろう。次章では、円盤星のbimodalな  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  分布の起源に関して考察したこれまでの理論研究について紹介する。

### 3. Bimodalな $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ 分布に関するこれまでの理論研究

銀河系円盤星のbimodalな  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  分布を説明するためにまず考えられたアイデアは円盤形成初期に1-2 Gyrの間だけ星形成を止めるというものだ<sup>6,7</sup>。星形成が止まっている間、大質量星起源のII型超新星はほとんど起きなくなるが、白色矮星起源のIa型超新星は起きるため急激に  $[\alpha/\text{Fe}]$  が下がり、結果的にその前後で星の  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  分布が不連続、つまりbimodalになるというアイデアだ。このシナリオはいまもたまたま目にするが星形成を1-2 Gyrもの間止める物理過程が不明確であることもあり個人的にはあまり好みではない。

ほかの重要なアイデアは恒星円盤の力学進化に伴う円盤動径方向に沿った星の移動(radial migration)過程による説明である。星のradial migrationは円盤中の重力不安定によって発生したバー・スパイラル構造や巨大分子雲が円盤星に重力的に作用しその軌道を変えることによって生じる。Radial migrationが起きると円盤上の各半径にはそこで生まれた星だけでなく、異なる半径で生まれて移動してきた星も存在できるようになる。実際に太陽近傍にはより内側の領域で生まれたとしか考えられないほど高い金属量をもつ星が存在しており、これは銀河系でも円盤星のradial migrationが起きている証拠と言える。2009年にラルフ・シェンリッヒとジェームズ・ピニーに

よってradial migrationの効果を考慮した銀河円盤化学進化モデルが考案された<sup>8,9</sup>。そして、そのモデル計算の結果得られた円盤星の  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  面上の分布は観測されるようなbimodal分布だったのである。このモデルによれば、high- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列は銀河形成初期に円盤内側で生まれradial migrationによって太陽近傍まで動いてきた星で構成され、一方でlow- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列は太陽近傍で生まれた若い星によって構成されるようである。このシナリオは円盤内側ほどhigh- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列の割合が大きくなるという観測的性質にも矛盾しないため非常に有力に思える。しかし、最近の銀河円盤化学進化モデルでは彼らの結果は否定されている<sup>10</sup>。原因はいくつか考えられるが、シェンリッヒらのモデルで採用されたII型、Ia型超新星爆発のモデルがあまり現実的ではなく、 $[\alpha/\text{Fe}]$  が高い星ができすぎていた可能性がある。

このようにこれまでの研究では銀河系円盤星のbimodalな  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  分布を説明するには至っておらず、銀河系形成における大きな謎となっている。そんななか、筆者は自作した銀河円盤化学進化モデルを使ってさまざまな条件設定での計算を重ねるうちに円盤星のbimodalな  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  分布を作る新しい可能性に気づいたのである。キーワードは『不連続的なradial migration』である。

### 4. 不連続的なradial migrationを考慮した銀河円盤化学進化モデル

前章で紹介した星のradial migration過程だが、その引き金となるのはバー・スパイラル構造との重力相互作用だけではない。実は衛星銀河と合体するときにも、その銀河のもっていた軌道エネルギーが円盤星に分配されることで円盤星の軌道が広がり、円盤内側から外側へのradial migrationが発生することがある。このような銀河合体時に発生するradial migrationはバー・スパイラルに



よって誘起させる radial migration に比べ極めて不連続的で急激なイベントである。不連続的な radial migration を起こすような銀河合体は宇宙論的な観点でみても決してめずらしくはなく、むしろ円盤を力学的に加熱し、厚い円盤を形成する有力なイベントである。しかし、このような不連続的な radial migration が起きた場合に円盤の化学進化にどのような影響があるかはこれまで詳しく調べられてはいなかった。

2016年の夏頃、『自作の銀河円盤モデルでAPOGEEサーベイのいくつかの観測結果を検証する』ことを博士論文のテーマに決めていた筆者は研究で用いるモデルを大体完成させ、チェックをかねていろいろな計算をして遊んでいた。その中で、不連続的な radial migration の効果も興味本位で調べたところ、これまで知られていなかった興味深い効果に気づき、そしてそれが円盤星の bimodal な  $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  分布の起源にもなるのではないかと考えた。

具体的なモデル計算の結果については次章で詳しく紹介するとしてここでは非常に簡単ではあるがモデルの概要について説明したい。なお、ここではモデルの詳細に関する説明は大幅に省いている。興味がある方はぜひ文献11を参照していただきたい。

#### 4.1 化学進化モデルの概要

モデルは銀河面  $R$  方向を分解した1次元軸対称を仮定している。各空間セルに対して円盤へのガス流入、星形成、円盤からのガス流出、そして星の radial migration に伴うガス、星、重元素の質量面密度の時間変化を解くことで銀河円盤の進化を計算することができる。星形成の材料となるガスの流入率は時間  $t$  と場所  $R$  の関数として  $\dot{\Sigma}_{\text{in}}(t, R) \propto \exp(-R/h_{R,\text{in}} - t/\tau_{\text{in}}(R))$  で与えている。ここで  $h_{R,\text{in}}$  と  $\tau_{\text{in}}$  は流入率プロファイルのスケールレングスと流入のタイムスケールである。

星形成率 ( $\dot{\Sigma}_{\text{SFR}}$ ) は近傍の星形成銀河で観測される経験則を使ってガスと星の質量面密度から計

算する。星形成が起こると大質量星からのUV放射や超新星爆発といったフィードバック過程に起因して円盤からのガス流出が起こることを考えており、ガス流出率は星形成率に比例すると仮定して  $\dot{\Sigma}_{\text{out}}(t, R) = \Lambda(R) \dot{\Sigma}_{\text{SFR}}(t, R)$  で計算する。ここで  $\tau_{\text{in}}$ ,  $\Lambda$  は  $R$  の関数である。その詳しい関数型の説明は省くが、これらはそれぞれいくつかのパラメータを用いてその性質を特徴づけることができる。本研究ではそれらのパラメータについてマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて、観測されている銀河系円盤のガス、星、星間ガス中の酸素、鉄の空間分布を再現するように決定している。

最後に星の radial migration についてである。これは研究の核であるので少し詳しく紹介する。星の radial migration の効果は場所  $R_f$  で生まれた年齢  $\tau$  の星が場所  $R$  まで移動している確率として取り入れており、それは以下のようなガウシアン型の確率密度関数を使って与える。

$$P(\tau, R_f, R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{RM}}^2}} \exp\left[-\frac{(R - R_f)^2}{2\sigma_{\text{RM}}^2}\right] \quad (1)$$

このような radial migration の取り扱いは  $N$  体シミュレーションの比較からある程度良い近似であることが知られており、同様の一次元銀河円盤モデルではよく採用されている。ここで  $\sigma_{\text{RM}}$  は radial migration に伴う星の円盤  $R$  方向の拡散スケールを表しており、その時間変化によって円盤内の星の radial migration の歴史を記述することができる。

$\sigma_{\text{RM}}$  の時間変化の中にはバー・スパイラルによって誘起される連続的な radial migration の効果と銀河合体による不連続的な radial migration の効果のどちらも含ませている。銀河合体による効果はある時刻  $t_{\text{RM}}$  で銀河合体によって急激な radial migration イベントが起きたことを想定して、 $t = t_{\text{RM}}$  を境にそれ以前に生まれた星についての  $\sigma_{\text{RM}}$  を不連続的に  $\sigma'_{\text{RM}}$  まで増加させることで表している。 $t = t_{\text{RM}}$  以降に生まれた星についてはバー・スパイラルによる radial migration の影響

を受けると考えて、 $\sigma_{\text{RM}}$ を年齢 $t$ の関数として $\sigma_{\text{RM}} \propto t^{0.5}$ で連続的に増加させており、これは最近の銀河円盤 $N$ 体シミュレーションの結果を参考にしている。なお、この計算では合体する衛星銀河は銀河恒星円盤に比べ十分暗く、合体後の恒星系には寄与しないと仮定している。

このモデルにおいて不連続的なradial migrationイベントを特徴づけるパラメータはイベント発生のタイミングを表す $t_{\text{RM}}$ とradial migrationの規模を表す $\sigma'_{\text{RM}}$ である。 $t_{\text{RM}}$ については宇宙論的構造形成シミュレーションの結果を参考に、銀河系サイズの銀河において不連続的なradial migrationを引き起こすような銀河合体が起きる典型的なタイミングとして $t_{\text{RM}}=2$  Gyrを選んだ<sup>12)</sup>。また $\sigma'_{\text{RM}}$ については銀河合体による円盤銀河の構造進化を調べた $N$ 体シミュレーションの結果を参

考に $\sigma'_{\text{RM}}=3$  kpcを仮定した<sup>13)</sup>。 $t_{\text{RM}}$ と $\sigma'_{\text{RM}}$ の値と計算結果の関係については文献11の中で詳しく議論しているが本稿では省略する。

次章ではこのモデル計算の結果得られた銀河系円盤星の $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ 面上での分布を示し、それを元に銀河系の形成史について議論する。

## 5. モデル計算結果

### 5.1 円盤星の $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ 分布

図3はモデル計算で得られた $R=5-7, 7-9, 9-11$  kpcの三つの領域における円盤星の $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ 図上の分布である。図3(a), (b)はそれぞれモデル内で $t=2$  Gyrでの不連続的なradial migrationを考慮していない場合と、考慮した場合の計算結果を示している。なお、比較のため太陽近傍で観測されたhigh- $[\alpha/\text{Fe}]$ とlow- $[\alpha/\text{Fe}]$

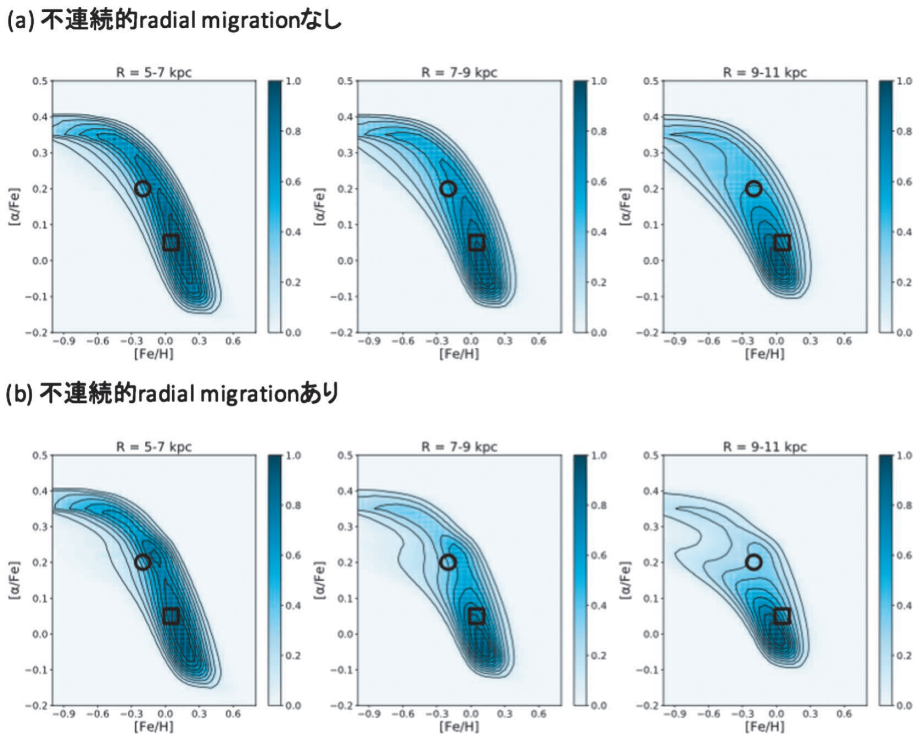


図3 モデル計算で得られた $R=5-7, 7-9, 9-11$  kpcの三つの領域における円盤星の $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ 図上の分布。(a)はパー・スパイラルから誘起される連続的なradial migrationだけが考慮されているモデル、(b)はそれに加えて $t=2$  Gyrでの不連続的なradial migrationを考慮したモデルの結果を示している。丸と四角のマーカは近傍円盤星について観測されているhigh- $[\alpha/\text{Fe}]$ とlow- $[\alpha/\text{Fe}]$ 系列のピークの位置をそれぞれ表している。

系列のピークの位置をそれぞれ丸と四角のマー  
カーで表している。

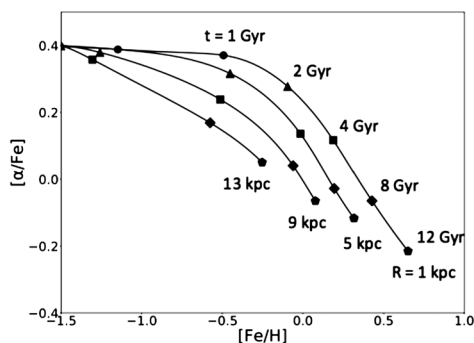
まず図3(a) についてだが、このモデルでは先  
行研究と同様に bimodal な分布を確認する  
ことができなかつた。一方で図3(b) では  $[\alpha/\text{Fe}]$  の値  
が異なる二つのピークの存在が明らかである。ま  
た  $R=9\text{--}11\text{ kpc}$  の分布には  $[\alpha/\text{Fe}]\sim 0.4$  と  $[\alpha/\text{Fe}]\sim 0.2$  に  
伸びる2股の分布が見えており、これは観測さ  
れる high- $[\alpha/\text{Fe}]$ , low- $[\alpha/\text{Fe}]$  系列によく似  
ている。さらに、high- $[\alpha/\text{Fe}]$  のピークは円  
盤外側で薄くなるもののその位置はほとんど変  
わっていないのに対し、low- $[\alpha/\text{Fe}]$  のピークは  
円盤外側ほど低金属量側に移動しており、これ  
は図2で示した実際の銀河系円盤の性質とよく  
一致している。このように、不連続的な radial  
migration を考慮したモデルはこれまで再現が難  
しかった円盤星の  $[\alpha/\text{Fe}]\text{--}[\text{Fe}/\text{H}]$  図上の  
bimodal 分布をよく再現できるのである\*<sup>1</sup>。

### 5.2 不連続的な radial migration の円盤銀河の化学進化への影響

ではなぜこのような結果が得られたのか考察し  
よう。図4はモデル計算で得られた各半径  $R$  にお  
けるガスの  $[\alpha/\text{Fe}]$  と  $[\text{Fe}/\text{H}]$  の変化の様子を  
表している。図4(a) は不連続的な radial migra  
tion が無い場合、図4(b) はある場合の結果であ  
る。二つの図から共通して言えるのは形成初期ほ  
ど  $[\alpha/\text{Fe}]$  が高く、円盤内側ほど化学進化が早く  
て  $[\text{Fe}/\text{H}]$  が高くなっていることである。一方  
で、二つの図の間の大きな違いは図4(b) では  
 $R=9\text{ kpc}$  において  $t=2\text{--}4\text{ Gyr}$  で  $[\alpha/\text{Fe}]$  の値が急  
激に下がっていることである。これこそ  $t=2\text{ Gyr}$   
に起きた不連続的な radial migration の効果を反  
映している。

Radial migration が起きると星は円盤に沿って  
内向きにも外向きにも移動するが、円盤内側ほど  
星の数密度は高いため、全体としては円盤内側か

(a) 不連続的な radial migration なし



(b) 不連続的な radial migration あり

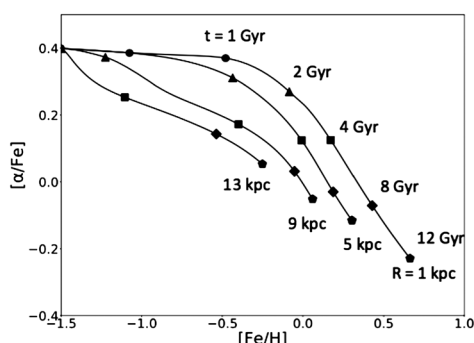


図4 モデル計算で得られた  $R=1, 5, 9, 13\text{ kpc}$  にお  
けるガスの  $[\alpha/\text{Fe}]$  と  $[\text{Fe}/\text{H}]$  の変化の様子。お  
およその時間変化もわかるように各  $R$  について  
 $t=1, 2, 4, 8, 12\text{ Gyr}$  の値をそれぞれ異なるマ  
ーカーで強調している。(a) はバー・スパイラル  
から誘起される連続的な radial migration だけ  
が考慮されているモデル、(b) はそれに加えて  
 $t=2\text{ Gyr}$ での不連続的な radial migration を考  
慮したモデルの結果を示している。

ら外側に向かって正味の星の流れが生じる。この  
とき II 型超新星爆発は寿命が短い星が起こすため  
radial migration の影響は小さいが、遅れて起こ  
る Ia 型超新星爆発は radial migration で円盤外側  
まで運ばれてから起きてしまう。結果的に radial  
migration が起きると円盤内側では Ia 型と II 型超  
新星爆発の発生率の比 ( $N_{\text{Ia}}/N_{\text{II}}$ ) が下がり、外側  
では上がる。これはバー・スパイラルが誘起する

\*<sup>1</sup> 最近になり、宇宙論的銀河形成シミュレーションでも円盤星の  $[\alpha/\text{Fe}]\text{--}[\text{Fe}/\text{H}]$  面上の bimodal 分布が再現できる例  
が見つかった<sup>14)</sup>。

radial migrationでも起きていることだが、不連続的かつ大規模なradial migrationイベントでは円盤内外での $N_{\text{Ia}}/N_{\text{II}}$ の変化は急激である。結果的に図4(b)では円盤外側( $R > 6 \text{ kpc}$ )で $N_{\text{Ia}}/N_{\text{II}}$ が急激に増加、それに伴って $[\alpha/\text{Fe}]$ が大きく減少したのである。これによって、 $R=5 \text{ kpc}$ 付近を境にその内側と外側で化学進化の様子が不連続的に変化し、結果として $R < 4 \text{ kpc}$ 起源の星からなるhigh- $[\alpha/\text{Fe}]$ 系列と $R > 6 \text{ kpc}$ 起源の星からなるlow- $[\alpha/\text{Fe}]$ 系列がそれぞれ形成されることになる。

また、図4(b)からはわかりにくいのが円盤内側( $R < 4 \text{ kpc}$ )では逆に $N_{\text{Ia}}/N_{\text{II}}$ が急激に減少したことで $[\alpha/\text{Fe}]$ の低下が抑えられており、結果的に高い $[\alpha/\text{Fe}]$ を持つ星がたくさん生まれる。これにより、図3(b)のhigh- $[\alpha/\text{Fe}]$ 側のピークが形成されるのである。なお、low- $[\alpha/\text{Fe}]$ のピークは単純に生まれた場所からほとんど動いていないまだ若い星々で構成されている。そのため、銀河円盤に沿って存在する負の金属量勾配を反映してlow- $[\alpha/\text{Fe}]$ ピークの金属量は円盤外側ほど低くなるのである。

### 5.3 モデル計算から示唆される銀河系円盤の形成史

以上より、急激なradial migrationイベントは円盤銀河全体の化学進化に重大な影響を与え、さらには観測されるような円盤星のbimodalな $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ 分布を作り出す可能性があることが明らかになった。仮にこれが円盤星のbimodalな $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ 分布を形成したシナリオとして正しいのであれば、まず銀河系はその形成の初期段階でおそらく銀河合体に起因した円盤全体を巻き込む急激かつ大規模なradial migrationイベントを経験していることになる。そして、現在銀河系に存在する厚い円盤構造はそのような不連続的なradial migrationイベントの前後に円盤内側( $R < 4 \text{ kpc}$ )で形成した星々で構成され、一方で薄い円盤構造は円盤外側( $R > 6 \text{ kpc}$ )で現在ま

でゆっくりと形成してきた星で構成されていると考えられる。

このように、私は本研究を通してこれまで理解が乏しかった銀河系の薄い円盤と厚い円盤構造の形成過程に関して、新たに有力な仮説を与えることに成功したのである。

## 6. まとめと今後の展望

私は準解析的計算手法に基づいた銀河円盤化学進化モデルを用いて、円盤星のradial migrationが円盤銀河の化学進化に及ぼす影響について調べた。その結果、銀河合体によって発生するような急激かつ大規模なradial migrationは円盤内側から外側への大量の星の輸送を引き起こし、それに伴って円盤外側でIa型超新星爆発が劇的に増加することで銀河円盤全体の化学進化は大きな影響を受けることが明らかになった。さらに、このモデル計算の結果得られた円盤星の $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ 図上の分布は銀河系で実際に観測されているようなbimodalな分布を非常によく再現することがわかった。このことから、銀河系は過去に不連続的なradial migrationを引き起こすような銀河合体イベントを経験しており、その結果として現在観測される薄い円盤と厚い円盤が形作られたと考えられる。

しかし、本研究で示した銀河系形成のシナリオを立証するにはさらなる調査が必須である。1次元軸対称を仮定した今回のモデルでは星の $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ 図上の分布やR方向の密度プロファイル等は調べられるが、円盤鉛直方向の分布や星の力学的性質についてはわからない。そのため、不連続的なradial migrationを経て生まれた円盤が観測される銀河系恒星円盤の力学的、空間的性質を再現できるかどうかは銀河形成シミュレーションによって調べる必要があるだろう。また、今回の計算では他の理論研究を参考にしてある程度現実的な不連続的なradial migrationの性質について検証しているが、より普遍的な円盤銀河形



成につなげるなら実際に宇宙論的な銀河形成過程の中でどれだけそのようなイベントが起きるかを定量的に調べることが必要不可欠である。

加えて強調したいのは、本研究で目を向けたのは銀河系円盤のまだ一部にすぎないということである。Radial migrationに伴う円盤の力学的、構造的進化の痕跡はAPOGEEの手が及んでいないようなバルジを含む円盤最内縁部、そして最外縁部にも残されているはずである。これらの未開拓領域における星の性質は現在進行中のAPOGEE-2や近い将来稼働開始予定のすばる望遠鏡広視野分光器PFS (Prime Focus Spectrograph)によって詳細に観測される予定であり、そのデータを使って太陽近傍だけでなくより広い範囲を包括的に議論していくことが重要となる。

このように本研究をステップとして銀河系形成により深く迫っていくには銀河形成シミュレーションや次世代の銀河系内観測の両方の力が必要となりそうだ。理論・観測の発展著しい現在、いよいよ銀河系形成最終解明の時代が始まろうとしているのを肌を感じている。この時代に研究者として立ちあえる、高揚感と責任感を胸に今後も研究を続けていきたいと思う。

## 謝 辞

本稿の内容は筆者と千葉柁司氏で執筆した投稿論文の研究成果に基づいています。研究をまとめるにあたり、大学院での指導教官だった千葉柁司氏、そして研究内容に対し多くのコメント、議論をしていただいた戸次賢治氏に深く感謝いたします。また、今回執筆の機会を与えてくださった小宮山裕氏に、深く感謝いたします。なお本研究は日本学術振興会特別研究員 (DC2) として行ったものです。

## 参考文献

- 1) Delgado-Serrano R., Hammer F., Yang Y. B., et al., 2010, A&A 509, A78
- 2) Yoshii Y., 1982, PASJ 34, 365
- 3) Gilmore G., Reid N., 1983, MNRAS 202, 1025
- 4) Adibekyan V. Z., Figueira P., Santos N. C., et al., 2013, A&A 554, A44
- 5) Hayden M. R., Bovy J., Holtzman J. A., et al., 2015, ApJ 808, 132
- 6) Chiappini C., Matteucci F., Gratton R., 1997, ApJ 477, 765
- 7) Haywood M., Lehnert M. D., DiMatteo P., et al., 2016, A&A 589, A66
- 8) Schönrich R., Binney J., 2009, MNRAS 396, 203
- 9) Schönrich R., Binney J., 2009, MNRAS 399, 1145
- 10) Minchev I., Chiappini C., Martig M., 2013, A&A 558, A9
- 11) Toyouchi D., Chiba M., 2016, ApJ 833, 239
- 12) Ruiz-Lara T., Few C. G., Gibson B. K., et al., 2016, A&A 586, A112
- 13) Villalobos Á., Helmi A., 2008, MNRAS 391, 1806
- 14) Grand R. J. J., Bustamante S., Gómez F.~A., et al., 2017, arXiv:1708.07834

## Deciphering the Formation History of the Milky Way Stellar Disk Based on the Chemical Abundance Distribution of the Disk Stars

Daisuke TOYOUCHI

*Theoretical Astrophysics Group, Department of Physics, Kyoto University, Kitashirakawa, Oiwake-cho, Sakyou-ku, Kyoto 606-8502, Japan*

Abstract: We calculate the chemo-dynamical model to investigate the influence of radial migration histories on the chemical evolution of a disk galaxy, in particular focusing on stellar distribution on the  $[\alpha/\text{Fe}]$ - $[\text{Fe}/\text{H}]$  plane. We find that for the model with rapid and discontinuous radial migration, the  $[\alpha/\text{Fe}]$  ratios of stars in outer disk regions decrease much more rapidly with time than the model without such a discontinuous radial migration, because the associated net transfer of intermediate and old disk stars from inner to outer disk regions increases the rate of Type Ia relative to that of Type II supernovae in the latter regions. Moreover, its effect on the stellar abundances at larger radii is significant enough to provide the large difference in the evolution of stars on the  $[\alpha/\text{Fe}]$ - $[\text{Fe}/\text{H}]$  plane between inner and outer disk regions. As a result we obtain the bimodal distribution of disk stars on the  $[\alpha/\text{Fe}]$ - $[\text{Fe}/\text{H}]$  plane as observed in the Galactic stellar disk, thereby implying that the event of discontinuous radial migration may play a key role in reproducing the observed bimodality of stars on this abundance-ratio diagram.