Chemodynamical models of our Galaxy

James Binney, Eugene Vasiliev (2023)

arXiv: 2306.11602

2023.06.30 (Fri)　服部公平

概要　APOGEE DR17のデータを用いて、DM及び６つの星成分から構成される、MWの化学動力学分布関数モデルを構築。
分布関数モデルは f (J, Fe/H, Mg/Fe) = f(J) f (Fe/H, Mg/Fe | J) のように、**力学部分**と**化学部分**の掛け算で表現(J = (Jr, Jz, Jphi) は、orbital action)。
化学部分は、[Fe/H], [Mg/Fe] 空間の2次元ガウス分布でモデル化し、ガウス分布の中心は J の線形関数として表現。
「72箇所の空間領域における速度分布」「30箇所の J 領域における化学組成分布」をフィットして良いモデルを探索した。
・サンプルの圧倒的多数は Jphi > 0 (prograde)であり、円盤に属する。バルジも、retrograde の星が少ないので、spheroidではなくfat diskでモデルするのが適切。
・High-α stars は Jphi < Jphi,solar [=2000 kpc km/s] でtruncate された分布を示す。

ゴール　MWのself-consistentな化学動力学モデルの構築。　**オリジナリティ**　化学組成分布にJ依存性を入れたので、分布関数にmetallicity gradient などの情報が自然と導入された。

データ　Gaia DR3。 APOGEE DR17の化学組成([Fe/H], [Mg/Fe])。StarHorseカタログによる距離（距離の誤差 < 0.75 kpc を選択）。星の分布は 1 < R < 14 kpc, |z| < 4 kpc

ロジック
化学組成・軌道は、MWの歴史のさまざまな情報を保持する。化学組成は星の一生の間に変化しないが、
ディスク星の軌道は散乱 / radial migration などで変化する。
現在の化学動力学分布を調べると、MWの内部の進化の様子がわかる。
DMと星（とガス）の分布関数を推定することで、重力場の推定も可能となる。

方法　ナイーブにモデルフィットを行うと、APOGEE DR17のselection function (例：ダスト減光が少ない領域は星が多く観測される)の影響を除去不可能。
そこで、星を空間領域に分割して、「その領域の星の速度分布」などを調べるようにしている。

結果と考察　データを観察すると、以下のような指針がたつ：
（１）バルジも結構見えている。しかし、retrogradeの星がいない。バルジはfat diskである。
（２） high-alpha disc は、Jphi > 3000 kpc km/s にほとんどいない。Truncated diskみたいなモデルが良さそう。

それをもとにモデル化すると、
・速度分布も、化学組成分布も、一部の例外を除いてそれなりにうまくいく。
・むしろ、解釈できない構造や再現できない構造が見えたら、今後のモデルの向上の指針となる。

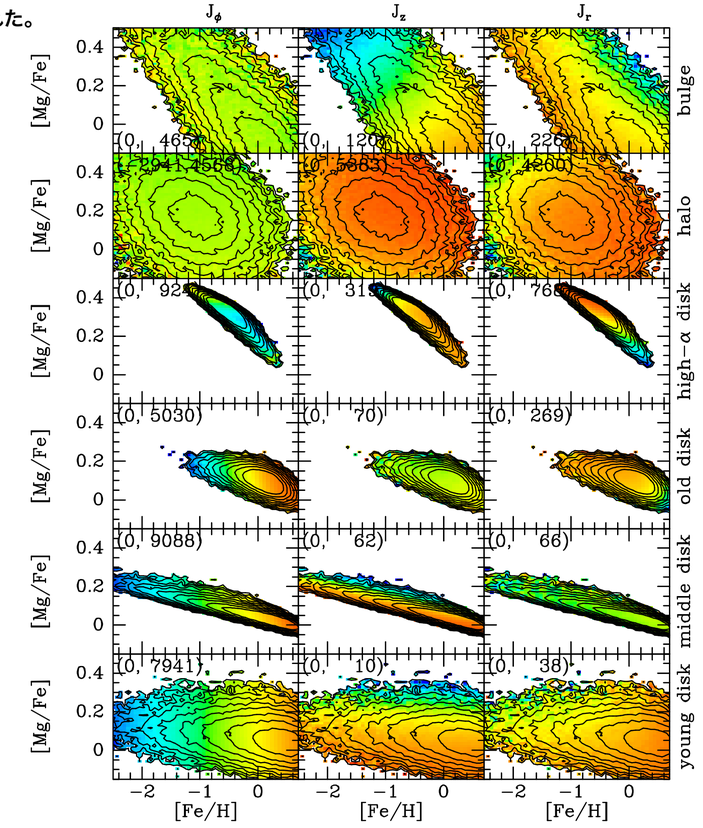
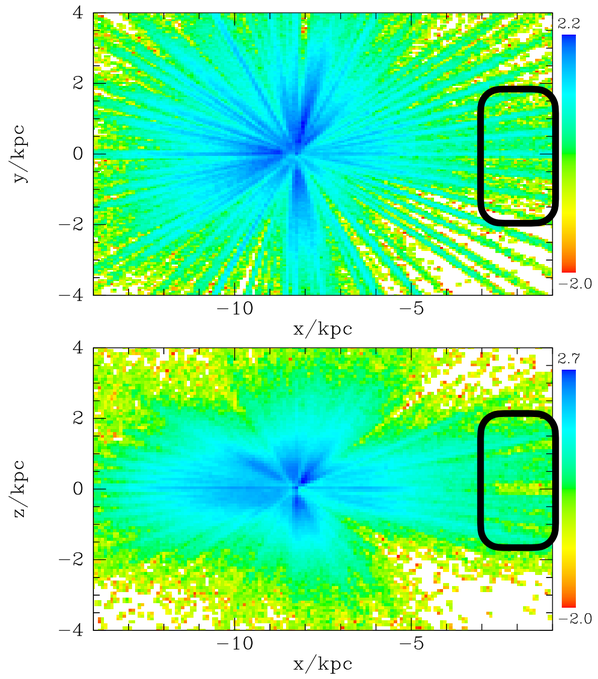


Figure 18. The components in chemical space. Each row shows the structure of the component listed on the right-hand edge. Contours show the density of stars of the given chemistry while colours show, from left to right, the mean values of J_ϕ, J_z and J_r. The numbers in brackets give the values in kpc km s^{-1} corresponding to red and blue hues. The density increases by a factor 2 between adjacent contours.

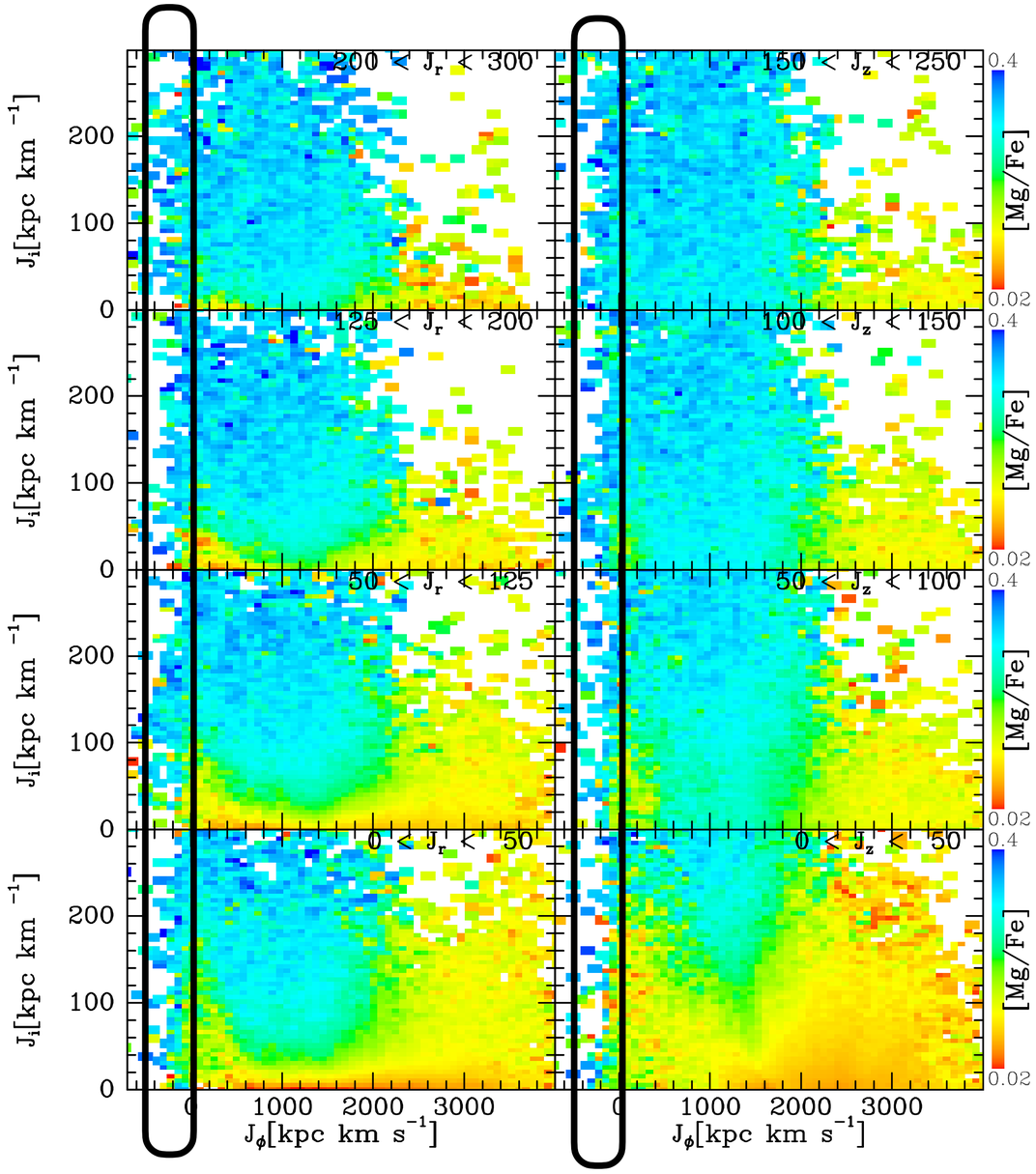
コメント
モデルの決定に、星の多次元分布自体を用いるのではなく、ある方向に射影した分布（ヒストグラム）を用いている。最尤モデルの推定に、一部の情報を捨てている。
モデルは軸対称・定常なので、vR, vZ の分布予測は常に左右対称。いくつかの(R, |z|)-binでモデル予想からずれているが、これはspiral摂動の効果などと解釈されている。
→このようなズレがある場所では、(R, |z|)でまとめるのではなく、(R, z)-bin vs (R, -z)-bin, (R, phi, |z|)-bin などで速度分布を見ると面白いかも。

データを観察

バルジも結構見えているのに、

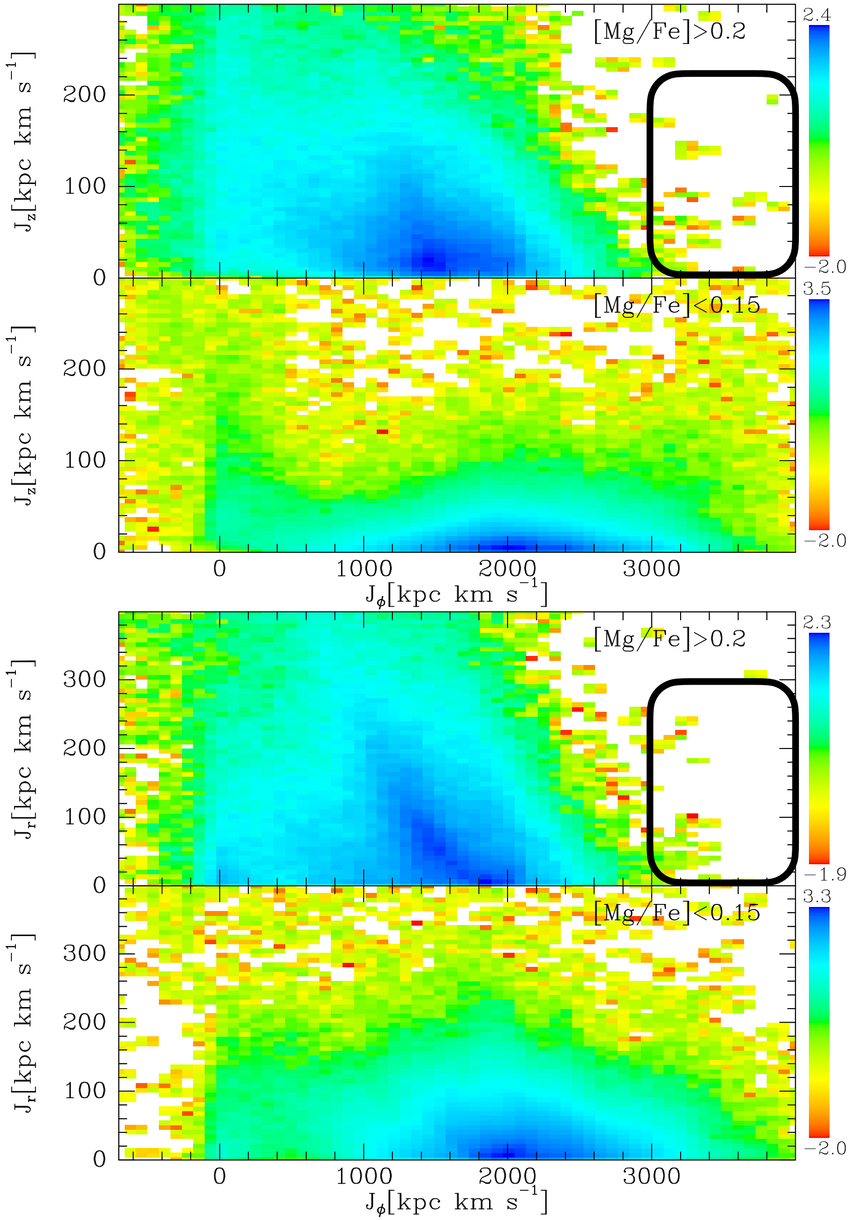


Jphi < 0ほとんど星がいない。



バルジ= fat disk

データを観察



観察の結果、

・ high-alpha disc は、Jphi > 3000 kpc km/s にほとんどいない。

・Truncated diskみたいなモデルが良さそう。

こういうのをモデルできるようにしましょう。

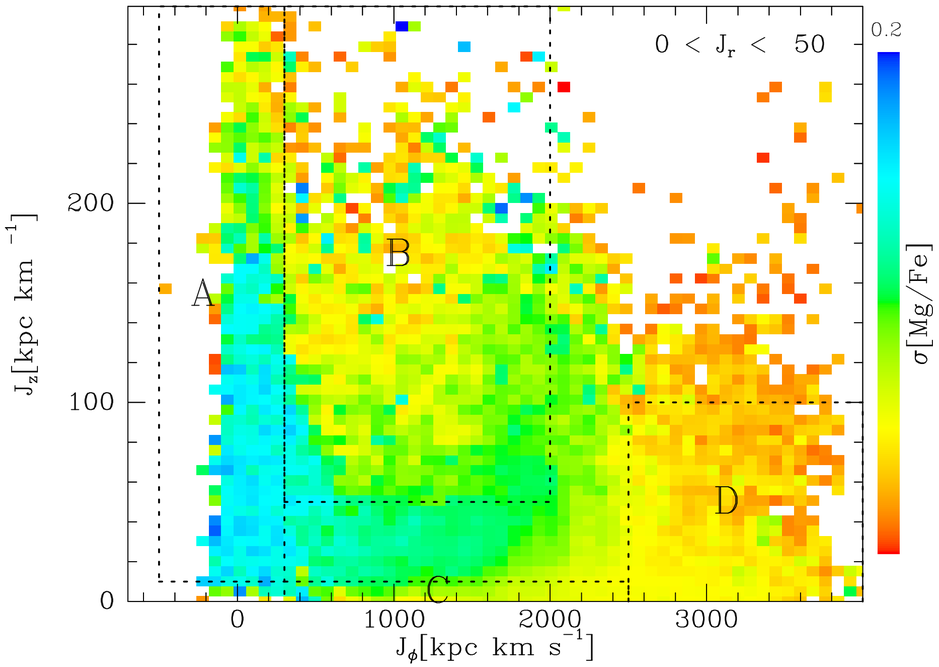
データを観察

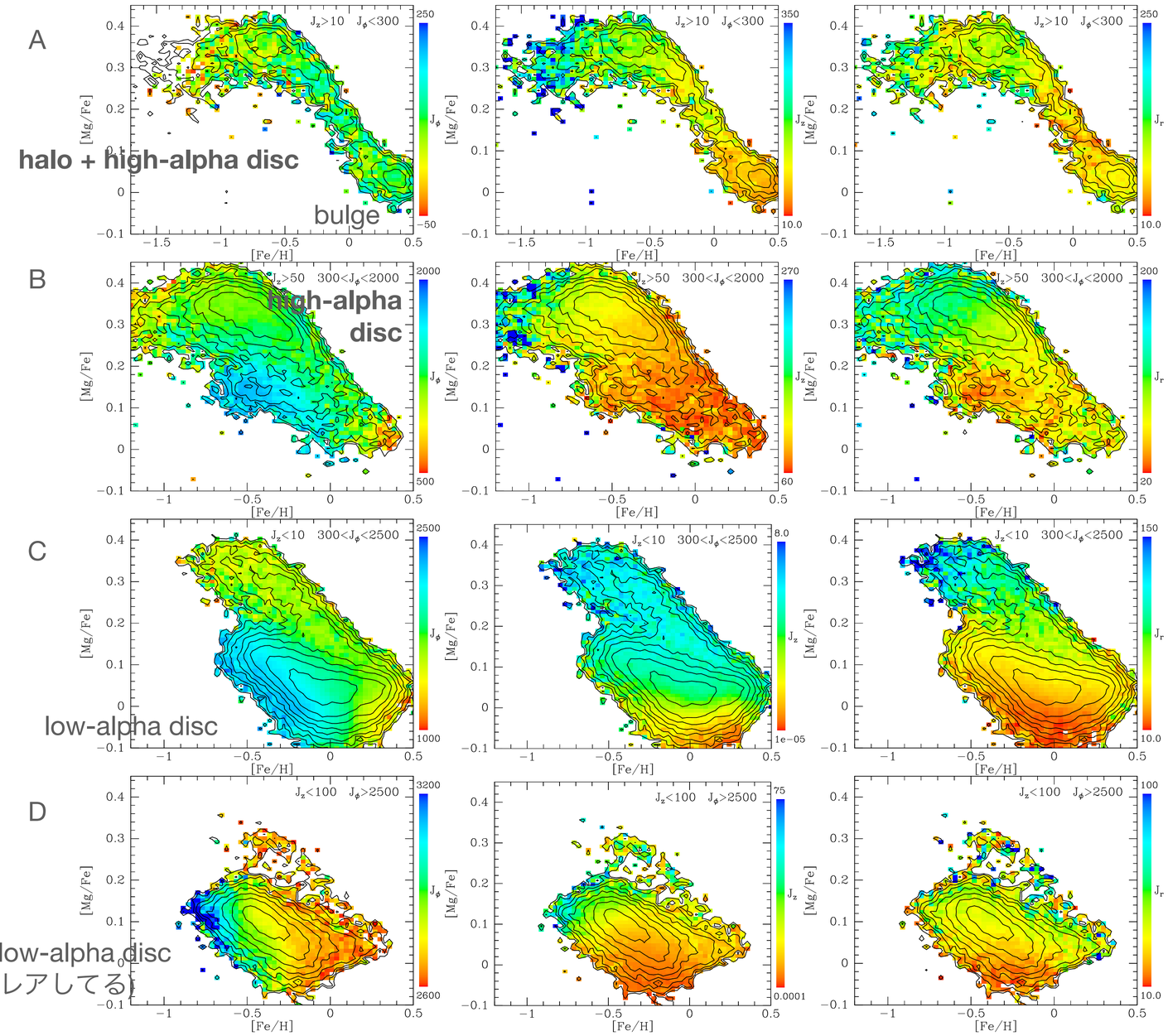
青　Jphi大
赤　Jphi小

青　Jz大
赤　Jz小

青　Jr大
赤　Jr小

J (=action) を用いて領域を分割。
＝星の軌道ごとにサンプル分割した。





観察の結果、

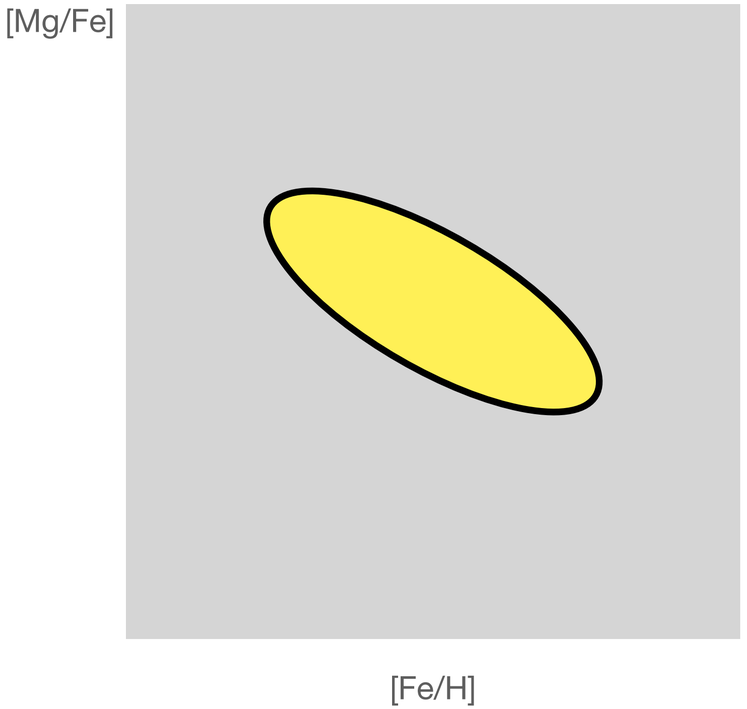
・「バルジはfat diskでモデルしましょう」
・low-alpha disc はmetallicity gradient が見えている。

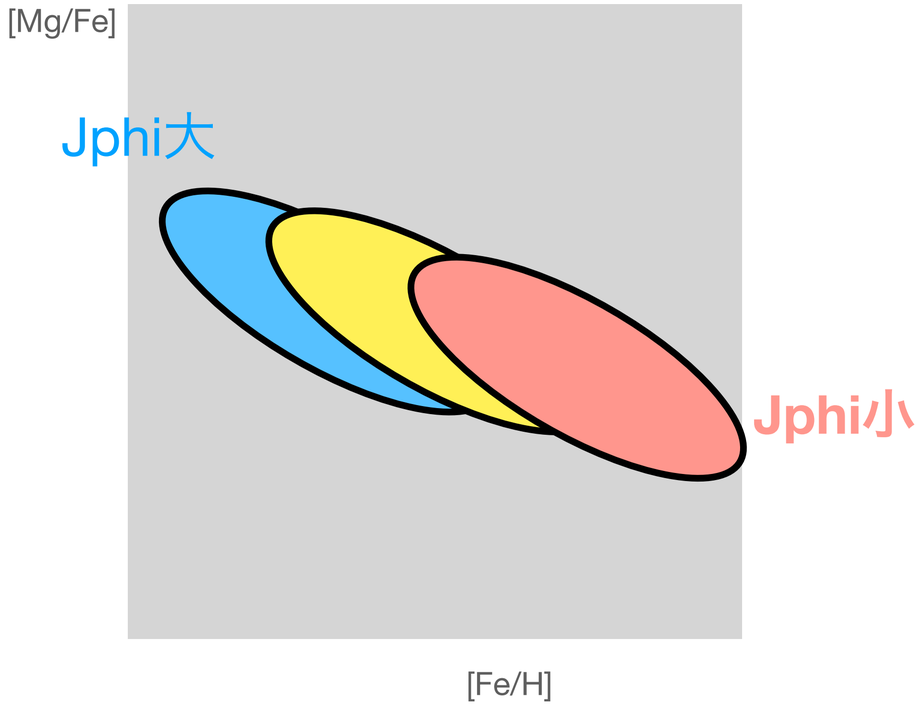
こういうのをモデルできるようにしましょう。

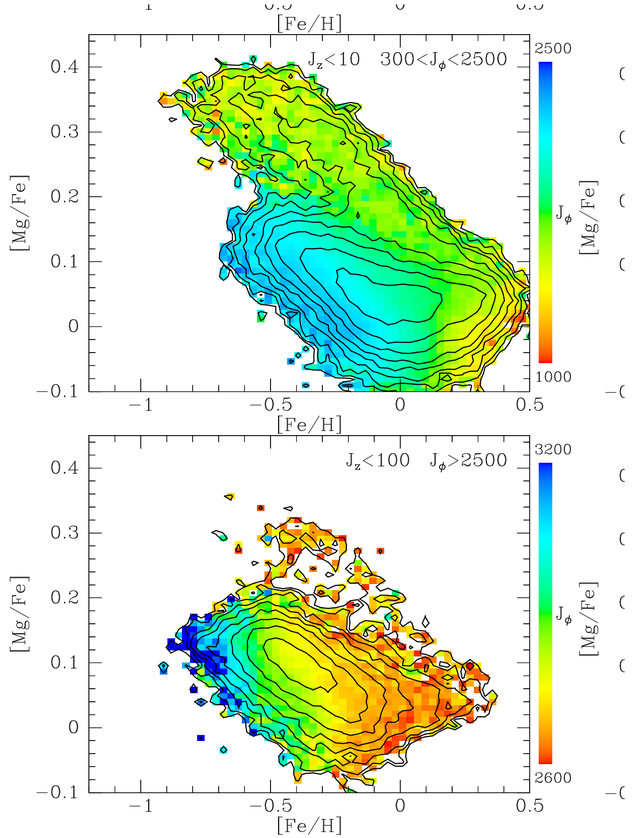
モデル化の「心」

分布関数モデルは f (J, Fe/H, Mg/Fe) = f(J) f (Fe/H, Mg/Fe | J) のように、**力学部分**と**化学部分**の掛け算で表現(J = (Jr, Jz, Jphi) は、orbital action)。

化学部分は、[Fe/H], [Mg/Fe] 空間の2次元ガウス分布でモデル化し、ガウス分布の中心は J の線形関数として表現。

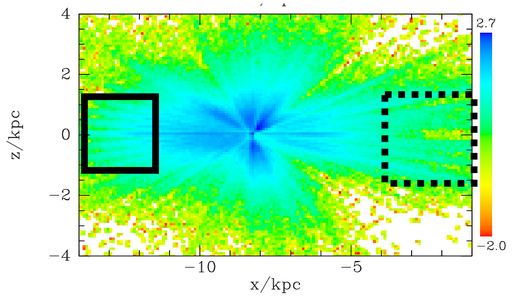


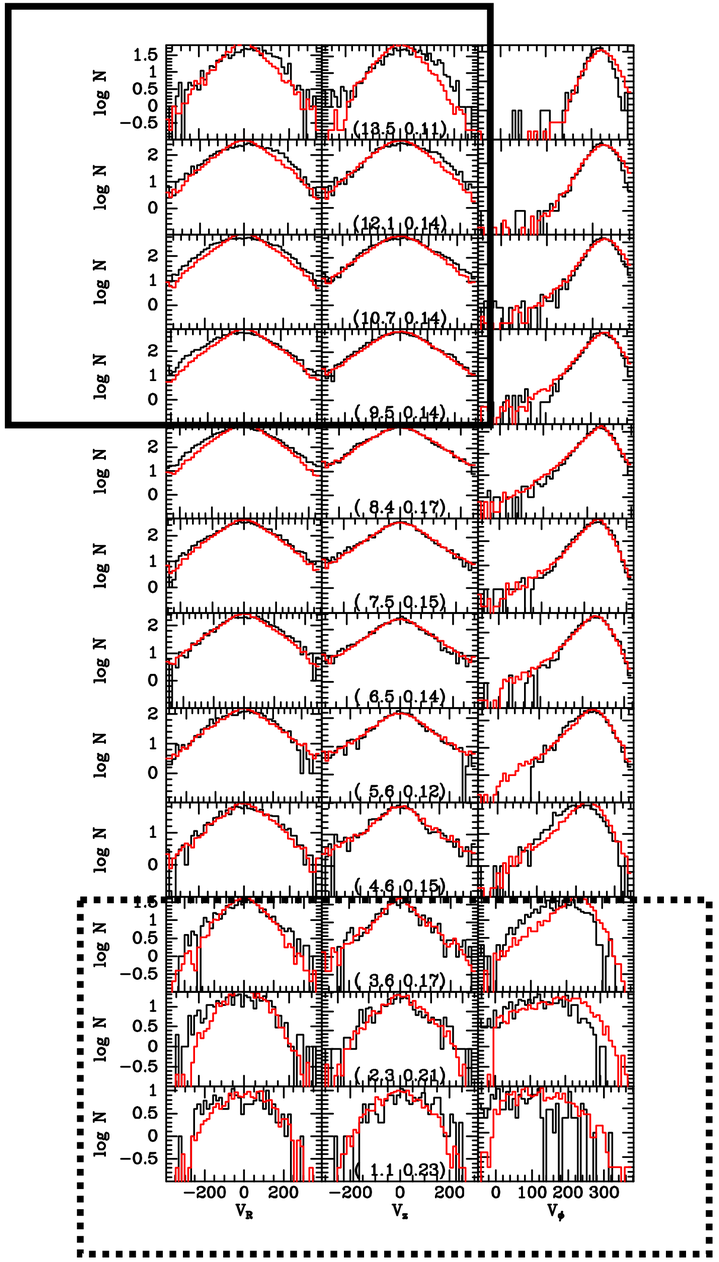




速度分布のフィットの例

outer disk





モデル（赤）は、ショットノイズを無視すればVz, VRの分布は左右対称。
outer disk は、左右対称なモデルからずれている。
spiralなどの摂動かもしれない。

bulge 領域は結構モデルが良くない。
軸対称モデルで無理やりbarなどを見ているので仕方ない。

化学組成分布のフィットの例

バルジあたりは変だが、軸対称モデルの割には頑張っている

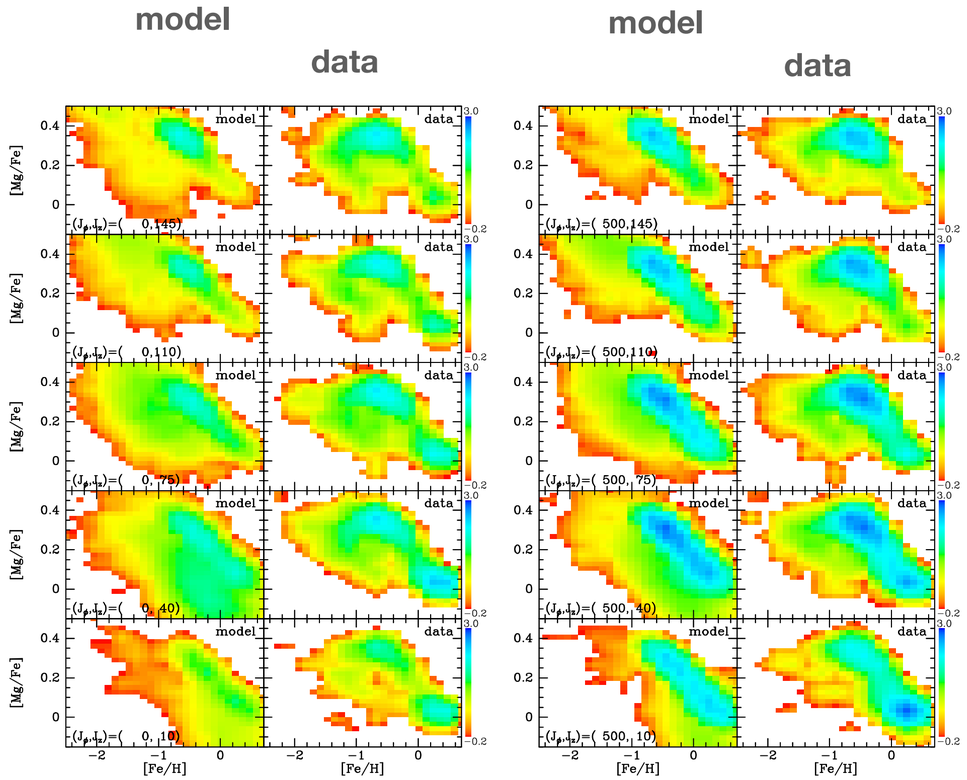


Figure 15. The chemical composition of stars that lie in 10 cells in action space. The left column is for cells with $J_\phi \in (-200, 200)\,\mathrm{kpc\,km\,s^{-1}}$ and J_z in intervals that increase from bottom to top; specifically $(0, 20)$, $(25, 55)$, $(60, 90)$, $(95, 125)$ and $(130, 160)\,\mathrm{kpc\,km\,s^{-1}}$. The right column is for $J_\phi \in (300, 700)\,\mathrm{kpc\,km\,s^{-1}}$ and the same intervals in J_z. Within each column the right panels show the distribution of real stars, while the left panels show mock stars.

Jphi が大きい領域はそれなりに良いモデル

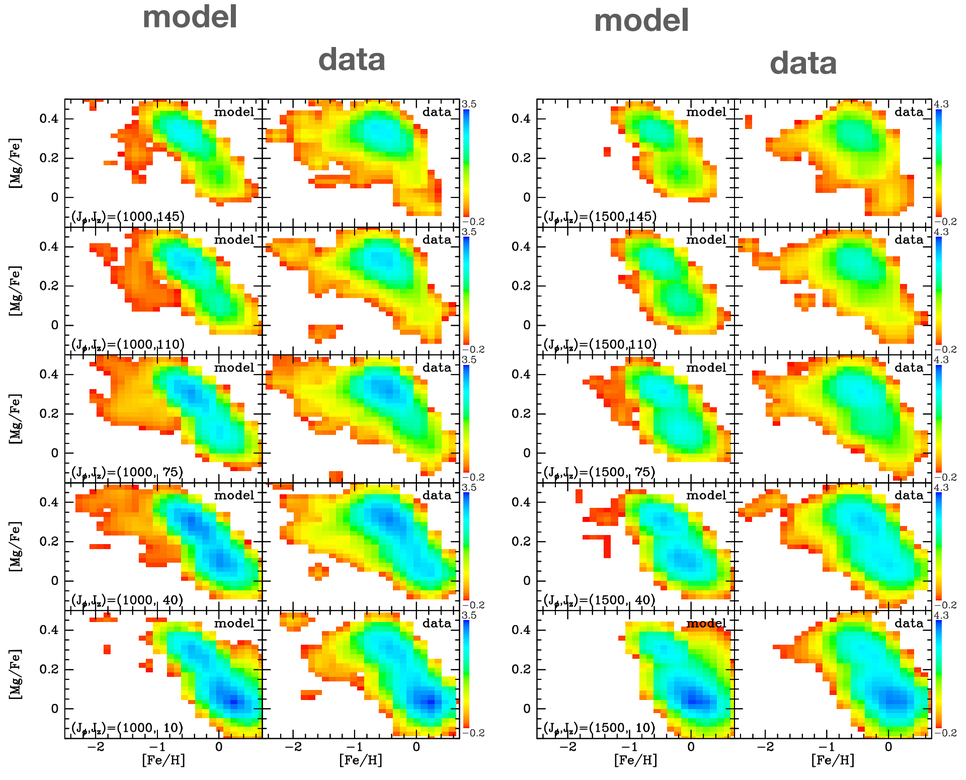


Figure 16. The same as Fig. 15 but for $J_\phi \in (800, 1200)\,\mathrm{kpc\,km\,s^{-1}}$ (left column) $J_\phi \in (1300, 1700)\,\mathrm{kpc\,km\,s^{-1}}$ (right column).



化学組成分布の予言

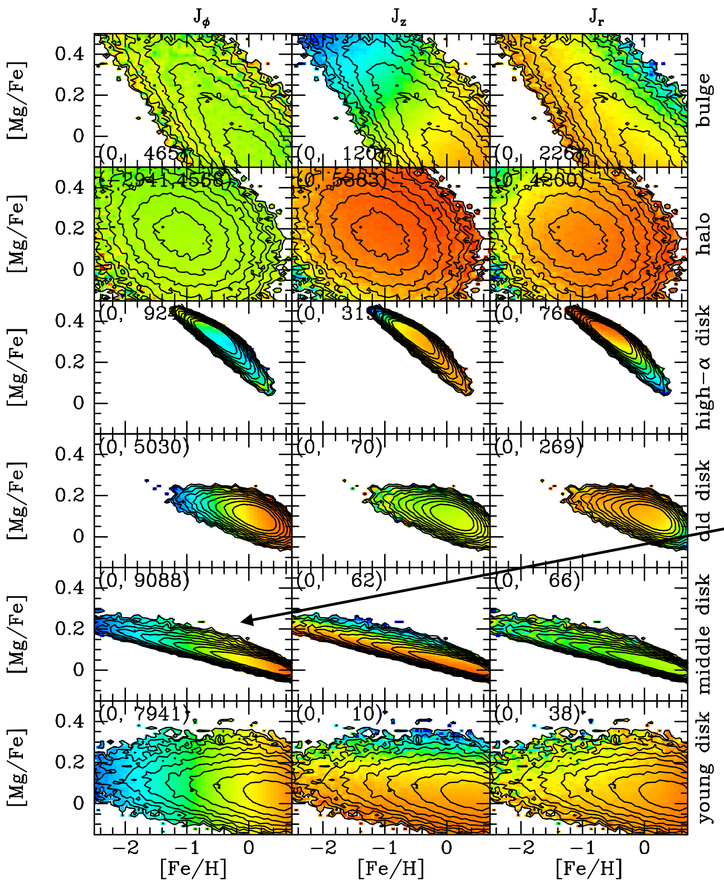


Figure 18. The components in chemical space. Each row shows the structure of the component listed on the right-hand edge. Contours show the density of stars of the given chemistry while colours show, from left to right, the mean values of J_ϕ, J_z and J_r. The numbers in brackets give the values in kpc km s^{-1} corresponding to red and blue hues. The density increases by a factor 2 between adjacent contours.

halo 領域は

metal-poor … Jr が大きい(離心率が大きい)

metal-rich … Jr が小さい(離心率が小さい)

だが、これはBinney曰く、

「mildly retrograde Enceladusが降着したというシナリオとは真逆」と書かれている。

服部はこの論拠を完全には理解できていないが、Binneyは

「Enceladus が徐々にradicalize されたはず」

「それならば、metal-rich ほどJr が大きいはず」

と解釈しているのだろう。

low-alpha disc は

metal-poor … Jphi が大きい(半径が大きい)

metal-rich … Jphi が小さい(半径が小さい)

だが、これはmetallicity gradient があることに対応。

d [Fe/H] / d R = - 0.081 dex /kpc

これは先行研究とも一致する。

このような議論ができるのが、今回のモデルの優位性。

ABSTRACT

A chemodynamical model of our galaxy is fitted to data from DR17 of the APOGEE survey supplemented with data from the StarHorse catalogue and gaia DR3. Dynamically, the model is defined by action-based distribution functions for dark matter and six stellar components plus a gas disc. The gravitational potential jointly generated by the model's components is used to examine the galaxy's chemical composition within action space. The observational data probably cover all parts of action space that are populated by stars. The overwhelming majority of stars have angular momentum $J_\phi > 0$ implying that they were born in the Galactic disc. High-α stars dominate in a region that is sharply bounded by $J_\phi \lesssim J_\phi(\text{solar})$. Chemically the model is defined by giving each stellar component a Gaussian distribution in ([Fe/H],[Mg/Fe]) space about a mean that is a linear function of the actions. The model's 47 dynamical and 70 chemical parameters are chosen to maximise the likelihood of the data given the model in 72 three-dimensional velocity spaces and 30 two-dimensional chemical spaces. The circular speed falls steadily from $237\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ at $R = 4\,\mathrm{kpc}$ to $218\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ at $R = 20\,\mathrm{kpc}$. Dark matter contributes half the radial force on the Sun and has local density $0.011\,\mathrm{M_\odot\,pc^{-3}}$, there being $24.5\,\mathrm{M_\odot\,pc^{-2}}$ in dark matter and $26.5\,\mathrm{M_\odot\,pc^{-2}}$ in stars within 1.1 kpc of the plane.

Key words: Galaxies, stars: kinematics and dynamics – star, Galaxy: abundances – The Galaxy, Galaxy: disc – The Galaxy, Galaxy: fundamental parameters – The Galaxy, Galaxy: structure

We started this work in the hope that it would prove possible to model the chemical structure of action space satisfactorily by assigning a simple chemical pdf to each stellar component. To an extent the quality of the fits displayed by Figs 15 to 19 dashes this hope. Eleven parameters are required to specify the pdf of each component and yet the model fails to capture some significant aspects of the data. Complete success in our endeavour would have vindicated the reality of the components that we represent with individual DFs. The limited success actually achieved leaves the reality of the standard components open to doubt.