Charting Galactic Accelerations with Stellar Streams and Machine Learning : Nibauer et al. (arXiv: 2205.11767)

GAゼミ@20220630 石垣

【アブスト】 銀河系の重力加速度場を、恒星ストリームの観測データから直接推定する手法を提案する。従来は、特定の重力ポテンシャルのモデルを仮定した上で、ストリームに所属する星の現在の位置と速度から母天体の軌道を計算し、ストリームの形状を最もよく再現するモデルパラメータ(e.g. スケール半径、軸比)を推定するのが一般的だった。それに対して今回の手法は、重力ポテンシャルのモデルを仮定せず、ストリームに沿って星の位置と速度が滑らかに変化するを制限として、観測データ(3D位置、3D速度)をフィットする。この手法を模擬ストリーム観測データに適用すると、3軸不等の重力ポテンシャルをよく再現できるだけでなく、より複雑な重力ポテンシャルも再現可能であることを示した。

【ゴール】銀河系重力ポテンシャルの制限 【オリジナリティ】 重力ポテンシャルの関数形の仮定なしで、ストリーム星の各位置での重力加速度を得られる

【ロジック】

I. 背景: ・ 恒星ストリームは矮小銀河や球状星団が銀河系の重力ポテンシャルで潮汐破壊して形成される。ストリームは母天体である銀河・星団から離れると、銀河系の重力ポテンシャルの影響を受けて運動する。そのため、トレーサー天体の少ない銀河系ハローでの重力ポテンシャルを測定する上で、貴重な天体となっている。

・ 従来の方法では、特定の重力ポテンシャルのモデルを仮定し、その元でストリーム星の軌道を計算し、観測と最も合うモデルパラメータを制限する、という手法が使われてきた。この場合、ストリームを構成する星々が全て同じ軌道エネルギーをとるのが前提となっていて、現実を再現していない(図1)

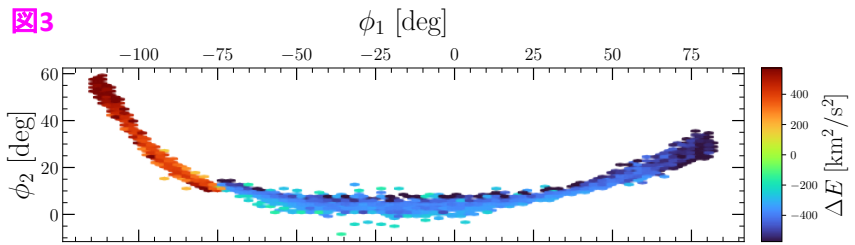
II. 手法(図2)

前提 (1)ストリームの各位置での接線方向は、その位置の速度ベクトルの方向と同じ、(2)ストリーム星の位置と速度は、ストリームに沿って単調増加する座標(例えばϕ_1)の滑らかな関数として、表される。

最適化:観測とモデルの差を最小化するような曲線を速さ(v)と位置ベクトル(**x**)をそれぞれニューラルネットワークで求める。例えば速さを推定する目的関数は、

$$\ell_\varphi(\varphi) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} w_n \left(v_\varphi(\gamma_n) - v_n\right)^2 + h\|\varphi\|_2^2,$$

図3



擬似データ(図3):3軸非対称のLogarithmic potential の元で、恒星ストリームを生成

III. 結果(図4)

図5: 従来のOrbit Fitting の方法(赤、水色)に比べて、今回の手法(緑)は仮定した重力ポテンシャルが生成するストリーム各点での加速度(黒)をよく再現している。Orbit fitting では、仮定する関数形が実際と違っている場合(水色)にバイアスが大きい。

図6:得られた6つのストリームでの加速度分布から、Logarithmic potential のモデルパラメータを推定できる。より複雑な重力ポテンシャルを再現することも可能。

【コメント】 データを最大限活用できる上で画期的。誤差やデータの欠けにどれだけ対応できるか?

図5

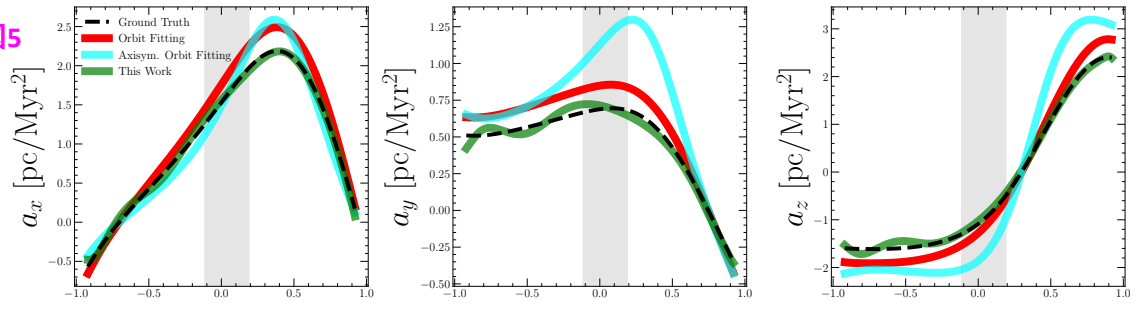


図6

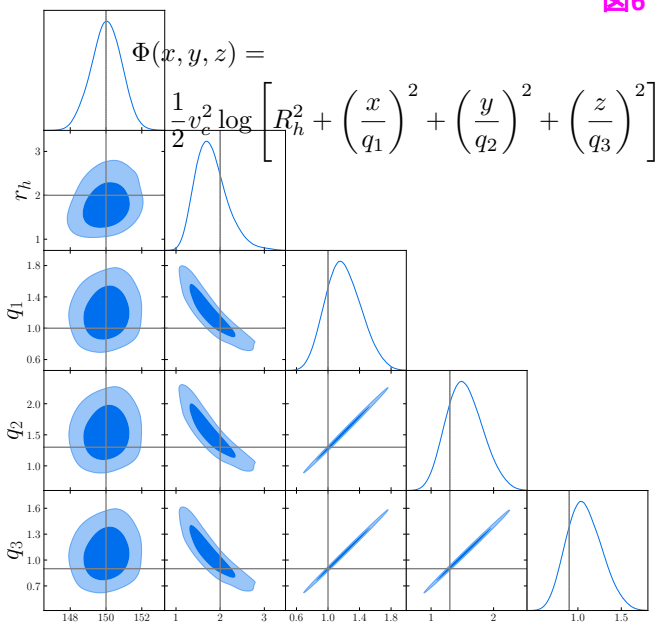


図1　ストリームのN体シミュレーション：　保存量であるLz、Eは、複雑な分布をしているが、ϕ_1が近い星どうしは、$E - Lz$面上でも近いところに分布している。

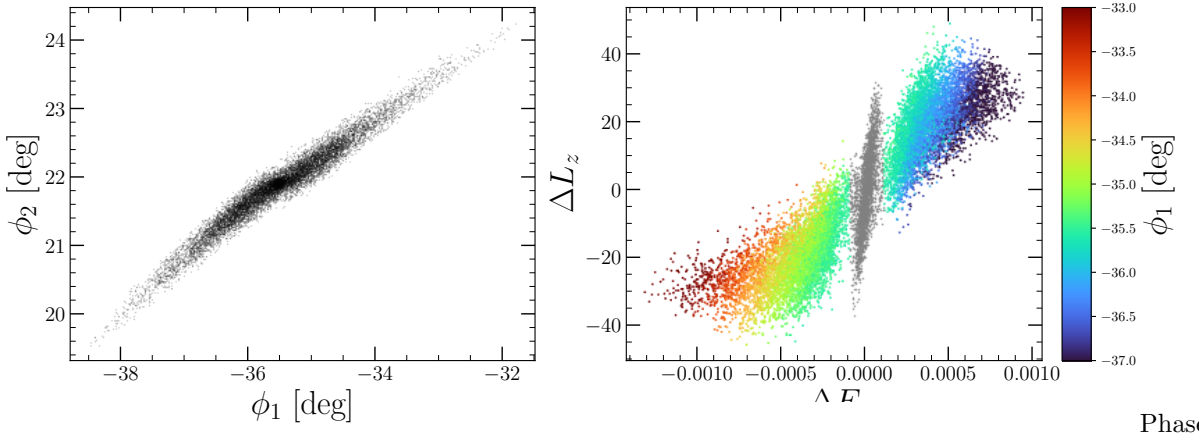


図2: ニューラルネットワークを使ったストリームモデルの構築の概念図

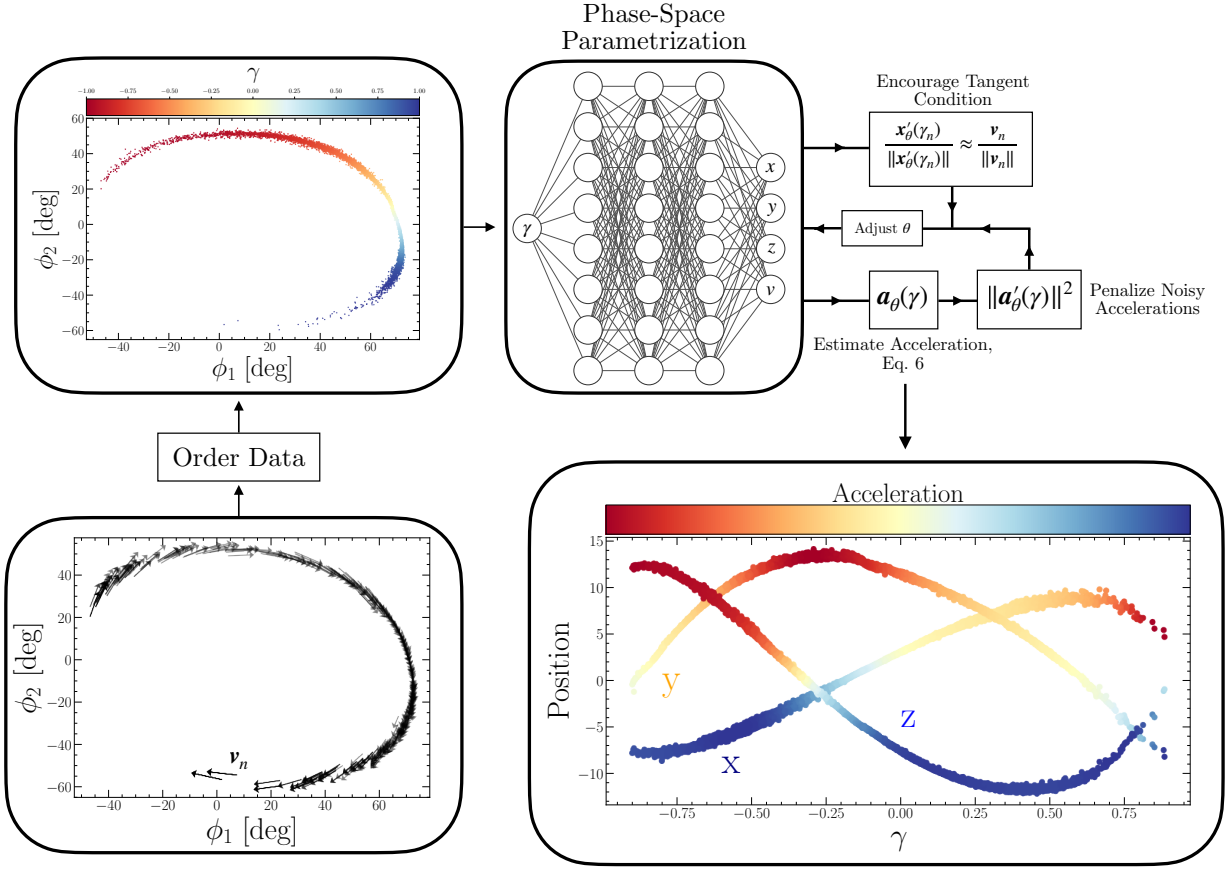


図4:フィットの結果（上：位置、下：速度）

