Charting the Galactic acceleration field II. A global mass model of the Milky Way from the STREAMFINDER Atlas of Stellar Streams detected in Gaia DR3
R. Ibata, K. Malhan, W. Tenachi et al. (arXiv:2311.17202)

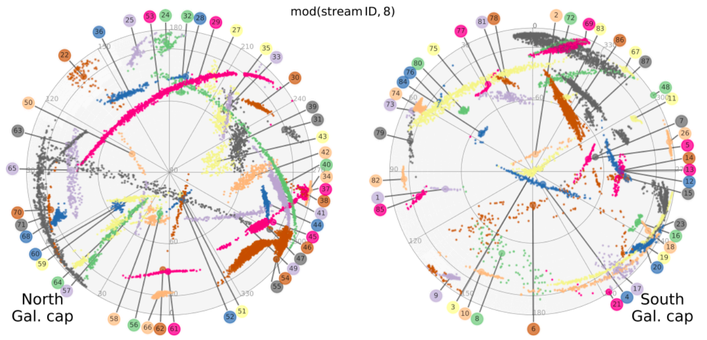
GAゼミ 2024.05.16 服部公平

【概要】（0）STREAMFINDERをGaia DR3に適用して発見された87個のストリーム構造(29個は新発見)についてのアトラス(地図帳)を公開する。
（1）Milky Way(MW)が孤立・摂動なしの仮定の下、long/thin stream 29個の力学解析からMWの質量分布を構築（DMハローは扁平、inner density slope=-1…NFW-like）。
（2）（1）のMWモデルにLMCの影響を追加し、Orphan stream (LMCの摂動が重要なストリーム)をモデル化。結果は先行研究と整合(本文「データと比較すると微妙」)。
（3）興味深いストリーム：(a) OmegaCen のストリーム(既知)を辿った先に続きがあった。(b) かつてSgr dwarfに付随しており、Sgr と共に降着してきた球状星団の残骸と思われるストリームを発見。(c) GD-1 のhot component を再確認[epicyclic overdensityが面白い]。[(d) high-energy stream が面白い]

赤字は服部の主観

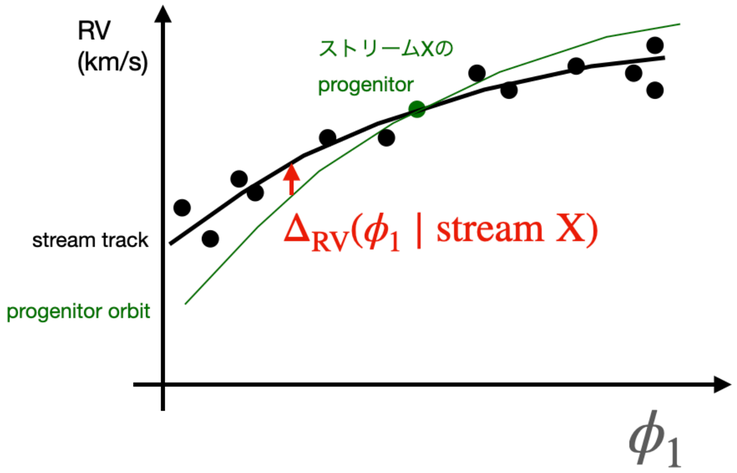
【ゴール】新たなストリームの検出。それによるMilky Way (MW) 重力場の推定。

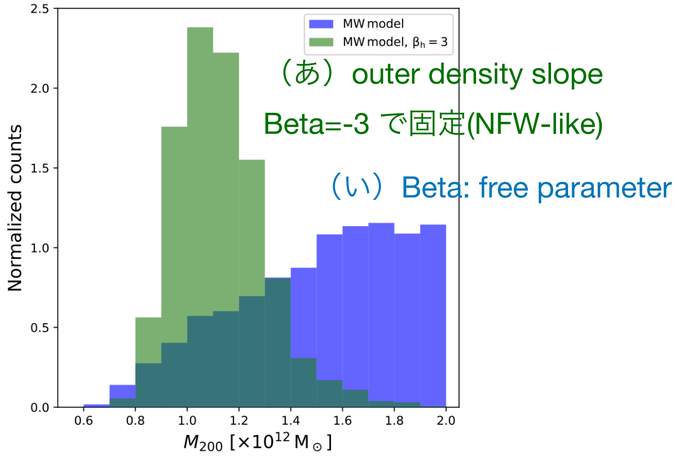
【オリジナリティ】（0）STREAMFINDERをGaia RV data に拡張(右図)。
（1）stream fitting 業界のorbit-fit法(stream = orbitとみなす方法)の補正方法を考案。



【話題1：（概要1）に関連】orbit-fit 法の補正方法

（従来）ストリーム(星団残骸)を母星団(progenitor)の軌道と同一視することで、MWの重力場モデルを制限。
（今回）任意のストリームXについて、テスト粒子計算(母星団の重力場＋MWの重力場)でストリームXのモデルを作り、stream trackと母天体軌道からのズレ Δ を計算する。実験によると、現実的な範囲のMW重力場なら Δ はモデル依存しない。まず、全てのストリームについてΔを先に計算する。補正項Δ、母天体の現在位置/速度から、任意のMW重力場モデルに対してストリーム形状が求められるので、N=29のストリームデータに合うMW重力場のモデルパラメタを推定。





（あ）outer density slope
Beta=-3 で固定(NFW-like)

（い）Beta: free parameter

	（あ）		（い）	
quantity	$\beta_h = 3$	$\mathcal{L}_{\max}^{\beta_h=3}$	$\beta_h = \text{free}$	$\mathcal{L}_{\max}^{\beta_h=\text{free}}$
$\rho_{h,\odot}[\frac{M_\odot\,pc^{-3}}{1000}]$	11.4 ± 0.7	11.4	$11.6^{+0.7}_{-0.8}$	11.2
$q_{m,h}$	$0.749^{+0.026}_{-0.030}$	0.735	$0.709^{+0.033}_{-0.026}$	0.727
γ_h	$0.97^{+0.17}_{-0.21}$	1.03	$0.99^{+0.26}_{-0.30}$	1.14
β_h	3	3	$2.53^{+0.42}_{-0.16}$	2.54
$r_{0,h}$[kpc]	$14.7^{+4.7}_{-1.0}$	21.4	$14.7^{+4.4}_{-3.3}$	19.5
$M_{d+t}[10^{10}\,M_\odot]$	$4.20^{+0.44}_{-0.53}$	4.17	$4.34^{+0.50}_{-0.65}$	4.27
M_t/M_{d+t}	$0.095^{+0.143}_{-0.014}$	0.201	$0.09^{+0.10}_{-0.01}$	0.14
$h_{R,d}$[kpc]	$2.172^{+0.184}_{-0.079}$	2.241	$2.198^{+0.153}_{-0.062}$	2.251
$h_{z,d}$[kpc]	$0.347^{+0.007}_{-0.010}$	0.348	$0.345^{+0.009}_{-0.010}$	0.349
$h_{R,t}$[kpc]	$1.62^{+0.72}_{-0.13}$	1.74	$1.77^{+0.86}_{-0.17}$	2.07
$h_{z,t}$[kpc]	$0.856^{+0.030}_{-0.020}$	0.858	$0.861^{+0.022}_{-0.025}$	0.860
$M_{R<50}[10^{12}\,M_\odot]$	$0.458^{+0.030}_{-0.026}$	0.477	$0.490^{+0.024}_{-0.033}$	0.518
$M_{200}[10^{12}\,M_\odot]$	$1.09^{+0.19}_{-0.14}$	1.24	$1.70^{+0.20}_{-0.49}$	2.00
$M_d[10^{10}\,M_\odot]$	$3.44^{+0.44}_{-0.54}$	3.34	$3.52^{+0.54}_{-0.51}$	3.65
$M_t[10^{10}\,M_\odot]$	$0.40^{+0.61}_{-0.09}$	0.84	$0.39^{+0.43}_{-0.07}$	0.62

【話題２：（概要２）に関連】LMCなどの補正

（今回の論文ではMW+LMCだけが用いられているが、Section 6 の記述はM31, M33, SMC, Sgrもあって興味深い）

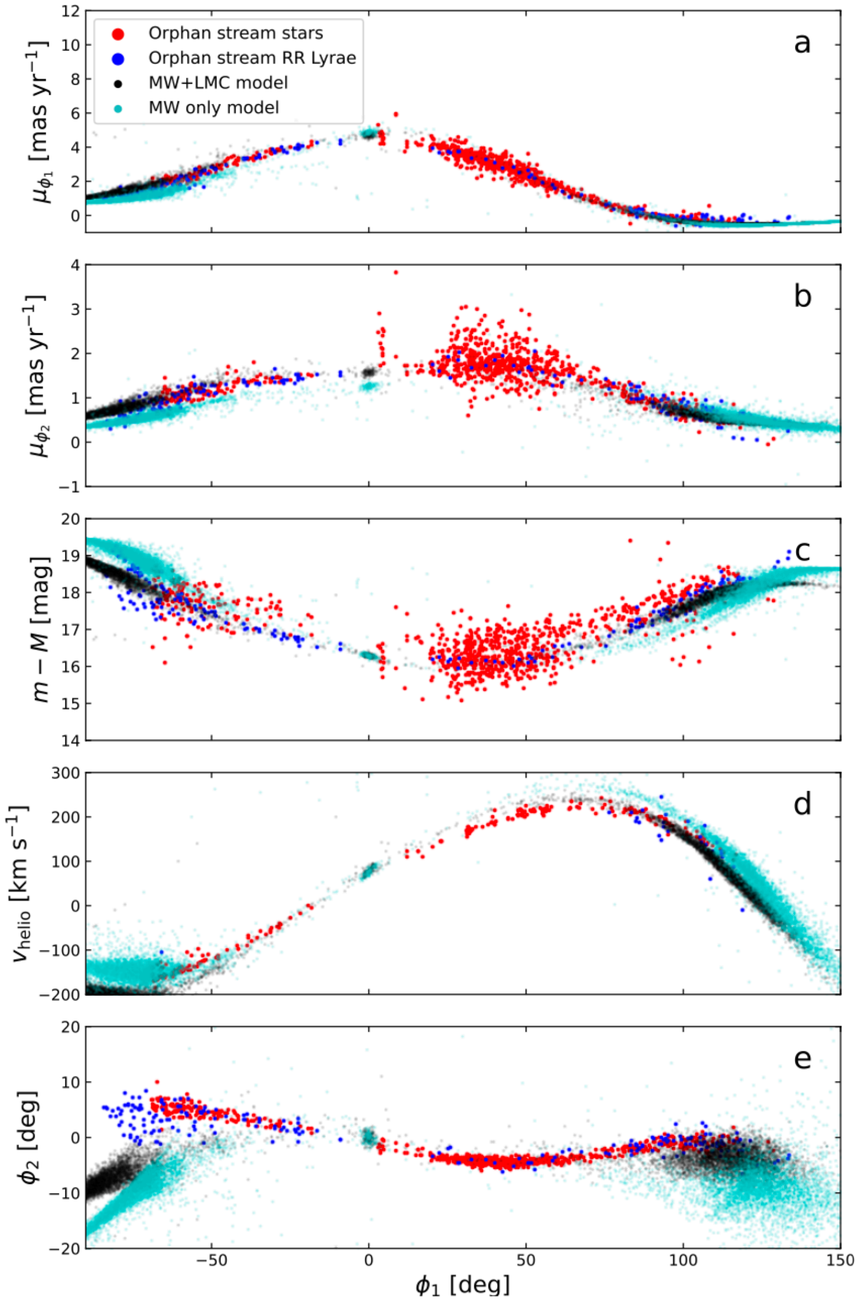
（従来）MWを孤立系だと思い、MW中心=固定された座標原点だと思ってストリームのモデルを構築(注:2009-2015くらいまで主流な仮定。)

（2018-）LMCが意外と重いことが判明し、Orphan stream などはLMCの影響を受けて折れ曲がってしまっていることが判明。W+LMC+stream のモデル化が開拓され、LMC質量推定にも用いられている(Erkal et al. 2019)。

（今回）話題１の方法論でMilky Way のstatic modelを構築したので、そのモデルにLMCモデルを入れた。

最尤法でM_LMC = 1.5e11 Msun という結果(先行研究と整合)だが、モデル（水色）はデータの大局的な振る舞いを再現できていない。DMハローが軸対象、double-powe-lawでモデル化していることの限界か？

【話題３：（概要３）に関連】：スペースの関係で次のページ



【コメント】

（１）Δ という補正項で従来の問題を鮮やかに解決している。

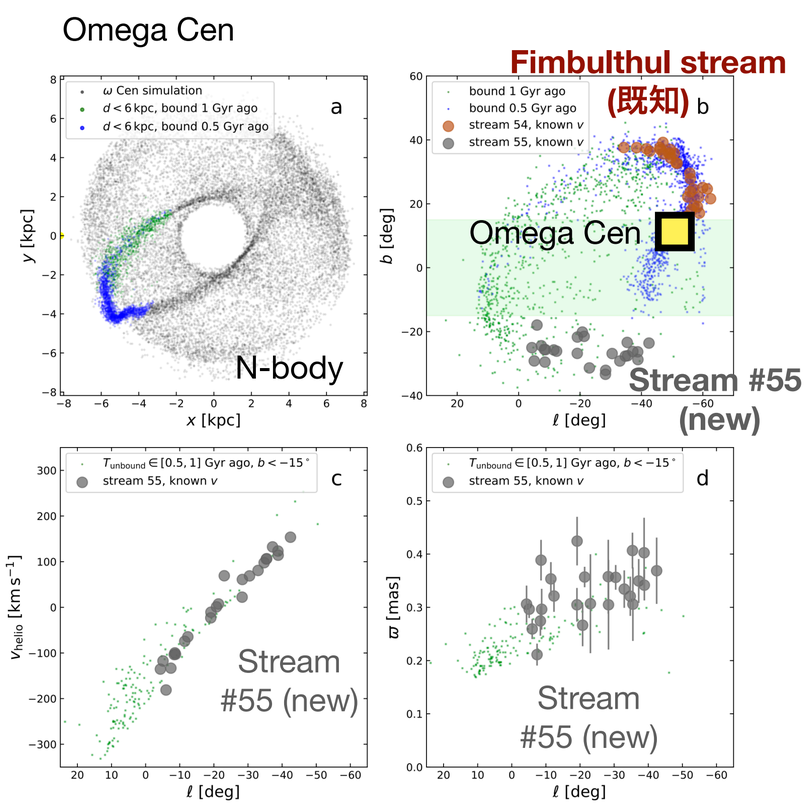
（２）Section 6 に書かれているように、local group galaxies の影響(M31, M33など)を考慮できる定式化を考えたのは非常に面白い。

（３）今回の定式化では、MW,LMCはそれぞれの系の中心から見た場合は時間変動しない というモデルを採用している。そのため、LMCはMWに近接してもdeformation されることはない。一方、MW-LMC interaction の先行研究で明らかになったのは、このようなdeformation の重要性すなわちDMをlive DM halo particles で表現することの重要性である。この両者の乖離を解決できる近似手法を作ることが今後重要だろう。

（とは言うものの、今回の手法はM31, M33 からの影響を考えるくらいなら問題なさそうである。）

今回の計算でさえ50,000 CPU hour が必要とのことであり、MCMCをやるなら高速化が鍵となる。

【話題３：（概要３）に関連】



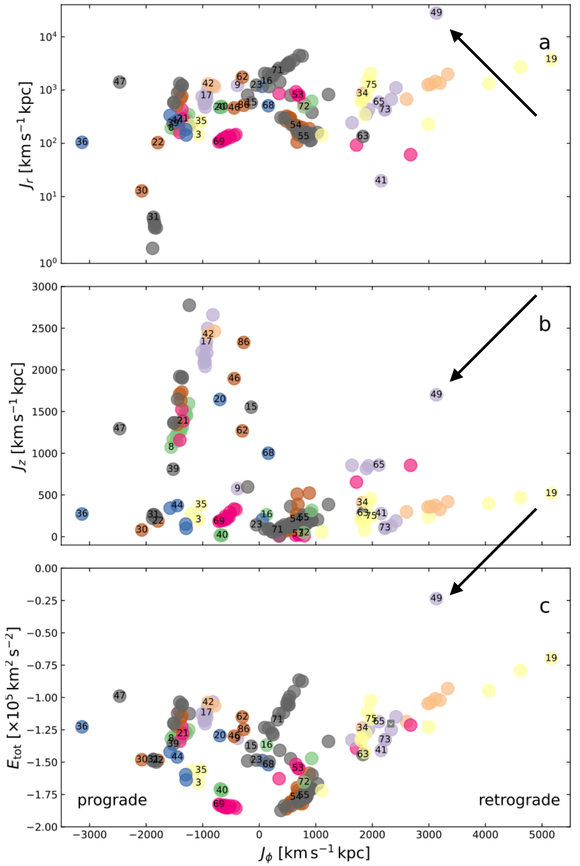
Stream #49 (Gaia-1):
Retrograde, high-energy stream

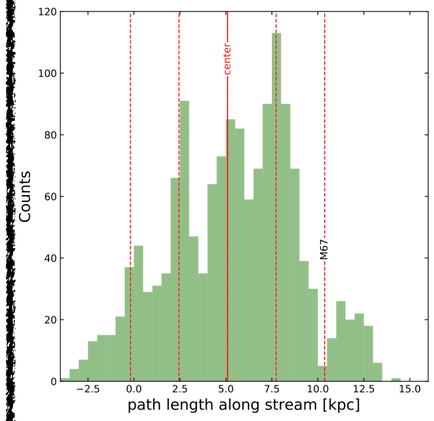
・このストリームは、r=9 kpc に位置するが、ちょうど今outer halo からinner halo に向かってきている軌道。

・唯一高精度のデータがある星(Gaia DR3 3578950965917470208)は、[Fe/H] = -1.8でありそこまでmetal-poorでないので、このストリームはfirst infall でというよりむしろ古参のストリームっぽい。

・銀河間を彷徨って渡ってきたストリームでなければ、このストリームは昔からMWに束縛されていたと思える。すると、「このストリームが束縛されている必要がある」という制約によってMW重力場、特に質量が制限できる可能性がある。

・この星のparallax は既にparallax_over_error = 9.5 （距離の誤差10.5%）だが、今後のGaia Data Release で精度が向上すれば、この１つの星だけでMW重力場に知見が得られるかもしれない。





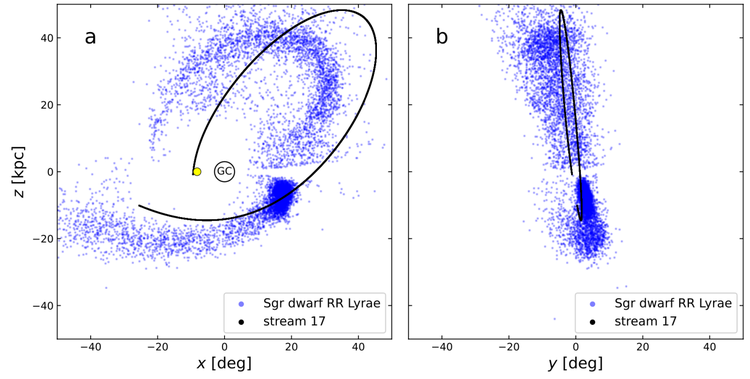
GD-1 stream で見られる等間隔なoverdensity。もしgap (underdensity) が DM subhalo 遭遇で形成されるなら、等間隔にならない。
→ Epicyclic overdensity説。

横軸：GD-1stream に沿ったストリームの物理的弧長[kpc]

Stream #17:
かつてSgrに属していおり、Sgrと共にMWに降ってきた球状星団があったと仮定する。この仮想的な球状星団が破壊された残骸がこのストリームであると解釈できる。

青：Sgr stream (RR Lyrae stars),

黒：Stream #17 track

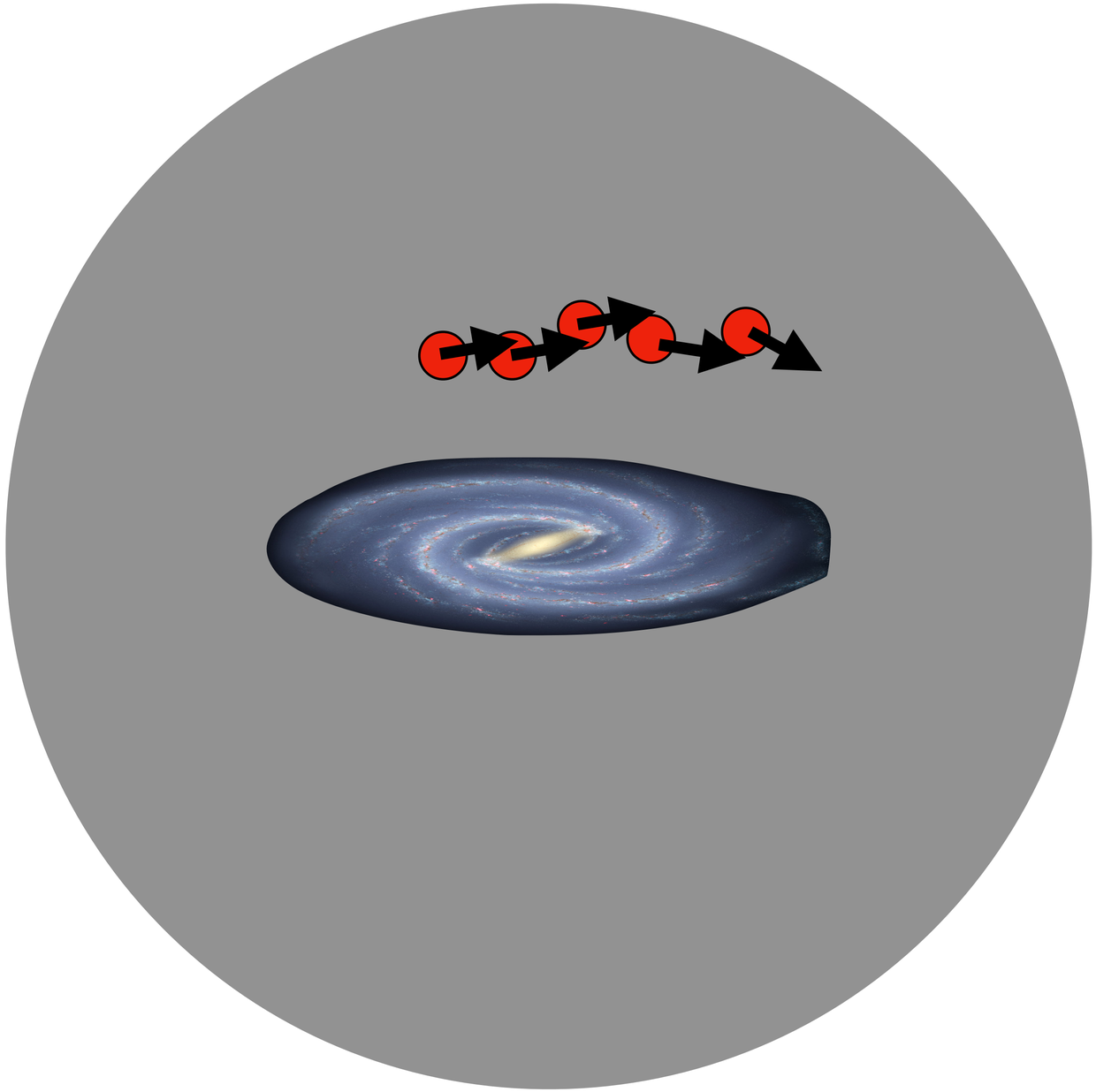


【話題１】に関連して　（この分野に詳しくない方のための説明）

重力場を知るためには場所ごとの加速度が必要だが、個別の星の現在の位置、速度(snapshot)だけからは個別の星の感じている加速度はわからない。

星団の残骸であるストリームが発見できれば、ストリームを母天体の軌道と同一視することで、星々のsnapshotだけから軌道の時間変化を推定できる（Koposov et al. 2010）。

すると、軌道の曲がり具合から、どのような重力場モデルが良いのか推定できる。しかし、厳密にはストリームは軌道に沿っていない(Sanders & Binney 2013a,b)ので、上記の方法で重力場を推定すると系統誤差を生む。



以下、自分が読んだ際のメモ

arXiv:2311.17202

Charting the Galactic acceleration field
II. A global mass model of the Milky Way from the STREAMFINDER Atlas of Stellar Streams detected in Gaia DR3

ABSTRACT

We present an atlas and follow-up spectroscopic observations of 87 thin stream-like structures detected with the STREAMFINDER algorithm in *Gaia* DR3, of which 29 are new discoveries. Here we focus on using these streams to refine mass models of the Galaxy. Fits with a double power law halo with the outer power law slope set to $-\beta_h = 3$ yield an inner power law slope $-\gamma_h = 0.97^{+0.17}_{-0.21}$, a scale radius of $r_{0,h} = 14.7^{+4.7}_{-1.0}\,\mathrm{kpc}$, a halo density flattening $q_{m,h} = 0.75 \pm 0.03$, and a local dark matter density of $\rho_{h,\odot} = 0.0114 \pm 0.0007\,\mathrm{M_\odot\,pc^{-3}}$. Freeing β yields $\beta = 2.53^{+0.42}_{-0.16}$, but this value is heavily influenced by our chosen virial mass limit. The stellar disks are found to have a combined mass of $4.20^{+0.44}_{-0.53} \times 10^{10}\,\mathrm{M_\odot}$, with the thick disk contributing $12.4 \pm 0.7\%$ to the local stellar surface density. The scale length of the thin and thick disks are $2.17^{+0.18}_{-0.08}\,\mathrm{kpc}$ and $1.62^{+0.72}_{-0.13}\,\mathrm{kpc}$, respectively, while their scale heights are $0.347^{+0.007}_{-0.010}\,\mathrm{kpc}$ and $0.86^{+0.03}_{-0.02}\,\mathrm{kpc}$, respectively. The virial mass of the favored model is $M_{200} = 1.09^{+0.19}_{-0.14} \times 10^{12}\,\mathrm{M_\odot}$, while the mass inside of 50 kpc is $M_{R<50} = 0.46 \pm 0.03 \times 10^{12}\,\mathrm{M_\odot}$. We introduce the Large Magellanic Cloud (LMC) into the derived potential models, and fit the "Orphan" stream therein, finding a mass for the LMC that is consistent with recent estimates. Some highlights of the atlas include the nearby trailing arm of ω-Cen, and a nearby very metal-poor stream that was once a satellite of the Sagittarius dwarf galaxy. Finally, we unambiguously detect a hot component around the GD-1 stream, consistent with it having been tidally pre-processed within its own DM subhalo.

Section 1

STREAMFINDER results for the full Gaia DR3 dataset

N=33million RV data
Spectroscopic survey data
Dedicated follow-up data

Publish the full Gaia DR3 stream catalog

Outline:
Section 2. アルゴリズムの変更点
Section 3. follow-up spectroscopic observations
Section 4. new sky maps and detections.
Section 5. modelling of the streams assuming that MW is axisymmetric and that its center defines the origin of an inertial frame around which the streams orbit
Section 6. generalize the model to allow the Local Group galaxies to move under the influence of each other, and the streams will be modelled as dissolving systems.
Section 7. how we use test particle simulations to correct simple orbit integrations, and thus greatly speed up the exploration of the parameters of the model.
Section 8. stream-fitting analysis
Section 9. we briefly summarize some salient streams

Section 2

stream contaminant

$$\ln\mathcal{L} = \sum_{\text{data}} \ln\left[\eta\mathcal{P}_{\text{stream}}(\theta) + (1-\eta)\,\mathcal{P}_{\text{cont}}\right], \quad (1)$$

eta: stream fraction

Stream model: a stellar population along a simple orbit convulsed by Gaussian

$$\begin{aligned}\mathcal{P}_{\text{stream}}(\theta) =& \mathcal{P}_{\text{length}} \times \mathcal{P}_{\text{width}} \times \mathcal{P}_{\text{LF}} \times \mathcal{P}_{\text{color}} \times \mathcal{P}_{\mu} \times \mathcal{P}_{\varpi} \\ & \times \mathcal{P}_{v} \\ =& \mathcal{P}_{\text{stream}}^{\text{Paper II}}(\theta) \times \mathcal{P}_{v}\,, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}&\mathcal{P}_{\text{cont}}(\alpha, \delta, \mu_{\alpha}, \mu_{\delta}, G, G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}}, \varpi, v) = \\ &\mathcal{P}_{\text{cont}}^{\text{Paper II}}(\alpha, \delta, \mu_{\alpha}, \mu_{\delta}, G, G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}}, \varpi) \\ &\mathcal{P}_{\text{GMM}}(v|\alpha, \delta, G, G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}}, \varpi)\,. \end{aligned} \quad (3)$$

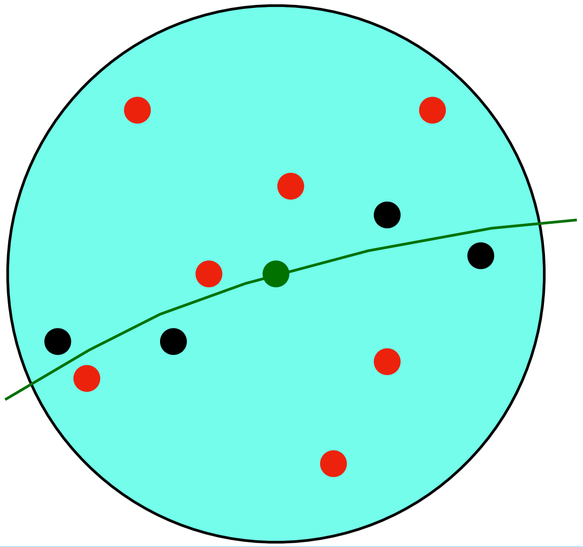
L = 20 deg



width = 50 pc

P_mu = (5 km/s dispersion)
P_pi = (50 pc line-of-sight distance dispersion)
P_v = (5 km/s dispersion)

This PGMM term is calculated from the available velocities in large (5.6 deg × 5.6 deg) tiles of a zenithal equal area projection of the sky.



ある星について、半径10 degを考える。
この星の運動情報からいくつかtrial orbitsを生成する。

それぞれのtrial orbitをストリームモデルと考えて、

k:　trial orbitと整合的な星

(n-k): trial orbitと整合的でない星

とする。

このストリームモデルが良いモデルかどうかは、下記のモデル尤度で判定する。

normalize するための項

$$\ln\mathcal{L}_1 = \sum_{j=1}^{k} \ln\left(\eta\mathcal{P}_{j,\mathrm{model}} + (1-\eta)\mathcal{P}_{j,\mathrm{cont}}\right) - \ln\mathcal{P}_{j,\mathrm{cont}}\,, \tag{4}$$

k個の黒い星に関するmixture model

- **trial orbitと整合するk個の星を全てstreamとみなすのではない**
- **k個の星の一部[eta] がstream, [1-eta] が背景星**

$$\ln\mathcal{L}_2 \approx \sum_{j=1}^{n-k} \ln\left((1-\eta)\mathcal{P}_{j,\mathrm{cont}}\right) - \ln\mathcal{P}_{j,\mathrm{cont}} \tag{5}$$
$$= (n-k)\ln(1-\eta)\,,$$

(n-k)個の赤い星に関する尤度

- **trial orbitと整合しない(n-k)個の星は全て背景星**

モデル尤度　ln L = ln L1 + ln L2

$$\ln\mathcal{L} = (n-k)\ln(1-\eta) + \sum_{j=1}^{k} \ln\left(1-\eta+\eta\frac{\mathcal{P}_{j,\mathrm{model}}}{\mathcal{P}_{j,\mathrm{cont}}}\right), \tag{6}$$

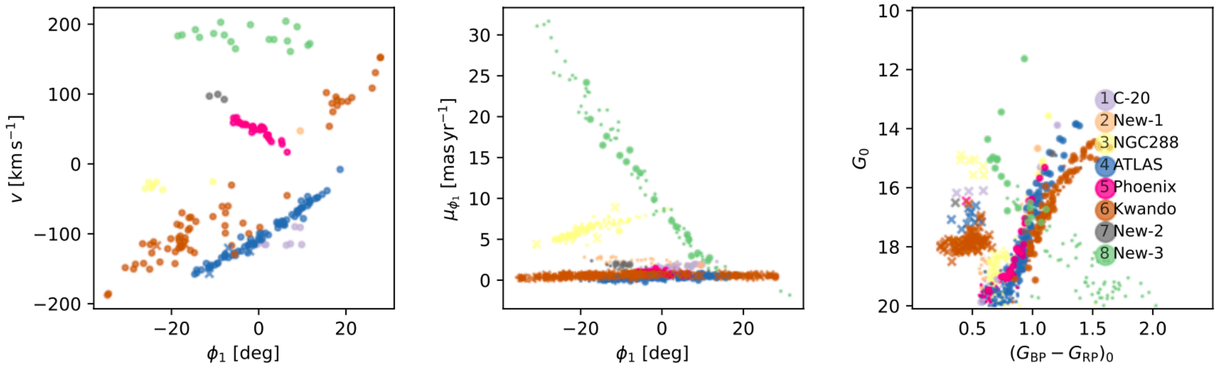
ln L - k を最終的な尤度とする。

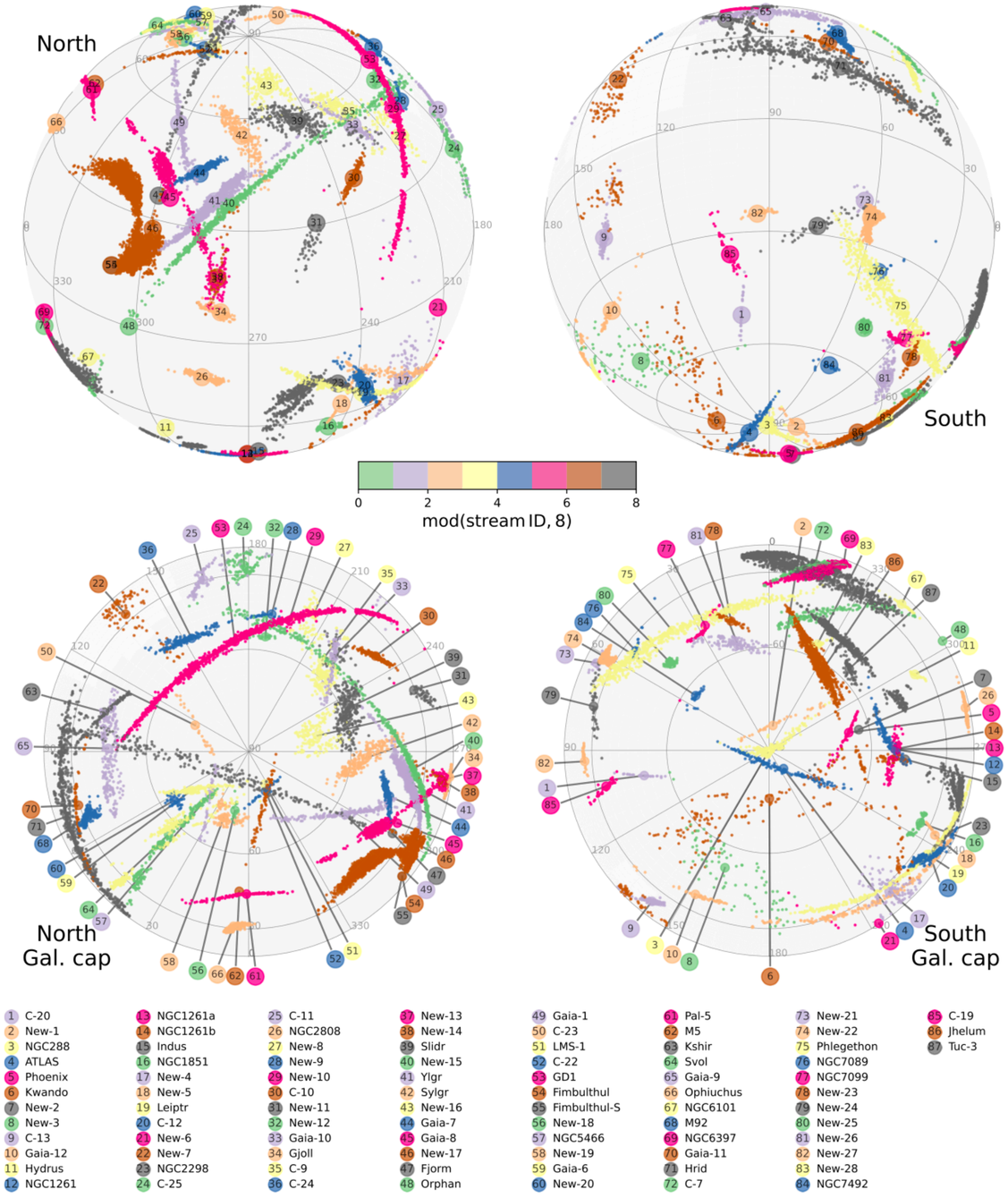
$$\ln\hat{\mathcal{L}} = \ln\mathcal{L} - k\,, \tag{7}$$

kが大きいモデルにペナルティが出るように設計。

Section 4

N=24540 non-RR Lyrae stars with ln Lhat > 19.8 (6-sigma detection)





Section 5　　MW は孤立系、MW中心が動かない

MW model

$$\rho_d(R,z) = \frac{\Sigma_d}{2h_z}\exp\left(-\frac{R}{h_R}-\frac{|z|}{h_z}\right). \qquad (8)$$

$$\rho_s(s) = \rho_0\left(\frac{s}{r_0}\right)^{-\gamma}\left(1+\frac{s}{r_0}\right)^{\gamma-\beta} e^{-s^2/r_t^2}, \qquad (9)$$

where $s = \sqrt{R^2+z^2/q_m^2}$ is an ellipsoidal coordinate.

r_t = 1000 kpc で固定

バルジ：McMillan (2017) で固定

Parameters

structure of MW … 11 parameters (thin/thick disks [3x2], DM halo [5])
GD-1 stream … 4 parameters (centroid known)
the other 28 streams … 6 parameters (6D phase-space information)

Data

29 long and thin streams
N=1397 data points:
… 1098 stars with RV
… 5 globular clusters
… 294 Gaia RR Lyrae stars (no RV)

補助データ　stellar disk 回転曲線… Eilers et al. (2019), R<15 kpc only (warpがあるので外縁部データ無視)

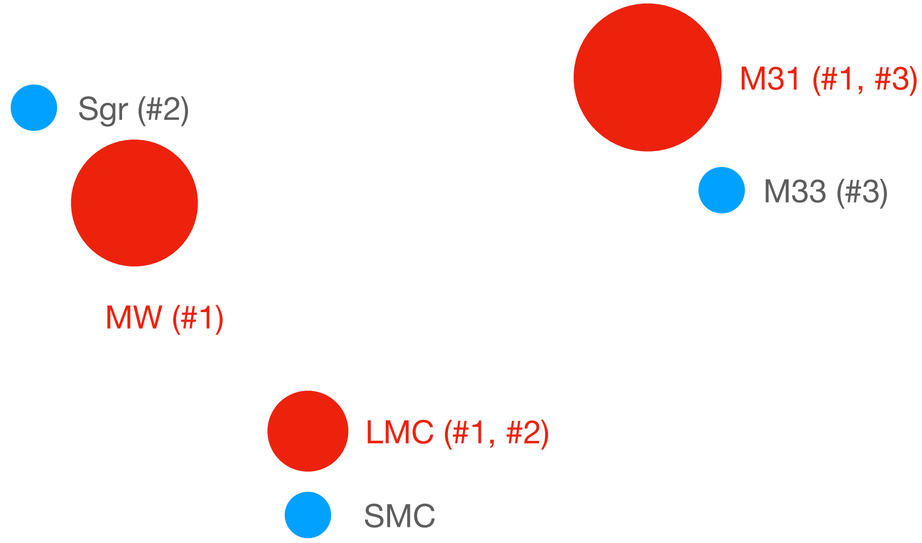
HI gas 終端速度 … McClure-Griffiths & Dickey (2007, 2016), bar 付近は非円運動があるので無視

Vertical force at z=1.1 kpc … Kuijken & Gilmore (1991)
stellar density measurements near the North Galactic Pole (z< 5kpc) … Ibata et al. (2017b)…　実質的には thin/thick の割合を制限するのに利用

Section 6

6つの銀河の影響を考えた場合のストリームモデルについて

(major galaxies) MW, M31, LMC
(other galaxies) Sgr , M33, SMC



それぞれの銀河は「動く重力場」としてモデル。
それぞれの銀河は自分自身の中心から見ると時間依存しないと仮定。
過去は5 Gyr まで遡る。

#1 major galaxies は、viral 半径でtruncateされている。
#2 LMC, Sgr は、dynamical friction考慮
#3 M31, M33 は、local group galaxies の重心から離れる向きのDark energy の斥力を考慮 $\ddot{x} = H_0^2 \Omega_\Lambda x$

t=0

stream progenitor を上記の6つの銀河の時間変動重力場のもとで軌道を逆方向に時間積分。

t=-T

stream progenitor の形状をPlummer profile (M: mass, a: scale radius)で仮定。

N=1e4 のテスト粒子を生成。

t=-T からt=0まで、軌道を順方向に時間積分 。

その際、テスト粒子は「progenitor からの重力場＋６つの銀河の重力場」の影響を考慮。

progenitorのmass loss もモデル化（テスト粒子がprogenitorから10 a 以上離れたら、1/N倍だけprogenitor の質量を減らす）

t=0

これを全てのストリームについて行うのは計算が膨大なので、今回はfull specの計算は行わない。

Section 7

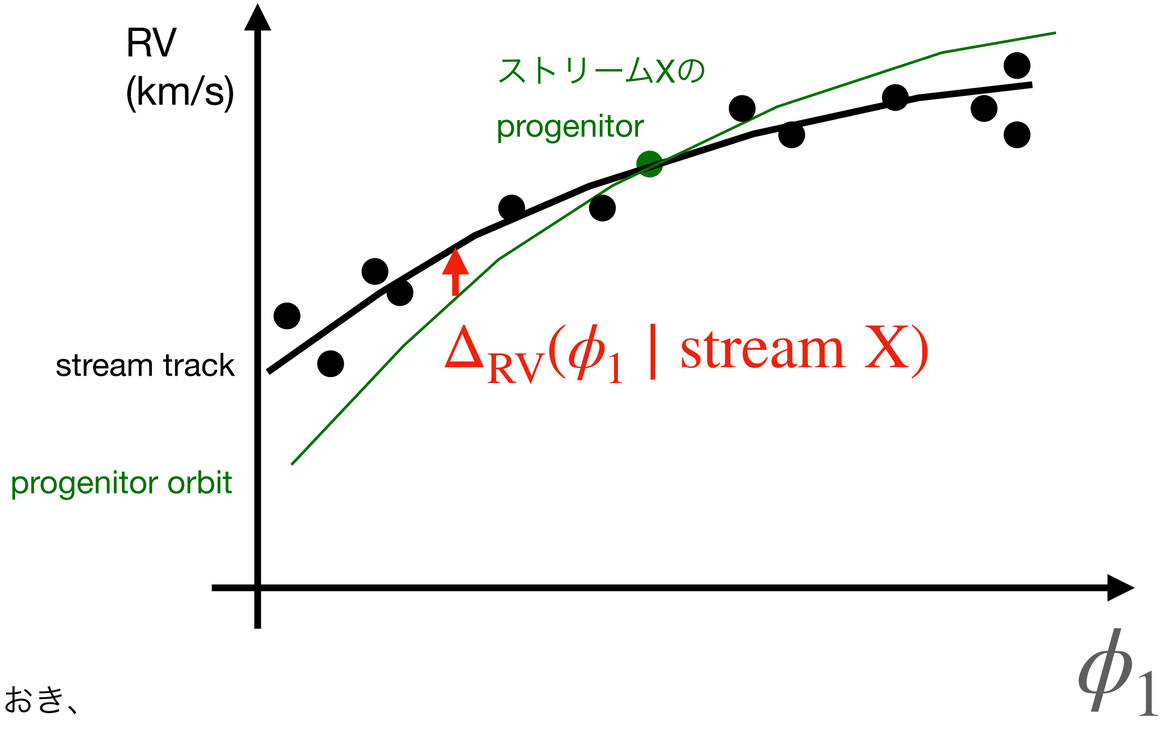
Section 6 の計算を使って、Section 5 のMCMCを改善する試み。

$\Delta_\Theta(\phi_1)$

stream はprogenitor orbit から僅かにずれている。そのため、stream=orbit と見做してfitを行うと正しく重力場を推定できない（系統誤差）。
各streamについて、stream(x,v)= orbit(x,v) + Delta(phi_1) のような補正モデルを考える。
Delta は、ストリームの伸びている方向に沿った角度座標 phi_1 の関数。

Set up

Section 5 で、
・MW以外の質量をゼロ
・MW重力場をMcMillan (2017) に固定
の仮定の下で、各ストリームに対するテスト粒子計算を行う。
Delta_RV (phi_1)　= RV_stream (phi_1) - RV_progenitor_orbit (phi_1)
…
のように、(RA, Dec, pmRA, pmDec, RV, DistanceModulus) について補正Delta を計算。



基本的には、reasonable なMWモデルであれば Delta は似ている。
そこで、reasonable なMWモデルで求めた Delta を各ストリームごとにあらかじめ用意しておき、
MCMCではこのDelta を用いてfitting を行う。