

銀河考古学研究における データアーカイブの役割

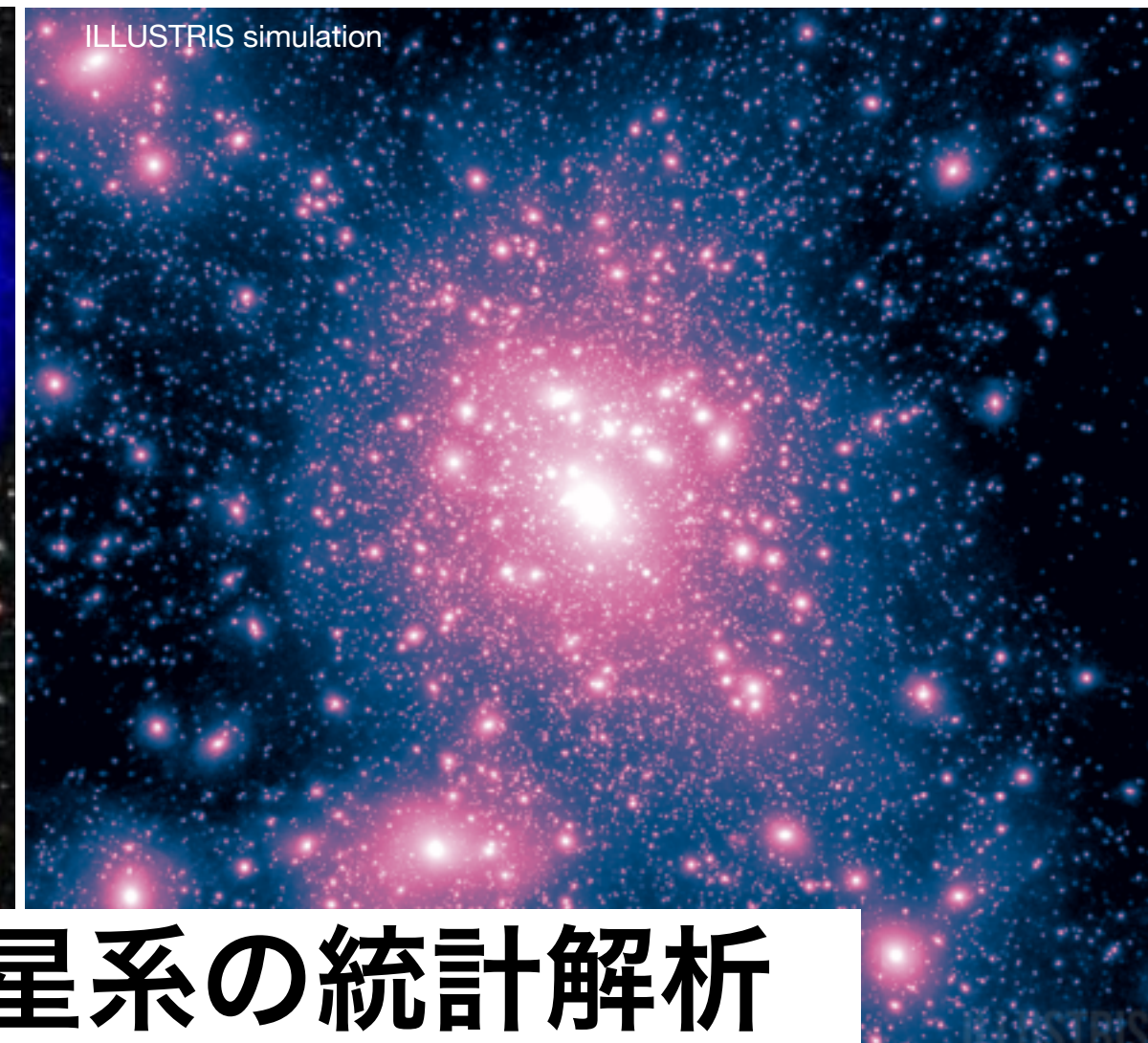
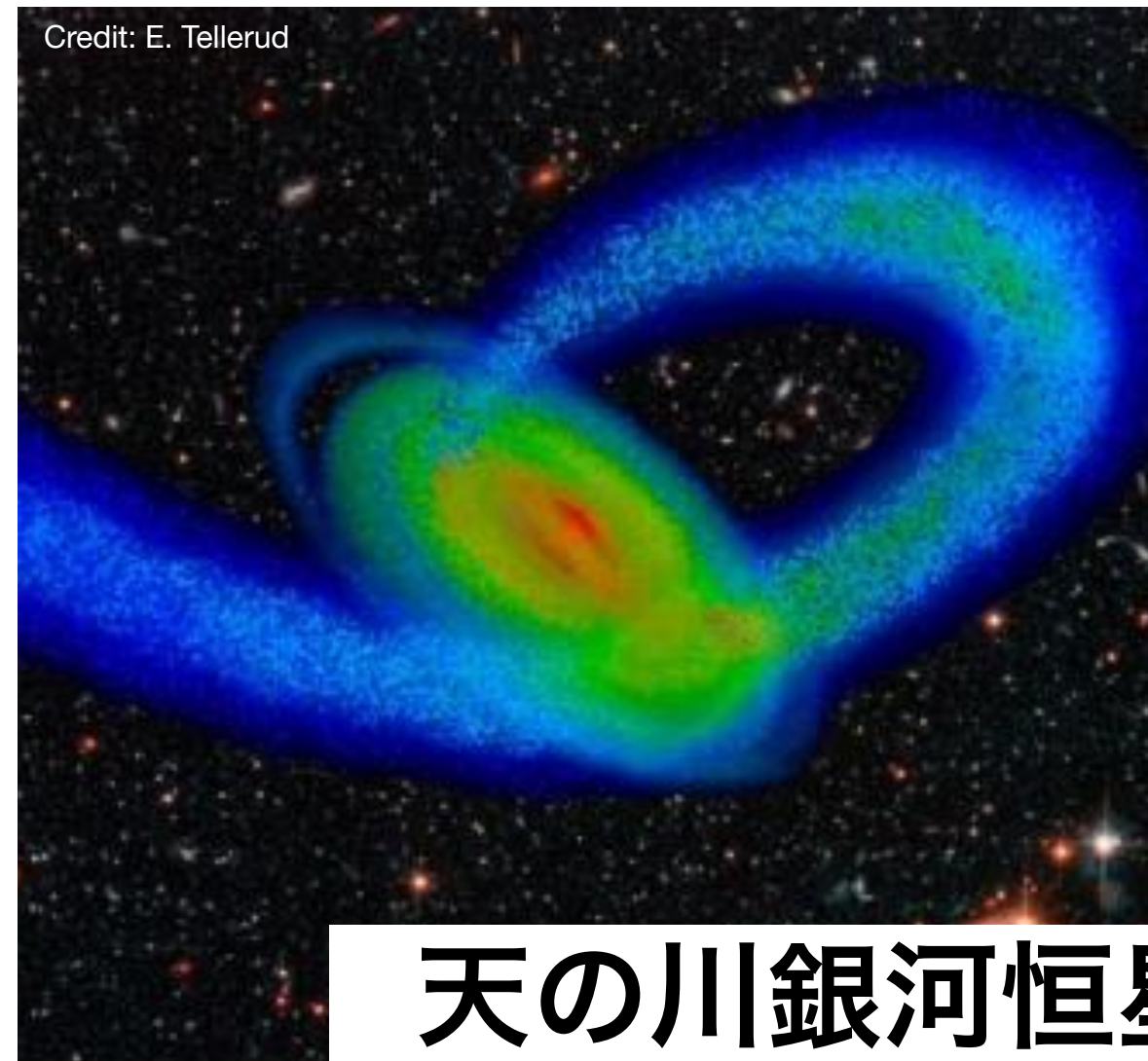
石垣美歩（東北大学）

概要

- 大規模観測プロジェクト（SDSS, Gaia等）開始以来、銀河考古学分野でアーカイブデータを駆使した研究が主流になりつつある
- 科学成果につなげるために、アーカイブデータに求められること
- アーカイブデータに期待すること
- HDS一次処理済みデータ（JVO）を使った標準星高分散分光ライブラリの試み

銀河考古学の科学目標

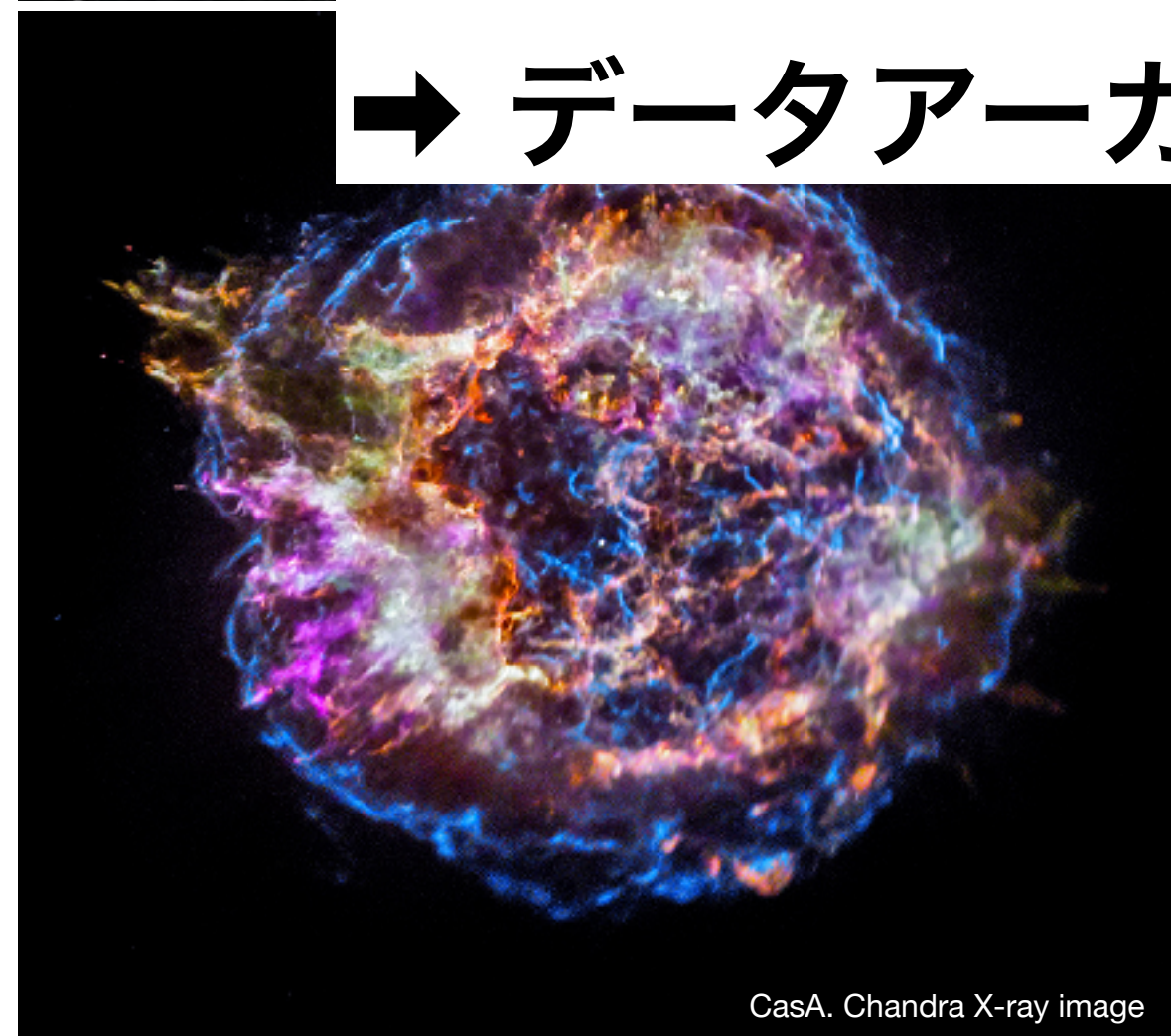
銀河 (天の川銀河)
形成



暗黒物質

天の川銀河恒星系の統計解析
→ データアーカイブの活用が鍵

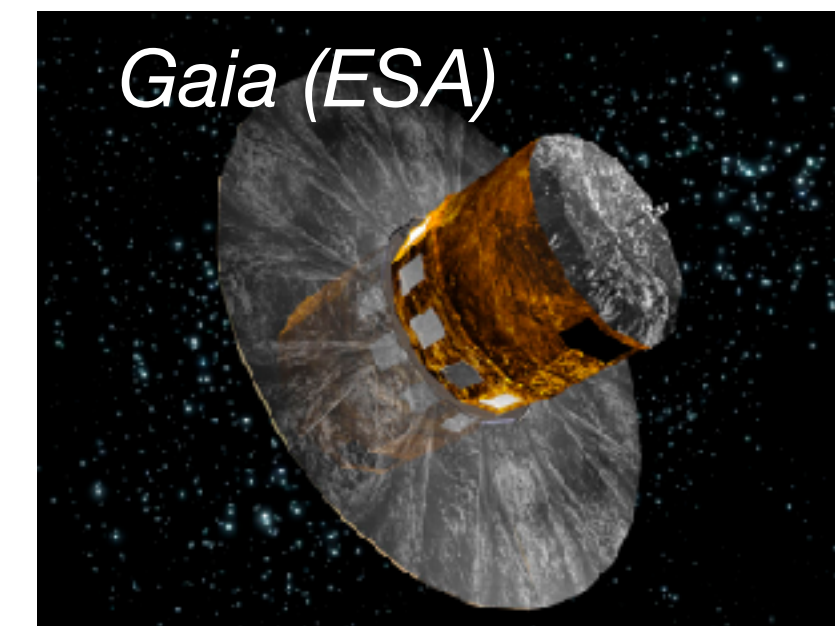
元素合成



宇宙論 (初代星)

アーカイブデータの重要性

例：Gaia衛星公開データ



- Gaia Data Release 2 (2018年4月): 約10億天体以上について位置、三角視差、固有運動
- 2018-2020年に出版されたNature論文 (Nature, Nature Astronomy) のうち、銀河考古学関連では少なくとも14本がGaia衛星公開データを活用
 - 銀河円盤のダイナミクス
 - 銀河系恒星ハローの起源 (過去の銀河合体の痕跡)
 - 恒星物理量の精密測定 (e.g. 年齢推定)

公開データを活用した銀河考古学

恒星（FGK型、変光星等）の位置、速度、元素組成、年齢

Photometry

- SDSS
- Dark Energy Survey
- Pan-STARRS
- HSC
- 2MASS
- WISE

Spectroscopy

- SDSS
- RAVE
- LAMOST
- GALAH
- DESI
- WEAVE
- PFS
- 4MOST

Astrometry

- Gaia
- JASMINE
- EUCLID
- WFIRST
- Gaia-NIR

Asteroseismology

- Kepler
- TESS

銀河系の恒星系を対象とした公開データサーベイ

■ Finished/On-going, ● Near-future

SDSS × Gaia カタログの活用例

1. SDSS CasJobs

- u, g, r, i, z
- Extinction
- Spectroscopic parameters (v_{los} , [Fe/H])

2. Cross-match with Gaia DR2 (via TOPCAT)

- Parallax
- Proper motion

3. Derivation of model-dependent quantities

- Galactic orbits
- 3D extinction
- Ages

4. Scientific analysis

TOPCATによるカタログ間のクロスマッチ

Table List:
2: gaia_spectro.csv
3: GALAH_DR2_1_catalog.fits
4: match(1,2)
5: 4xGAIA_DR2

Current Table Properties:
Label: 4xGAIA_DR2
Location: /Users/fishigakimiho/HMP/data/GALAH/GALAH_Sanders18_GaiaDR2.session-4
Name: 4xGAIA_DR2
Rows: 342,060 (244 apparent)
Columns: 204 (194 apparent)
Sort Order: gaia_dr2_id
Row Subset: kinematics_rvmatch
Activation Actions: 1 / 2

Table Browser for 5: 4xGAIA_DR2

source_id	ra	ra_error	dec	dec_error	parallax	parallax_err	pmra	pmra_error	pmdec	pmdec_error	duplicate	pho_g_n
328	4356798194949270272	244.46923	0.8363	-3.87848	0.5175	-2.801	0.8758	19.876	1.462	9.43	0.948	2.881
797	6069563133335671808	285.61139	0.9951	-50.83886	1.0157	-2.3279	1.1396	18.856	2.235	9.819	2.169	3.165
1401	6679381181194623296	306.61837	1.8852	-42.14974	1.0729	-4.7997	1.4551	25.839	1.877	32.751	2.022	1.975
2191	584420877186848512	133.25332	0.2179	6.54381	0.1758	-0.3079	0.2641	-27.949	0.441	11.798	0.341	2.412
7069	2783369793264211456	333.87157	0.8423	1.78887	0.8584	0.526	0.0481	-36.473	0.076	-13.898	0.079	1.865
12591	2944271533962677760	94.52221	0.8149	-17.64894	0.0206	0.2255	0.0195	-3.278	0.037	5.859	0.04	77922

Available Functions

```
f() astromXYZ( ra, dec, parallax )  
f() distanceBoundsEdsd( plxMas, plxErrorMas, lP )  
f() distanceEstimateEdsd( plxMas, plxErrorMas, lP )  
f() distanceQuantilesEdsd( plxMas, plxErrorMas, lP )  
f() distanceToModulus( distPc )  
f() eclToIcrs( xyz )  
f() epochProp( tYr, astrom6 )  
f() epochPropErr( tYr, astrom22 )  
f() galToIcrs( xyz )  
f() icrsToEcl( xyz )  
f() icrsToGal( xyz )  
f() modulusToDistance( distmod )  
f() polarXYZ( phi, theta, r )  
f() rvKmsToMasyr( rvKms, plxMas )  
f() rvMasyrToKms( rvMasyr, plxMas )  
C AU_YRKMS  
C C_KMS  
C PC_AU  
C PC_YRKMS  
KCorrections  
Lists  
Maths  
Shapes
```

Function epochProp(tYr, astrom6)

Description:
Propagates the astrometry parameters, supplied as a 6-element array, to a different epoch.
The input and output astrometry parameters are each represented by a 6-element array, with the following elements:

index	gaia_source	name	unit	description
0:	ra	deg	right ascension	
1:	dec	deg	declination	
2:	parallax	mas	parallax	
3:	pmra	mas/yr	proper motion in ra * cos(dec)	
4:	pmdec	mas/yr	proper motion in dec	
5:	radial_velocity	km/s	barycentric radial velocity	

The units used by this function are the units used in the gaia_source table.

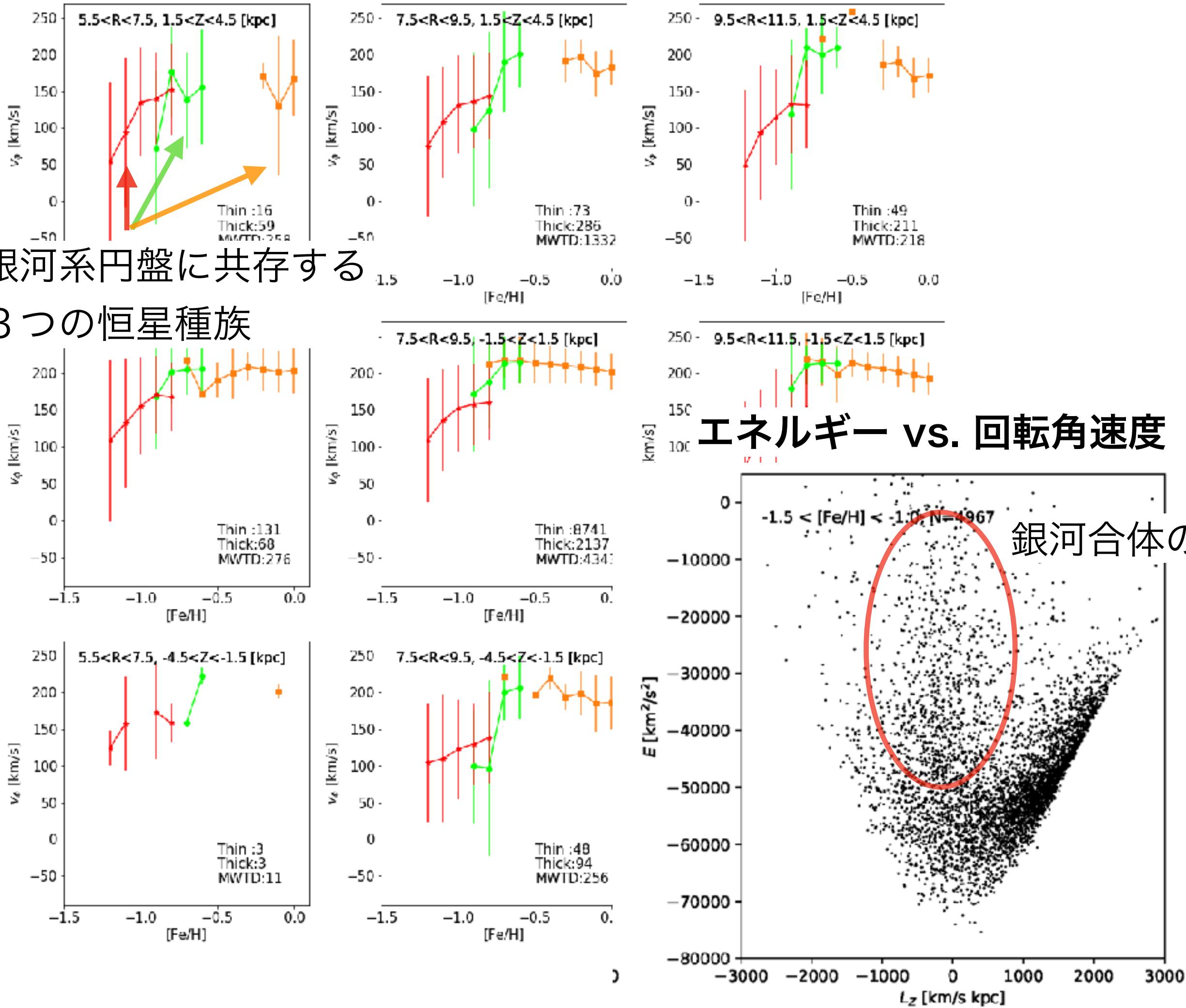
Parameters:
tYr (floating point)
epoch difference in years
astrom6 (array of floating point)
astrometry at time t0, represented by a 6-element array as above (a 5-element array is also permitted where radial velocity is zero or unknown)

関数：

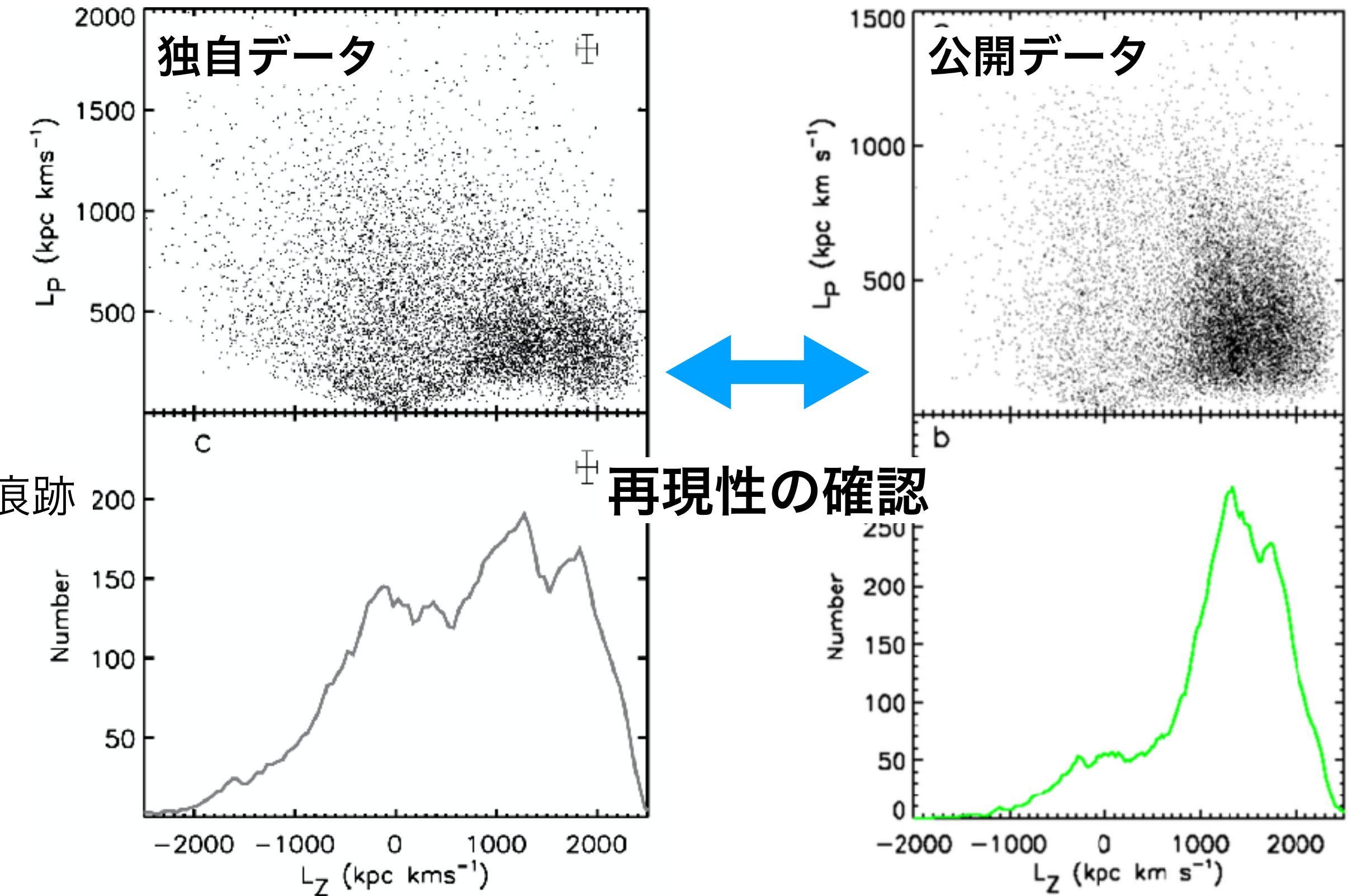
e.g. 測定値を任意の分点での値に変換する、視差から距離とその誤差を推定

科学研究への活用

恒星金属量 vs. 回転速度



独自のデータによる解析のクロスチェック



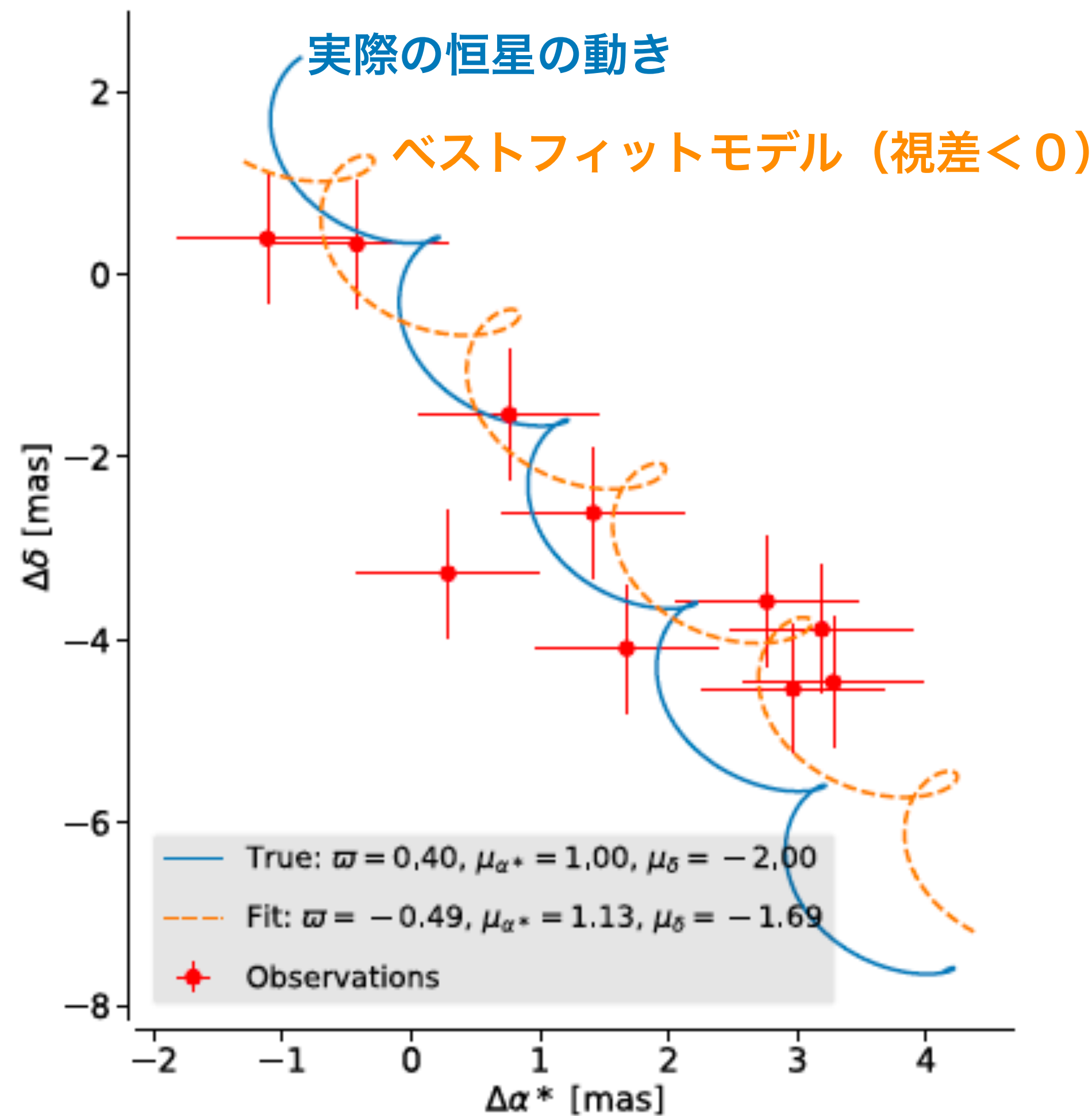
Carollo et al. 2019

アーカイブデータに求められるもの

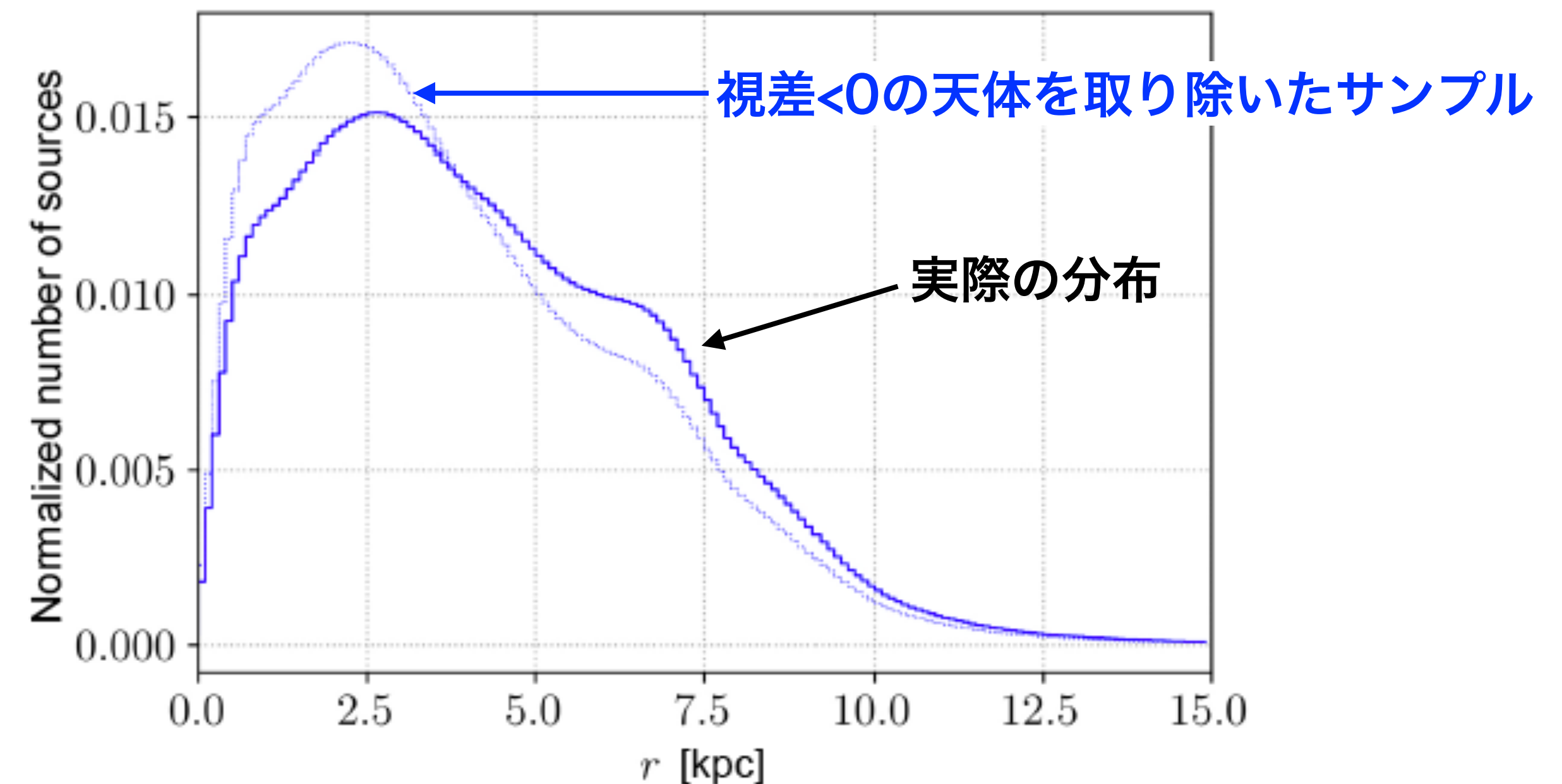
- 解析済みカタログの提供
 - データ量が膨大なため、個人で一様に処理するのが困難
 - 測光→等級・減光、分光→視線速度・元素組成等、位置天文→三角視差・固有運動
- 他サーベイとのクロスマッチ
- 誤差情報のユーザーへの伝達
- 定期的なアップデート
- 標準星を用いた測定値の系統誤差評価
 - 例：低分散分光サーベイ → 高分散分光データが存在する明るい恒星のリスト、物理量の評価

位置天文データの誤差の影響

Luri, Gaia collaboration et al. 2018

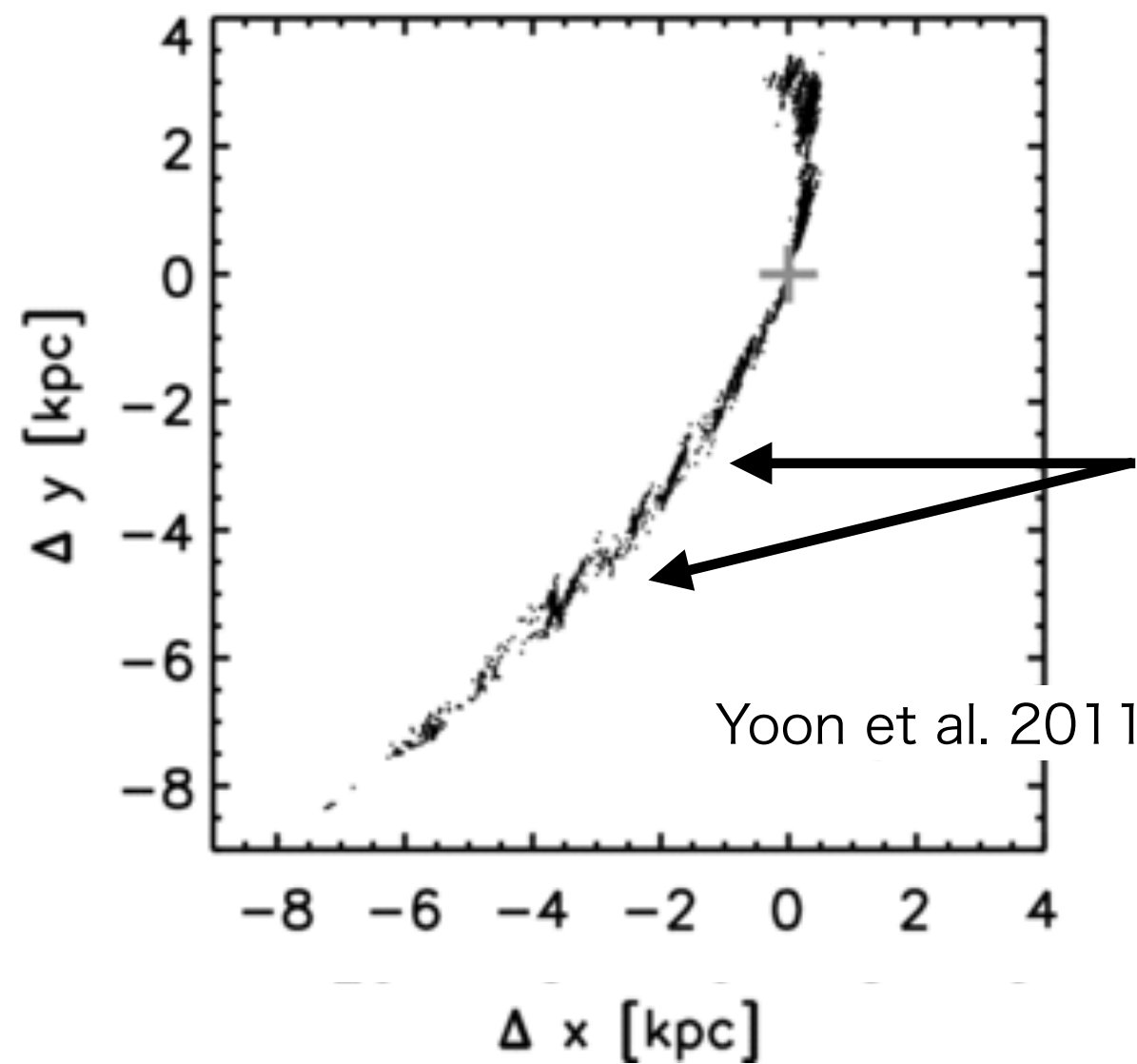


- 視差、固有運動推定の相関係数 (Covariance matrixの提供)
- 視差 <0 といった非現実的な値が生じうる



超低表面輝度天体：恒星ストリームの例

シミュレーション



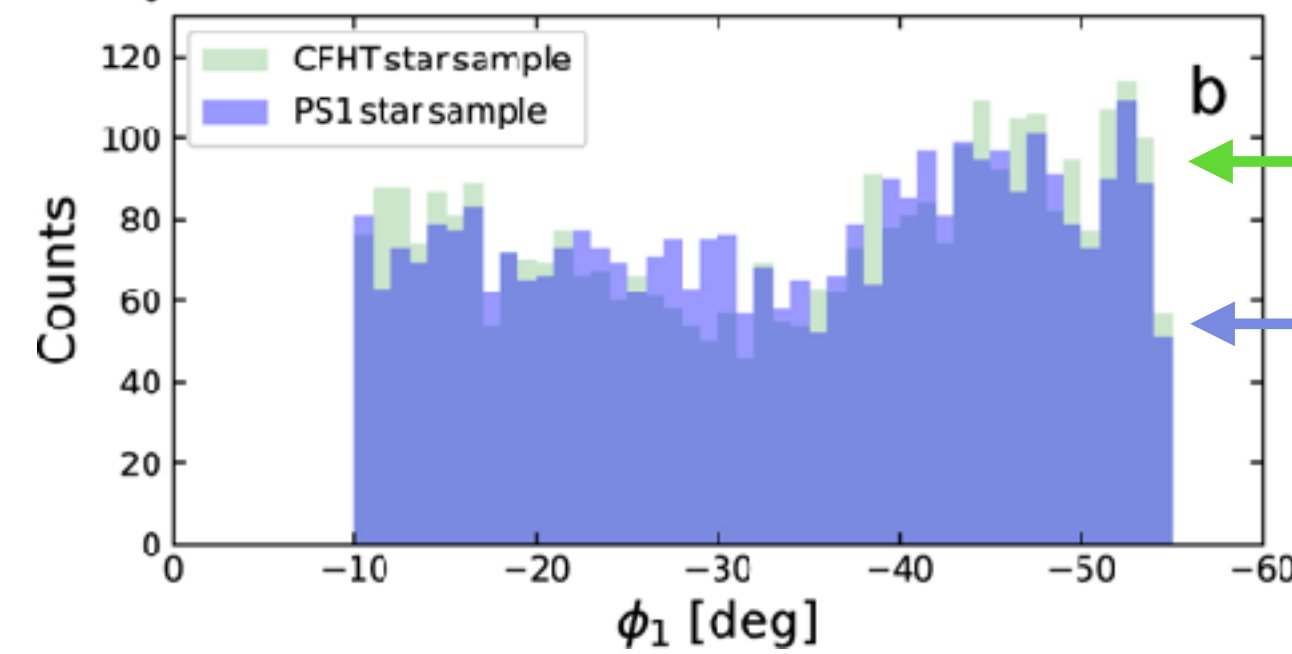
暗黒物質サブハローによる
恒星密度ゆらぎ

- 地上：天候やseeingの変動
- スペース：Completeness の変動
- ➔ 人工的な恒星カウント数のゆらぎ (<40%)

観測

Star counts along the GD-1 stream

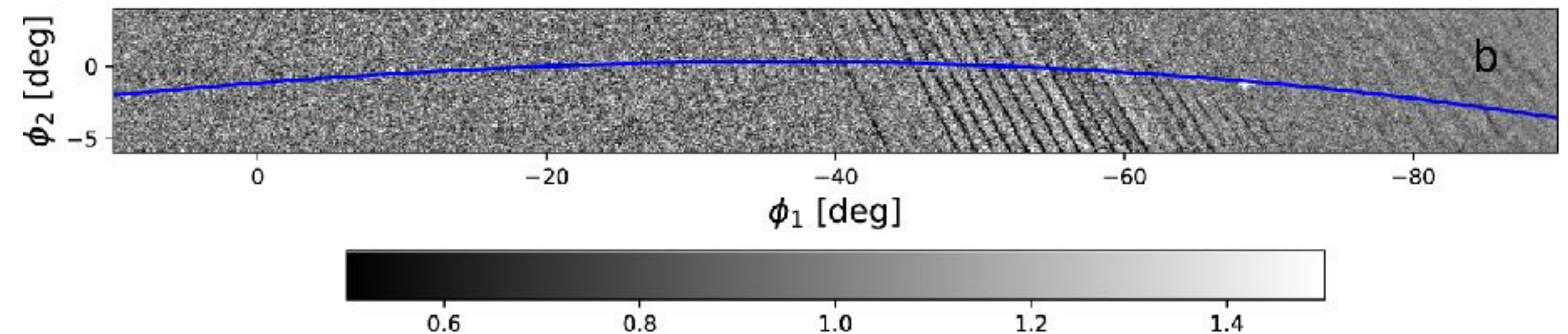
Ibata et al. 2020



プログラム観測

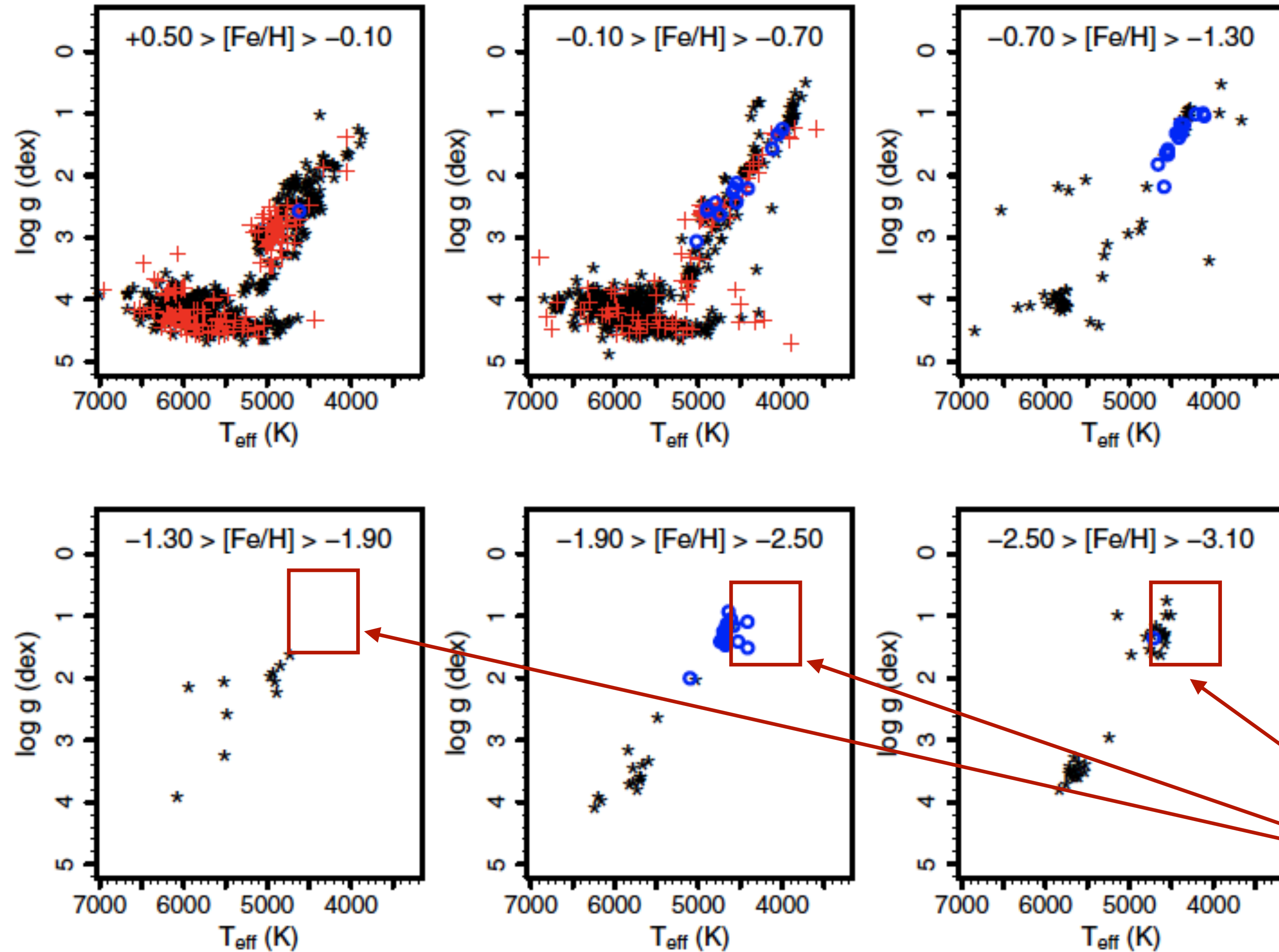
アーカイブデータ
(Pan-STARRS)

Normalized count level of Gaia sources at $G < 20$



基準星による品質評価

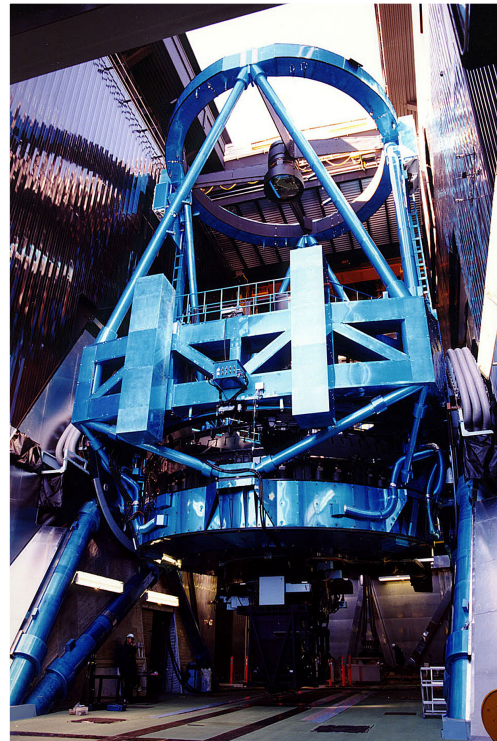
Gaia-ESO Benchmark Stars



- 大規模分光サーベイの一樣解析で導出する元素組成測定**の基準星** (e.g. Gaia Benchmark Stars; Jofre et al. 2014)
- 恒星物理パラメータ (温度、質量、半径、元素組成等) が独立な精密測定 (高分散分光、星振学など) で正確にわかっている星
- 広範な恒星物理パラメータを網羅していることが望ましい

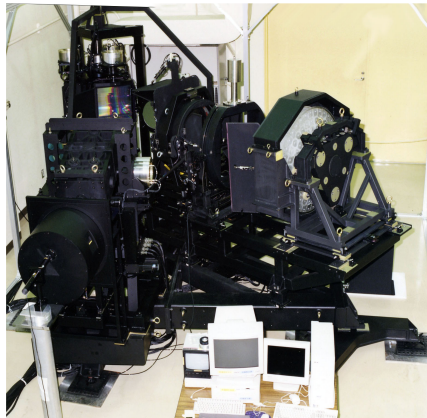
現状ではまだ赤色巨星、金属欠乏星の基準星が少ない

HDS一次処理済みデータの活用例



Subaru Telescope

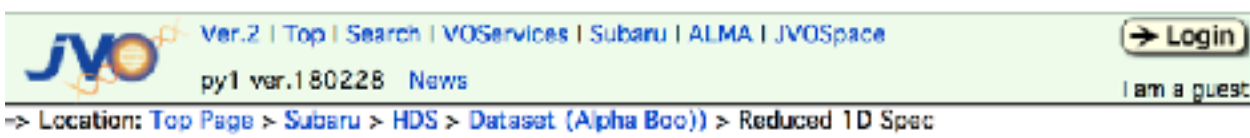
HDS



Reduced 1D spectra



JVO portal (<http://jvo.nao.ac.jp/portal/>)



Alpha Boo (0611_SK_00010297)

Summary Proc Info Download

Raw Data

HDSA00010297

Flat data

flat.fits

Wavelength calibrated COMPARISON spectra

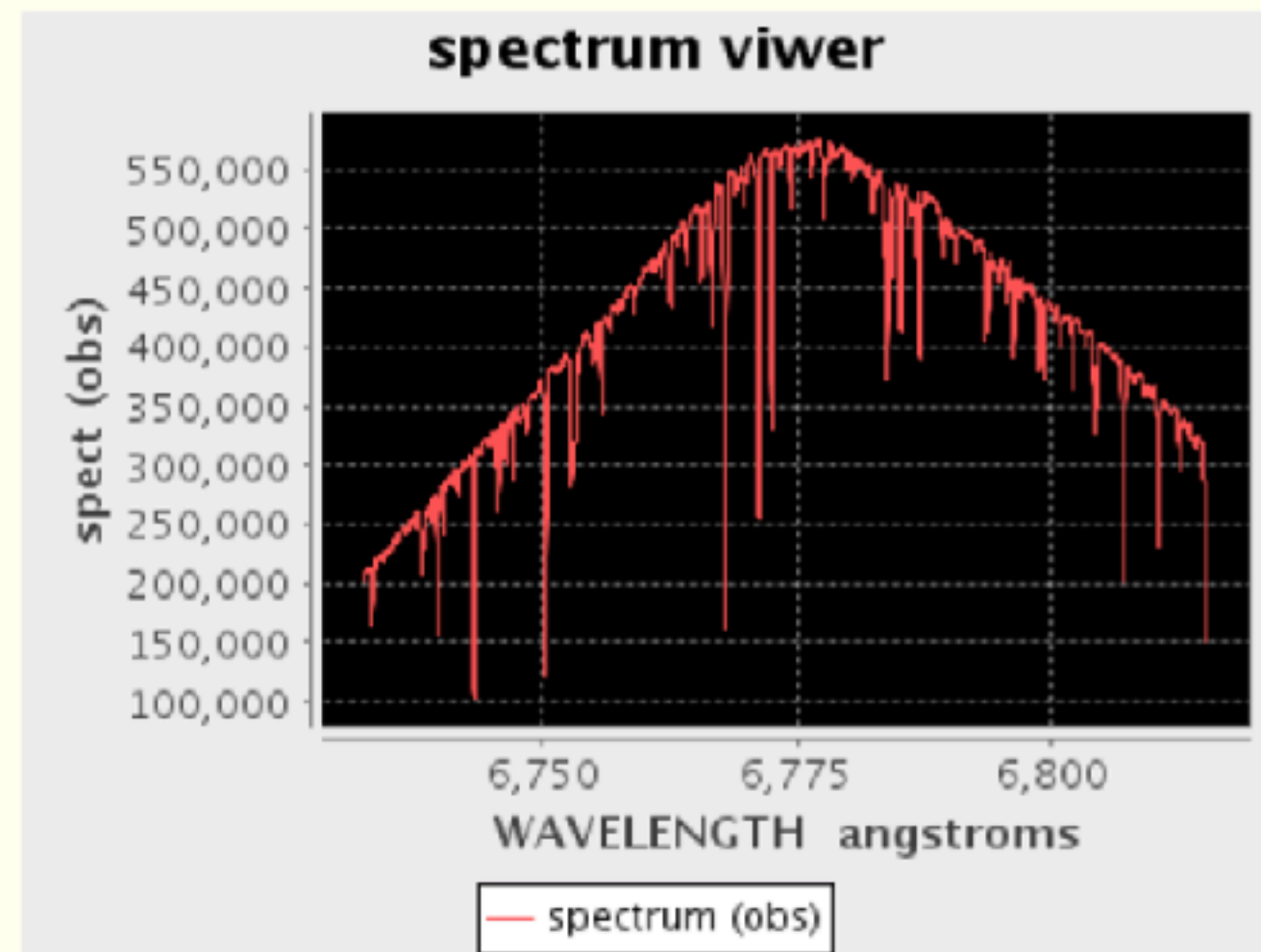
comparison spectrum data unavailable

Links to spectrum data

- [HDSA00010297_087](#) (Alpha Boo [6810.01:6893.65])
- [HDSA00010297_088](#) (Alpha Boo [6732.53:6815.35])
- [HDSA00010297_089](#) (Alpha Boo [6656.80:6738.39])
- [HDSA00010297_090](#) (Alpha Boo [6582.75:6663.52])
- [HDSA00010297_091](#) (Alpha Boo [6510.33:6590.28])
- [HDSA00010297_092](#) (Alpha Boo [6439.49:6518.62])
- [HDSA00010297_093](#) (Alpha Boo [6370.17:6448.48])
- [HDSA00010297_094](#) (Alpha Boo [6302.33:6379.82])

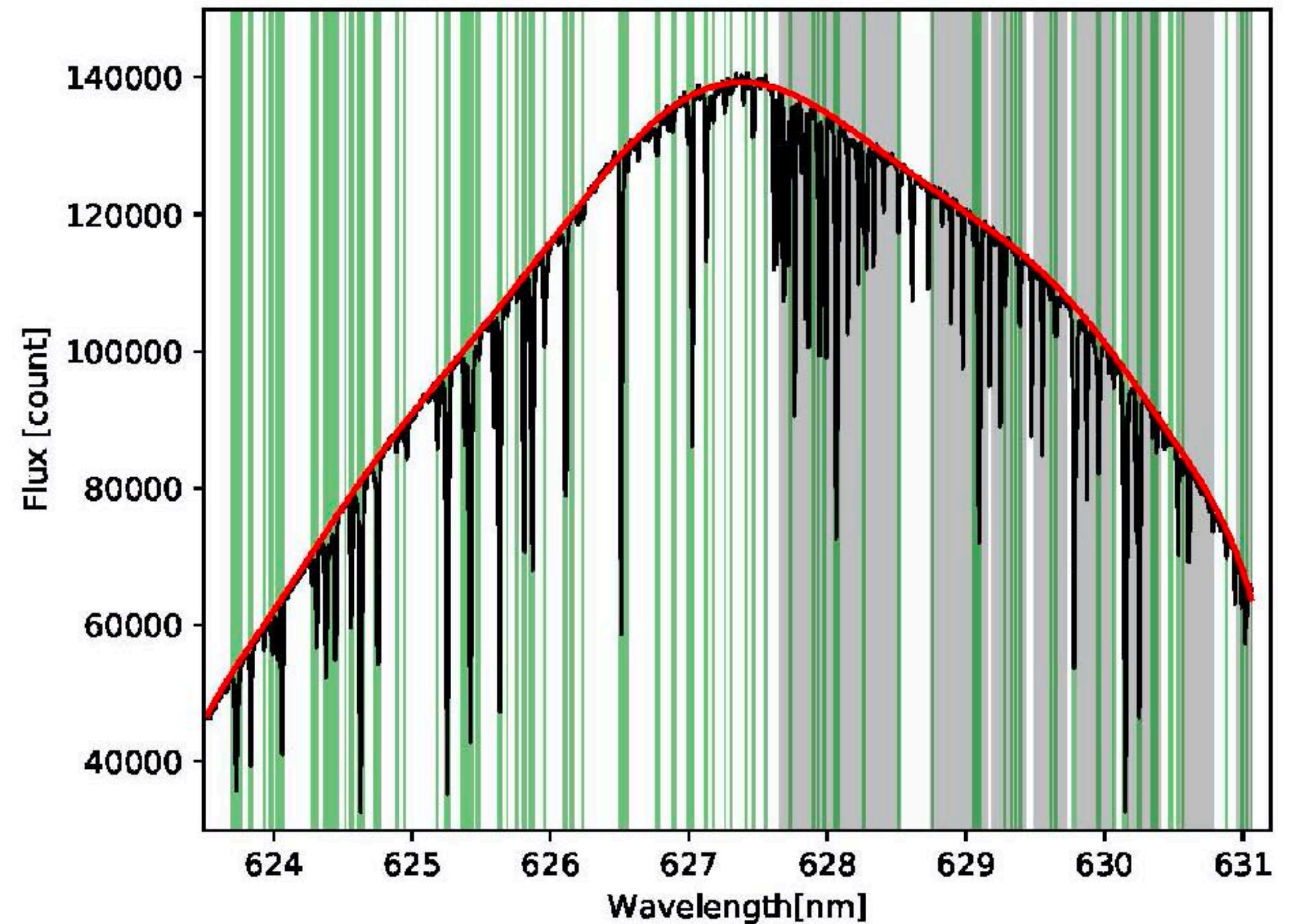
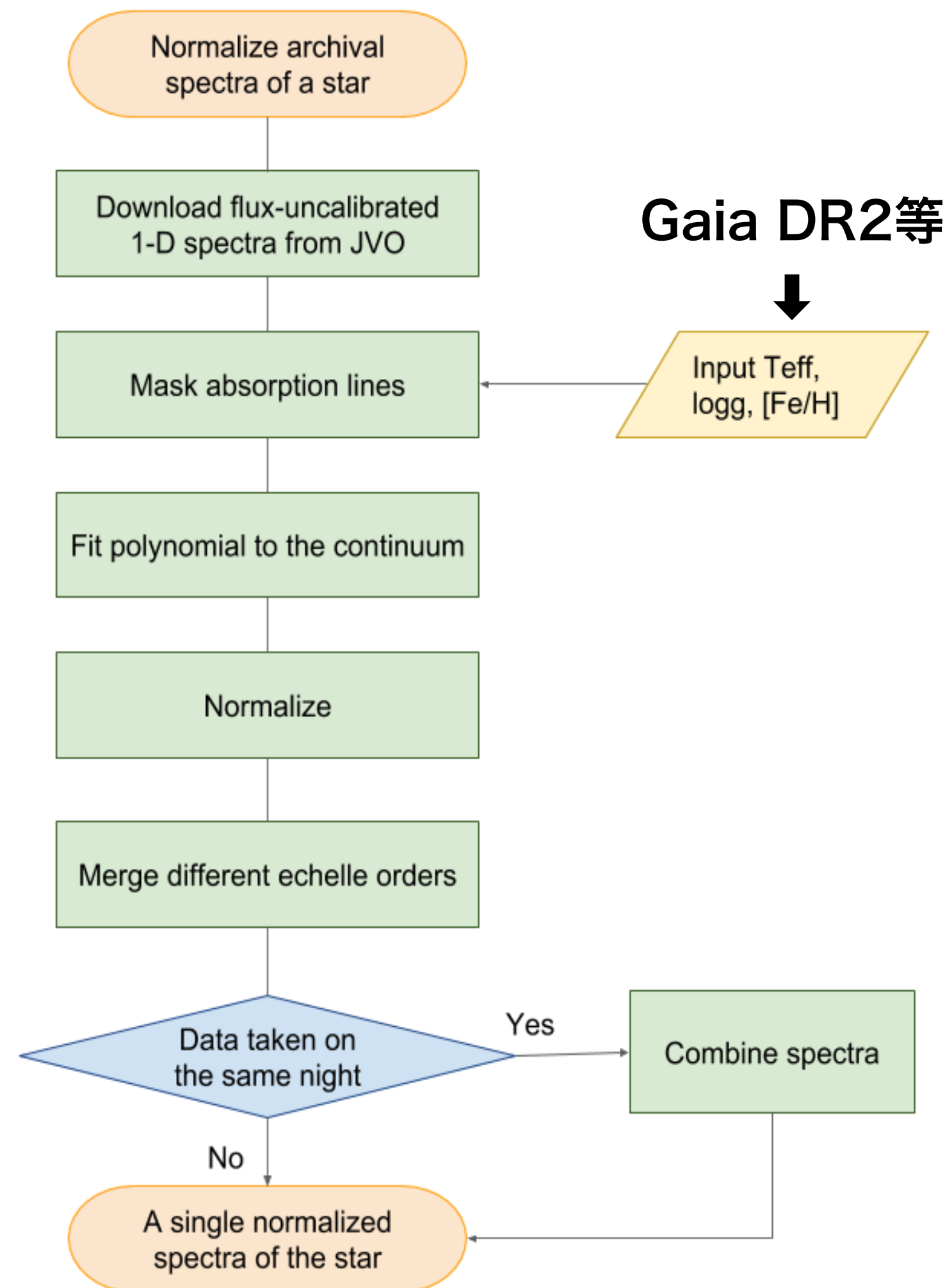
HDSA00010297_088 (Alpha Boo [6732.53:6815.35])

Uncalibrated 1D Spectrum

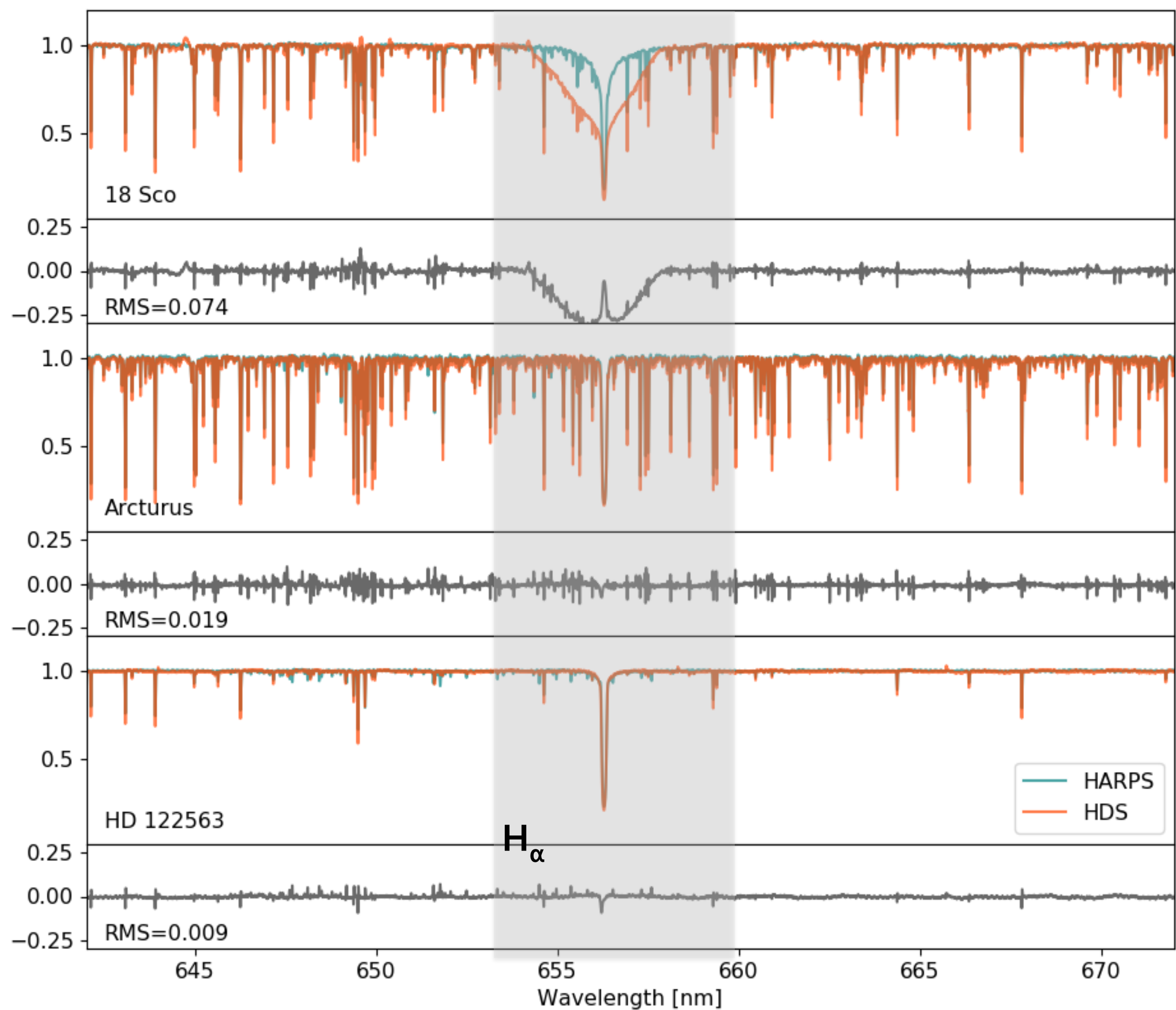


- すばるHDSで過去に取得された高分散分光データの一部はJVOを通じて一次元スペクトルが公開されている
- 一次元スペクトルがある天体について Gaia DR2、Simbadより測光、位置天文情報を取得
- 恒星物理パラメータを導出 → 吸収線をマスクして規格化
- スペクトルライブラリとして活用

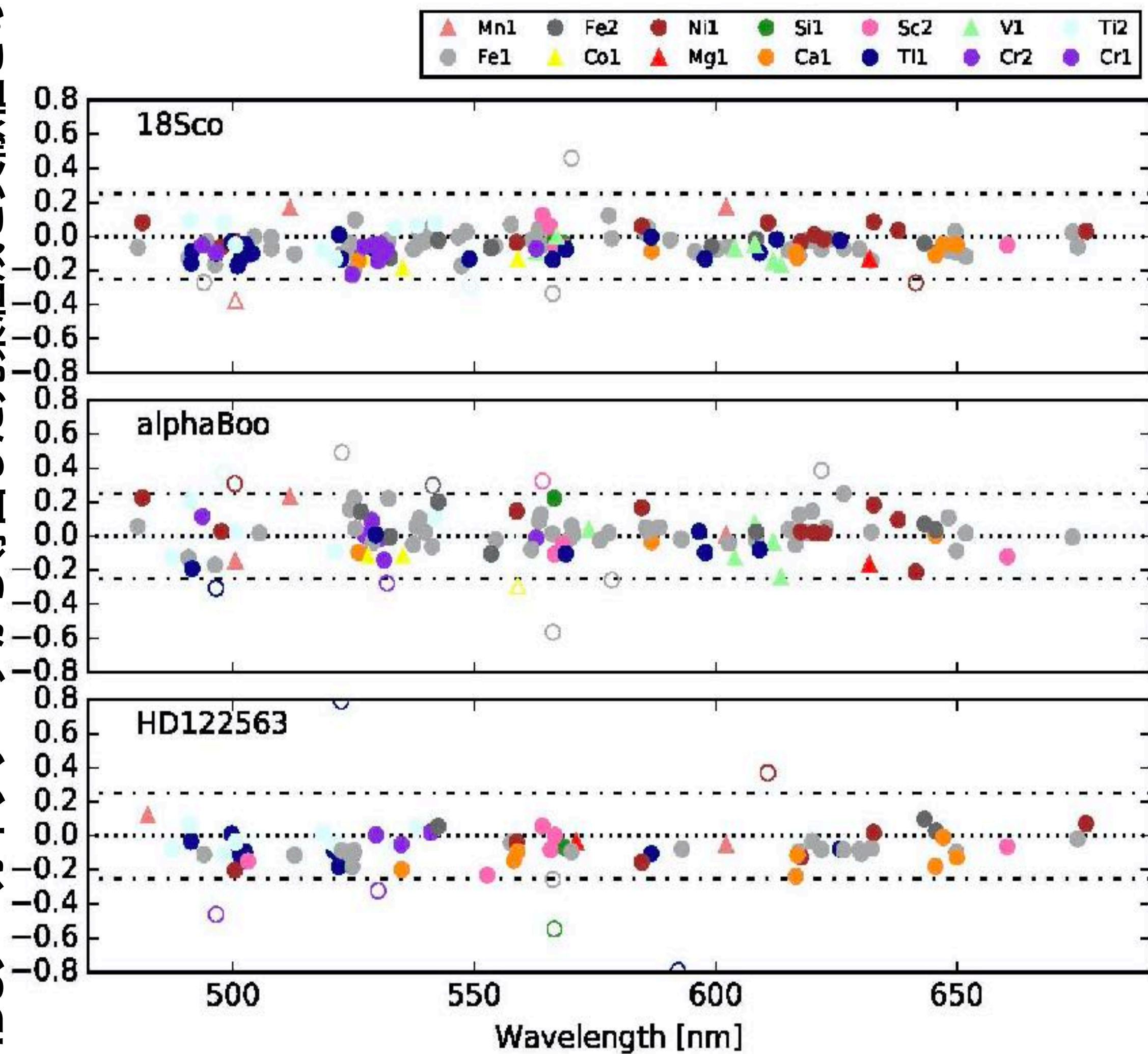
連続光の規格化



スペクトルと元素組成の導出



HDSアーカイブデータから導出した元素組成と文献値との差



まとめ

- 銀河考古学分野では、大規模サーベイの提供するデータアーカイブに基づいた恒星系の統計解析が今後も加速していく
 - ➔ アーカイブデータの品質が科学成果に直結する
- アーカイブデータに必要な要件
 - 解析済み、クロスマッチ済みデータの提供
 - 測定値の誤差情報を伝達、予想しうるバイアス等への注意喚起
 - 基準星によって、系統誤差を評価
- アーカイブデータ活用への展望
 - HDS一次処理済みデータ（JVO）を使った標準星高分散分光ライブラリ ➔ 金属欠乏星などレアな天体について基準星を拡張し、大規模分光サーベイでのデータアーカイブ品質向上につなげる