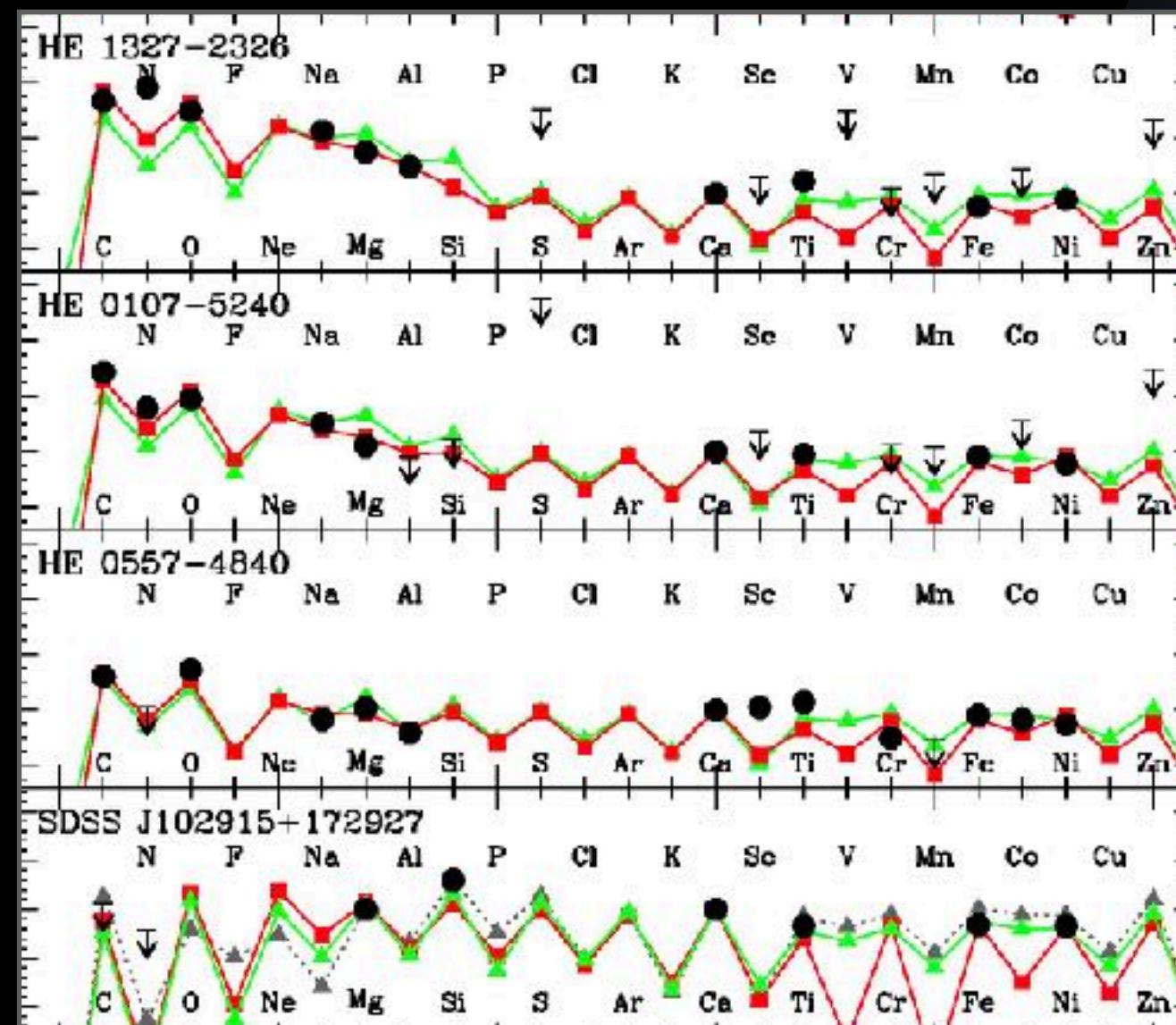
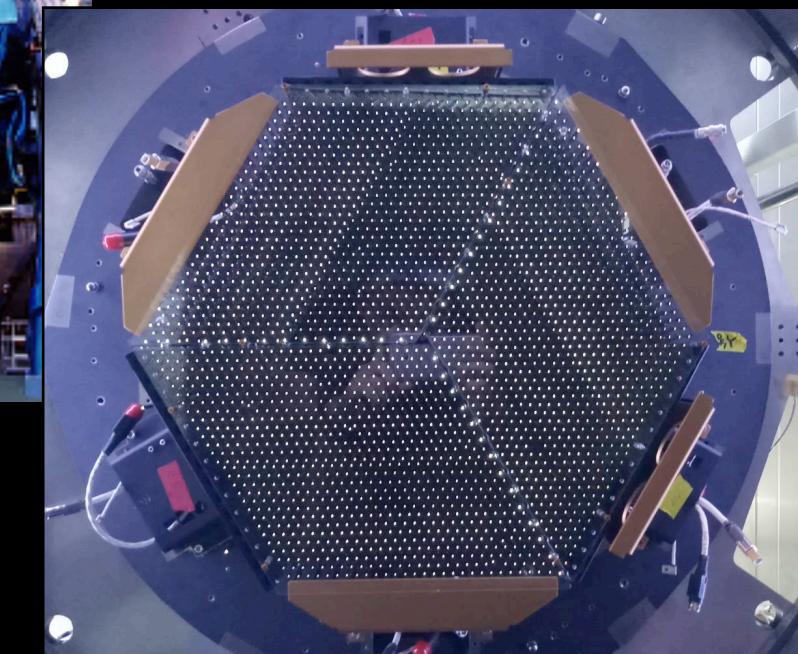


天の川銀河の古い恒星系で探る宇宙初期の化学進化

- 広視野多天体分光サーベイに期待すること -

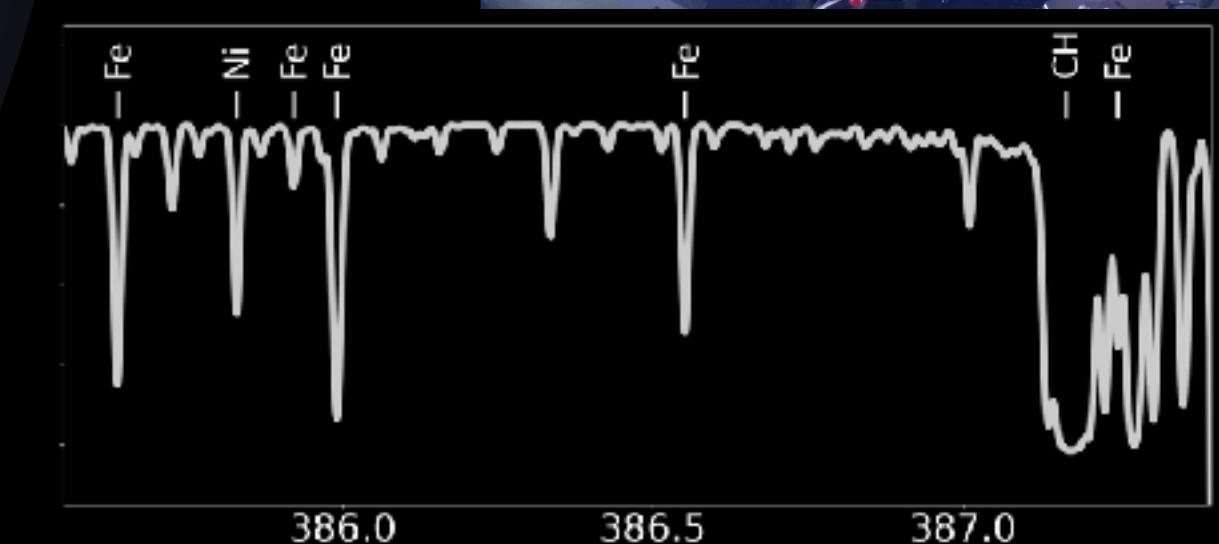


石垣美歩 (国立天文台・ハワイ観測所)



初代星・初代銀河研究会2023@北海道大学

2023年11月20-22日



Collaborators: T. Hartwig, C. Kobayashi, N. Tominaga, K. Nomoto, W. Aoki, M. Chiba, Y. Tarumi, S. Leung, M. Mardini, PFS Galactic Archaeology science working group, inspiring discussion with many others!

概要

- ・ 天の川銀河恒星ハローの新しい描像
- ・ 古い恒星の元素組成で探る初代星・初代銀河の化学進化
 - ・ 「銀河考古学」の基本的なアプローチ
 - ・ より複雑な物理現象の理解に向けて

天の川銀河恒星ハローの新しい描像

Gaia + 広視野撮像(タイムドメイン) + 星震学 (2010頃-)

従来の描像 (~2010頃)

球状の希薄な星の分布

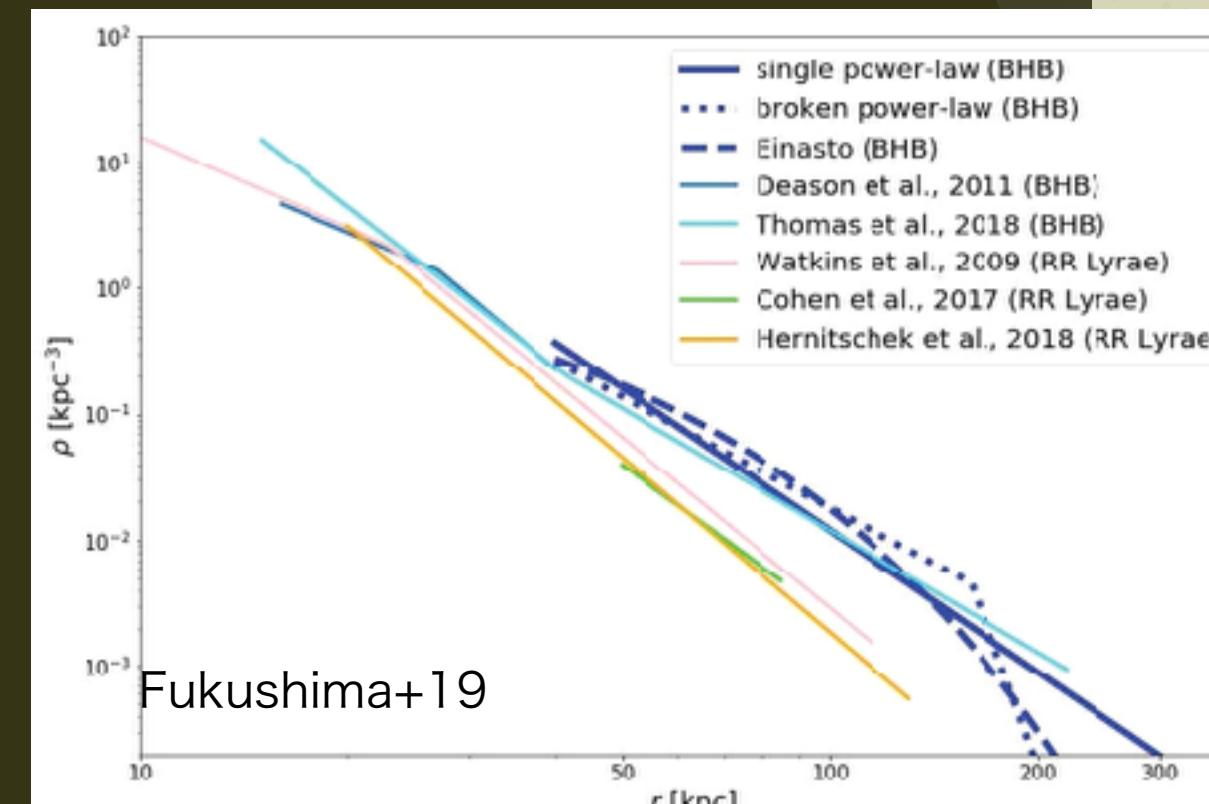
低金属量 ($[Fe/H] < -1$) で年齢の古い星種族

二重構造 (空間分布・速度・金属量)

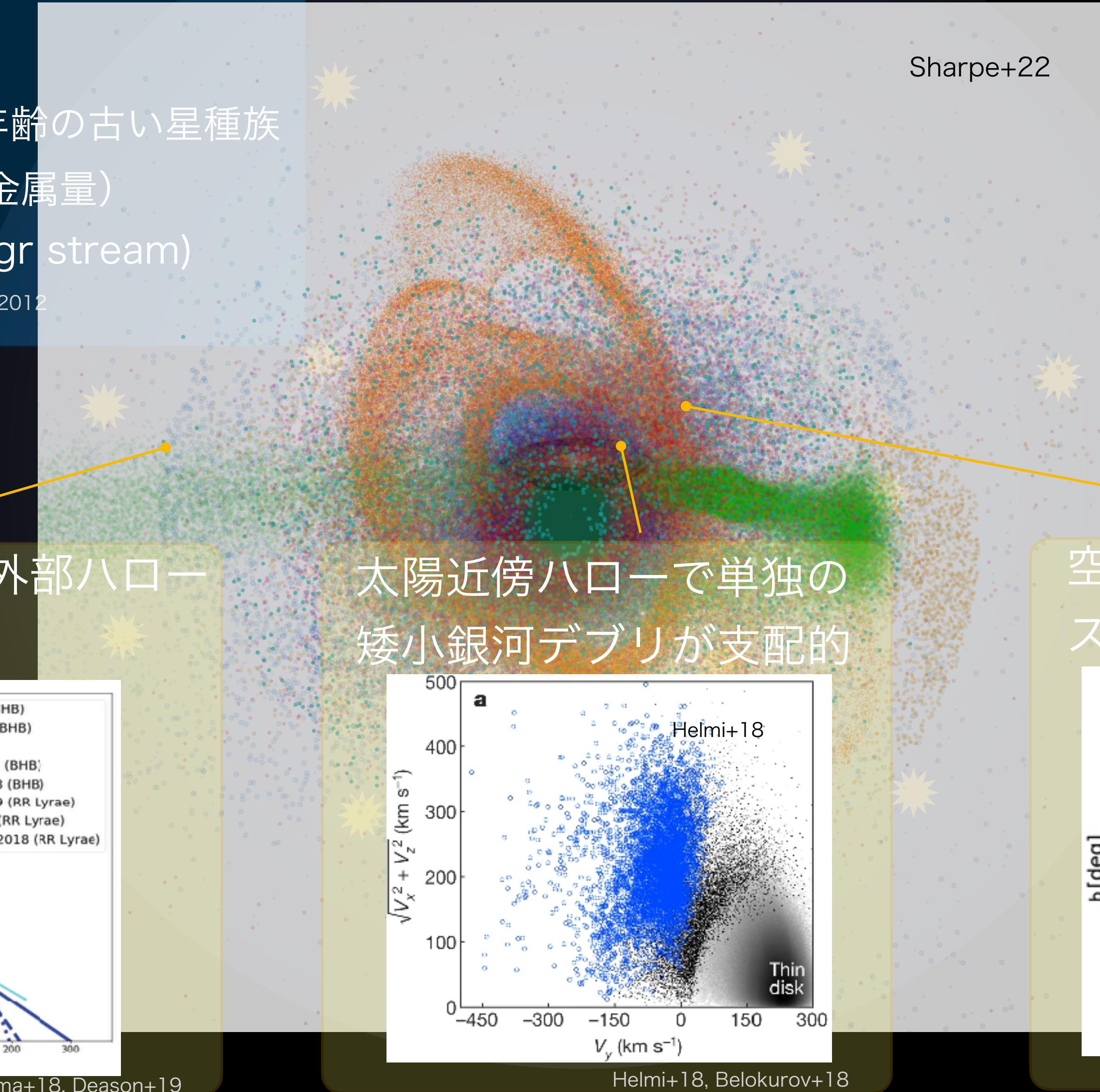
明るい恒星ストリーム (e.g. Sgr stream)

e.g., Belokurov+06, Juric+08, Carollo+10, Ivezić et al. 2012

明るいトレーサーによる外部ハロー
 $\gtrsim 300$ kpcでの密度分布

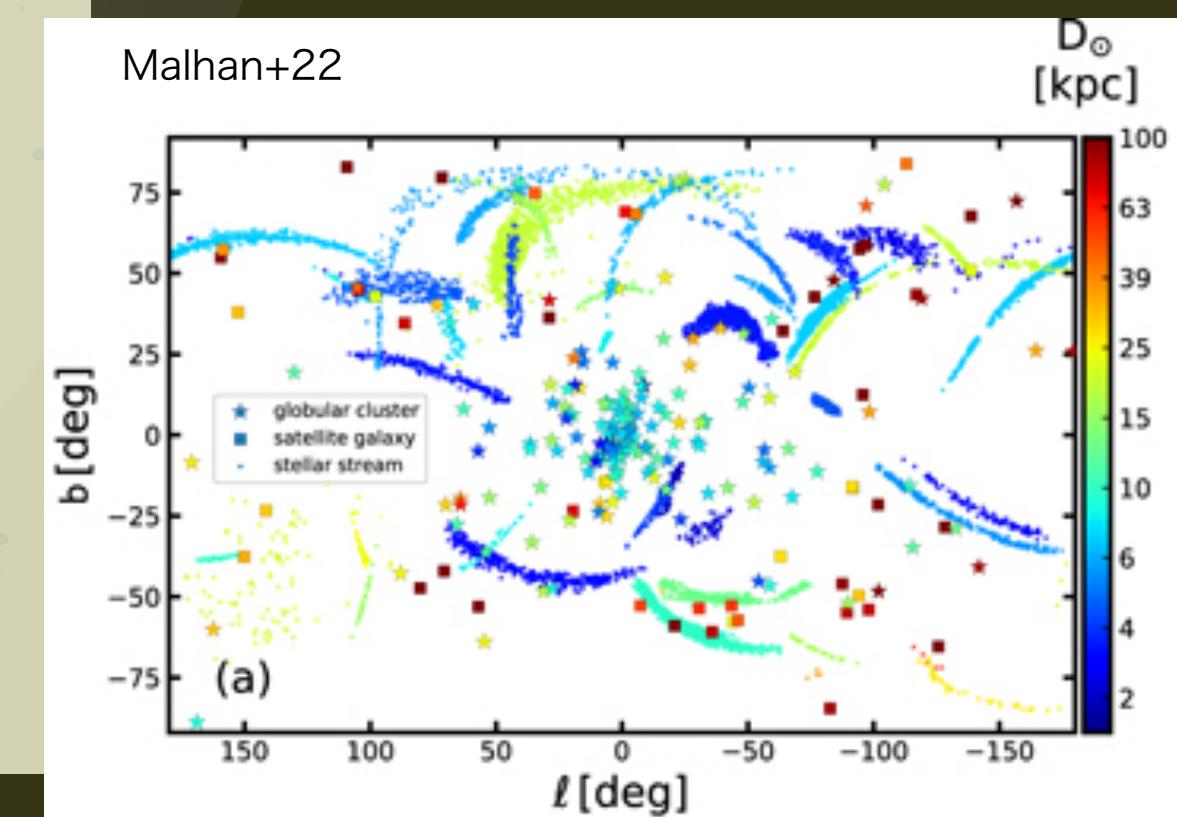


Cohen+17, Fukushima+18, Deason+19



Helmi+18, Belokurov+18

空間・速度分布で無数の新恒星
ストリームを発見



Ibata+20, Naidu+20, Malhan+22

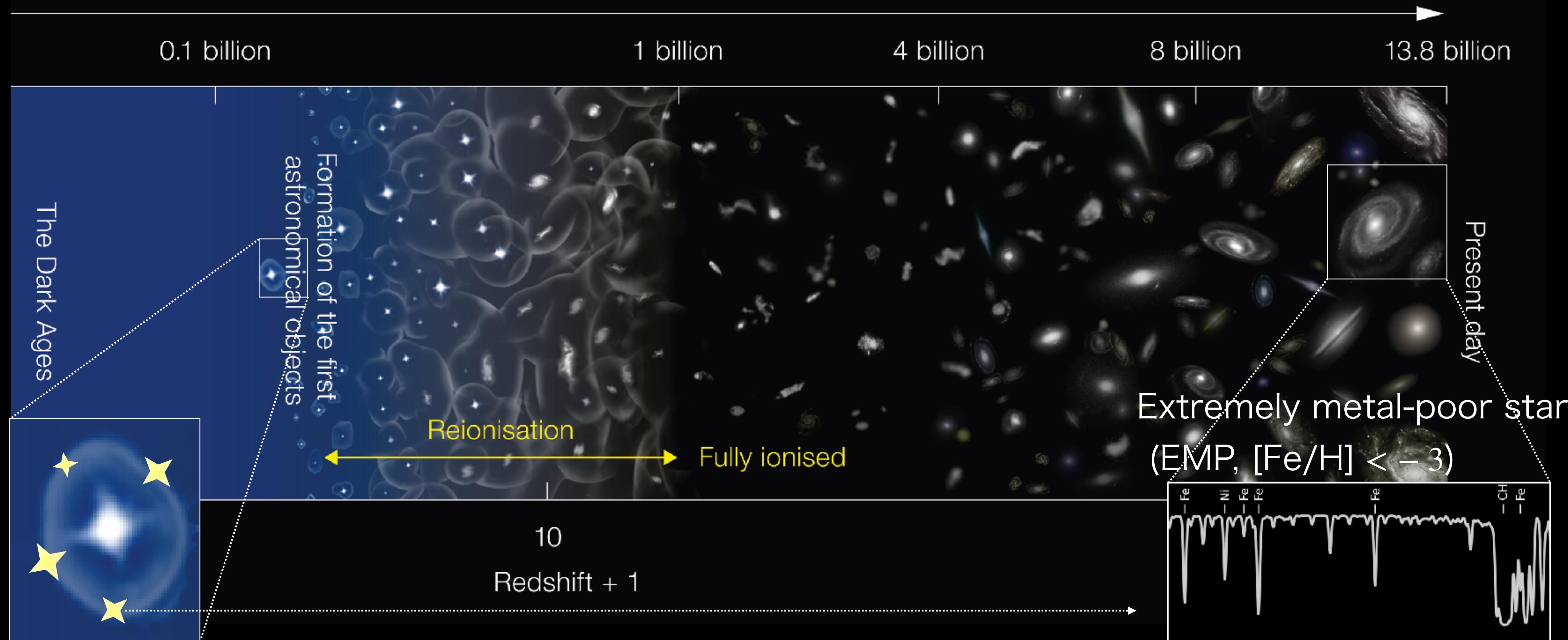
過去に合体した矮小銀河の性質、合体のタイミングを観測に基づいて議論できるようになった

古い恒星の元素組成で探る初代星・初代銀河の化学進化： 「銀河考古学」の基本的なアプローチ

Credit: NAOJ/ESO

Years after the Big Bang

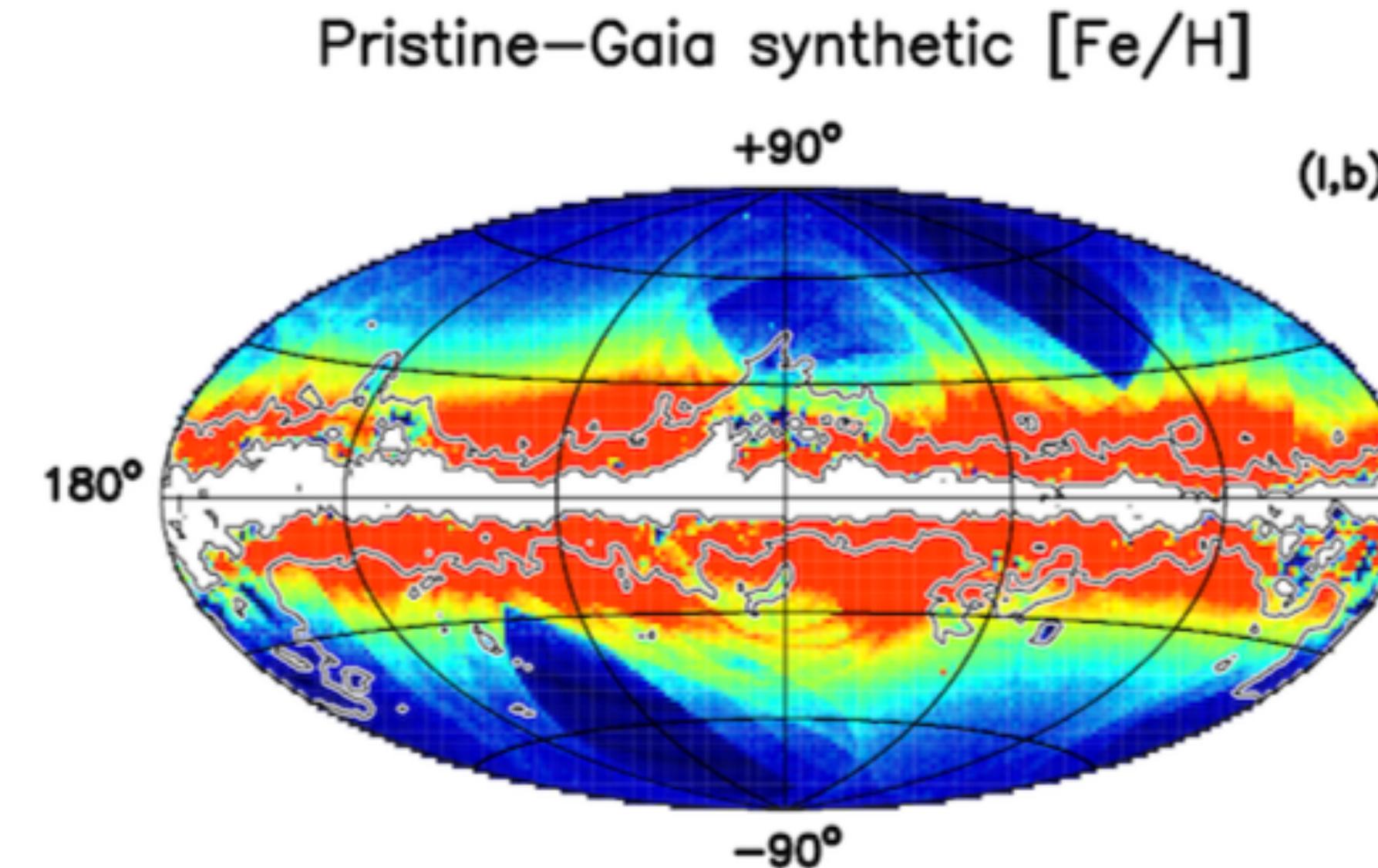
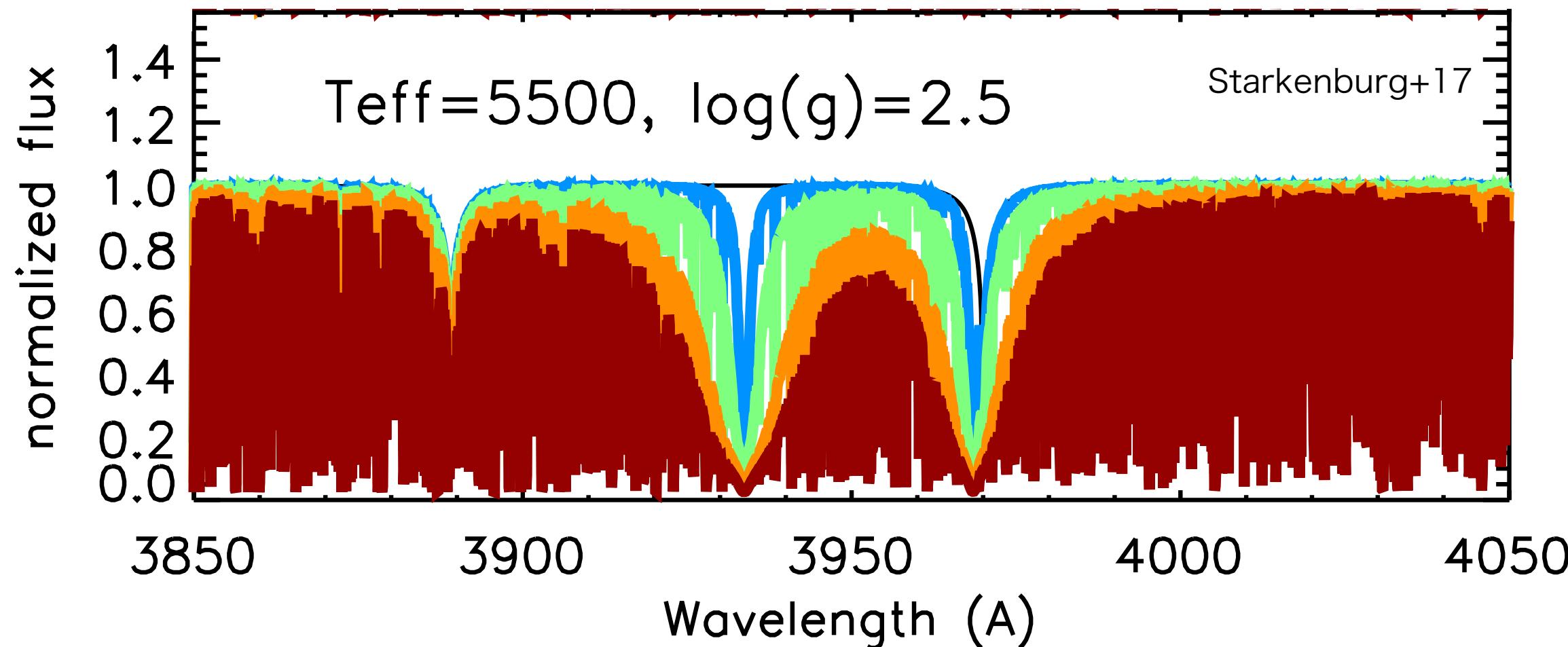
Audouze&Silk95, Freeman&Bland-Hawthorn00, Beers&Christlieb05, Frebel&Norris15



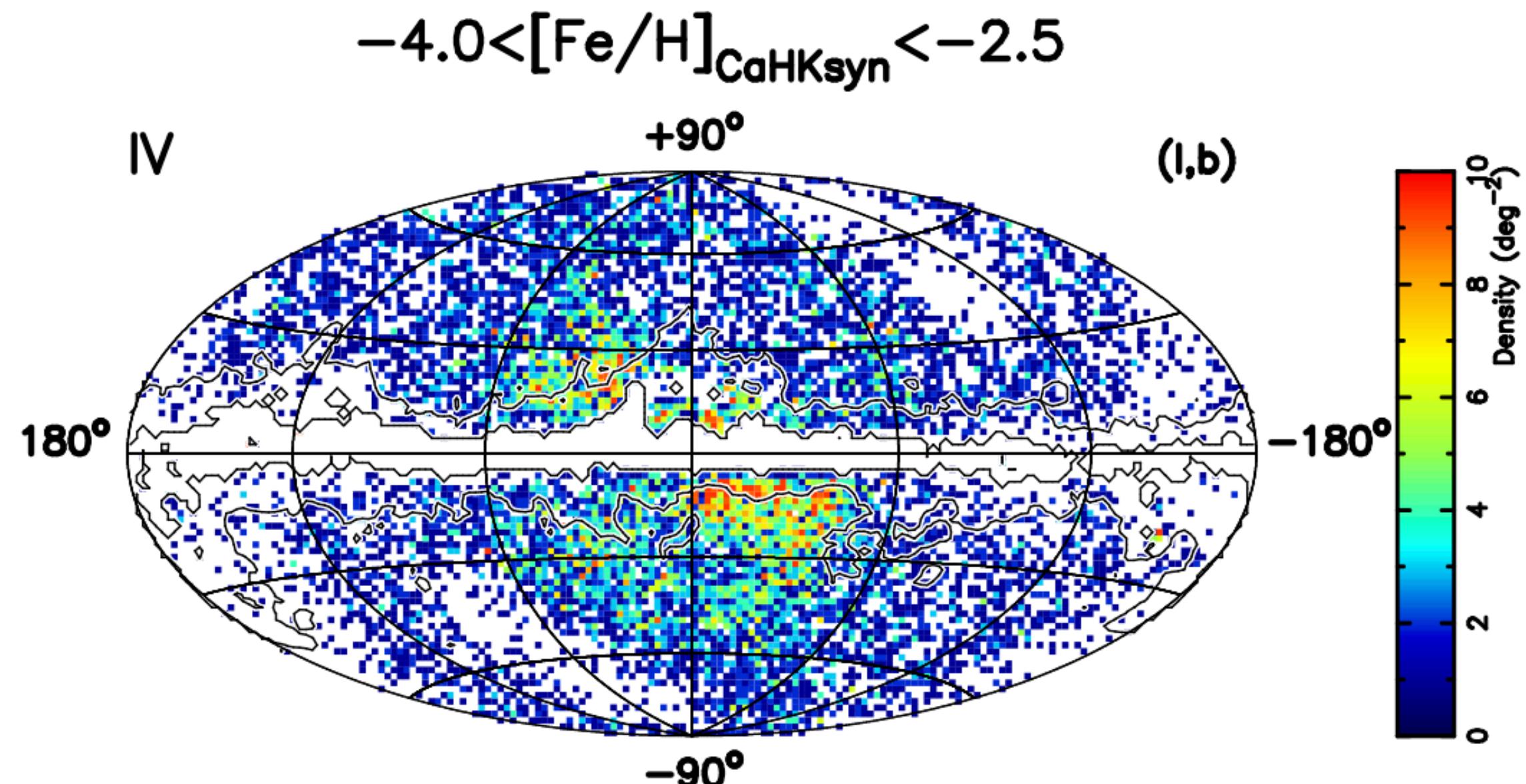
狭帯域フィルターによる天の川銀河の撮像サーベイ

e.g., Sky Mapper, Pristine, SAGES, ZERO surveys

Martin+23

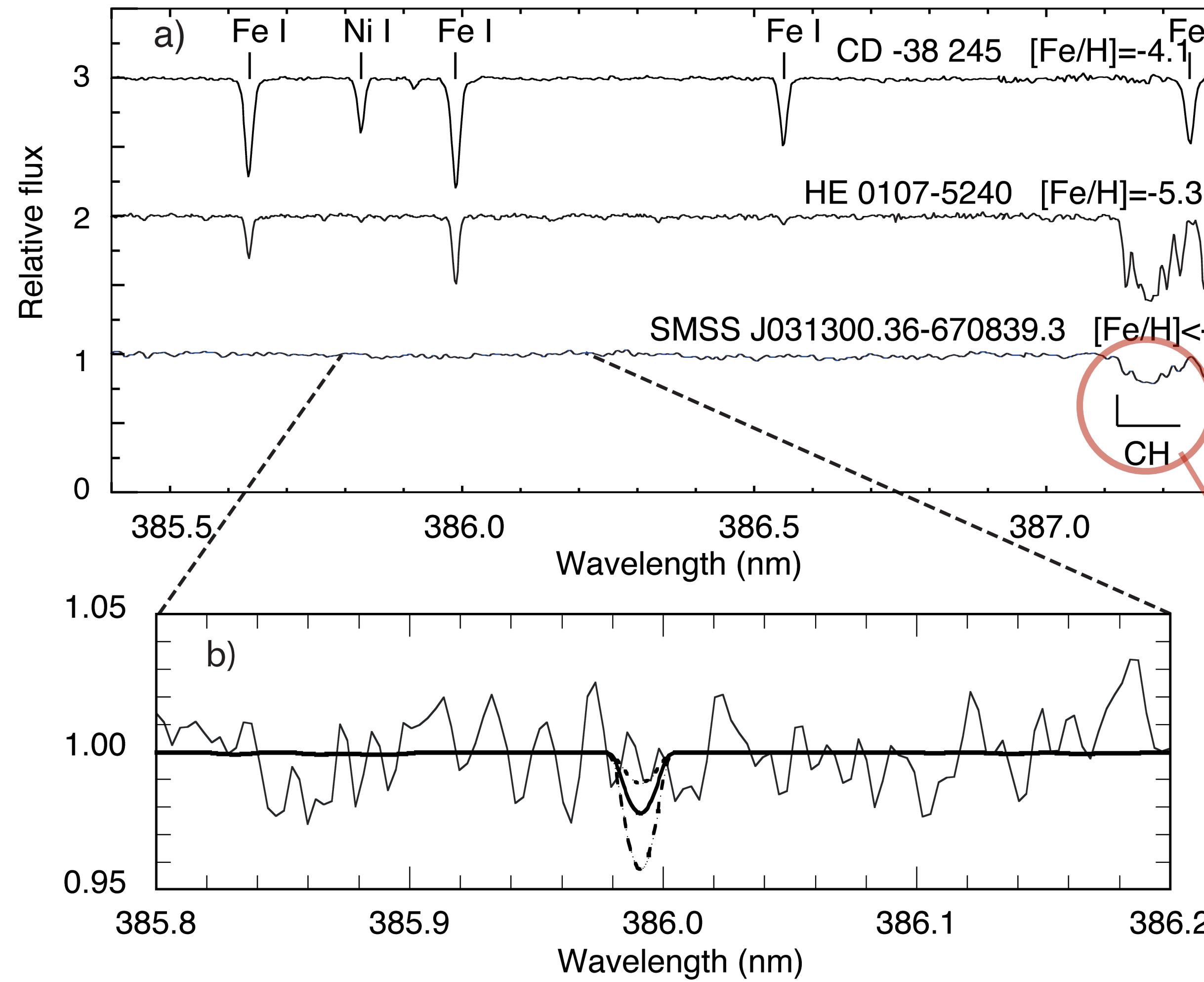


- ・ 全天の大部分をカバーする探査領域
 - ・ サンプル選択バイアスが少ない
 - ・ 低金属量検出の成功率が向上
- e.g., Extremely Metal-Poor (EMP, $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$) star 検出の成功率 $\sim 20\%$



広視野サーベイの成果①：[Fe/H] < -5 の「鉄欠乏星」の発見

Keller+14, Ishigaki+14, Takahashi+14, Chan+17, Choplin+19, Chan+20

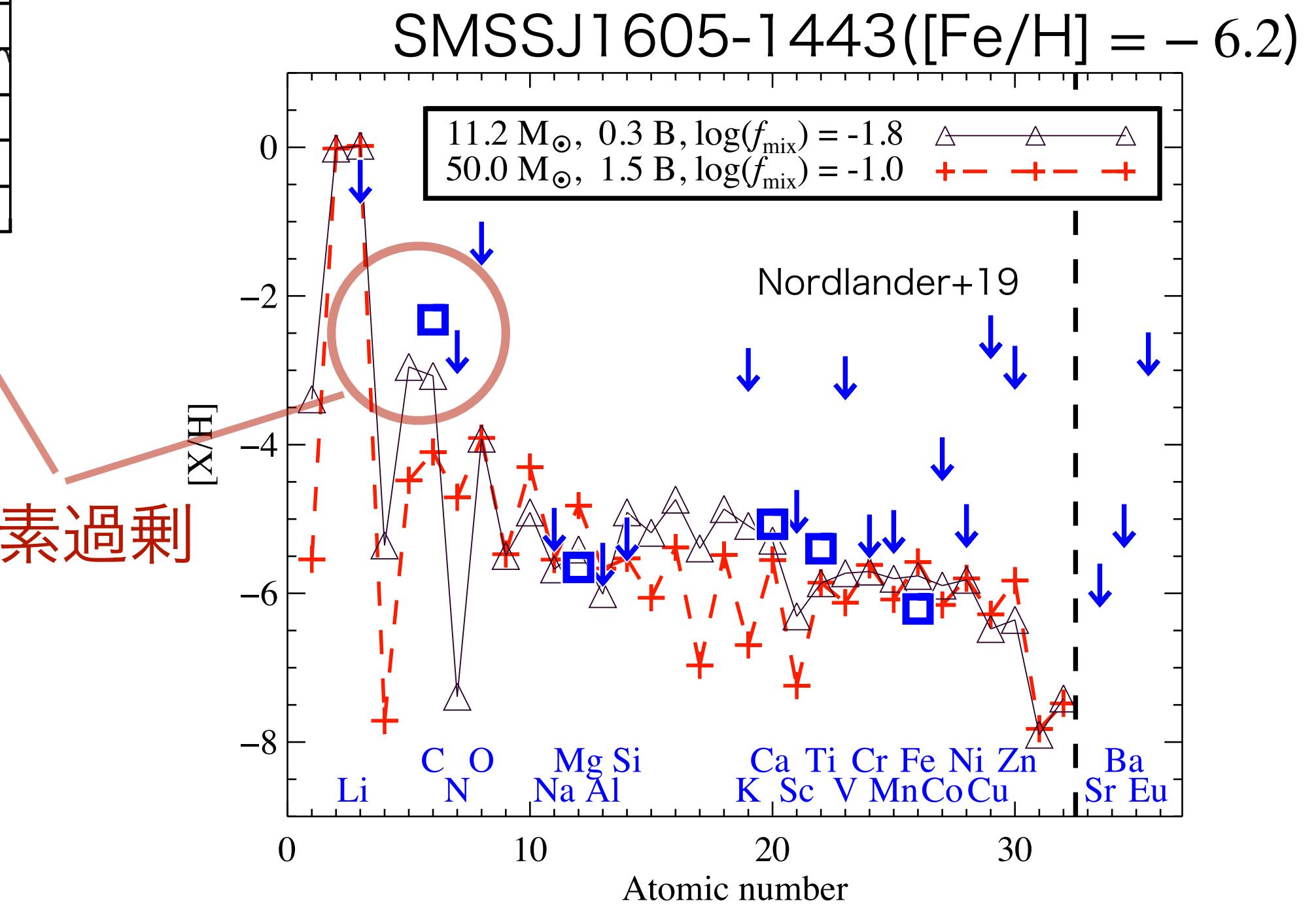


[Fe/H] < -6.53 (3σ)

[Ca/H] = -6.94 \pm 0.10

[C/H] = -2.55 \pm 0.09

Bessel+15, Nordlander+17



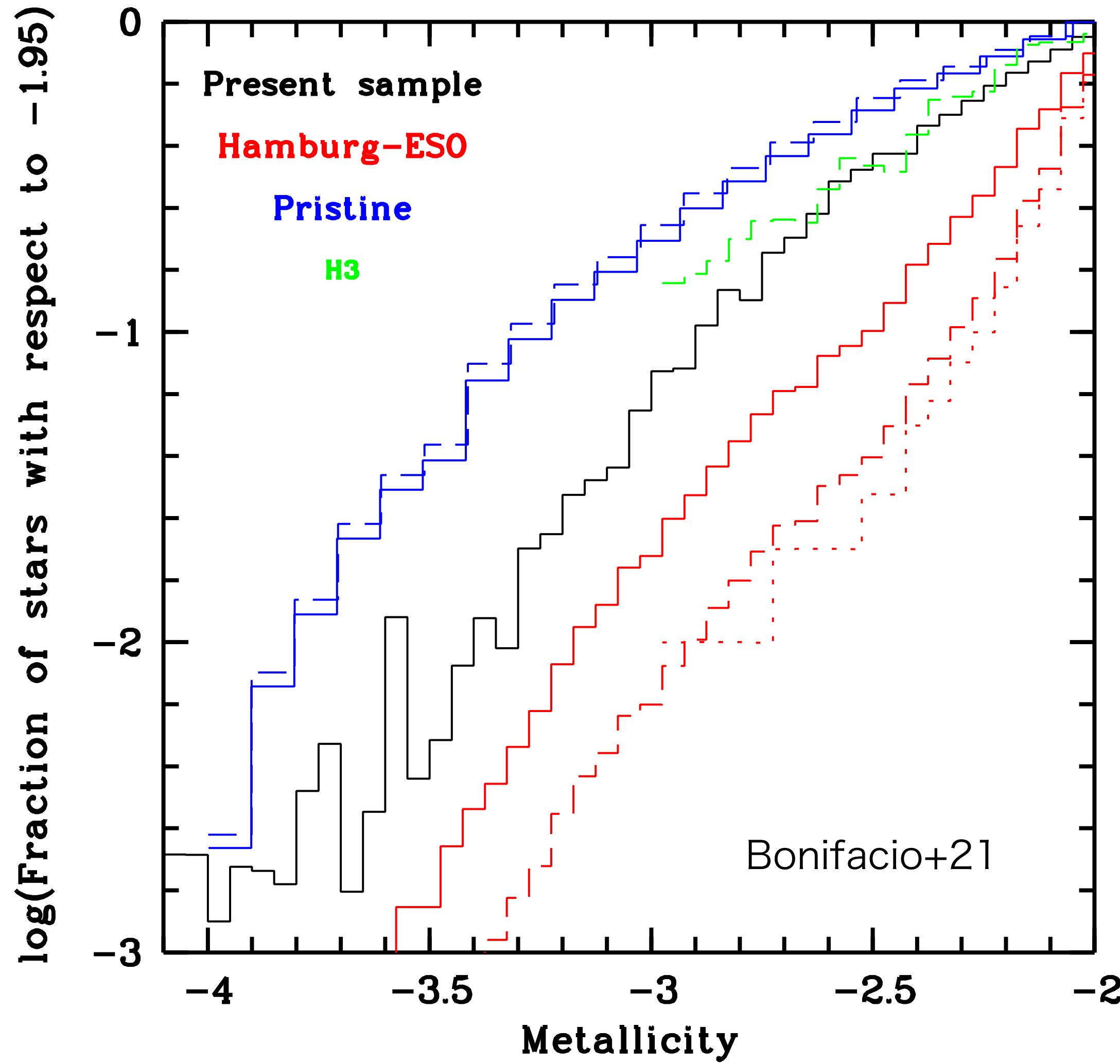
炭素過剰

最も鉄の欠乏した星は最も炭素過剰 ($[C/Fe] > 3$)

→ 超金属欠乏星 ($[Fe/H] < -3$) 星が生まれた時代・環境に特有の元素汚染源

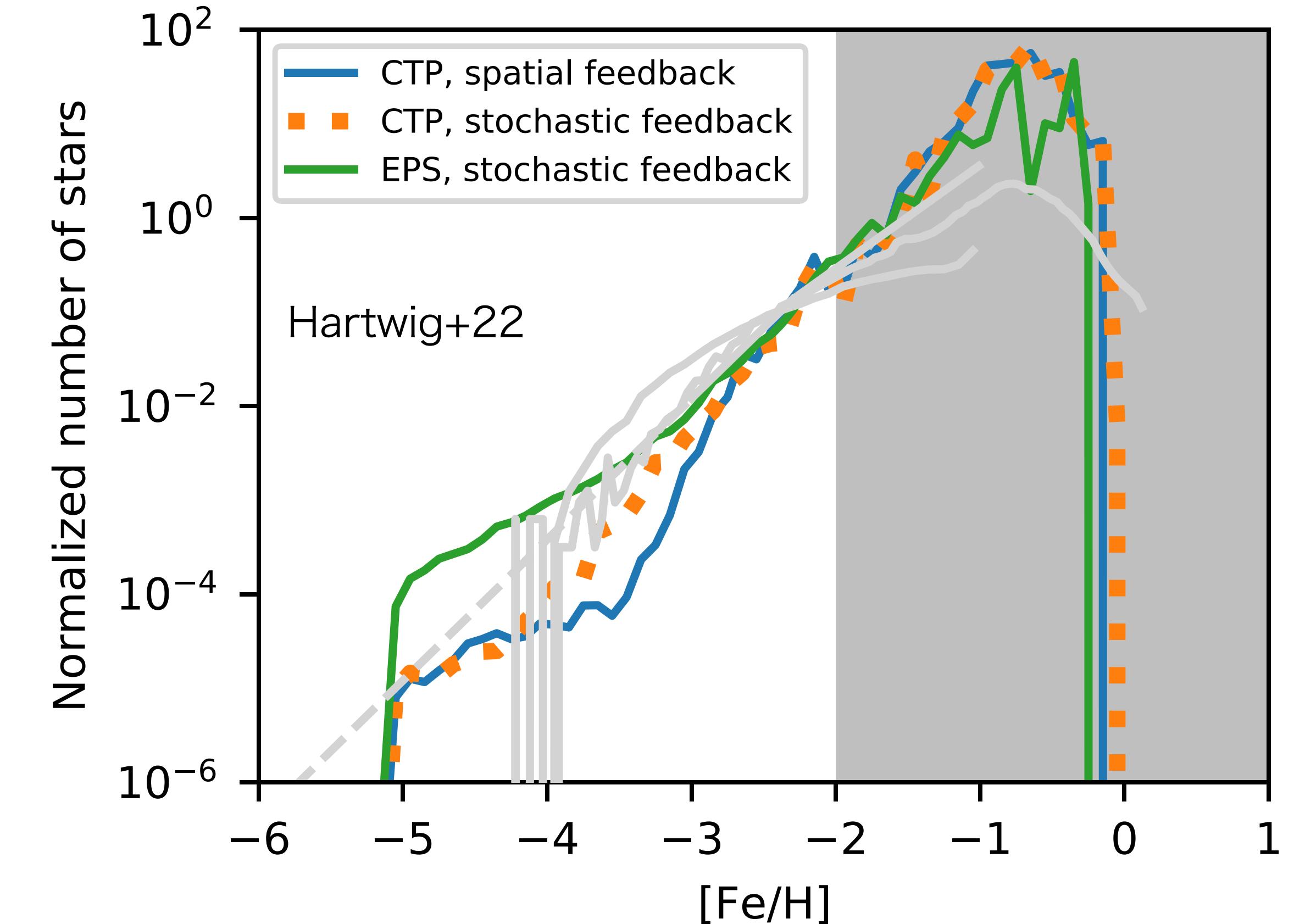
広視野サーベイの成果②: 金属量分布

$-4 < [\text{Fe}/\text{H}] < -3$ で複数のサーベイから独立な観測的制限



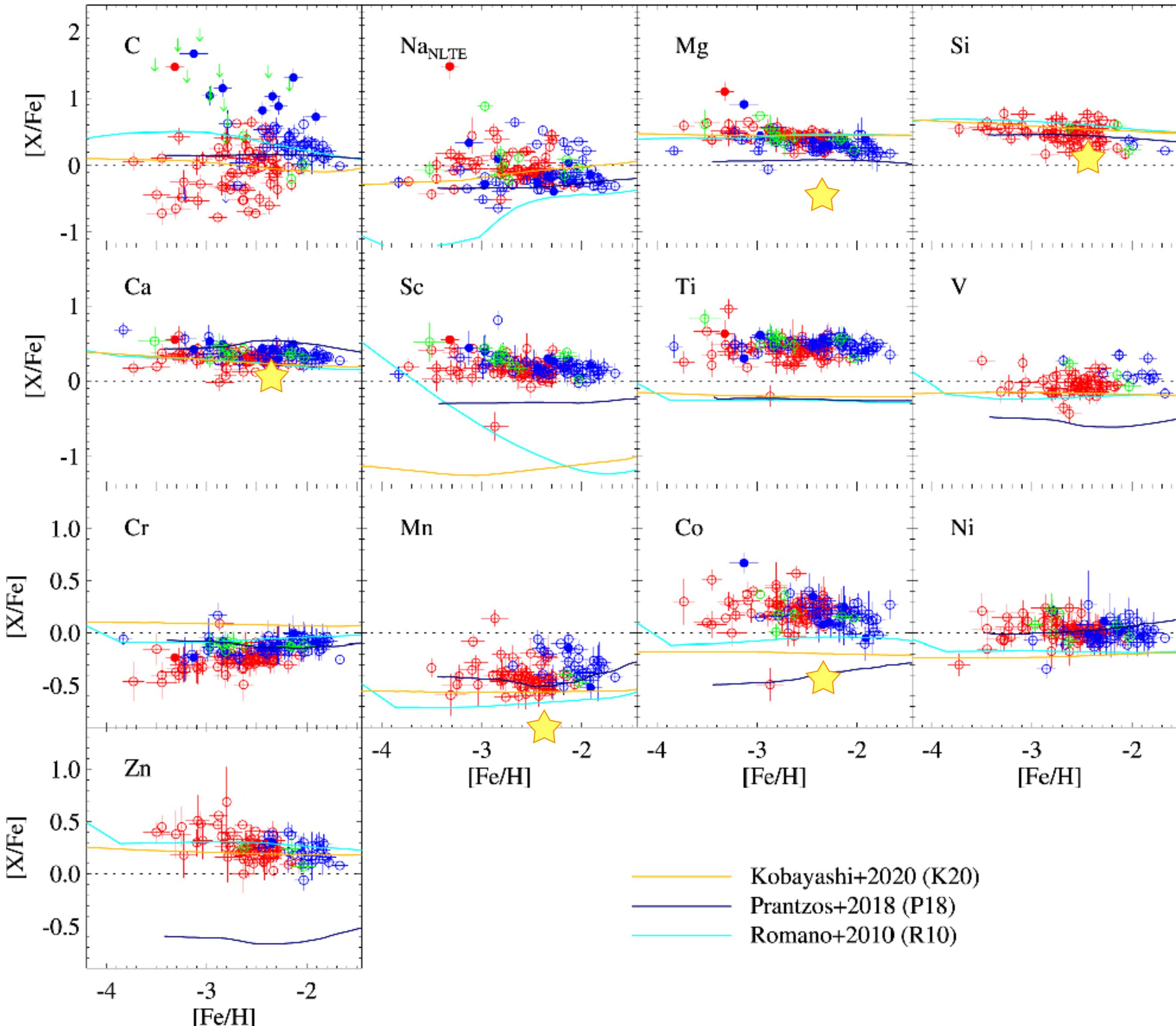
理論モデルの検証
初代星のIMF、質量範囲、星形成効率、メタルの混合

e.g., Tumlinson06, de Bennassuti+17



広視野サーベイの成果③：元素組成比分布

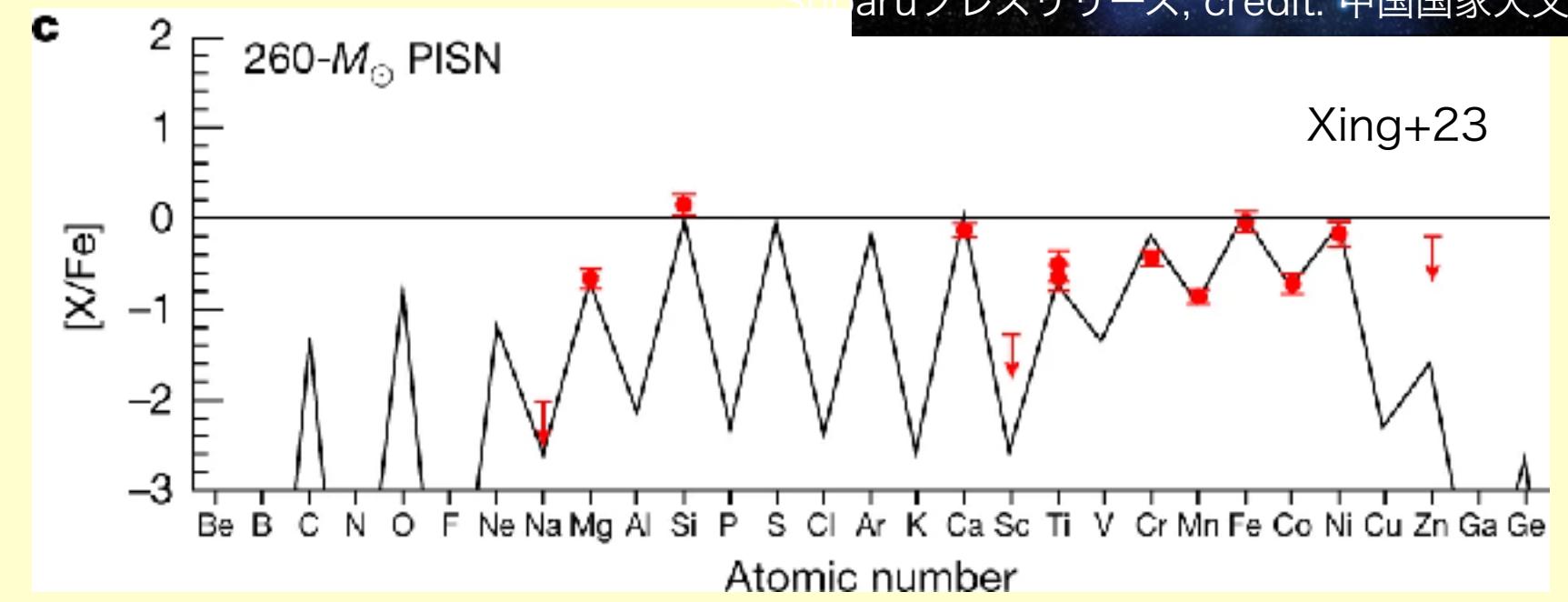
400 Very metal-poor stars by Li, Aoki+22



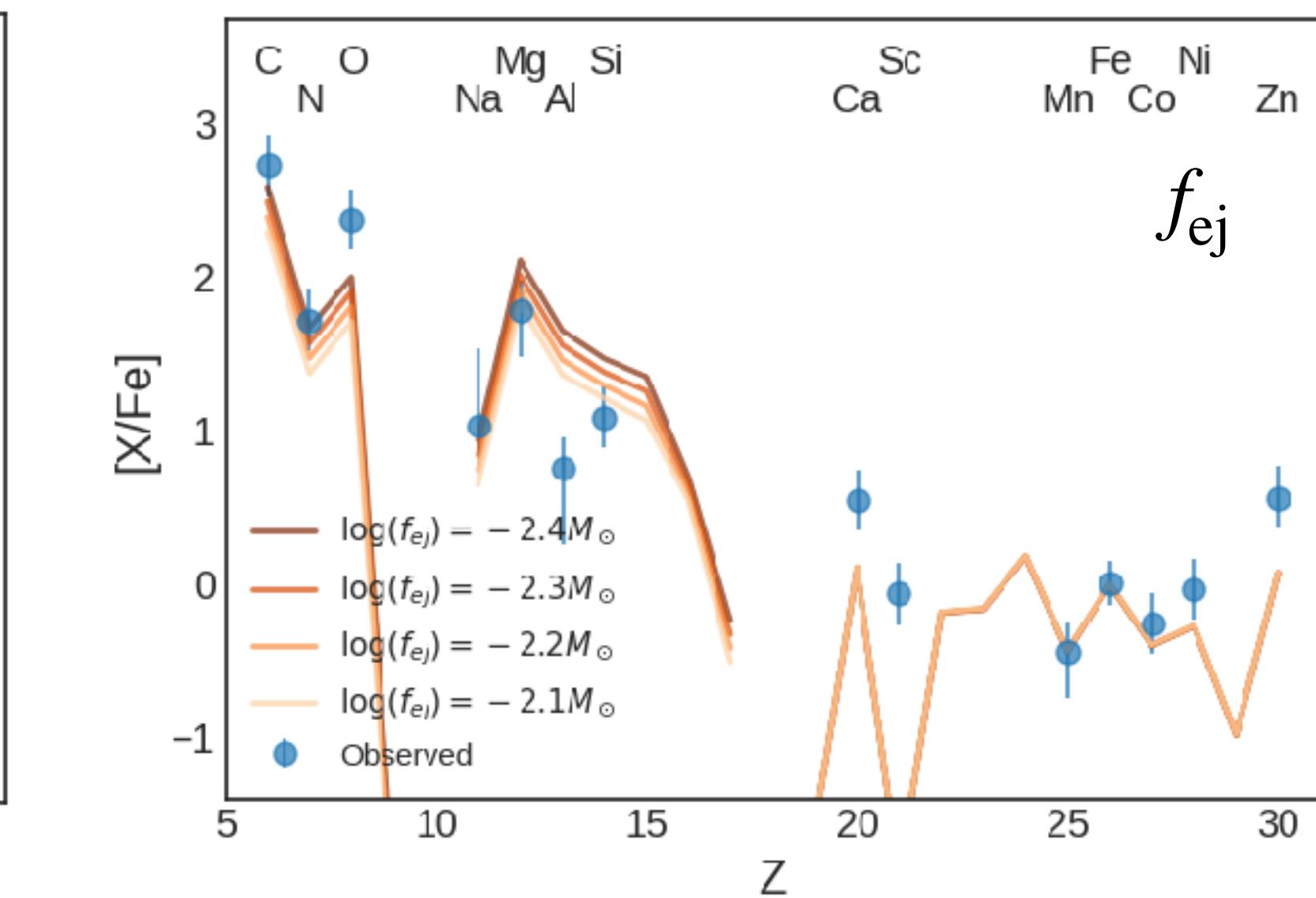
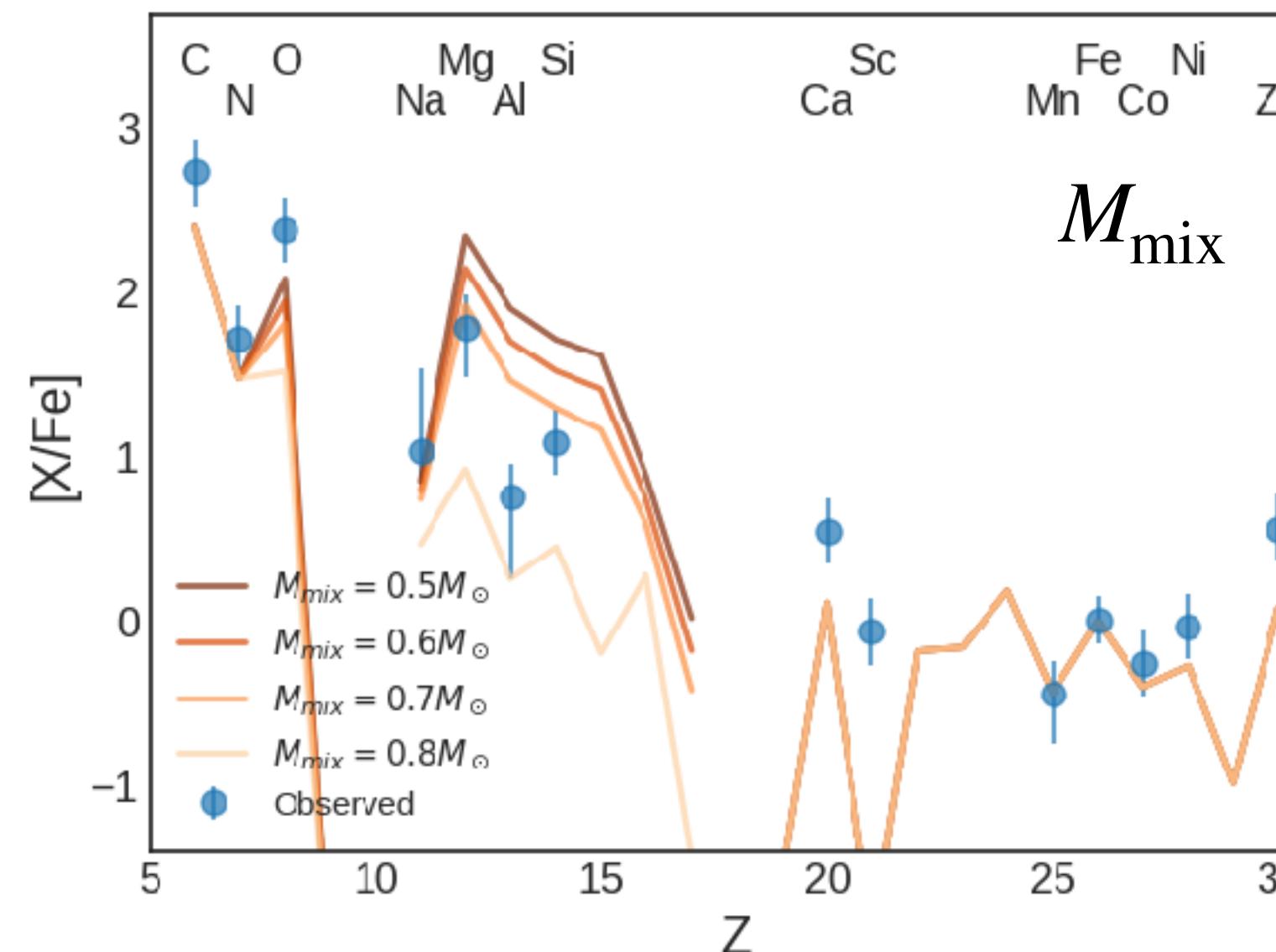
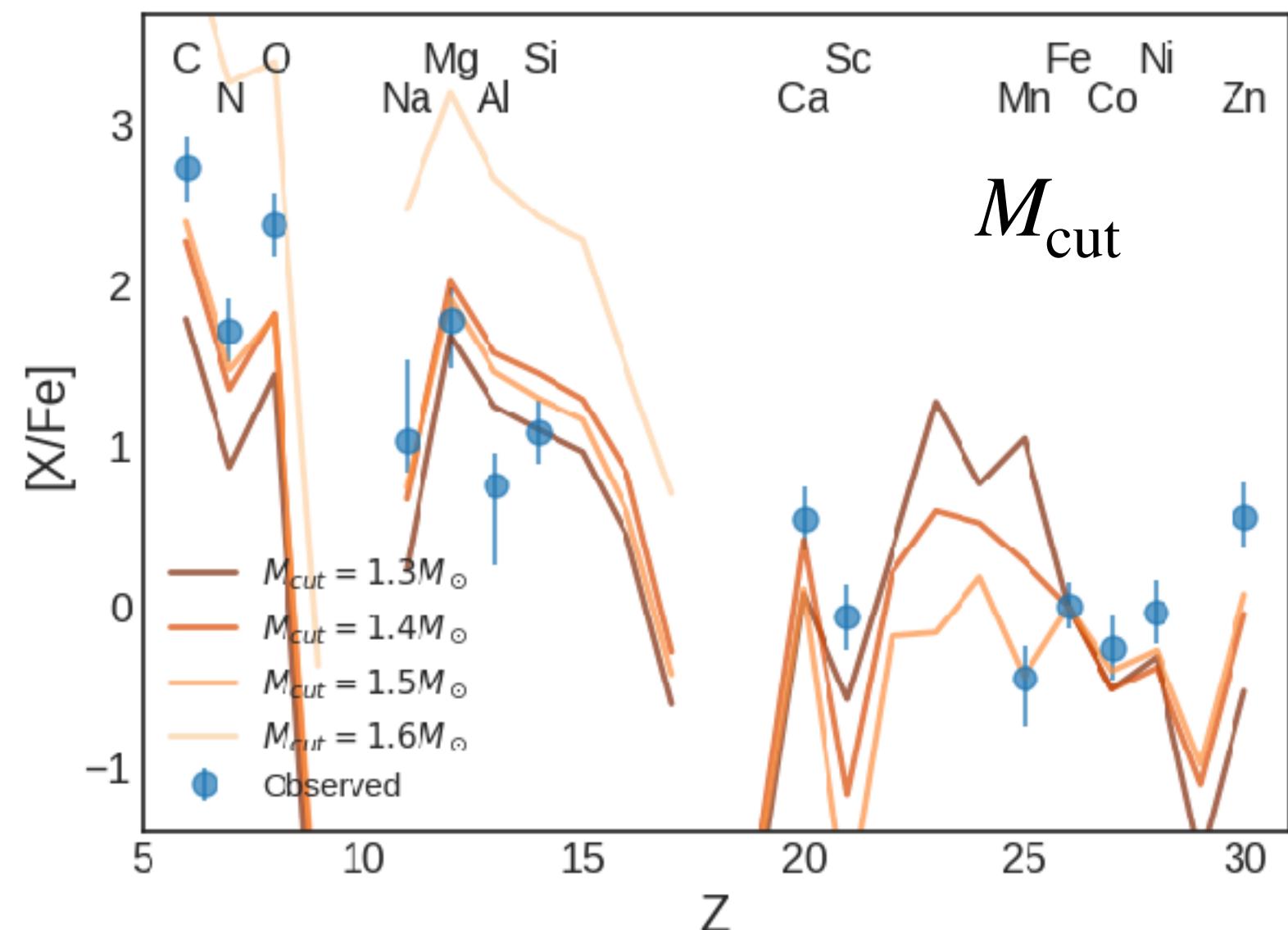
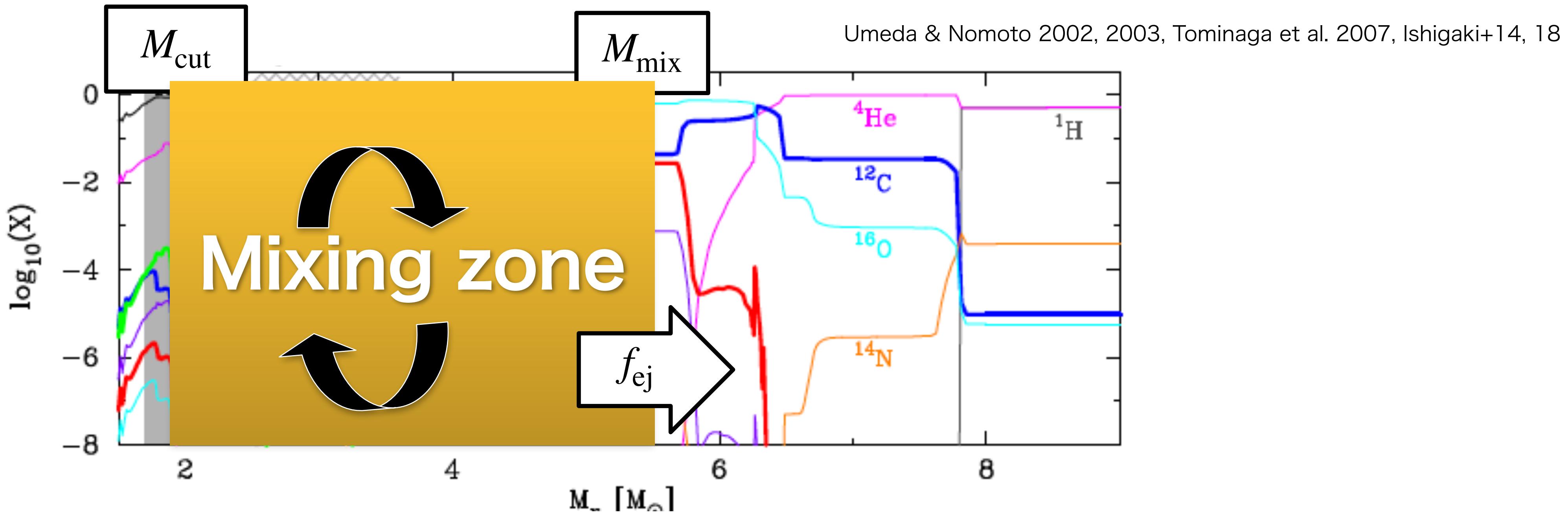
- 軽元素 (C, N, Mg) の分散が大きく、鉄族元素で小さい
- 元素間の相関
- 超新星爆発イールド・化学進化モデルとの違い

特異な元素組成比を示す金属欠乏星

電子対生成型超新星($M = 260M_{\odot}$)モデルとの比較



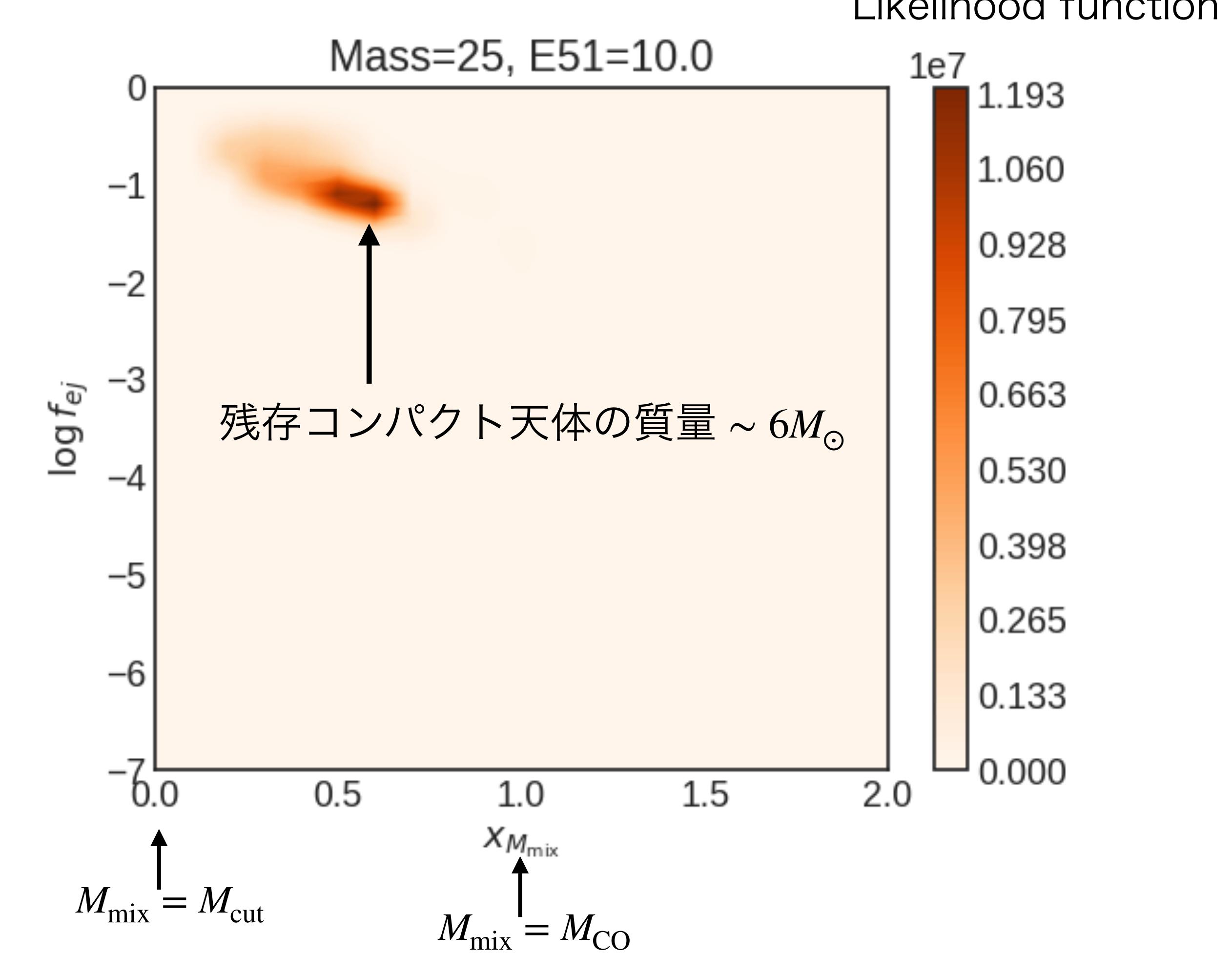
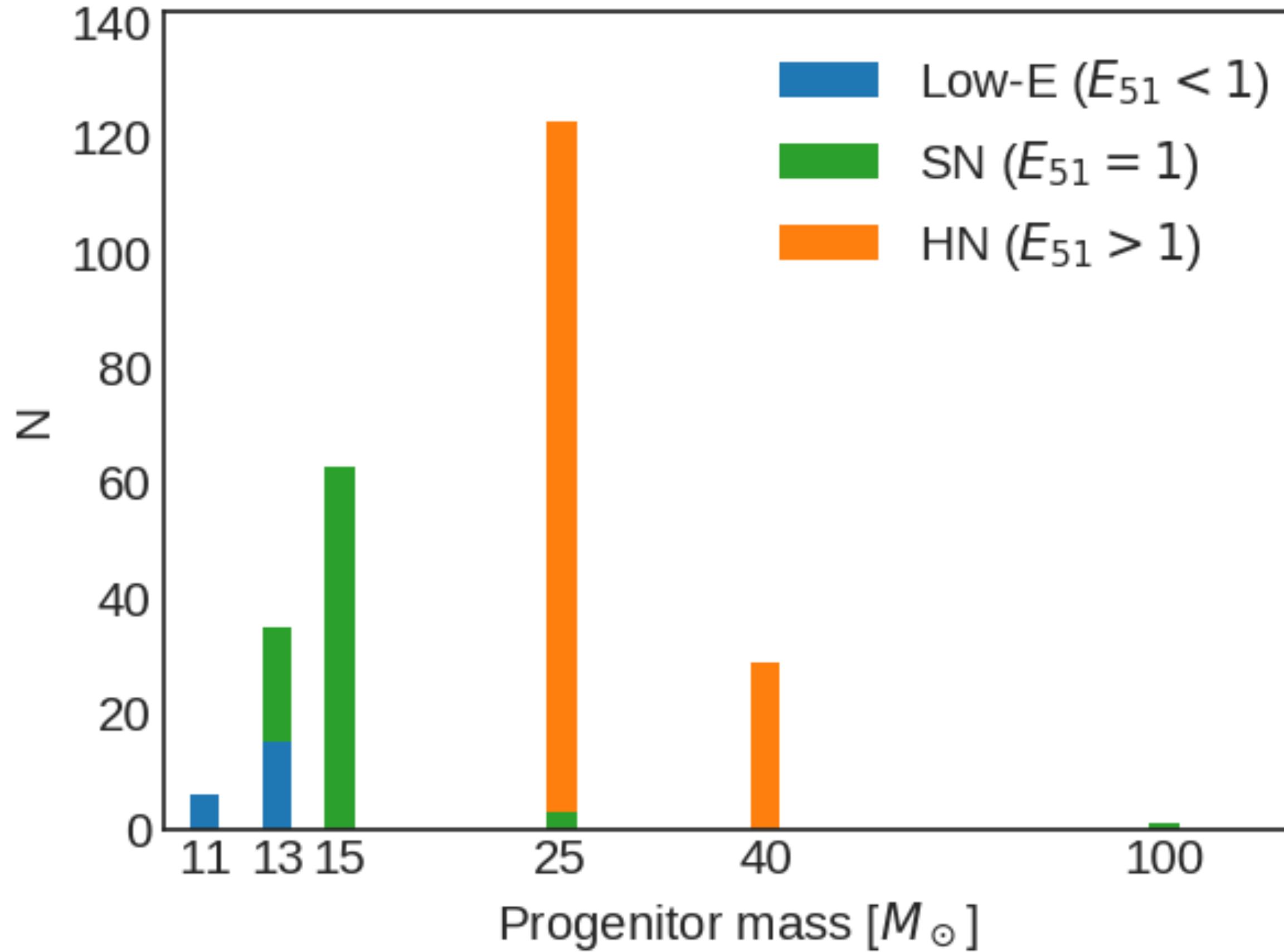
元素組成比と初代星超新星爆発イールドモデル



複数の元素組成比 → イールドモデルへの制限

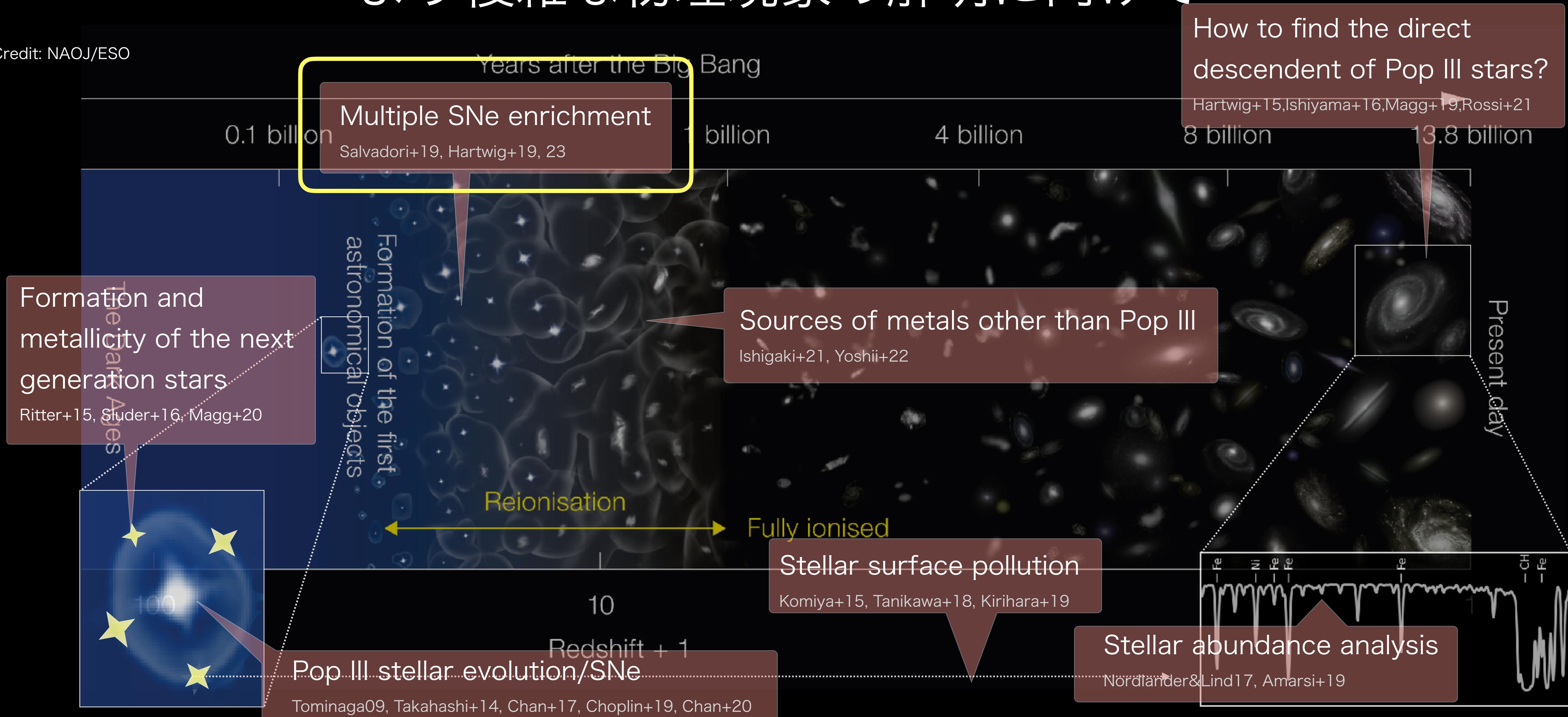
元素組成比から初代星質量への制限

See also Tominaga+14, Placco+14, Ishigaki+18



古い恒星で探る初代星・初代銀河の化学進化： より複雑な物理現象の解明に向けて

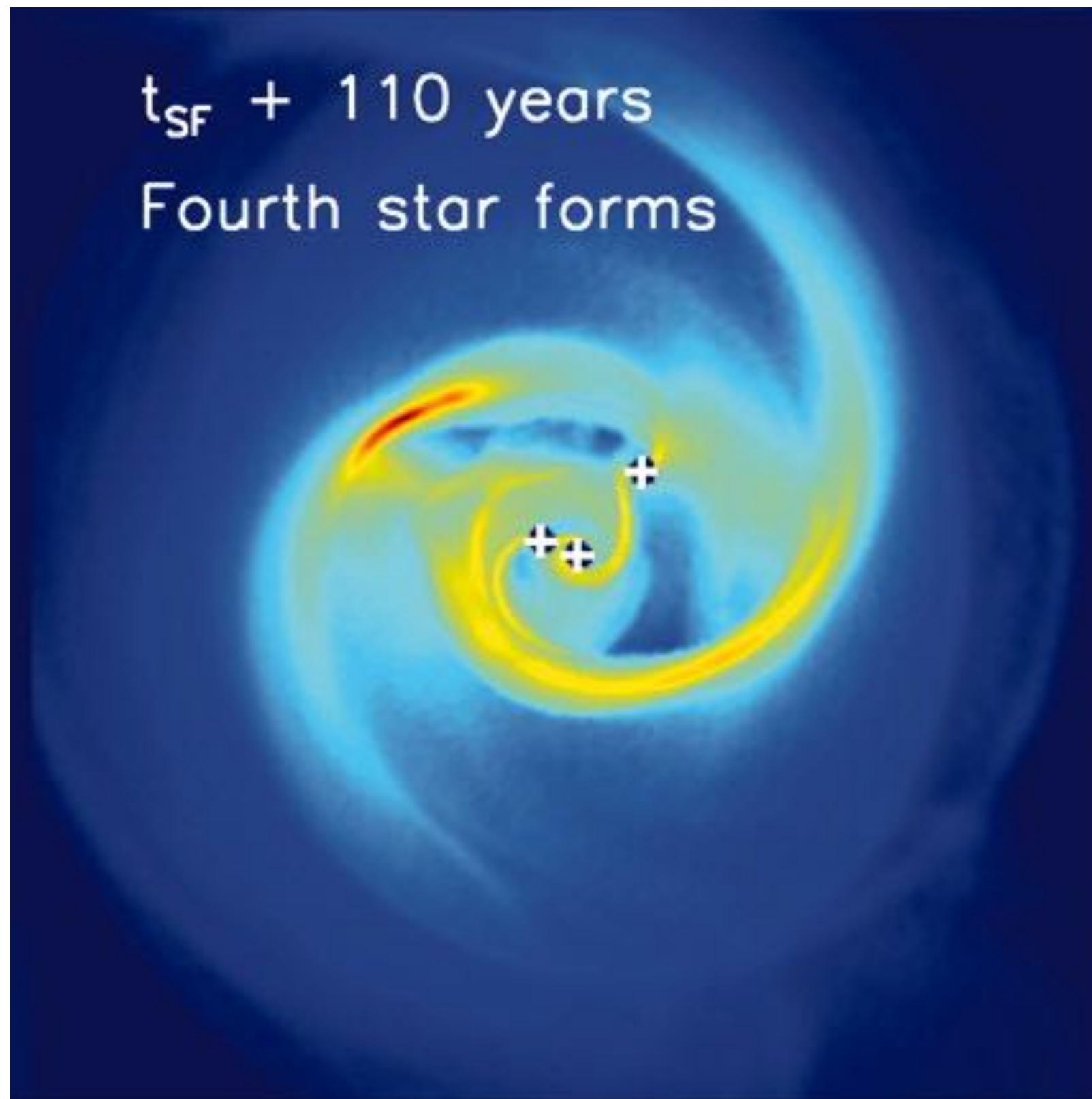
Credit: NAOJ/ESO



複数の初代星による元素汚染

初代星は連星・星団として誕生する

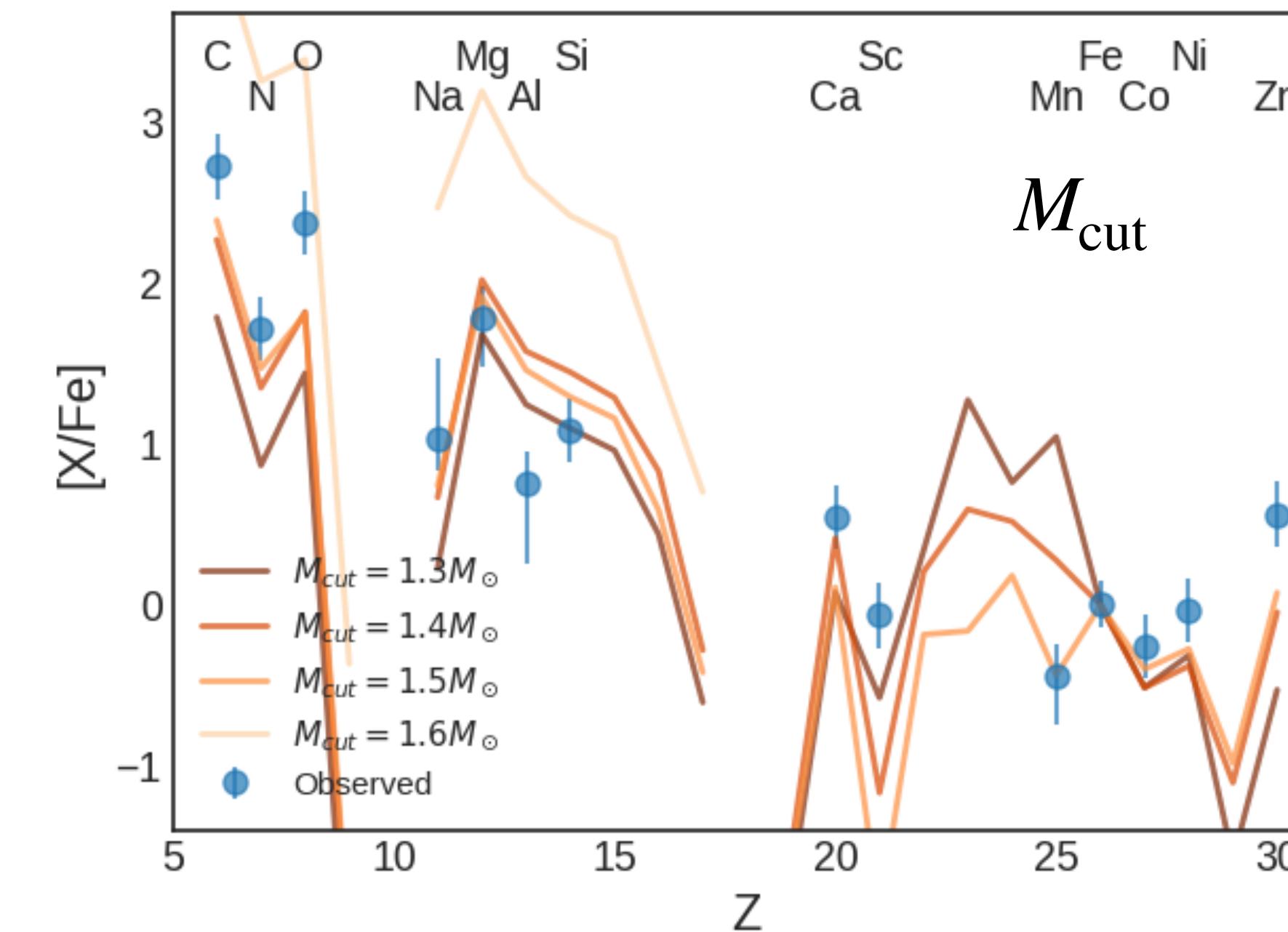
Clark+11, Greif+15, Hirano & Bromm+17, Susa+19,
Sharda+20, Sugimura+20



- ・ イールドモデルの複雑化

総パラメータ数 $> 2 \times$ 超新星イールドモデル単体のパラメータ数
(質量、エネルギー、爆発形状、フォールバック、物質混合・・・)

- ・ 限られた元素組成比データ



→ 複数の超新星爆発による元素汚染

個々の星の観測データでは、イールドモデルの制限が困難

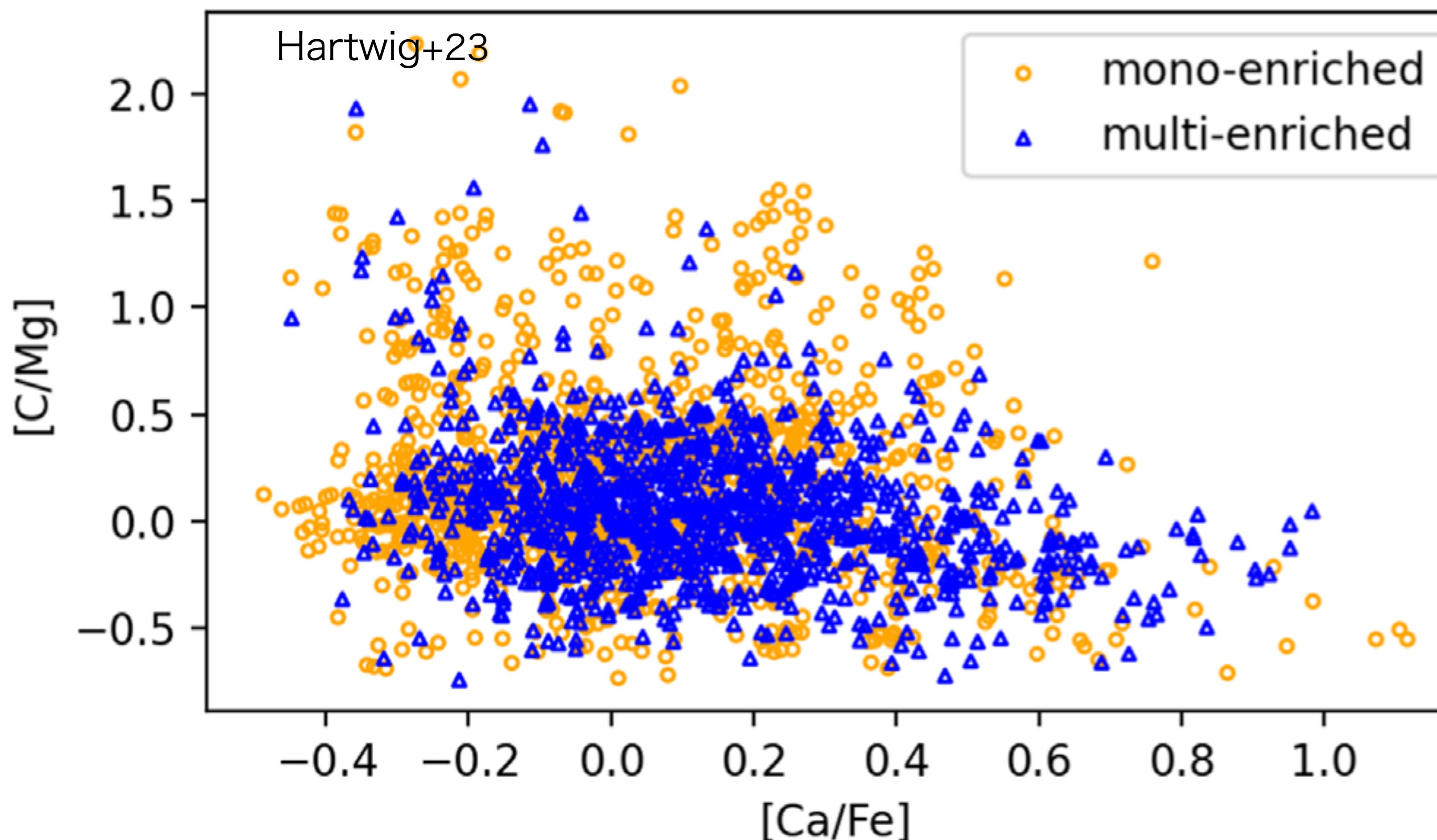
単独 vs 複数の超新星による元素汚染を識別

- ・ 多天体分光サーベイで得られる多数の星の平均的な振る舞い
- ・ 複数の元素組成比を組み合わせた制限

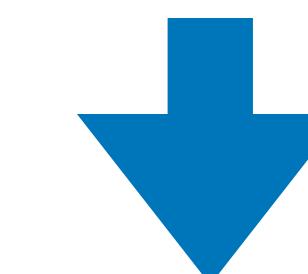
機械学習による手法

Hartwig, Ishigaki, Kobayashi, Tominaga, & Nomoto, 2023,
ApJ, 946, 20

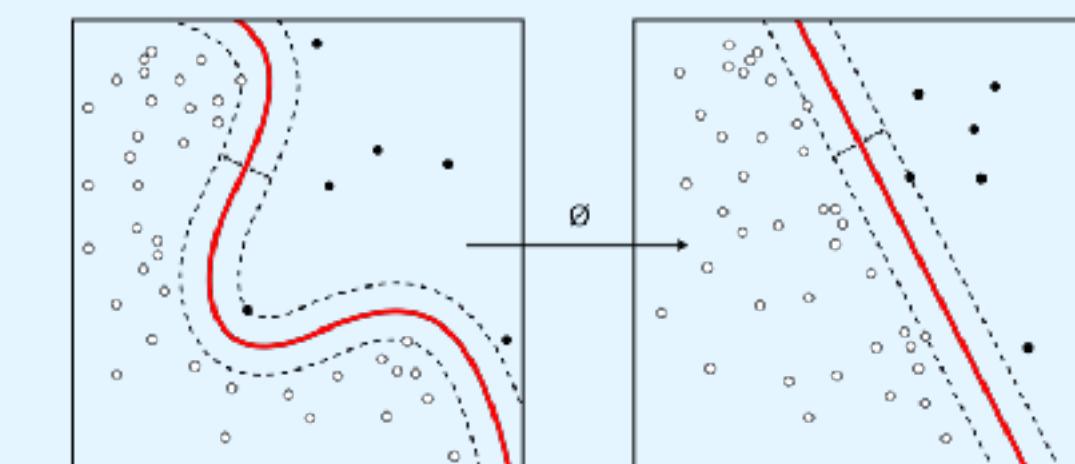
単独 ("mono-enriched") と複数 ("multi-enriched") の初代星超新星のイールドモデル



- ・ 境界が非線形
- ・ 2つのクラスの重なり



“サポートベクターマシン
(SVM) ”による分類

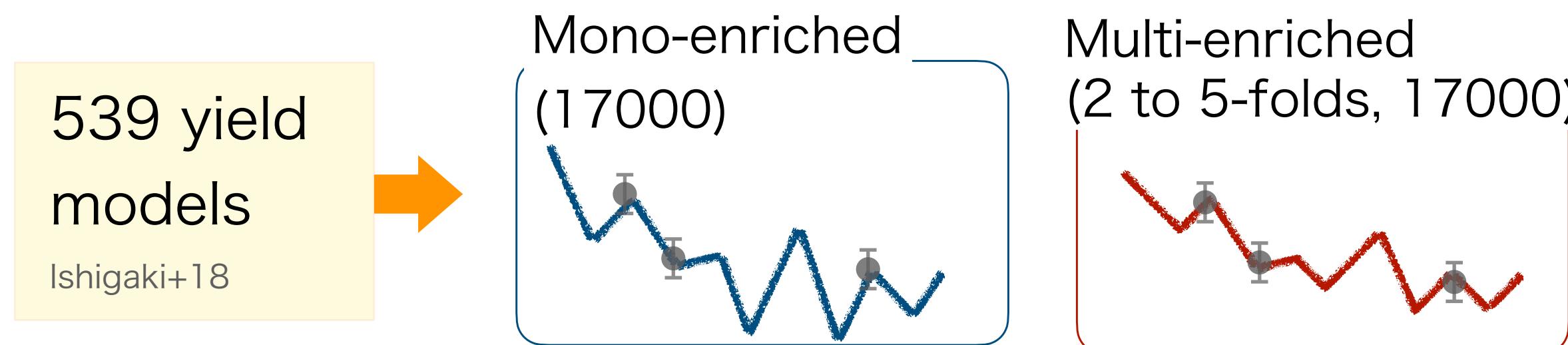


Credit: Alisneaky, Zirguezi @Wikipedia

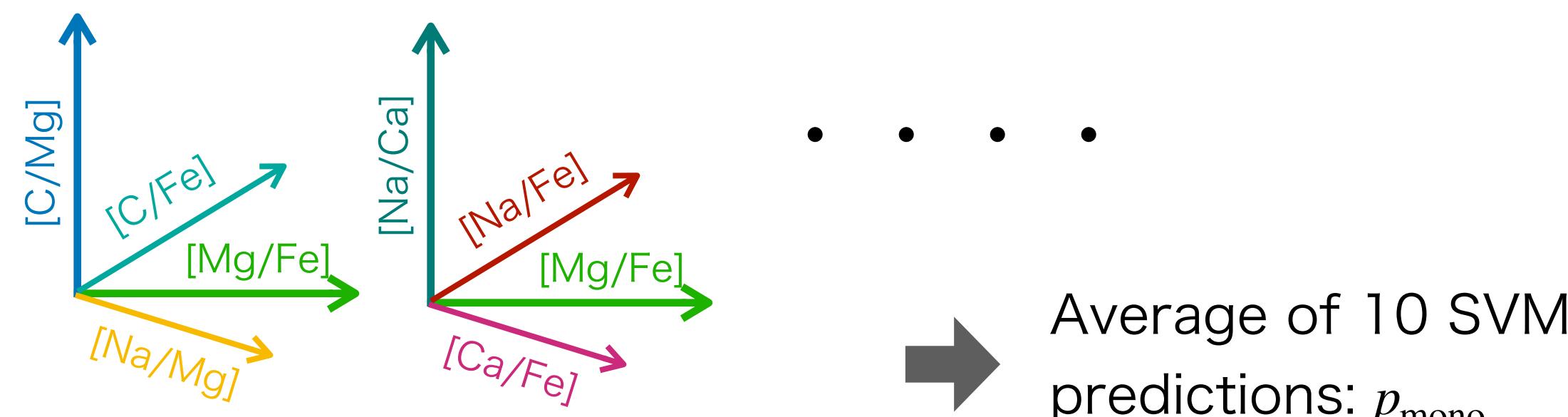
サポートベクターマシン (SVM) を使った超金属欠乏星分類の新手法

Hartwig+23

1. Create mock observation as a training set



2. Training 10 SVM models based on 24 [X/Y] ratios



3. Validation

Ground Truth	mono	multi	N/A
mono	0.20%	34.20%	15.60%
multi	0.21%	13.84%	35.95%
Prediction	mono	multi	

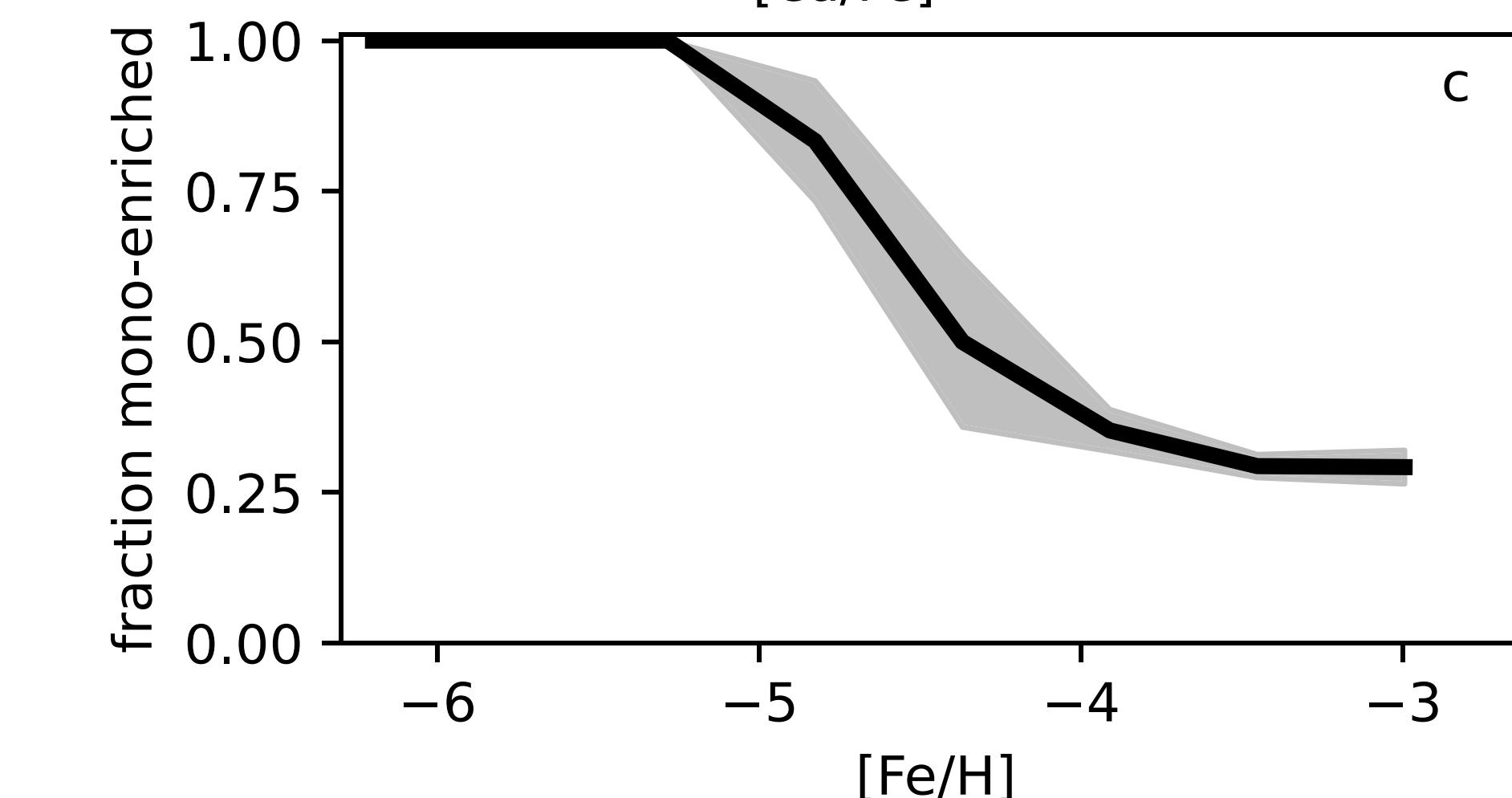
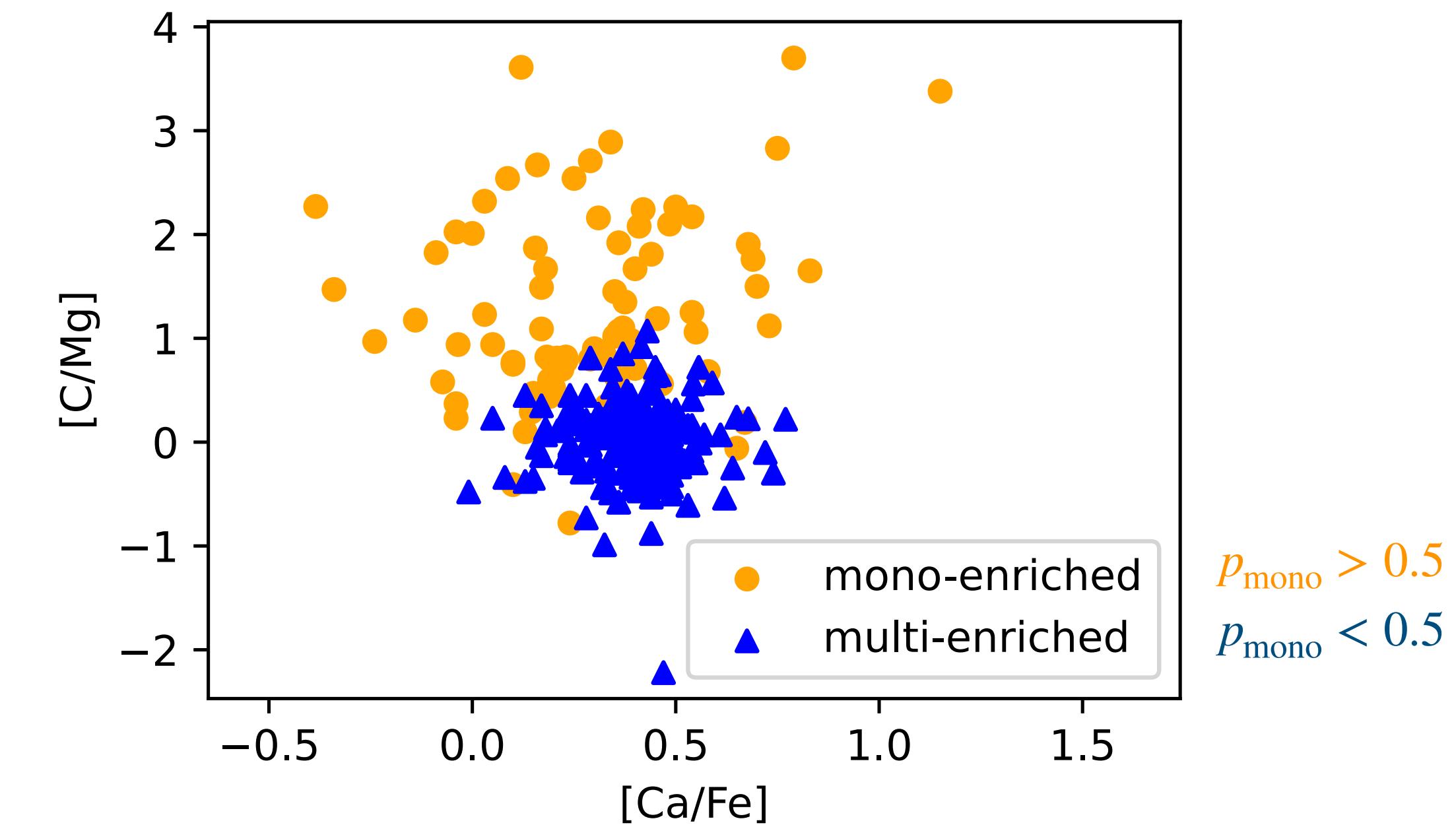
Accuracy: ~ 70 %
(w/o errors: ~ 79 %)

SVMモデル限界

- 2つのクラスの分布の重なり
- 事前分布の仮定

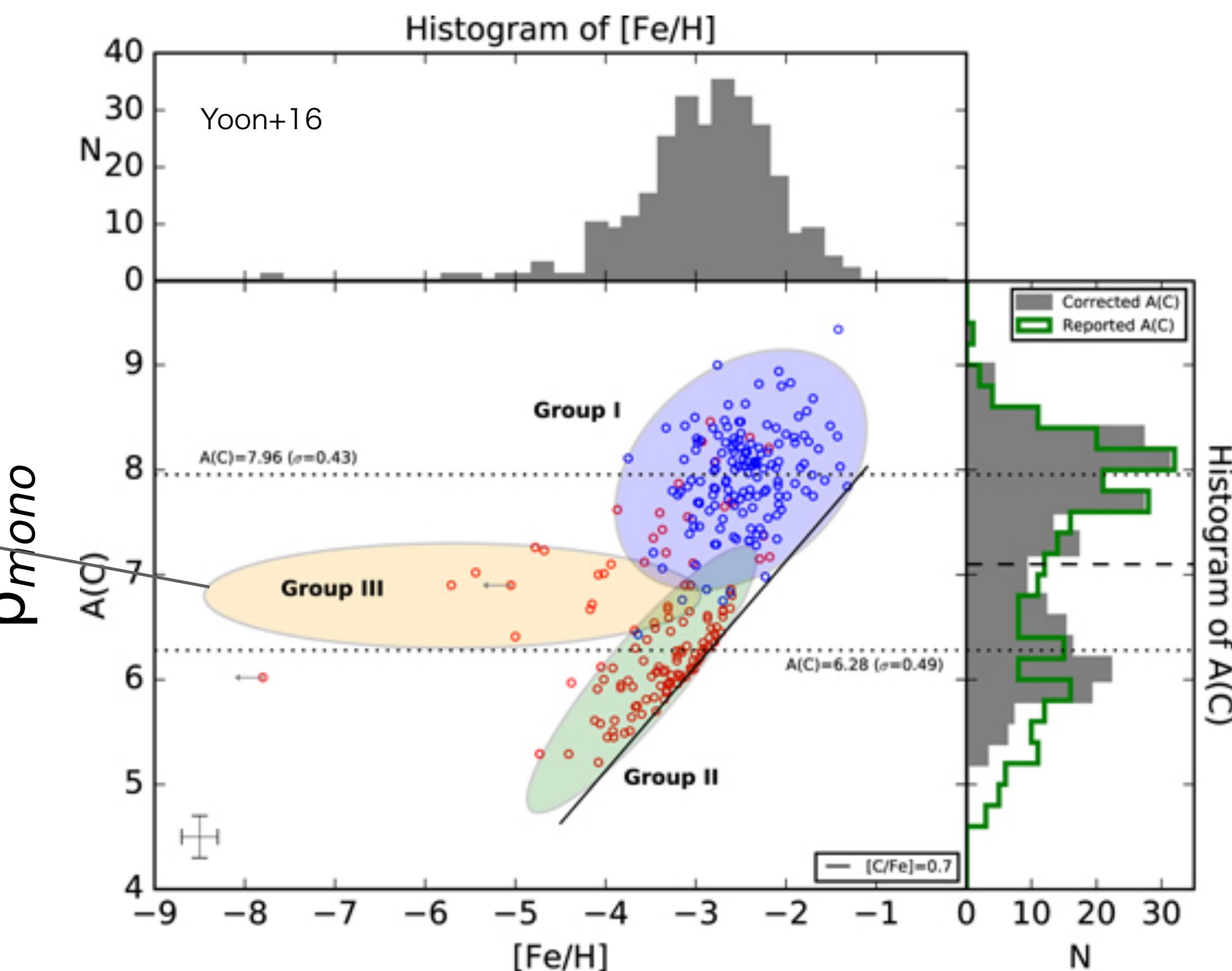
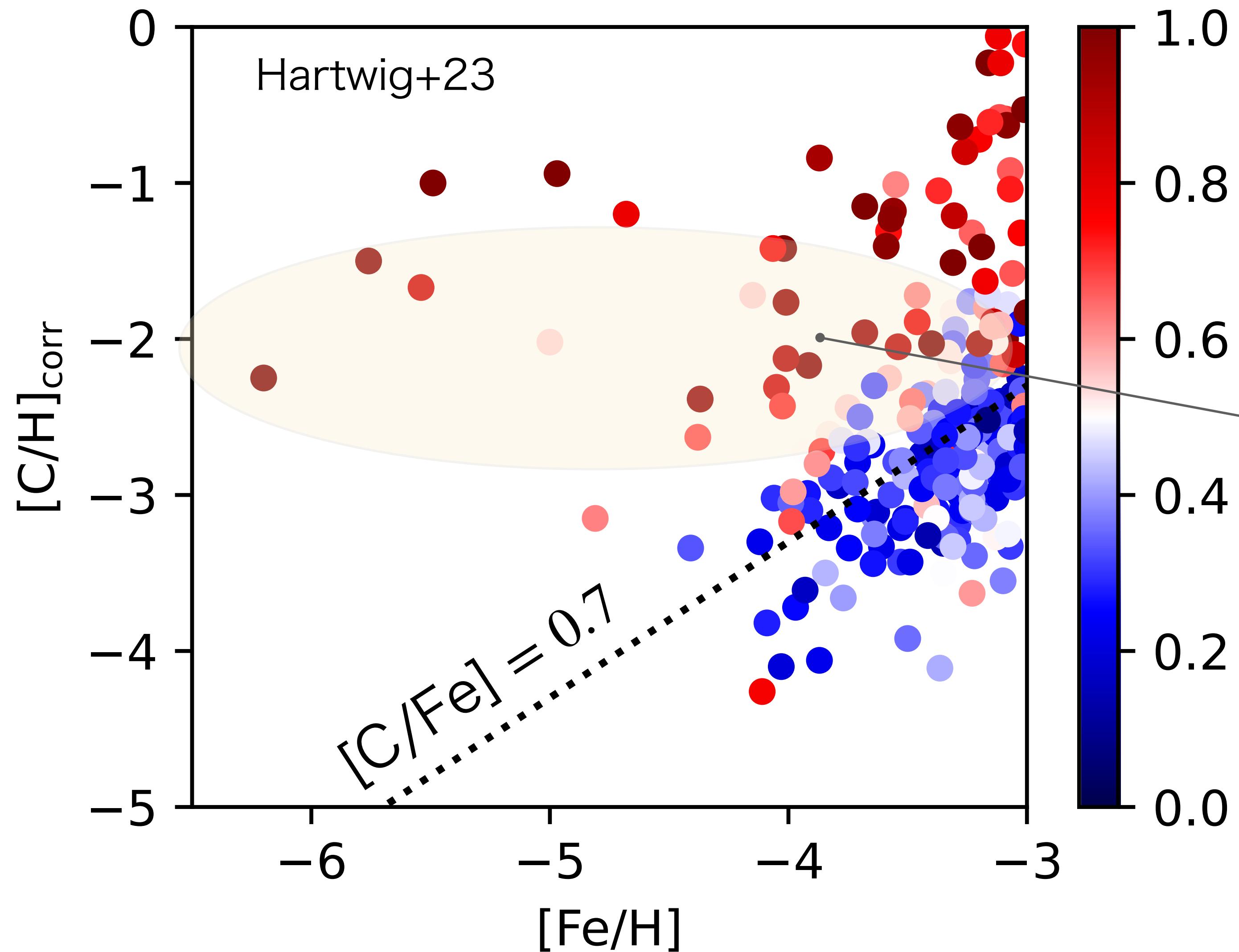
4. Applying to observational data:

462 unique EMP stars SAGA database (Suda+08), Ishigaki+18



炭素過剰と単独 の初代星超新星による元素汚染の確率 (p_{mono})

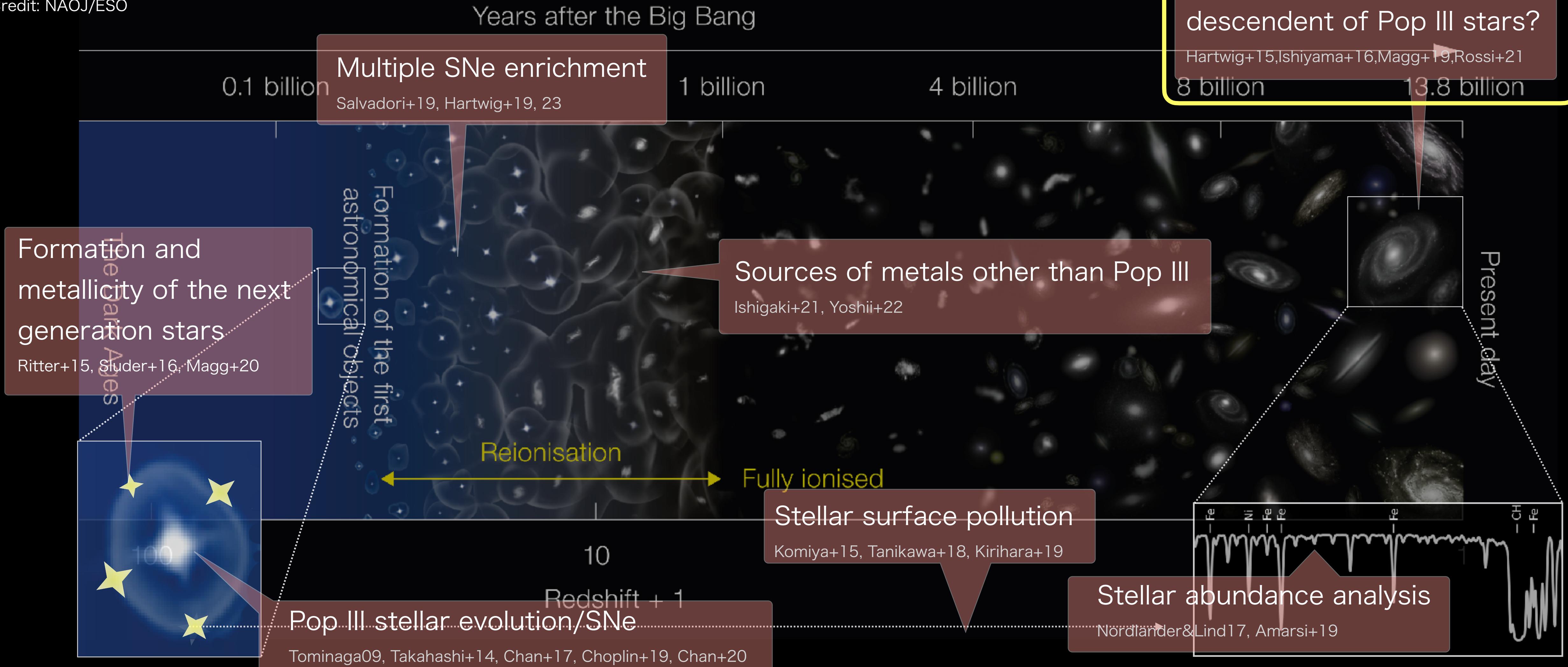
- 単独の初代星による汚染 ($p_{\text{mono}} > 0.5$) : $31.8\% \pm 2.3\%$
- 炭素過剰な星 ($[\text{C}/\text{Fe}] > 1$) : **単独**の初代星超新星による汚染に分類される



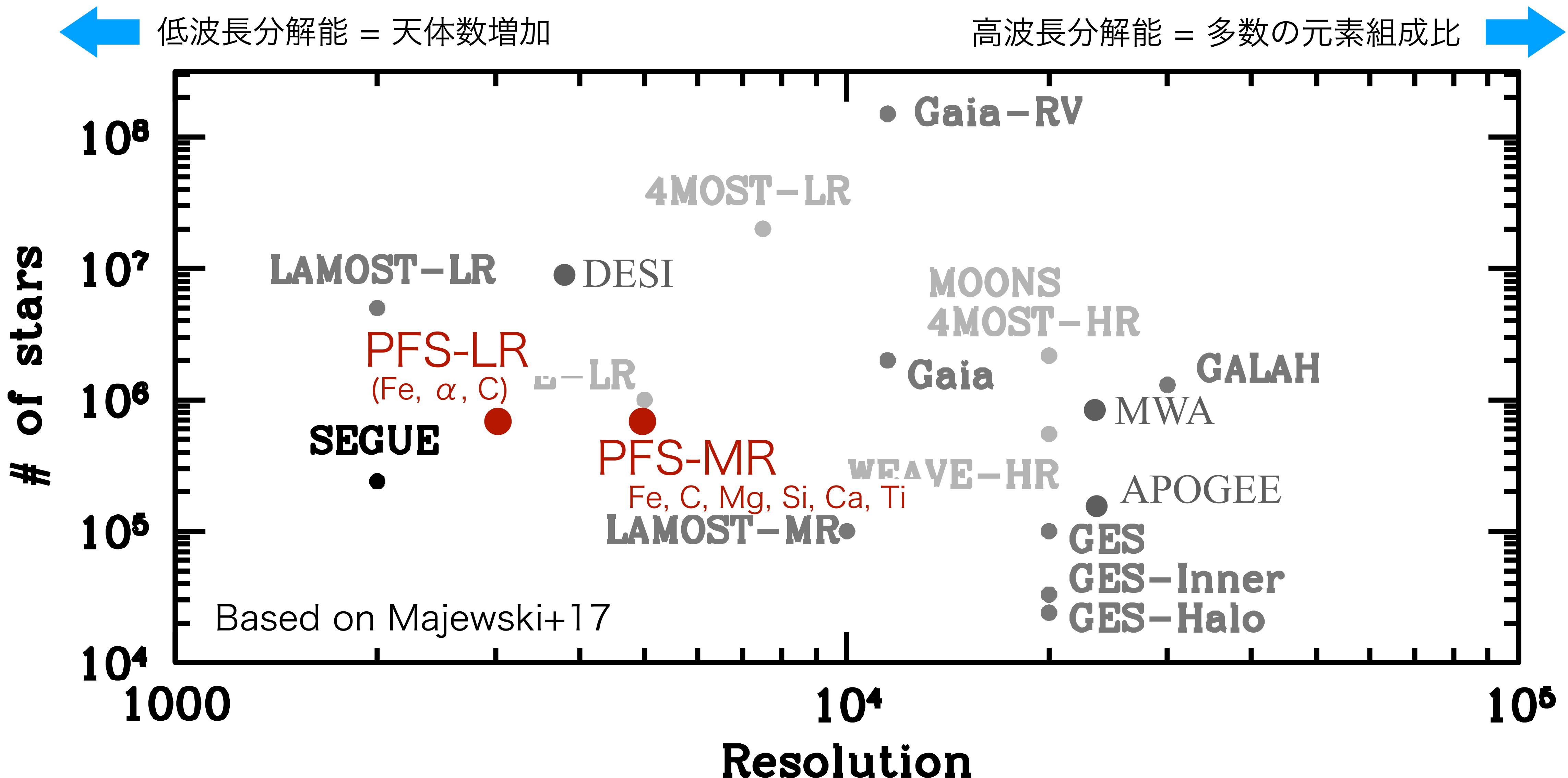
イールドモデル・観測データの進化
→ より正確な分類が可能

古い恒星で探る初代星・初代銀河の化学進化： より複雑な物理現象の解明に向けて

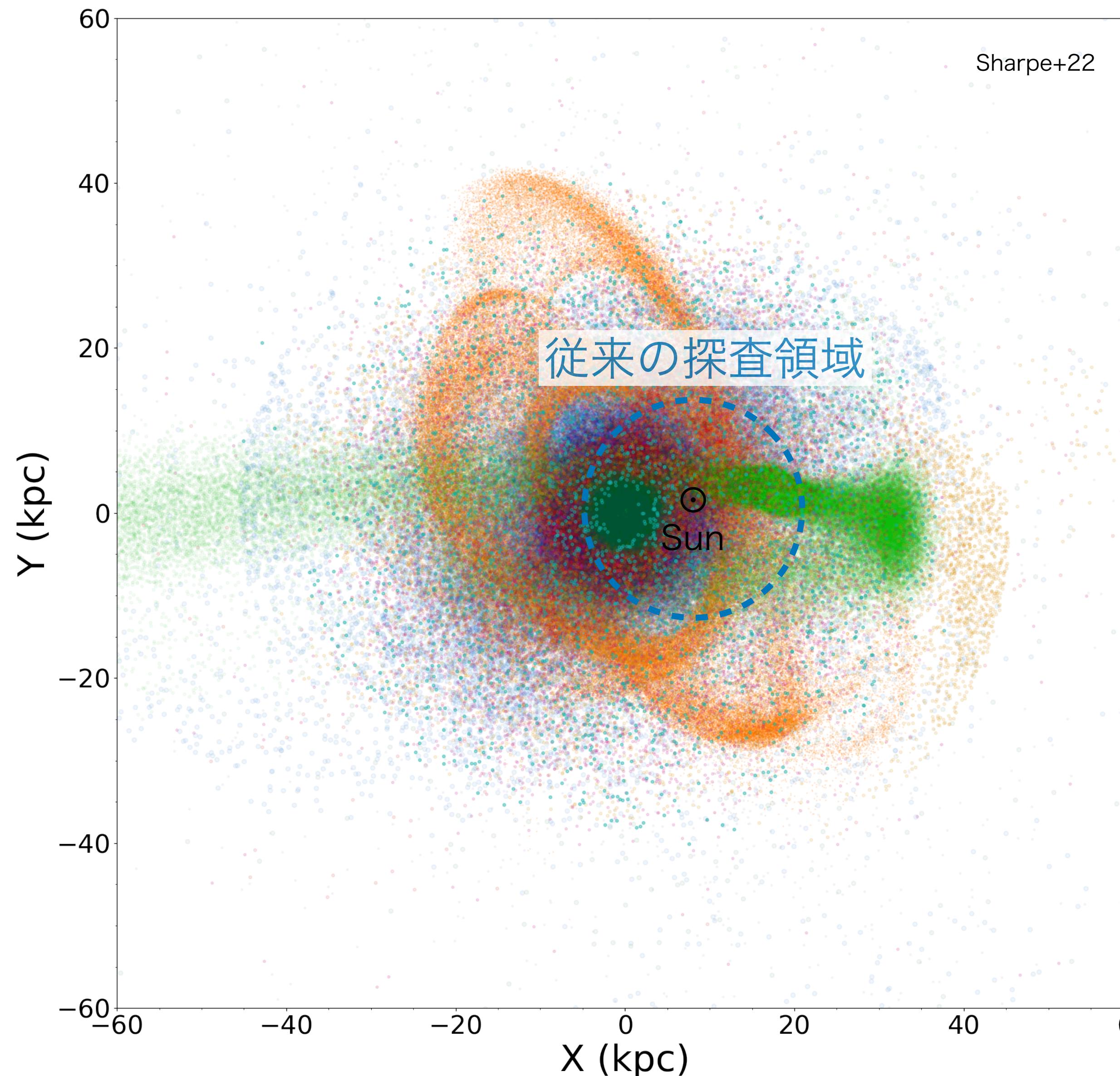
Credit: NAOJ/ESO



近年・将来の天の川銀河恒星系を対象とした多天体分光探査



外部ハローで元素組成比探査が重要



従来の探査領域に含まれない星種族

- 最近合体した矮小銀河
- 軌道角運動量が大きい矮小銀河
- より小さい矮小銀河（初代銀河の生き残り）

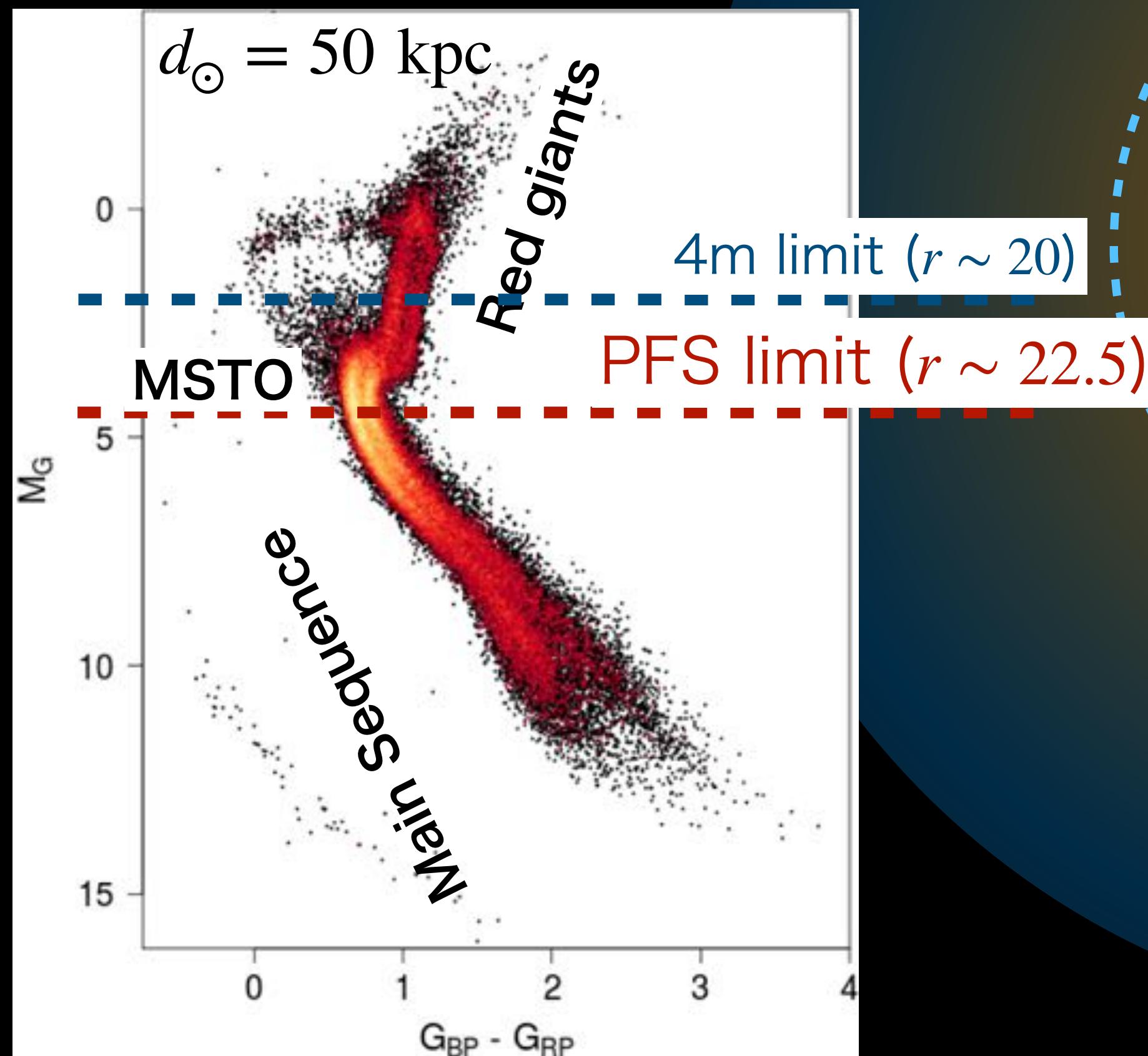
外部ハローでの元素組成の観測

- 平均的な金属量が低い
- 炭素過剰星の割合が高い

すばる望遠鏡/PFSでの展望

内部ハローの化学動力学解析

→ H3, 4MOST, MOONS, WEAVE, DESI, Milky Way Mapper



Solar neighborhood



8m Subaru Telescope



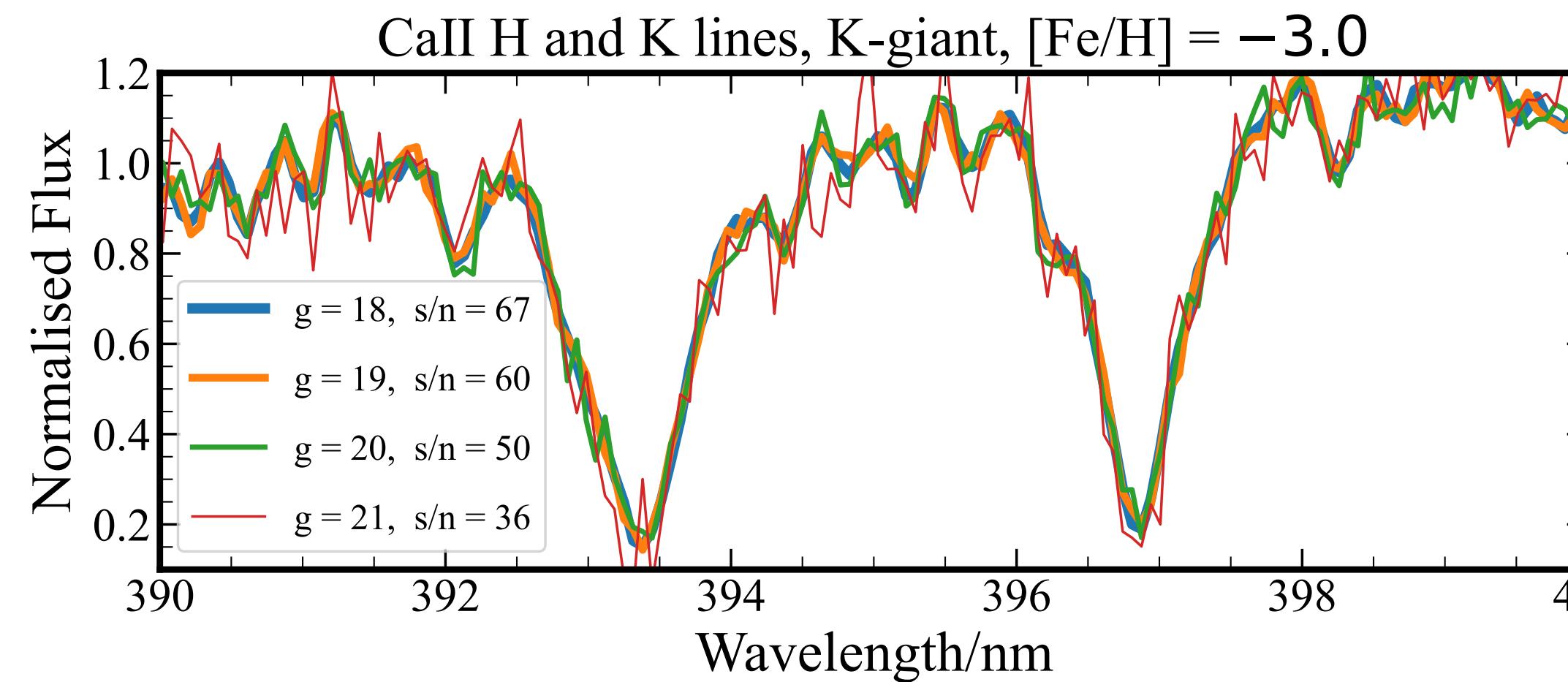
2400 fibers over 1.3 deg²

→ Prime Focus Spectrograph (PFS)

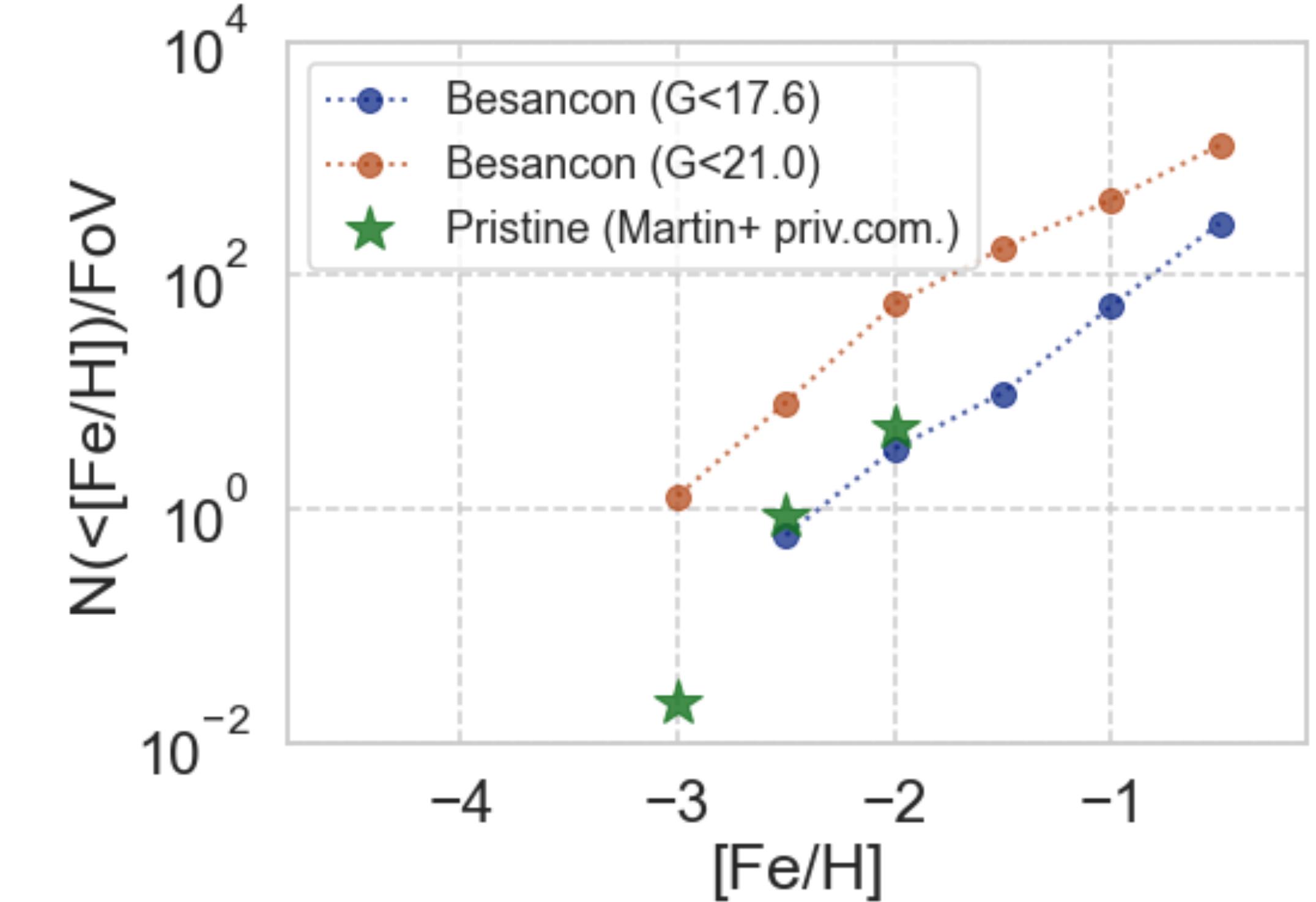
外部ハローでの金属欠乏星探査

すばる/PFSによる超金属欠乏星の探査

mock PFS spectra by Mohammad Mardini (IPMU)



PFS-SSP 「Ancillary program」として提案済み



候補天体の絞り込み

→ Subaru/HSC による狭帯域フィルターサーベイ
("ZERO" survey: Chiba+)

PFSの深い限界等級($G \lesssim 21$)

→ 視野あたりの超金属欠乏星の数が大幅に増加

まとめ

- ・ 天の川銀河恒星ハローの新しい描像
 - ・ 位置天文、撮像・分光、星振動学サーベイによる位相空間+化学組成+年齢情報 → ハローのビルディングブロックとなつた矮小銀河の性質と合体のタイミングを定量的に議論できるように
- ・ 古い恒星の元素組成で探る初代星・初代銀河の化学進化
 - ・ 「銀河考古学」の基本的なアプローチ
 - ・ 最も鉄欠乏した星の発見 → 炭素過剰が普遍的に見られる
 - ・ 金属量分布 → 複数のサーベイが独立に低金属量側を制限。理論モデルの検証が可能に
 - ・ 元素組成比分布 → 分散、トレンドが高い統計精度で確率。特異な組成をもつ星の発見
 - ・ 組成比から初代星質量への制限 → $M = 15 - 25M_{\odot}$ の初代星が元素汚染源として支配的
- ・ より複雑な物理現象の理解に向けて
 - ・ 複数の初代星の元素汚染の痕跡を残す星を検出する新手法 (Hartwig+23)
 - ・ すばる/PFSが未解明の外部ハローの探査に威力を發揮