

辻本拓司(国立天文台)

宇宙化学進化、3つのキーワード

□ <u>太陽近傍</u>: 我々が唯一精密に知り得る領域
 □ <u>銀河系</u>: 太陽近傍は銀河系のone pieceに過ぎない
 □ <u>r過程元素</u>: 初めて起源天体が同定され新展開へ

第6回超新星ニュートリノ研究会,1月6-7日 at 宇宙線研



ァ過程元素 → 太陽近傍および銀河系でのヶ過程元素(Euなど)進化が重要



✓ high-zでは星形成率、つまり超新星レートの不定性は極めて大きい

✓ 幸いにも、超新星背景ニュートリノのそのほとんどが、z<1からの寄与



$$\frac{\mathrm{d}F_{\nu}}{\mathrm{d}E_{\nu}} = \frac{c}{H_0} \int_0^{\mathrm{dmax}} R_{\mathrm{SN}}(z) \frac{\mathrm{d}N_{\nu}(E_{\nu})}{\mathrm{d}E'_{\nu}} \frac{\mathrm{d}z}{\sqrt{\Omega_{\mathrm{m}}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda}}}$$

宇宙におけるstellar mass budget



"超新星背景ニュートリノにおいて銀河系の化学進化は極めて重要"

銀河系化学進化、*r*過程元素進化の 近年における革新的進展

進展1:銀河系進化理論の新展開

星の動径方向の大移動(radial migration)

進展2:銀河系観測データの新展開

✔銀河面広範囲にわたる化学組成情報

✓星の年齢情報

▲ 化学組成の銀河系面時空マップ

進展3: r過程元素起源の同定

中性子星合体からの重力波検出と重力波対応天体からの電磁波検出



太陽近傍星の組成比の化学進化



 $[Fe/H] = \log (Fe/H)_{\underline{a}} - \log (Fe/H)_{\odot}$



同じ時間で到達する金属量([Fe/H])が少ない

太陽近傍の星形成史



およそ100億年にわたり星形成が 定常的に続いている





Accretion of satellite galaxies evidenced in the Galactic halo

約100億年ほど前に比較的大きな銀河が銀河系に衝突し Helmi+ 2018 多くのハロー星を作った



銀河系はsmall systemが降着しながら、 構造形成がなされ、そして現在まで進化してきた



✓~100億年前に~10⁹ M_☉のmassive dwarf galaxyが降着

→ thick disk形成

thin disk形成

Gaia-Enceladus

✓現在Sagittarius galaxyが降着中

銀河系ハロー: a graveyard of merged galaxies







金属量勾配がある:銀河の中心に近いほど、金属量が高い



銀河系の内側ほど星形成が活発な中、速く形成された

inner disk: 昔に短いタームスケールで形成された outer disk: ゆっくりと現在にわたって形成中



銀河系全体では、星形成は初期ほど(high-z)高く、 時間と共に減少していく傾向となる

(z<1のcosmic star formation rateの傾向におおよそ合いそう) (=超新星レートも現在に向けて減少していく)

銀河系円盤形成・進化に関する最新描像

銀河系円盤内を星は動径方向に大移動: radial migration

(Sellwood & Binney 2002; Schoenrich & Binney 2009)

R_{form} [kpc]



R_{form} [kpc] 生まれた位置





太陽系形成論においても重要

太陽も銀河のもっと内側で形成さ れ、そして移動してきた可能性が大

そもそも46億年前に太陽金属量であることが不思議 何故なら、現在のガスの金属量はおよそ太陽と同じ 46億年間、金属量が増えていないとは考えにくい



太陽系の素材(ダスト)はもっと銀河の内側からやってきた可能性も



太陽近傍星の化学組成分布の理解



銀河系観測データの新展開I

大規模サーベイによる銀河面広範囲にわたる化学進化情報取得



APOGEE (the Apache Point Observatory of Galactic Evolution Experiment)

- ✓ 2011~2020
- $\checkmark > 10^5$ stars
- ✓ *H*-band (1.5-1.7 microns) $A_H / A_V \sim 1/6$

 \checkmark radial velocity & ~15 chemical elements





grey is $A_V > 1$

Gaia-ESO survey

2011~



Gaia衛星 (2013年に打ち上げられたヨーロッパの 全天可視光位置天文観測衛星) 10マイクロ秒角クラスの精度で約10億個の 星の距離と固有運動を測定

✓>10⁵ starsについて、VLT (very large telescope)による高分散可視光 観測を行い、Gaia情報に視線速度、化学組成情報を提供する

✓ >12 chemical elements









+理論

星の年齢導出に飛躍的な進歩

これまで化学進化の時間は、重元素量([Fe/H])がその指標として

星の年齢そのものが使われる時代へ

化学進化パス 化学進化パス 100 Myr 5 Gyr 1 Gyr

[Fe/H]

化学進化儿;



Stellar age estimate from asteroseismology



TESS(トランジット系外惑星探査衛星)へ

2018年4月に打ち上げ (7月から観測スタート) 全天の85%(*Keplerの*400倍)をカバーする ~15,000 targets/sector (total: 26 sectors) v_{max} △

赤道座標で表した1年目のセクターのマップ



数字はセクターの番号。色の違いはカメラの違い。 赤,マゼンタ,青,緑の四角はそれぞれは、カメラ1, 2,3,4の視野を示す。

(天文学辞典より)



(Silva Aguirre+ 2019)

for 25 stars

combined with Gaia parallaxes

精度 質量: 5-10% 年齢: 20% Other techniques for age dating



Other techniques for age dating

for 巨星

[C/N] can be a chemical clock







Summary on 宇宙化学進化

✓超新星背景ニュートリノにおいても重要なz<1での宇宙星形成史や 宇宙化学進化は銀河系の進化に類似するものと考えることができよう

□我々がこれまでによく理解しているのは太陽近傍の進化であって、 銀河系全体の進化はそれとは異なるものである

✓そして、今後我々は銀河系ディスク全体にわたる化学組成の時空マップを得るであろう → 銀河系全体の進化への理解

✓銀河系進化に関する理論、観測から両面からの大きな進展

■星は動径方向に大移動をする

 → 太陽系の物質起源を考える上でも不可欠な要素
 ■個々の星の年齢を評価することが当たり前の時代へ

r過程元素の化学進化



GW170817で決定的に



化学進化&星の化学組成からのアプローチ

✓中性子星合体起源説で説明できるか(矛盾しないか)?

🔶 銀河系の化学組成でチェック

✓中性子星合体起源の証拠を見れるか?

r過程元素合成イベントの特徴は





近傍の矮小銀河にその痕跡を見ることができる (稀さが際立ち、そのイベントの痕跡を直接捉えることができる)

The rarity of *r*-process event is identified

faint (small-mass) dwarf galaxies





— no counterparts in other UFDs fine a big abundance jump

残された(未解決な)課題

✓ r過程元素合成サイトは中性子星合体だけか?

特殊な超新星(磁気駆動型超新星, Collapsar)も候補 (Winteler+2012, Nishimura+2015) (Siegel+2019)

✓中性子星合体は全てのr過程元素を作るのか? どの元素を作り、どの元素を作らないのか? 軽い元素は(通常の)超新星で作られた?

(e.g., Montes+ 2007, Qian & Wasserburg 2007)

r-process enrichment in the Galaxy

The prediction by NS mergers is NOT compatible with the observed feature



contribution (~80%!) from collapsars (Siegel+2018).

r-process enrichment in the Galactic Bulge



Study of the Galactic bulge confirms that *r*-process enrichment with $DTD \propto t^{-1}$ is not consistent with the observations.

Faster enrichment such as the form of DTD $\propto t^{-1.5}$ is required.

r-process enrichmentのdelay time distribution に要求されることからの知見



でかつ

NS mergerで100%r過程元素ができる

ということはない



星のr過程元素組成から示唆される中性子星合体レート

太陽組成中のEu

$$R_{NSM} \approx 230 \left(\frac{M_{ejecta}}{0.01 M_{\odot}}\right)^{-1}$$

一方、

the event rate of NSMs deduced from the gravitational-wave detection by Advanced LIGO/Virgo Observing Runs 1 and 2

gives 110-3840 Gpc⁻³yr⁻¹ (the 90% confidence intervals) with the most probable value around ~1000 Gpc⁻³yr⁻¹

中性子星合体で十分量は説明できそう

NS mergers, in general, do not seem to produce light r-process elements.

Implication I

"Galactic halo field stars"

the uniformity of elemental ratios exists only for heavy *r*-nuclides

A nonuniform abundance pattern for light *r*-nuclides may suggest that they are produced in the different site from heavy *r*-nuclides But, see TT, Nishimura & Kyutoku (2020)



the latest discovery of a signature of synthesized light r-process element (Sr) in the afterglow of GW170817





(Watson+ 2019)

Implication II "Globular cluster M15"





Implication III

Isotope anomalies are seen only for light r-nuclides



What made isotope anomalies?

(Yokoyama+2020)

Late injection of SN grains

Trinquier et al. (2007) Qin et al. (2011)

variations in ⁵⁴Cr/⁵²Cr



Likely, ejection from a nearby CCSN

 \checkmark Other isotopes support

✓ depends on the location from the sun

suggesting that regular CCSNe produce light *r*-nuclides



supporting evidence?



solar twins' Th abundance

(da Silva+ 2016)

Summary on r過程元素の化学進化

✓r過程元素の起源としては、評価される頻度の観点からも (少なくともmajor siteとして)中性子星合体だと言えそうである

 ✓ただし、星形成からr過程元素合成までの時間が短い(数百万年 から数千万年)populationが存在しなくてはならない
 □それが超新星である可能性も否定はできない
 □銀河系のあらゆる種族の星(ハロー星を含め)から示唆される

✓中性子星合体は全てのr過程元素を供給している可能性は高いがしかし、

□軽いr過程元素は状況が複雑そう

それらを作らない中性子星合体もあり? 超新星も作る? □actinide (Th&U) boost星の起源は?→ 青木さんのトーク

✓地球を含めた太陽系は、金属量は多い(十分にある)がUやThは 相対的に少ない環境で生まれたか → 程よい熱量を地球は確保?