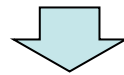


# r過程中性子星合体説を示唆する 銀河の化学進化

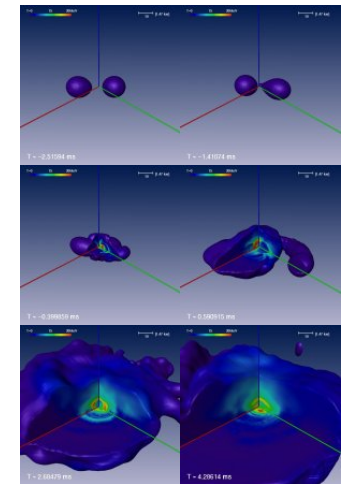
辻本拓司 (国立天文台)

銀河系と近傍矮小銀河の星の化学組成解読



r過程元素中性子星合体説

- ✓ 銀河系の化学組成
- ✓ 近傍矮小銀河の化学組成
- ✓ 元素合成パターン
- ✓ 合体頻度(つまりは、重力波検出レート)

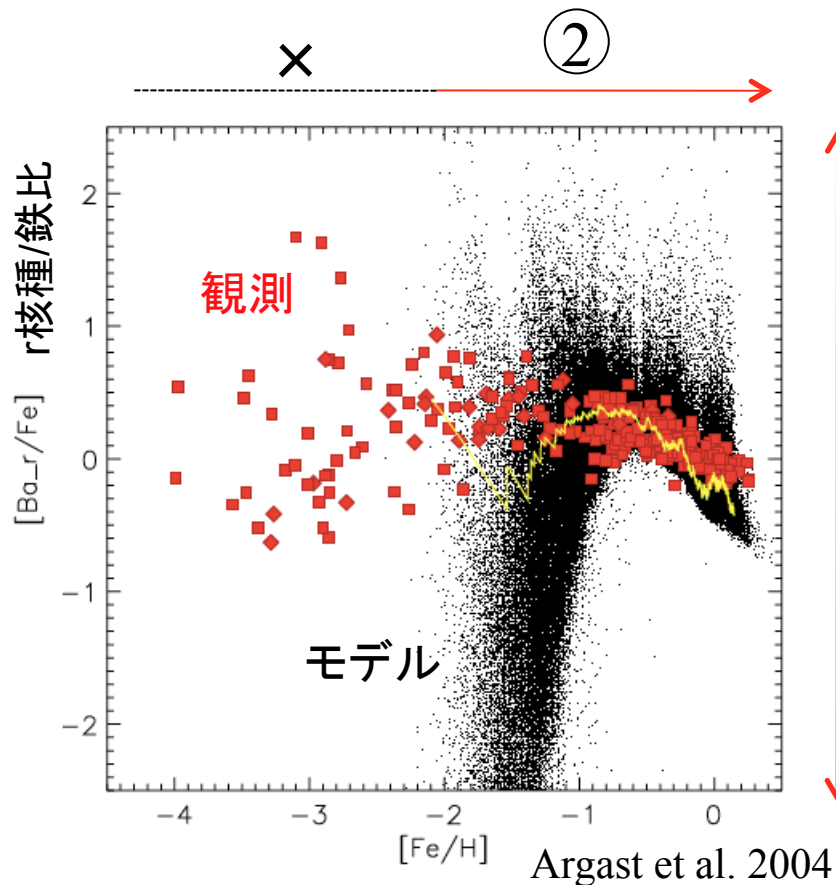


「コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域」

2月12-14日 at 京大基研

# r過程元素起源に関する過去の流れ

唯一の観測からの制限は銀河系の星の化学組成であった  
それが、中性子星合体説を否定してきた (1990~)



① r核種/鉄比に予言される大き過ぎる分散

要因

各イベント当たりに放出される  
大量のr核種量

~超新星の場合のおよそ100~

1000倍

② 遅過ぎるr核種放出

要因

I. 合体するまでに要する時間

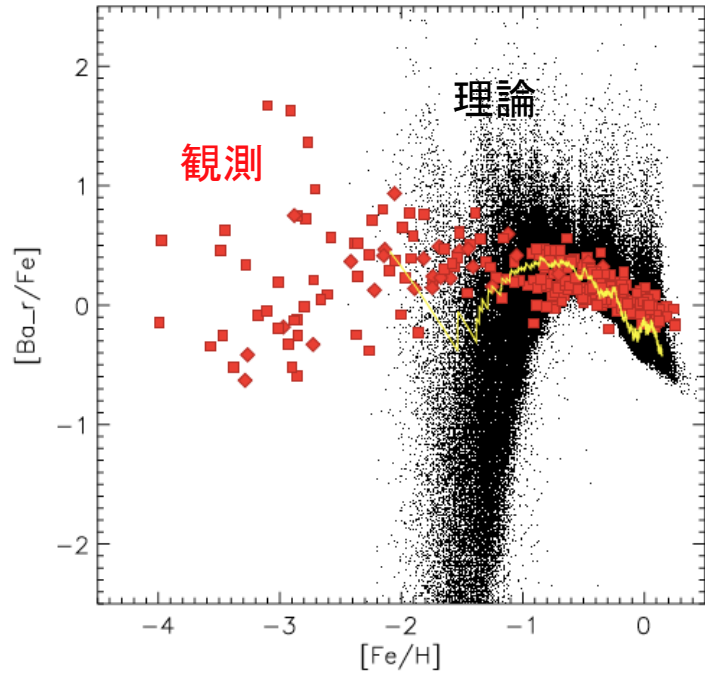
II. 現象のrarity

超新星の場合のおよそ

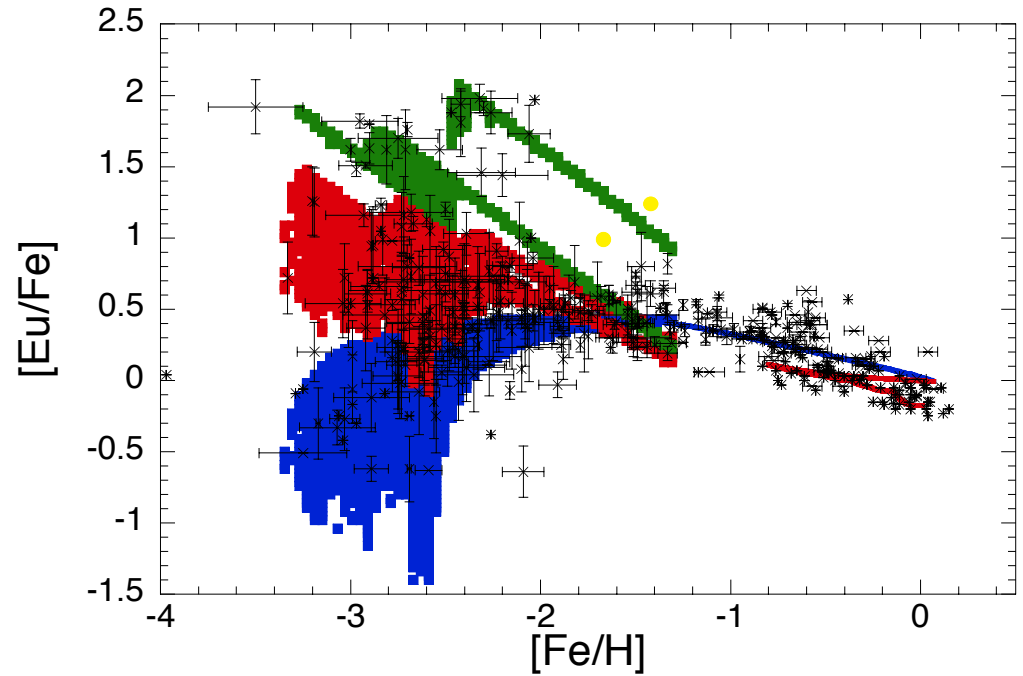
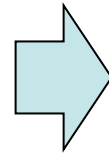
1000分の1

➡ r核種を超新星でいかに作るかに研究が特化されてきた

# 銀河系化学進化問題は解決される



Argast et al. 2004



TT & Shigeyama 2014

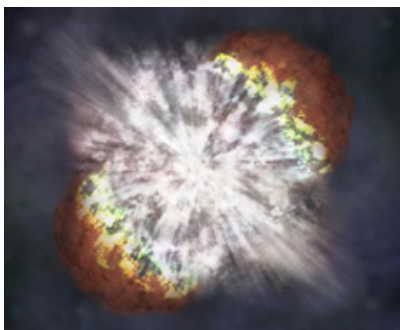
I. 大き過ぎる  $r$ 核種/鉄比分散問題の解消

II.  $r$ 核種の銀河形成初期における出現を実現

# I. 大き過ぎる $r$ 核種/鉄比分散問題の解消

放出された元素がどのように星間ガスと混ざり合うか？  
中性水素と衝突しながら静止する距離は速度の  
4乗に比例する。

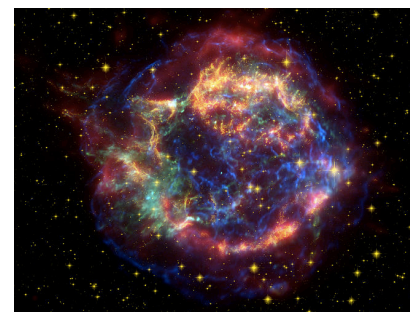
✓超新星からの重元素(鉄、酸素...)の星間ガスとの混ざり合いは**比較的ローカル**



超新星爆発

a few 1000km/sで放出

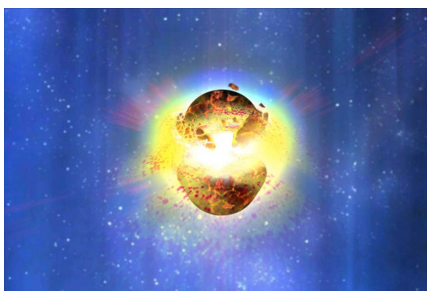
周囲の星間ガスを掻き集めながら、数10pcの体積中に拡散する。



数10pc

超新星残骸

✓中性子星合体からの重元素( $r$ 核種)の星間ガスとの混ざり合いは**広範囲にわたる**



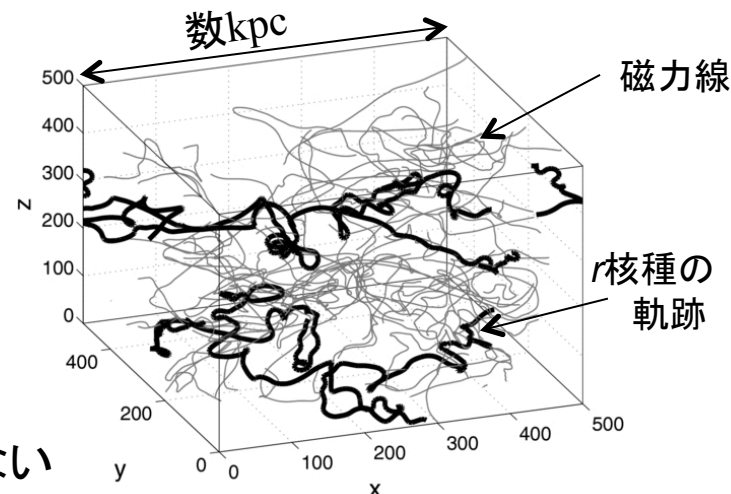
中性子星合体

光速の10-30%で放出

擾乱磁場に沿いながら  
広範囲なガスと混ざり合う



$r$ 核種の濃度が極端に  
高い/低いガスは作られない



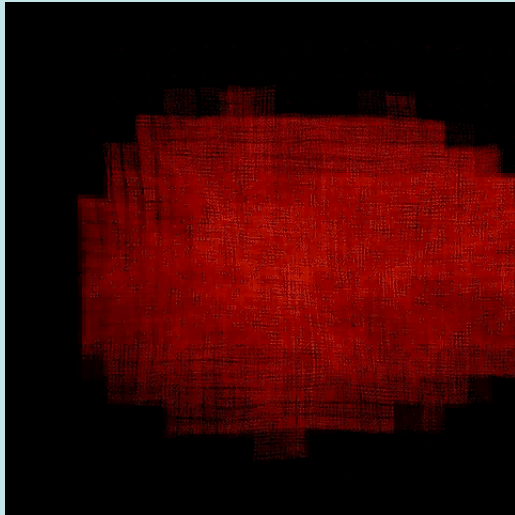
## II. $r$ 核種の銀河形成初期における出現を実現

rarityの解消

階層的銀河形成

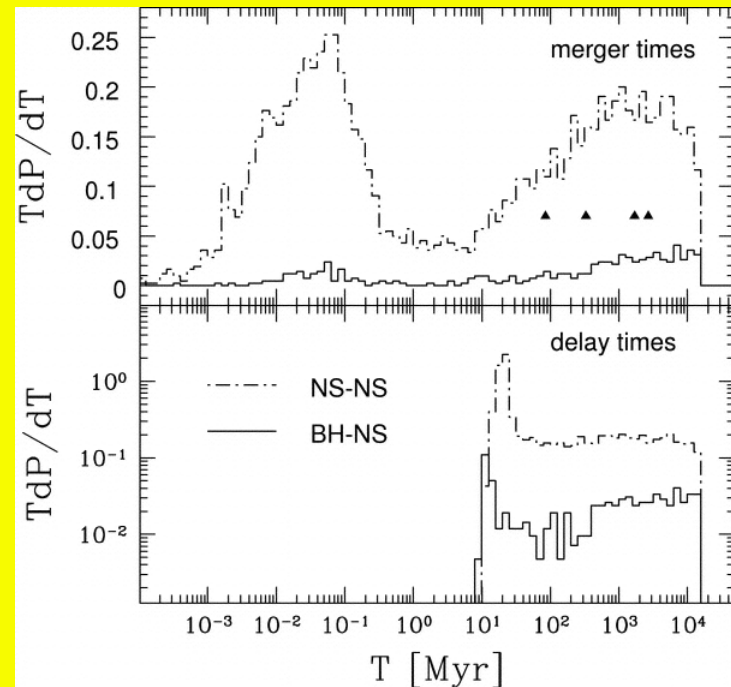


銀河系ハローは小さなbuilding blocks  
が合体を繰り返しながら形成された



稀な現象であっても極めて初期  
の段階で中性子星合体が起きる  
building blocksが存在する

合体にかかる時間は短い可能性



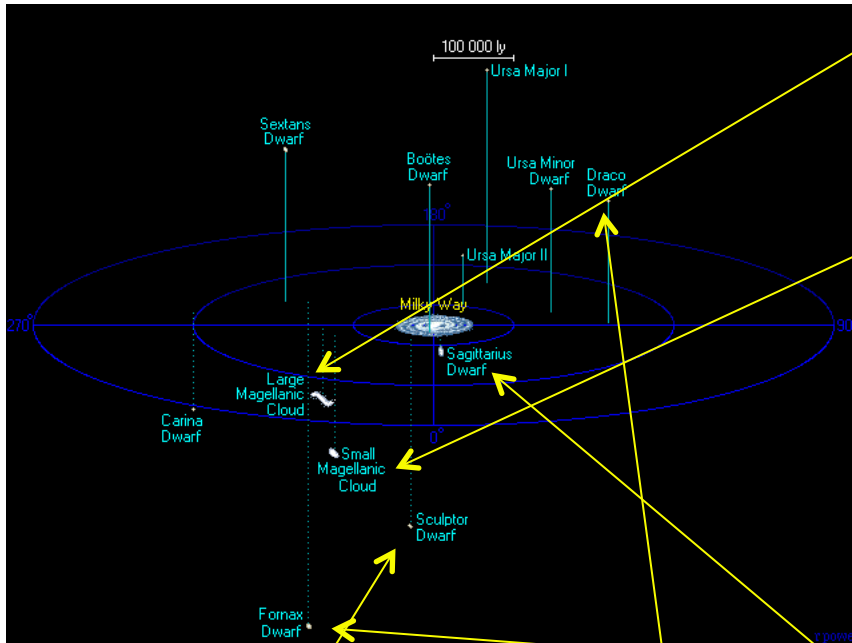
合体までの時間  $\sim (1-3) \times 10^7$  yrs

あるいは、磁気駆動型超新星が  
初期フェーズでは $r$ 過程enrichmentを  
担っていたかもしれない

(cf. Wehmeyer et al. 2015)

# 近傍矮小銀河に刻まれたr核種進化の履歴

星のスペクトル分光:  
<300 kpcが射程内

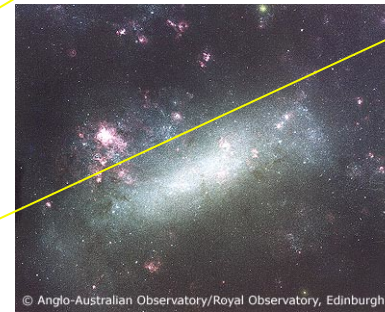


## 矮小不規則銀河

星の質量 ガスrich

$$M_* \sim 10^9 M_\odot$$

大マゼラン星雲



50kpc

$$10^8 M_\odot$$

小マゼラン星雲



60kpc

## 矮小回転楕円体銀河

ガスを含まない

$$M_* \sim 10^3 - 10^8 M_\odot$$

(因に球状星団は $10^5 M_\odot$ , 銀河系は $10^{11} M_\odot$ )

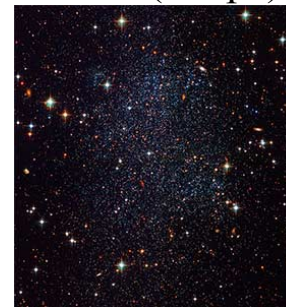
ちょうこく座(90kpc)



りゅう座(76kpc)



いて座(20kpc)



ろ座(138kpc)

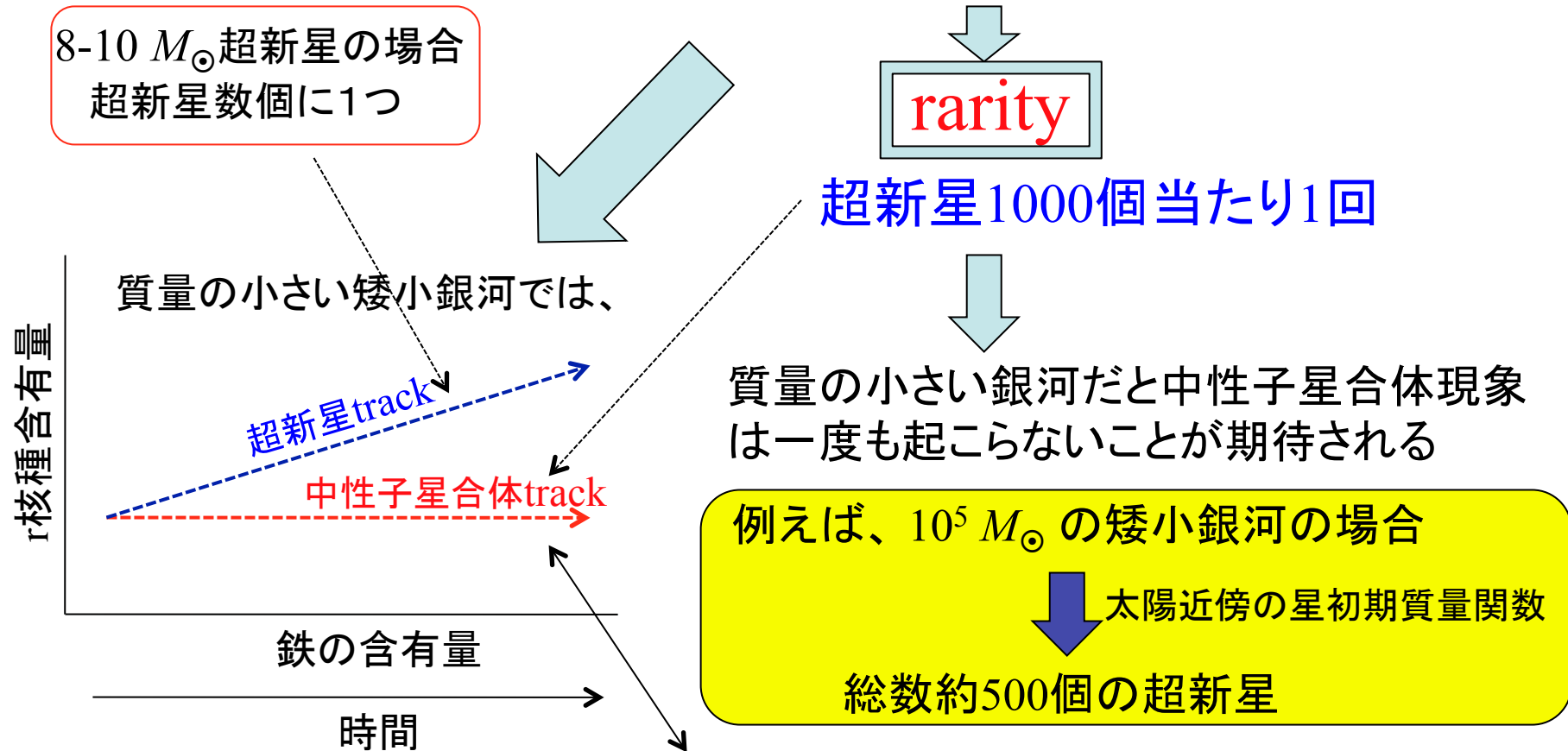


しし座I(254kpc)



# 矮小銀河を使って $r$ 核種の起源を知る

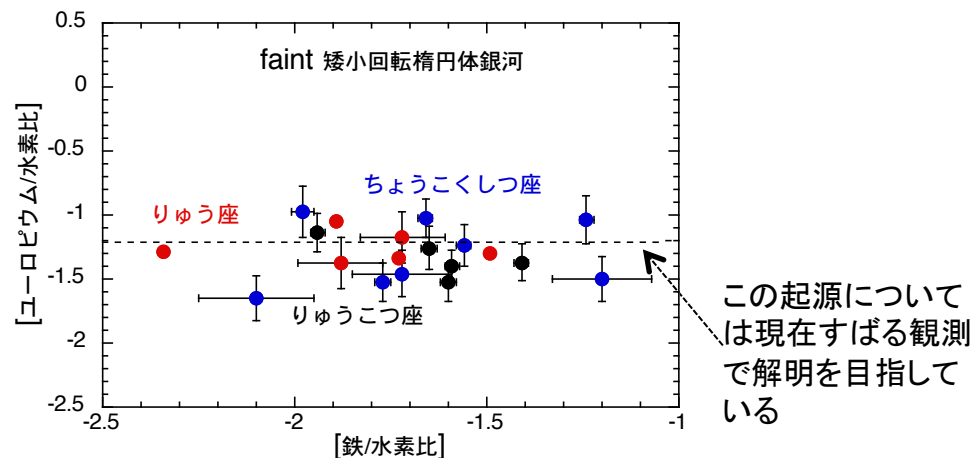
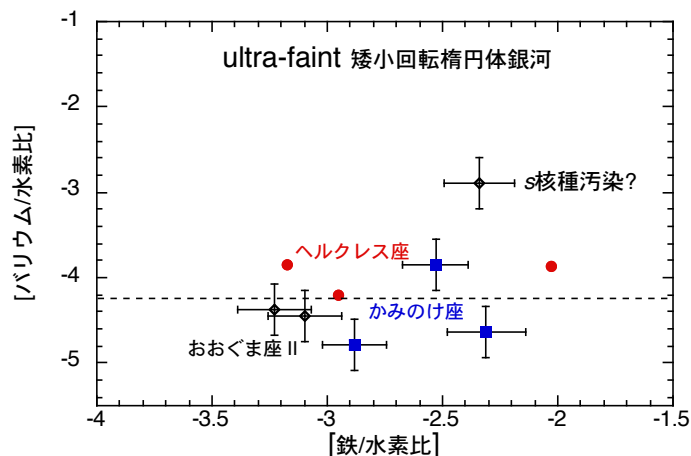
## 超新星 vs. 中性子星合体



$r$ 核種含有量は増加しないことが予言される

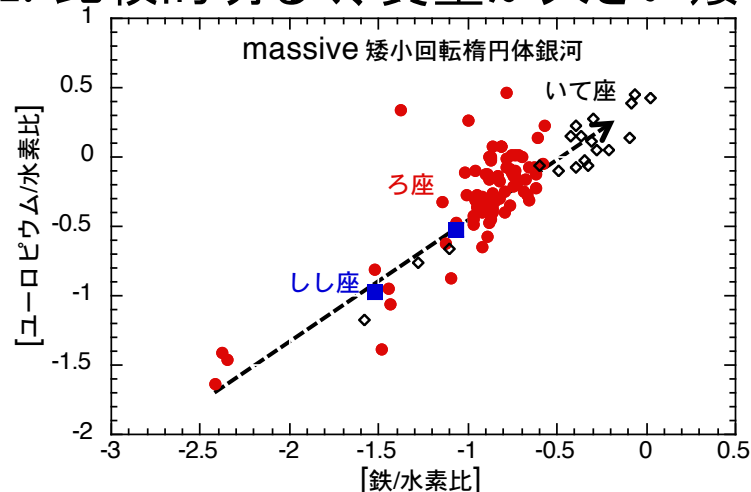
# 矮小銀河の $r$ 核種パターンは中性子星合体説を支持する

## I. 暗い、質量の小さい矮小銀河



$r$ 核種含有量に増加傾向が見られないことは、中性子星合体が $r$ 核種起源であることを強く主張する。

## II. 比較的明るく、質量が大きい矮小銀河



中性子星合体現象のrarityが消えるため、Eu含有量の増加傾向が見られる。例えば、ろ座銀河では >100回の現象が期待される。



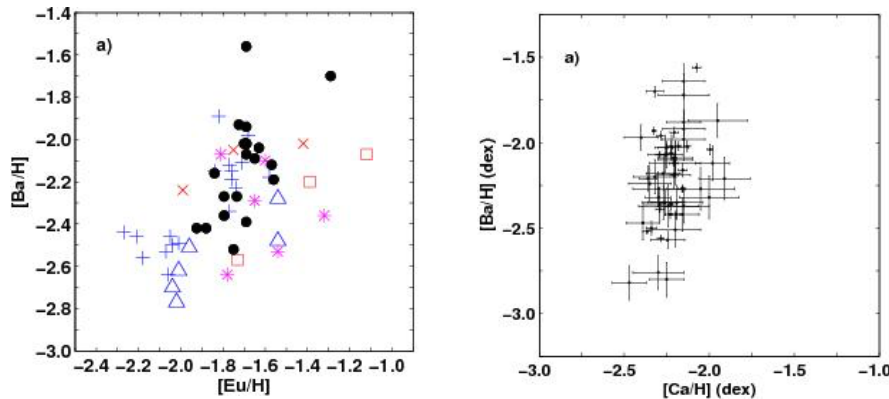
# 球状星団にみる中性子星合体による $r$ 過程元素合成

M15 ← massive GC

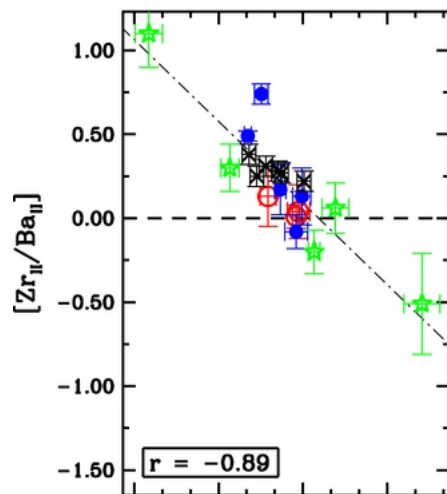
(中性子星合体が起こりうる)

Eu, Ba, Laに星々間に大きな分散が見られる

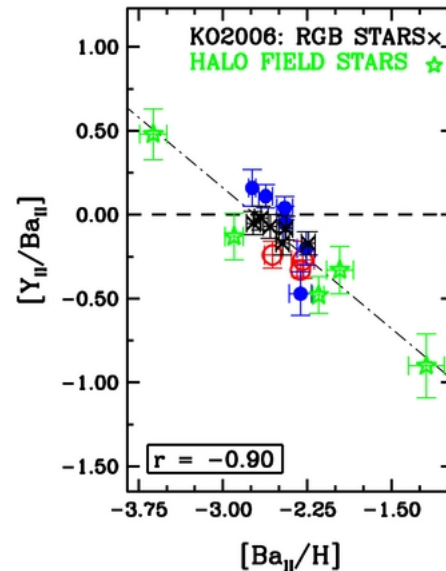
Fe, Caには分散なし



(Worley et al. 2013)



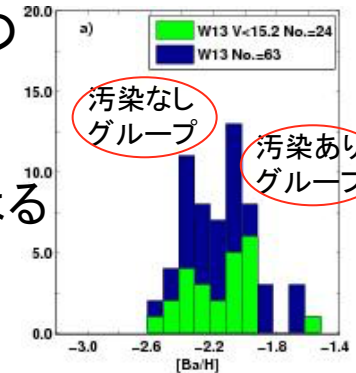
(Sobeck et al. 2011) [Ba/H]



星団形成後に起きた中性子星合体に伴うejectaによって星の表面が汚染されたというシナリオで説明できる

1. mass lossによるコア内の高密度ガス形成
2. 中性子星合体現象
3.  $r$ -process-rich ejectaによる汚染
4. 星の表面汚染

bimodal distribution



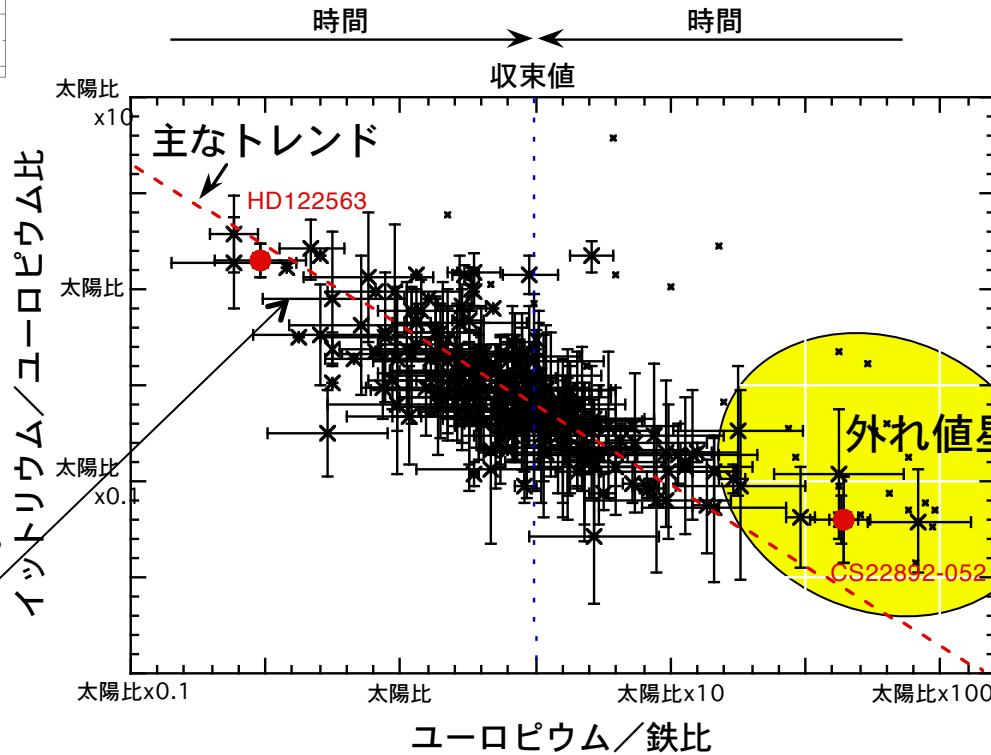
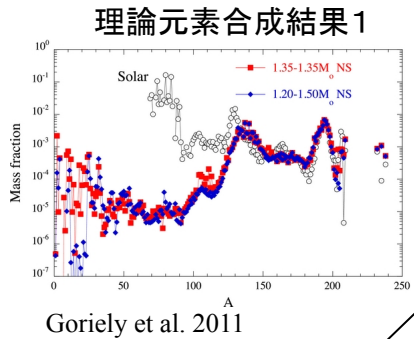
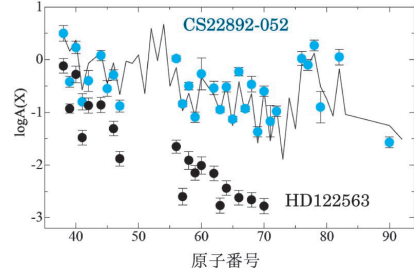
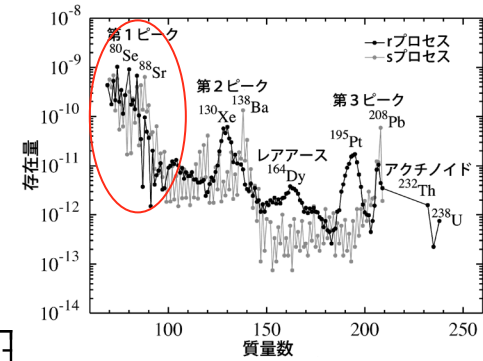
(Worley et al. 2013)

軽い $r$ 過程元素(Sr, Y, Zr)には分散が見られない

軽い $r$ 過程元素は中性子星合体では作られていない

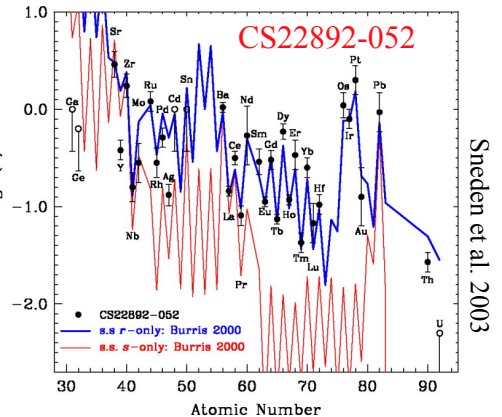
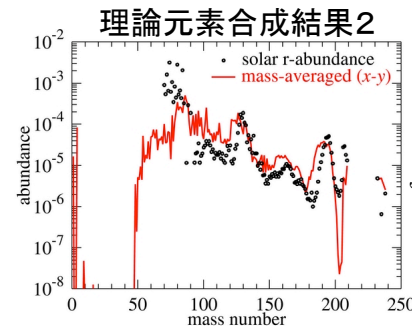
# 軽いr核種は(主に)超新星で作られる

## 銀河系ハロー一星も語る



全てのr核種  
が中性子星  
合体で合成

軽いr核種:超新星で合成  
重いr核種:中性子星合体で合成

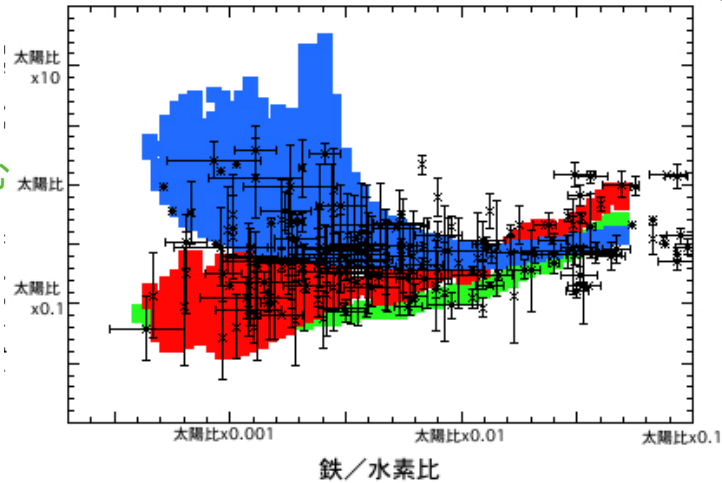
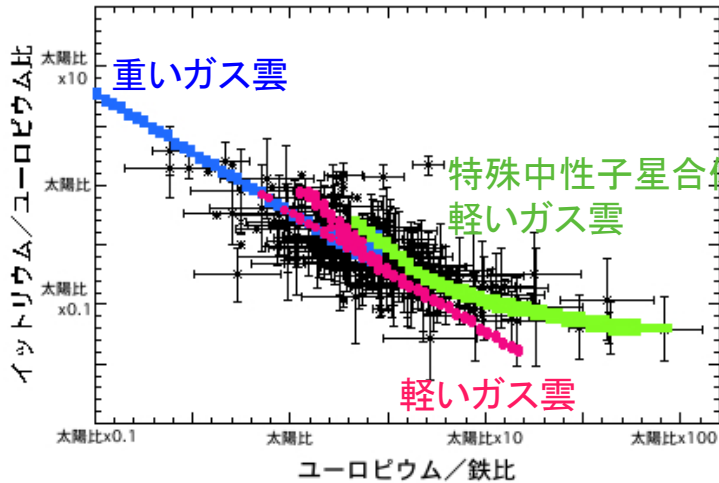


# 銀河系ハローにおける重い&軽いr核種の化学進化

混ざり方の違い

Y: SN remnant  $\sim 5 \times 10^4 M_{\odot}$  と混ざる  
 Eu: fragment 全体と混ざる

Y/Eu variation  
 が作られる



(TT & Shigeyama 2014)

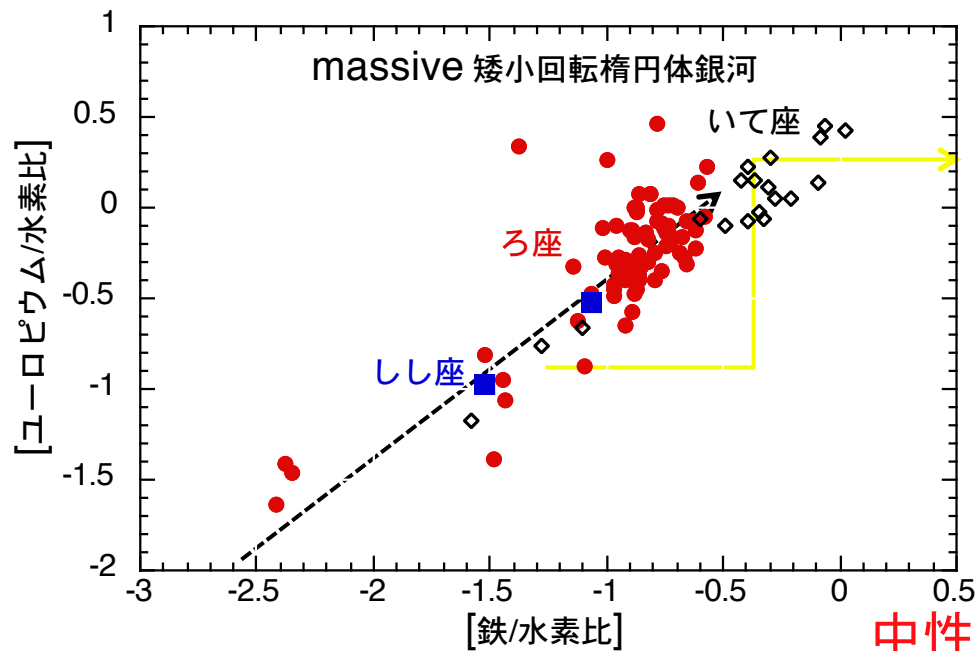
ちょっとまとめると。。

元素合成の観点から中性子星合体は2種類

- majority :  $A > 130$  といった重いr核種のみ作る
- minority : 全てのr核種を作る

# 中性子星合体頻度の導出

矮小銀河の化学組成からどのくらい稀な現象かを評価できる



傾きは鉄とユーロピウムのproduction rate比で決まっている

傾き =

$$\frac{\text{中性子星合体Eu量} \times \text{中性子星合体頻度}}{\text{超新星Fe量} \times \text{超新星頻度}}$$

超新星Fe量 =  $0.1 M_{\odot}$

中性子星合体r核種総量 =  $0.01 M_{\odot}$

中性子星合体頻度 = 1000超新星に1回

銀河系超新星頻度

=  $2.3 \pm 0.48$  per century

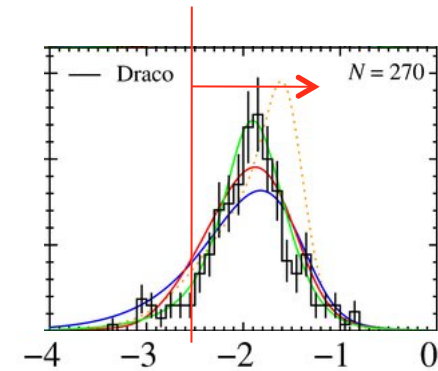
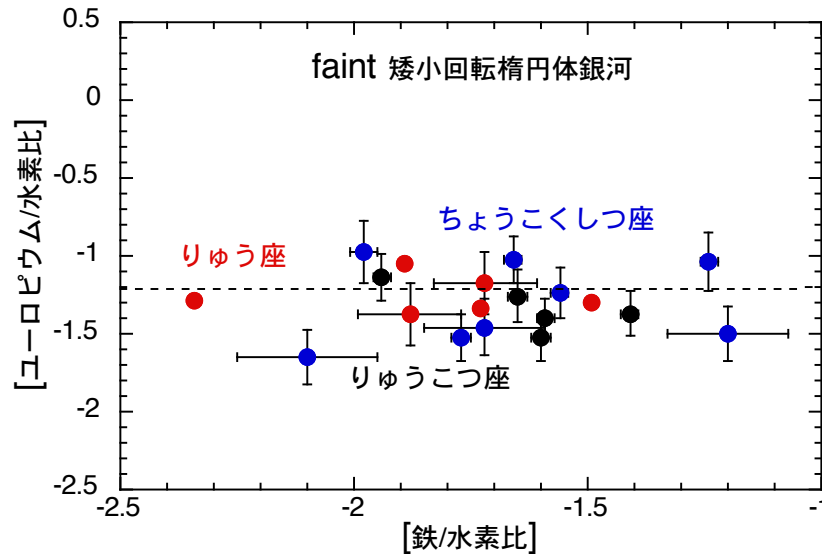
(Li et al. 2011)

銀河系では  $23 \text{ Myr}^{-1}$

$\sim 10 \text{ MWEG}^{-1} \text{ Myr}^{-1}$

# 中性子星合体頻度の導出 II

暗い矮小銀河からもどれだけ稀かを評価できる



銀河光度  $\xrightarrow{\text{IMF}}$  銀河質量  $\xrightarrow{\text{IMF}}$  重い星の総数

Draco: one event per  $> 1500$  CCSNe

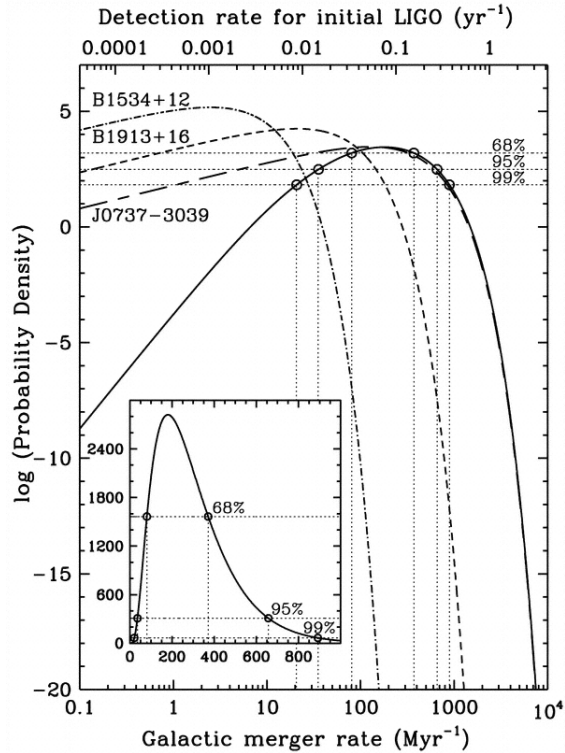
Carina:  $> 2000$  CCSNe

Sculptor:  $> 10000$  CCSNe

矮小銀河のIMFでは  
CCSNeの数は減る  
可能性あり

銀河系あたり、 $10-20 \text{ My}^{-1}$  あるいはこれよりちょっと小さい頻度

# 銀河系連星パルサーからの頻度評価



Model Galactic Population

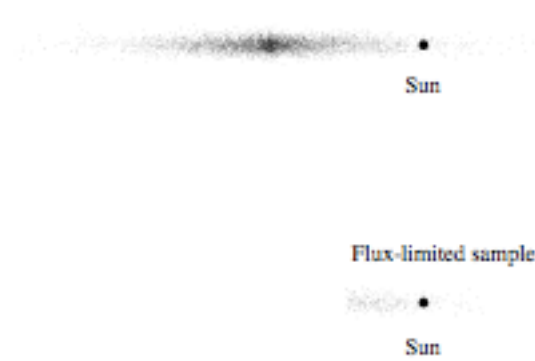


Table 2. Compact binary coalescence rates per Milky Way Equivalent Galaxy per Myr.

Source	$R_{\text{low}}$	$R_{\text{re}}$	$R_{\text{high}}$	$R_{\text{max}}$
NS-NS ( $\text{MWEG}^{-1} \text{Myr}^{-1}$ )	1 [1] <sup>a</sup>	100 [1] <sup>b</sup>	1000 [1] <sup>c</sup>	4000 [16] <sup>d</sup>
NS-BH ( $\text{MWEG}^{-1} \text{Myr}^{-1}$ )	0.05 [18] <sup>e</sup>	3 [18] <sup>f</sup>	100 [18] <sup>g</sup>	
BH-BH ( $\text{MWEG}^{-1} \text{Myr}^{-1}$ )	0.01 [14] <sup>h</sup>	0.4 [14] <sup>i</sup>	30 [14] <sup>j</sup>	
IMRI into IMBH ( $\text{GC}^{-1} \text{Gyr}^{-1}$ )			3 [19] <sup>k</sup>	20 [19] <sup>l</sup>
IMBH-IMBH ( $\text{GC}^{-1} \text{Gyr}^{-1}$ )			0.007 [20] <sup>m</sup>	0.07 [20] <sup>n</sup>

Abadie et al. 2010  
(LIGO team)

銀河系の5個程度の連星パルサーからの確率的評価では、 $1\text{-}1000 \text{ Myr}^{-1}$

今回の化学組成からの評価 = pessimistic estimate  $\times 10$   
the most plausible value  $\times 1/10$