

超新星残骸の特徴から探る 中性子星の多様性の起源

Probing the Nature of the Neutron
Star Diversity through Properties of
Supernova Remnants

勝田 哲 (埼玉大学)

Diversity of Neutron Stars

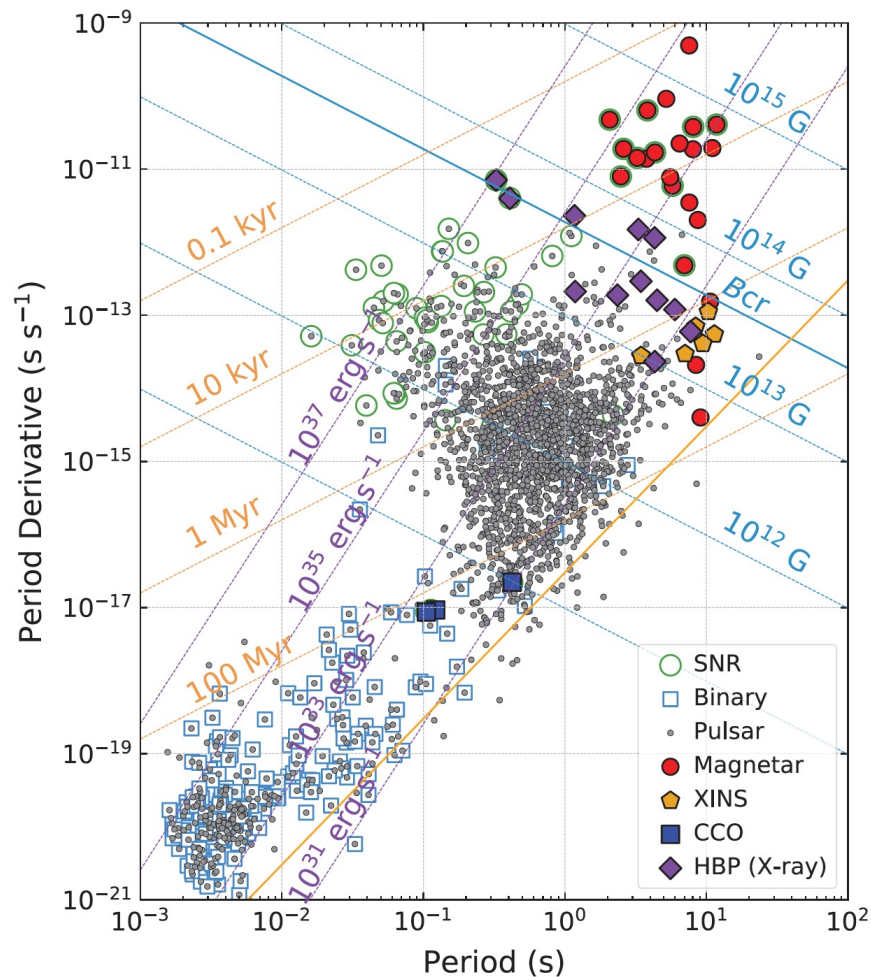
<多様な中性子星>

- Normal pulsars
 - 普通のパルサー
- RRAT
 - たまに電波で点火する
- XDINS
 - 基本、熱的X線のみを放射
- Magnetars
 - 磁場が強く、活動性が激しい
- CCO
 - SNR 中心に鎮座。X線のみで光る
- バイナリーパルサー
 - 恒星の相方を持つ。ミリ秒周期

<何故そんなに違うのか?>

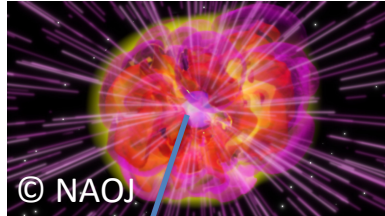
- 生まれつき性質が異なる
- 進化段階によって見せる顔が違う
- 環境要因(一つは連星の有無。他は?)

「Observational Diversity of Magnetized Neutron Stars」 by Enoto, Kisaka, Shibata (2019)



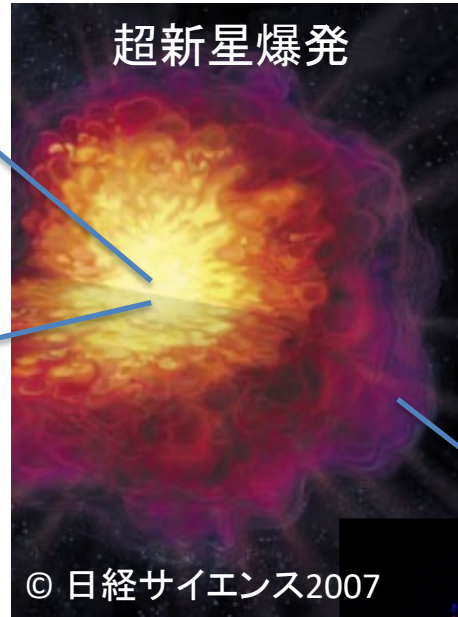
Neutron Stars and Supernova Remnants

超新星爆発 → 超新星残骸
中性子星



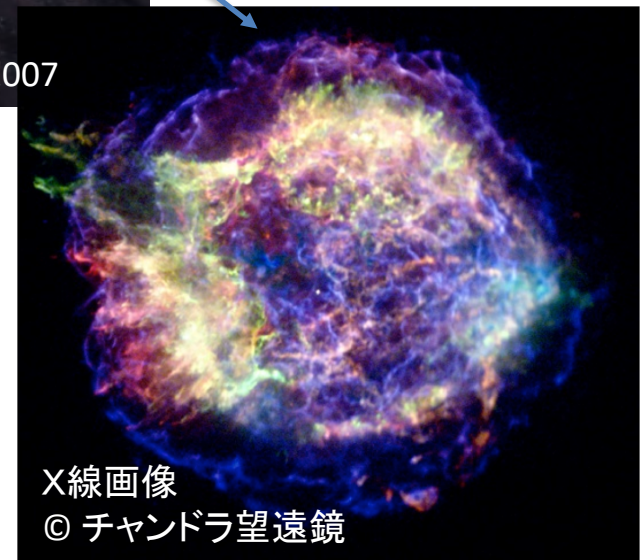
内側 (中心)

中性子星



外側

超新星残骸



爆発の内側と外側
に関連性はあるか?
その視点ではあまり
研究されていない。

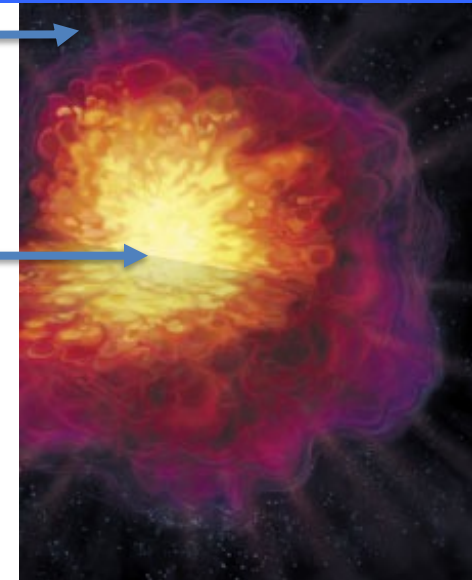
Contents

- 中性子星と超新星爆発タイプ

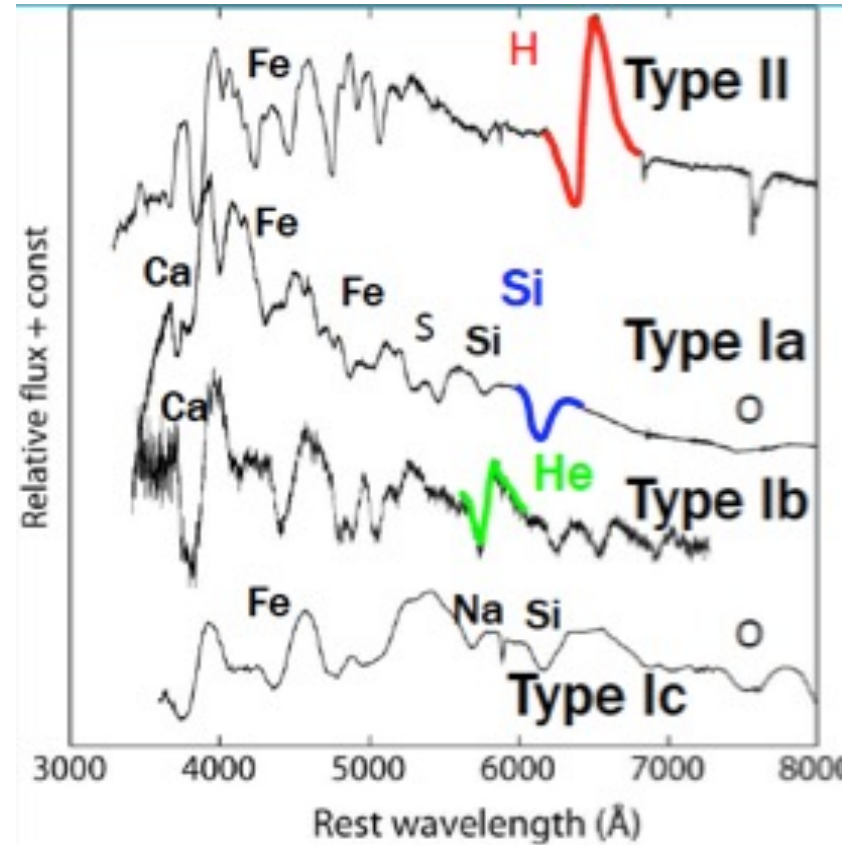
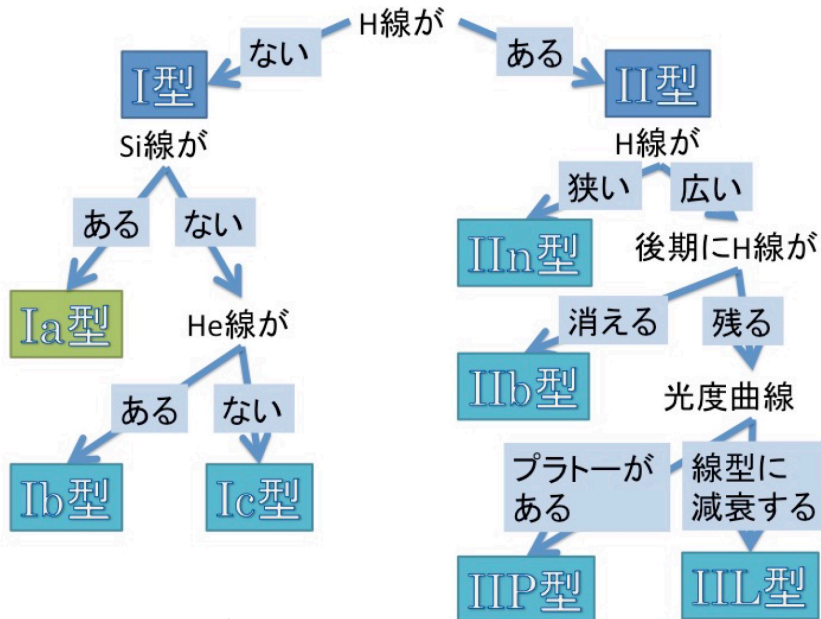
- 1) 超新星の爆発タイプ (爆発の外側)
- 2) 中性子星 (爆発の内側)

に関連性はあるか? (Chevalier 2005)

- 中性子星キックと超新星爆発の非対称
- 中性子星と超新星残骸のサイズ・膨張速度
- 中性子星と超新星の発生頻度



Supernova Types



原田了 修士論文 2015.3

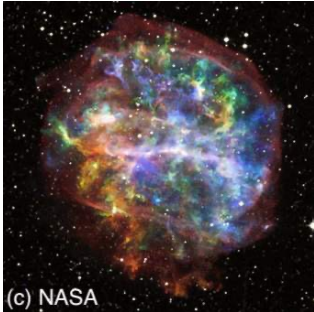
爆発タイプを決める要素

- 1) 爆発外側の元素組成比
- 2) 星周物質

Inferring SN Types of SNRs

・イジェクタの組成比
・イジェクタの速度

→ SN Type 推定



O-rich ejecta at 2000 km/s
Little H

→ Type IIL/b



Lack of O-rich ejecta
Slow H-rich ejecta

→ Type IIP
(EC SN?)



Shell radius ~ 9.6 pc
Age ~ 1000 yr
 $\rightarrow V_{\text{exp}} \sim 9500$ km/s (fast!)

→ Type Ib/c

SN Types Compared with NSs

普通のパルサー



Chevalier (2005)

PROPERTIES DEDUCED FROM MODELS

Supernova Remnant	Supernova Type	Age (yr)	P_0 (ms)	B (10^{12} G)
Crab.....	IIP	950	20	4
3C 58.....	IIP	2400	50	4
PSR 0540-69.....	Ib/c	800	40	5
Kes 75.....	Ib/c	1000	30	48
MSH 15-52.....	Ib/c	1700	10	14
G292.0+1.8.....	IIL/b	3200	40	10
G11.2-0.3.....	IIL/b	1600	60	2
G54.1+0.3.....	IIP, Ib/c	1500	100	10
G292.2-0.5.....	IIP, Ib/c	1700	$\ll 200$	41

変わったパルサー (マグネター/CCO)



PROPERTIES OF REMNANTS WITHOUT NORMAL PULSARS

Supernova Remnant	Distance (kpc)	Supernova Type	Age (yr)	Radius (pc)
Cas A.....	3.4	IIL/b	320	2.5
RCW 103.....	3.8	IIL/b	...	5.0
Pup A.....	2	IIL/b	3700	16
Kes 73.....	7	IIL/b	...	4.7
E0102.....	59	IIL/b	1000-2100	6.3

Magnetar & CCO はIibばかり。ただし、観測バイアスもあるだろう (実際、全体的にIIPが少なすぎる)。結局、なんとも言えない。

Contents

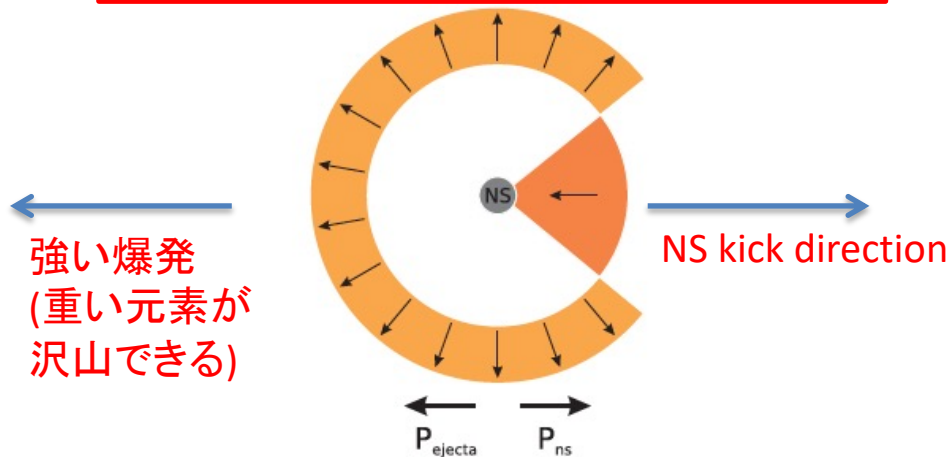
- 中性子星と超新星爆発タイプ
- 中性子星キックと超新星爆発の非対称
- 中性子星と超新星残骸のサイズ・膨張速度
- 中性子星と超新星の発生頻度

Possible Origins of NS Kicks

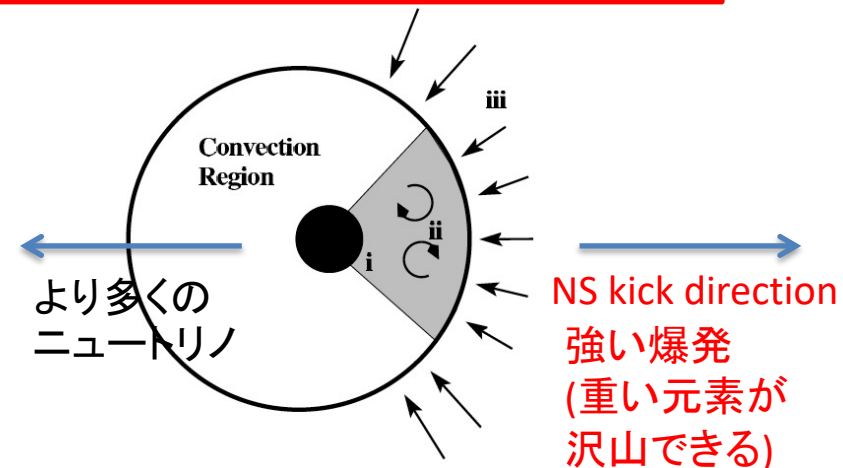


中性子星は、高速(100—1000 km/s)で運動している。その原因は？
生まれつき(@爆発)以外考え難いが...しっかり実証されたのはつい最近。

爆発噴出物非対称によるキック
(e.g., Scheck et al. 2004)



ニュートリノ非対称によるキック
(e.g., Fryer et al. 2006)



Targets

以下の3基準を満たす超新星残骸を無バイアスに選定した:

(1) 中性子星が超新星残骸中に確認されている。

(2) 比較的若い(数千年以下)。

(3) 中間質量元素(Si, S, Ar, Ca)の輝線がX線で検出されている。

SK et al. (2018)

Holland-Ashford et al. (2017)

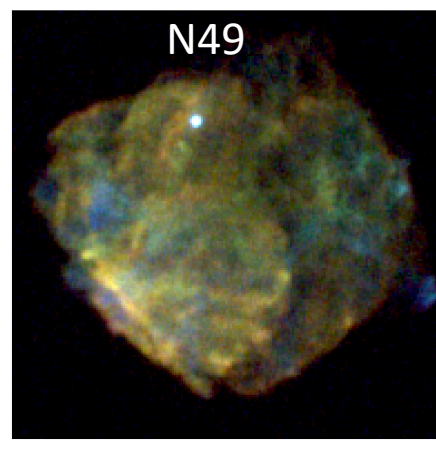
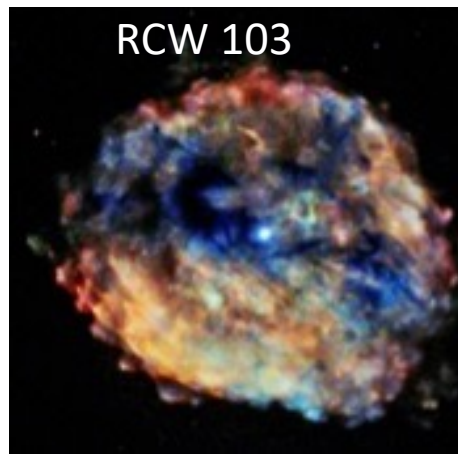
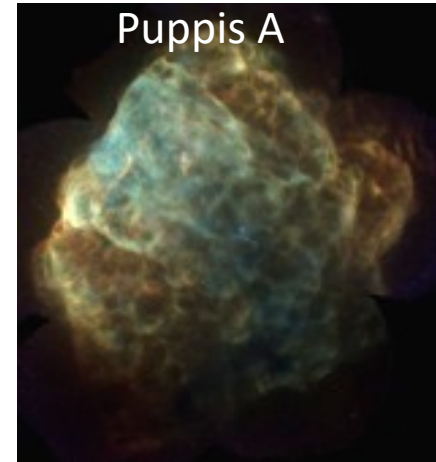
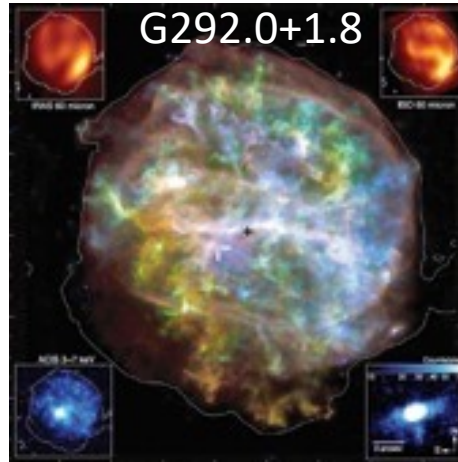
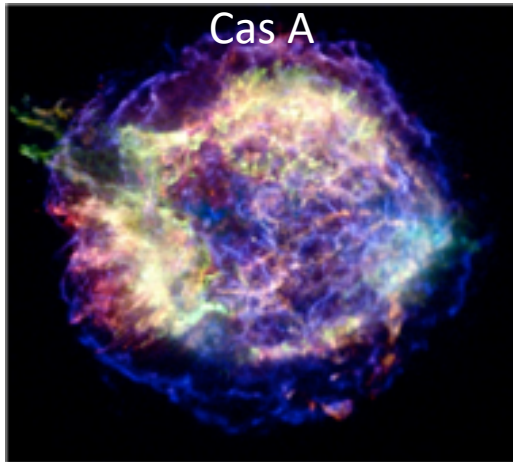
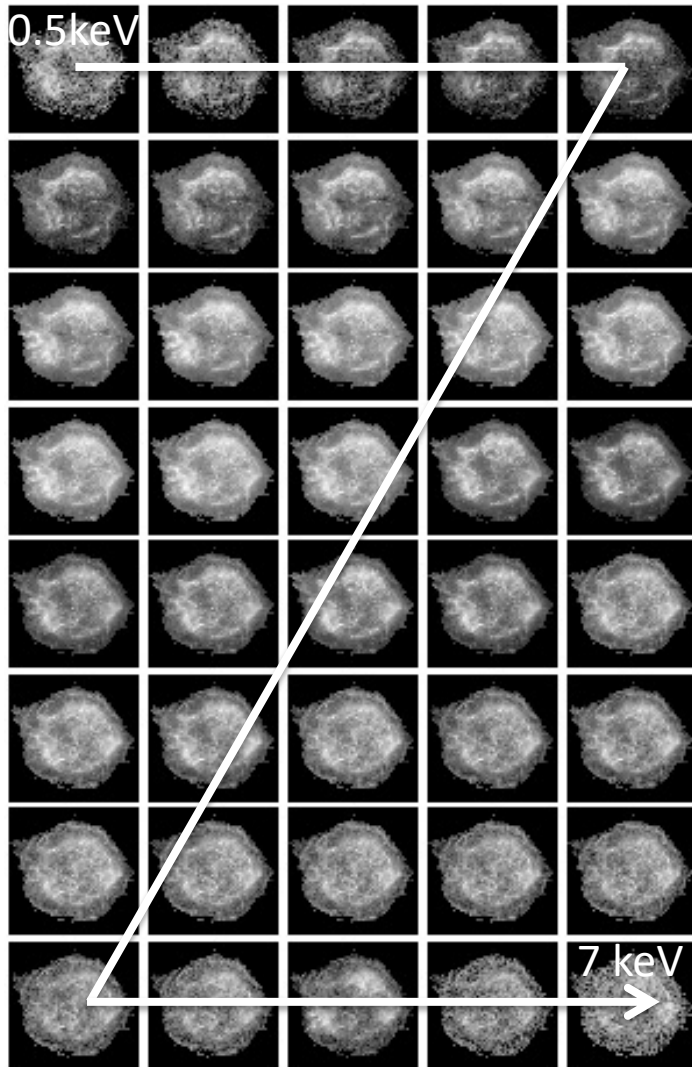
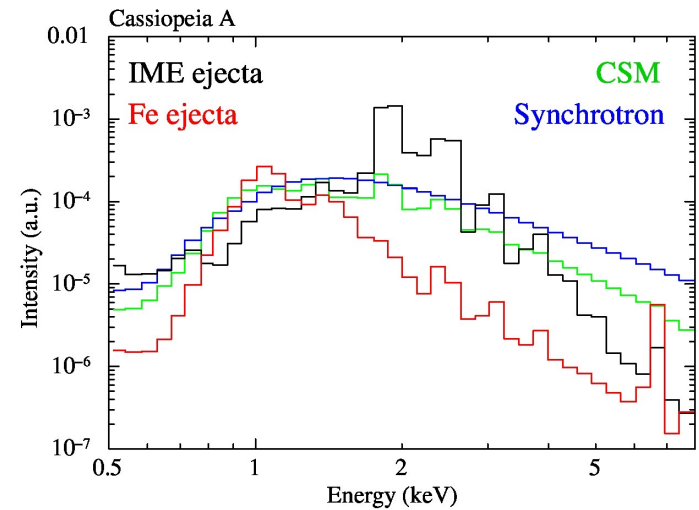


Image Decomposition

エネルギーバンド毎の画像



典型的なスペクトル成分を数種選定



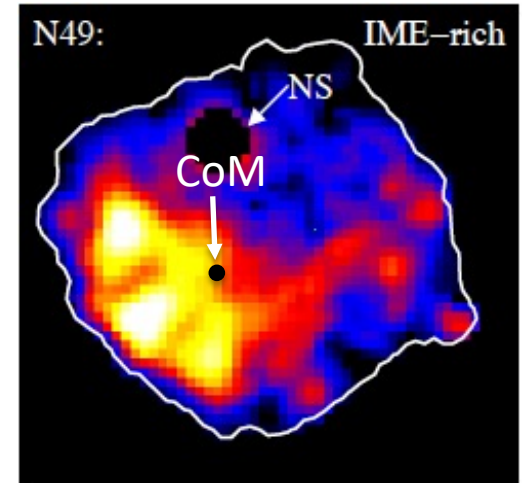
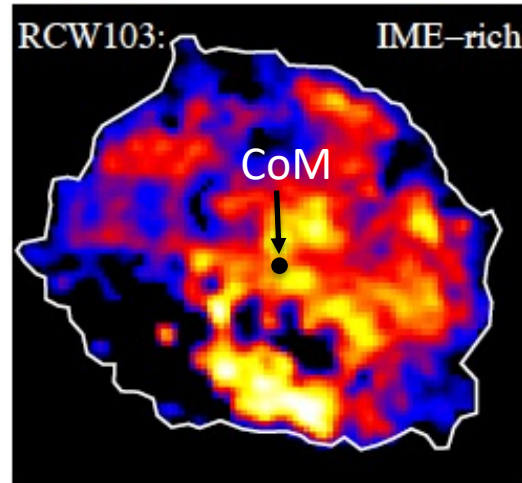
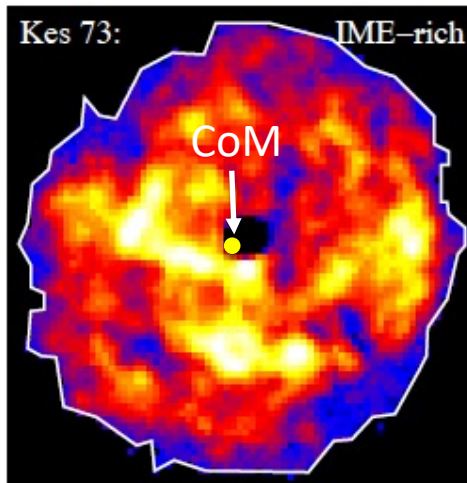
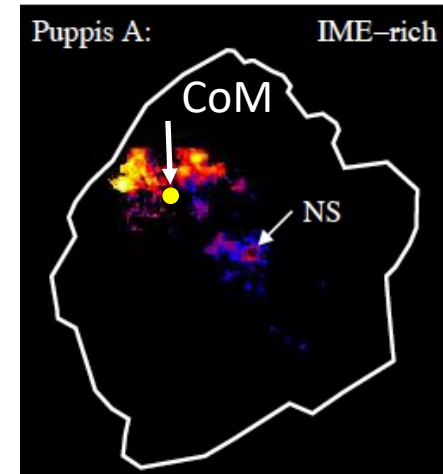
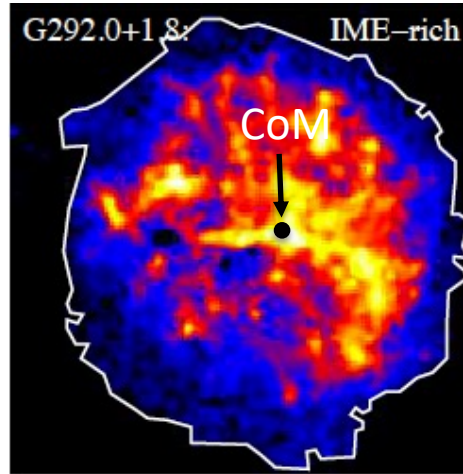
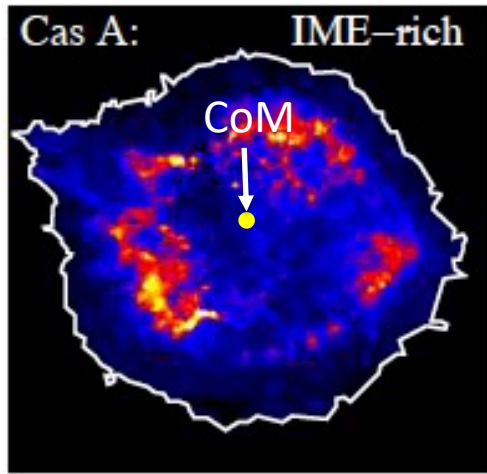
Pixel毎のスペクトル

ピクセル毎に各スペクトル成分の寄与を見積もる。

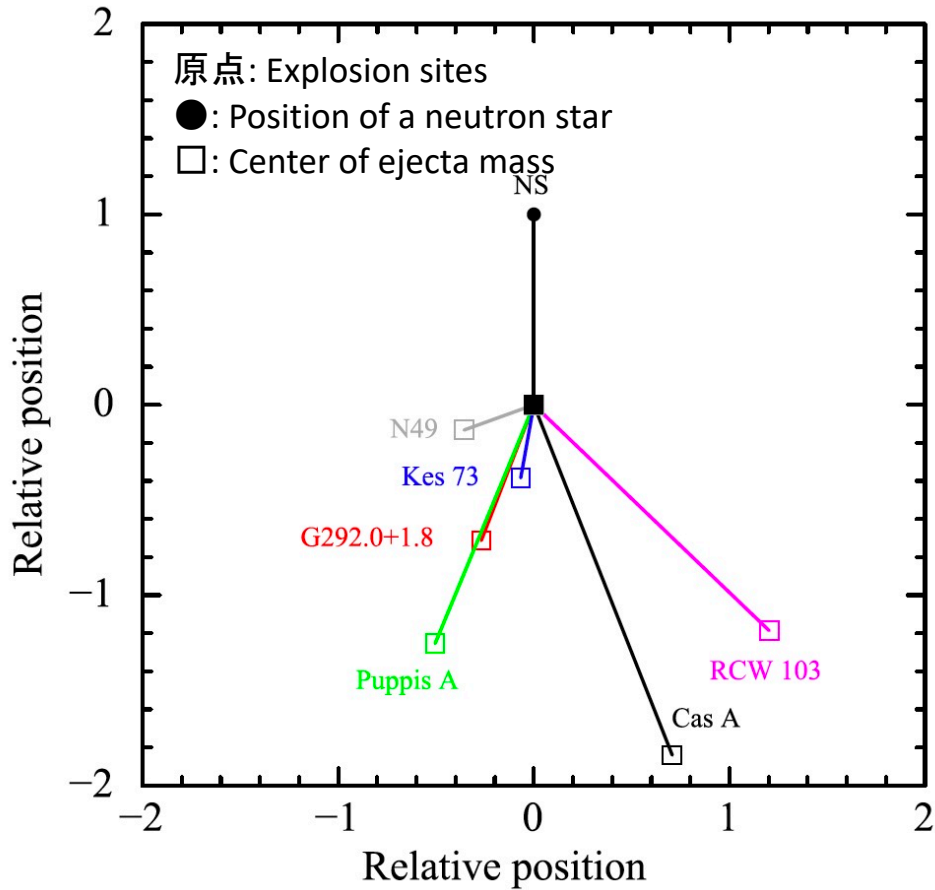
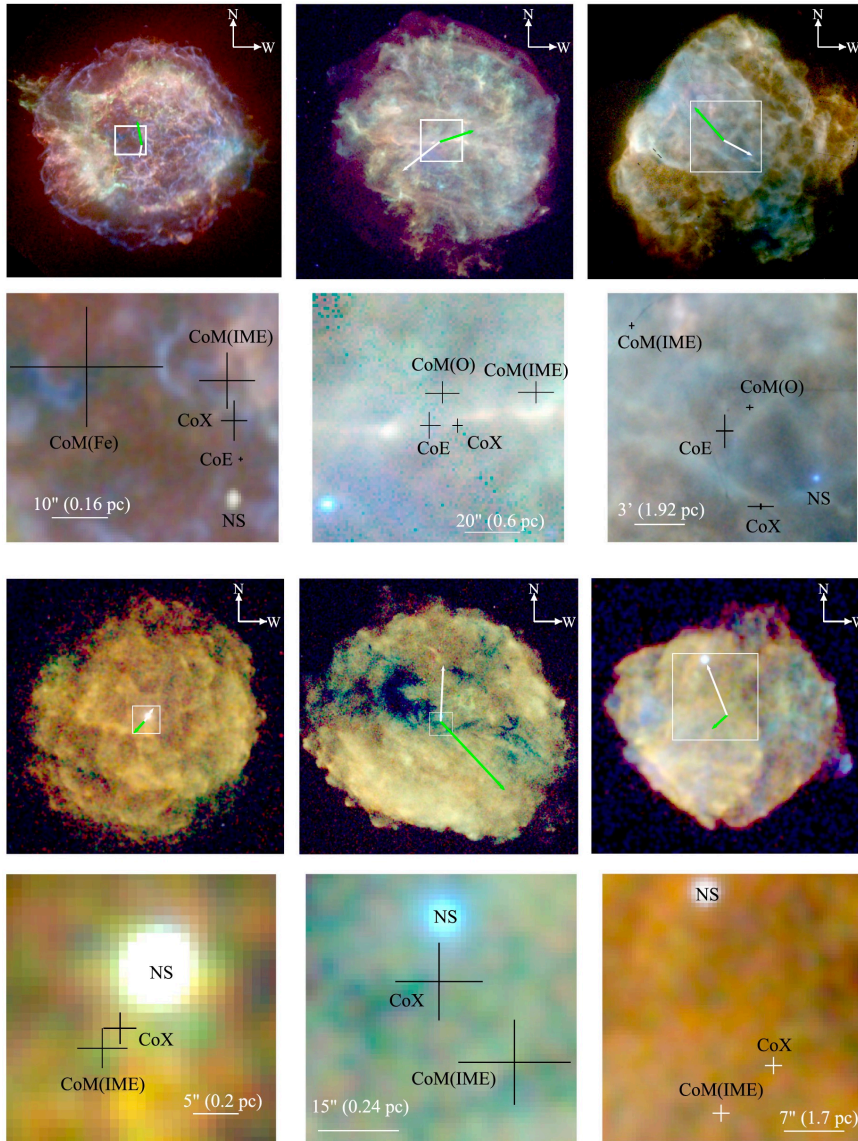
各成分の強度マップを作成

IME Distributions and Center of Mass

中間質量元素 (Si, S, Ar, Ca) = 爆発時の影響を比較的強く受ける

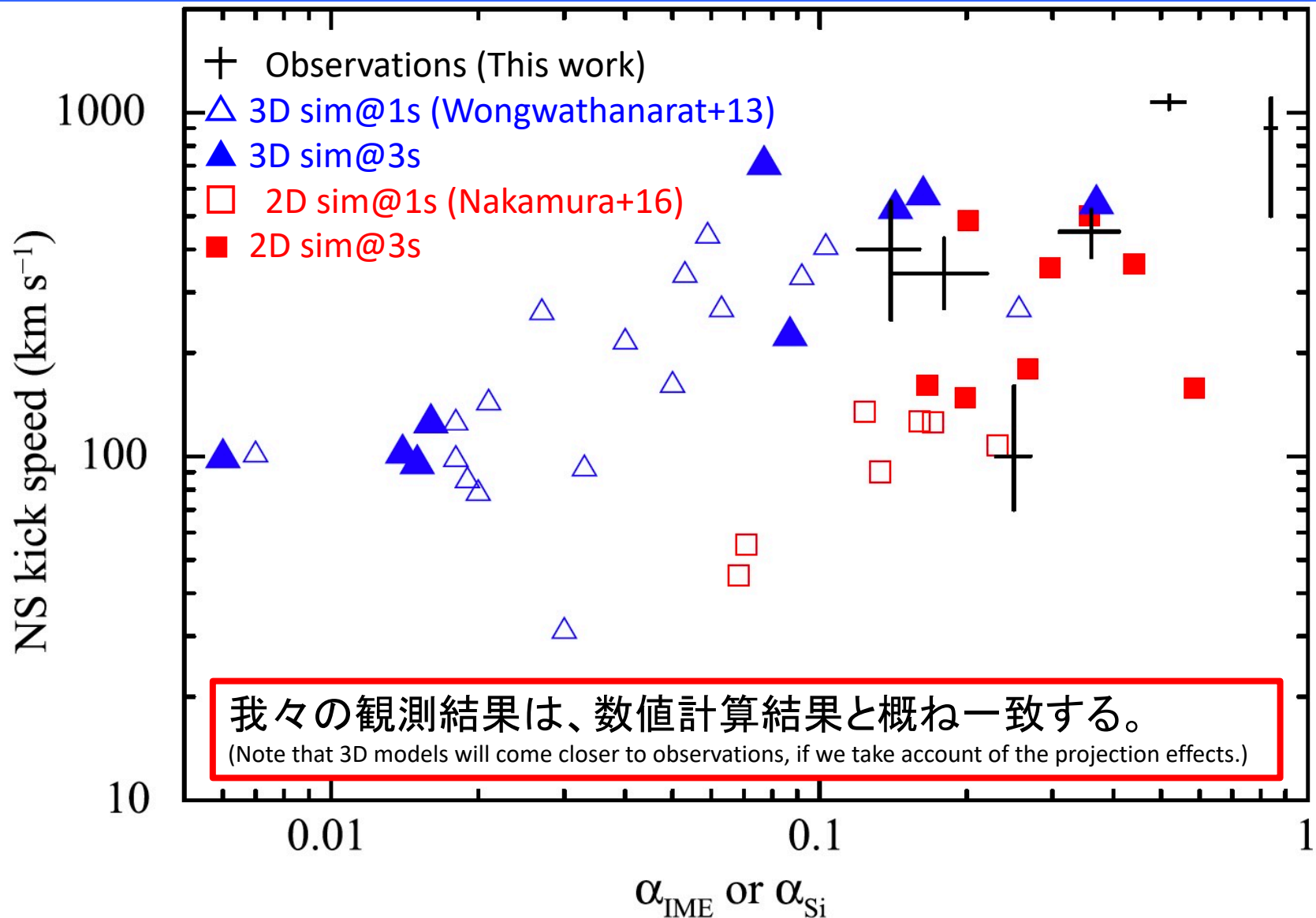


CoM, CoE, and NS Positions

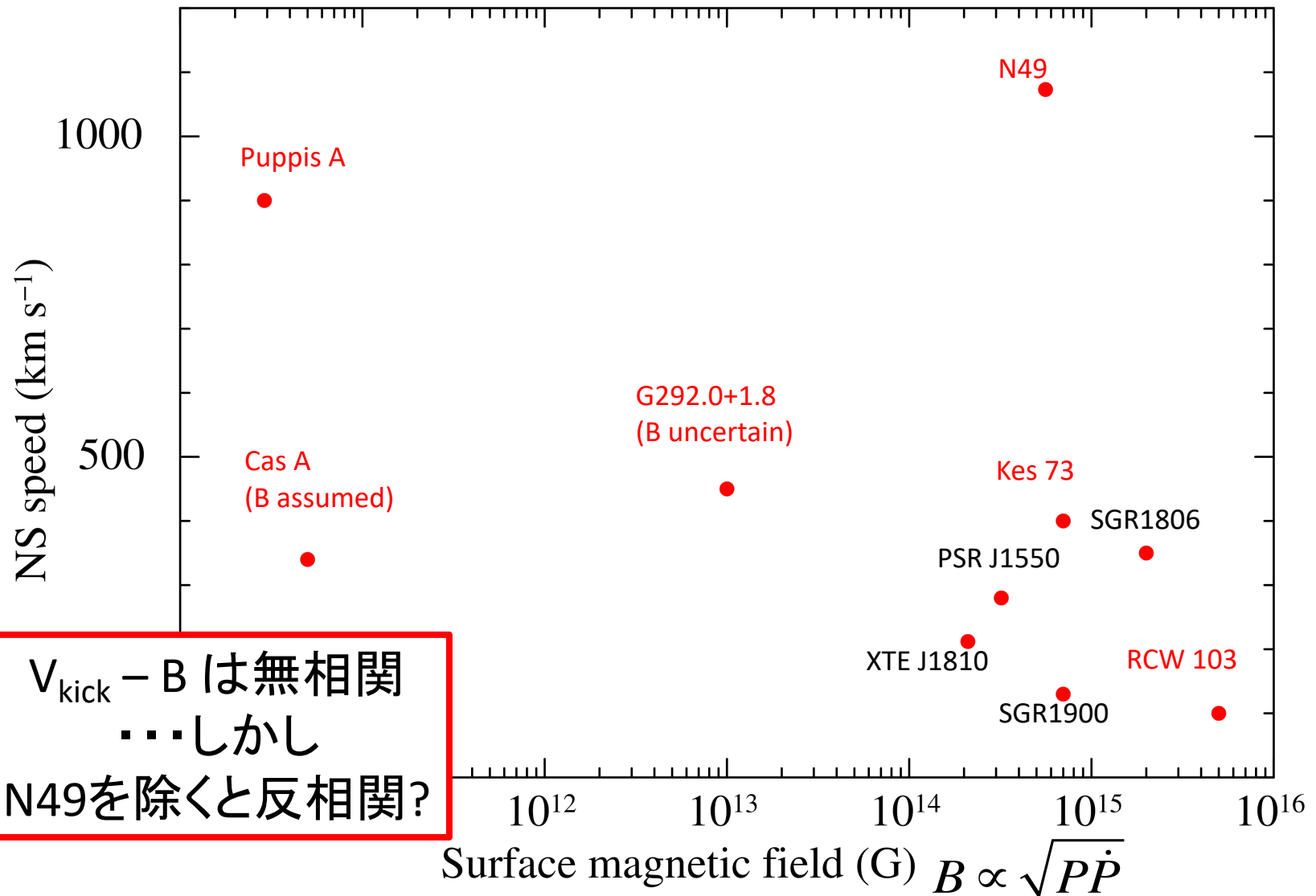


明快にhydrodynamic kick説を支持!
 ※このような「反配置」が偶然に得られる確率は0.3%以下

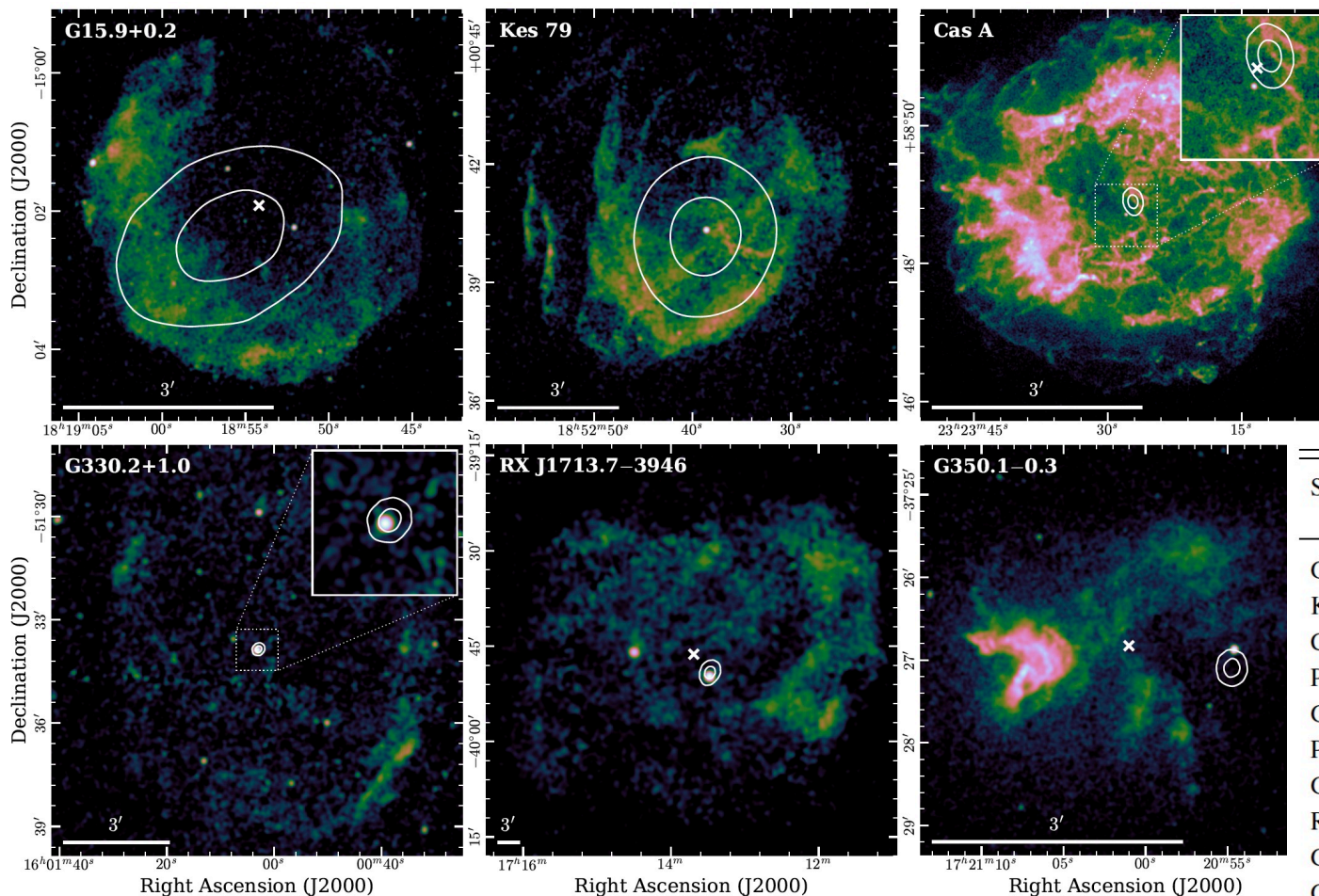
Kick Velocity – Degree of Asymmetry



Kick Velocity – Magnetic Field



Systematic Study of CCO Velocities



Mayer & Becker (2021)

SNR	v_{proj} (km s^{-1})	Reference
G15.9+0.2	<1200	This work
Kes 79	<450	This work
Cas A	570 ± 260	This work
Puppis A	$763 \pm 73^{(b)}$	1
G266.1-1.2 (Vela J)	<1400	2,3
PKS 1209-51/52	<180	4
G330.2+1.0	<230	This work
RX J1713.7-3946	<230	This work
G350.1-0.3	320^{+210}_{-190}	This work
G353.6-0.7	... ^(d)	5,6

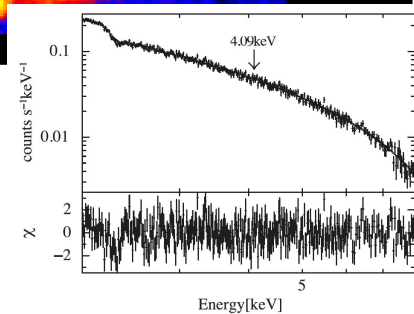
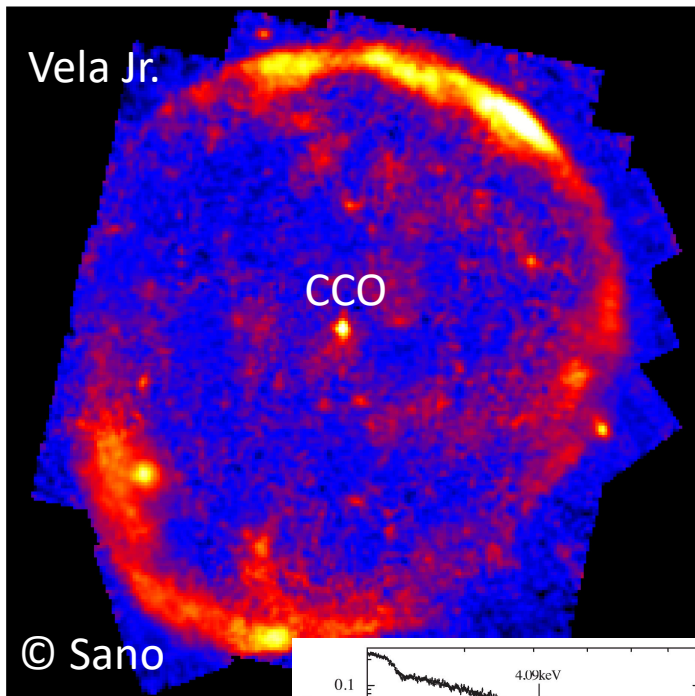
CCOが特別速いということは無さそう

目次

- 中性子星と超新星爆発タイプ
- 中性子星キックと超新星爆発の非対称
- 中性子星と超新星残骸のサイズ・膨張速度
- 中性子星と超新星の発生頻度

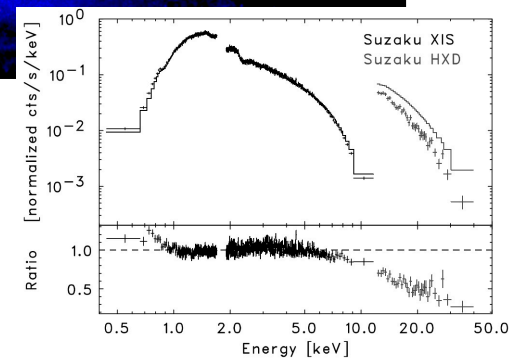
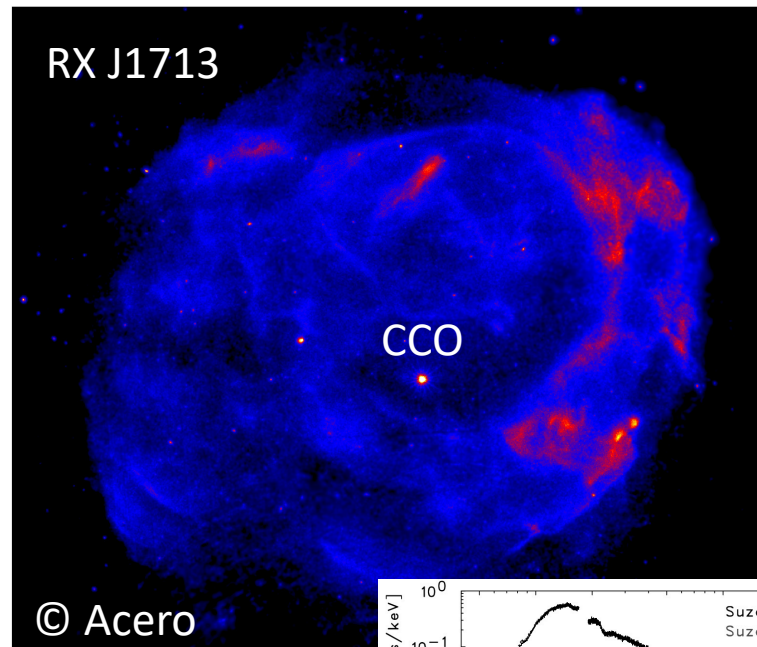
SNRs with CCOs

CCO を伴う SNR は非熱X線放射が強い傾向がある。
→ 衝撃波速度が大きい? → Size が大きい?



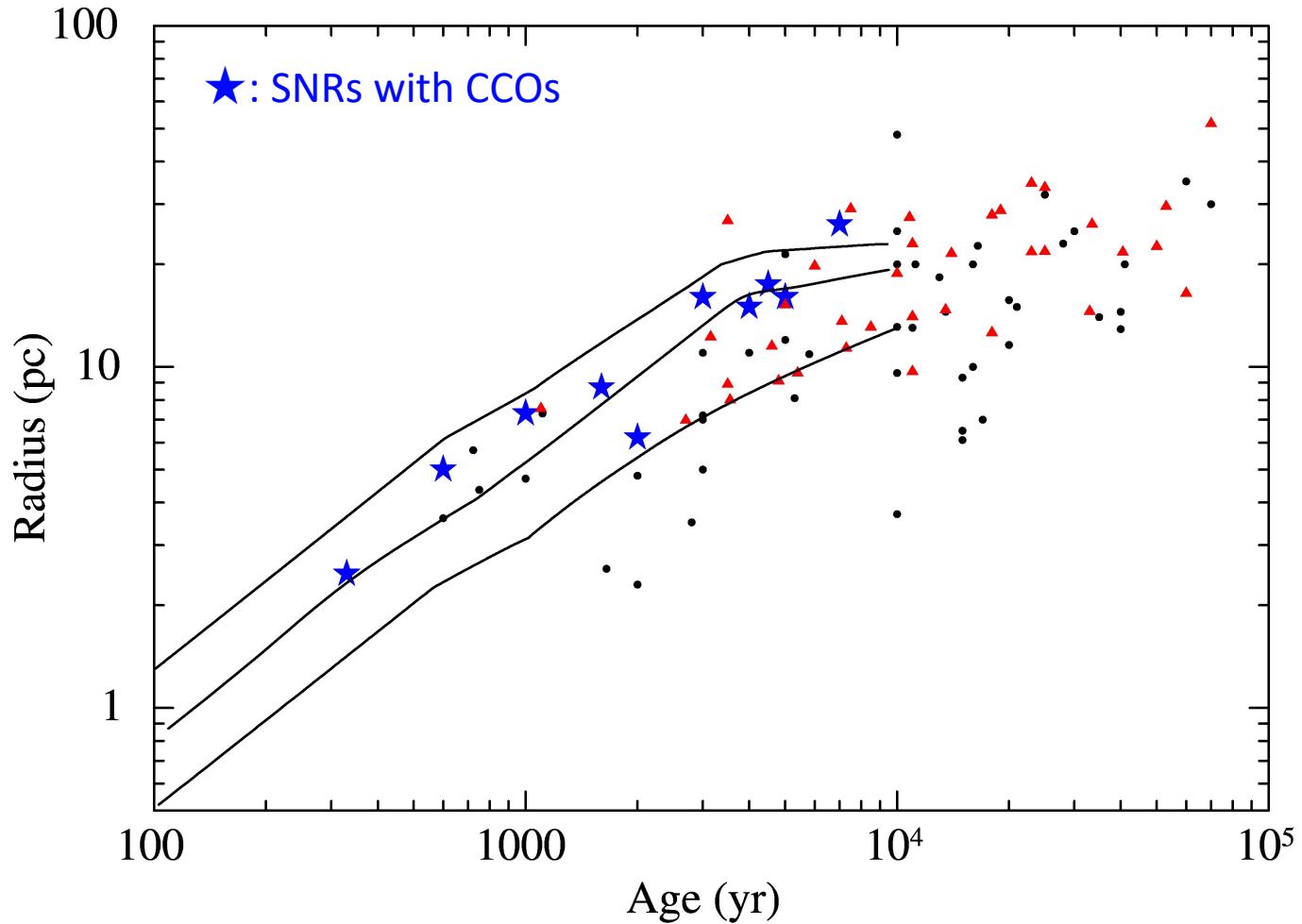
Hiraga et al. (2009)

2021/8/10



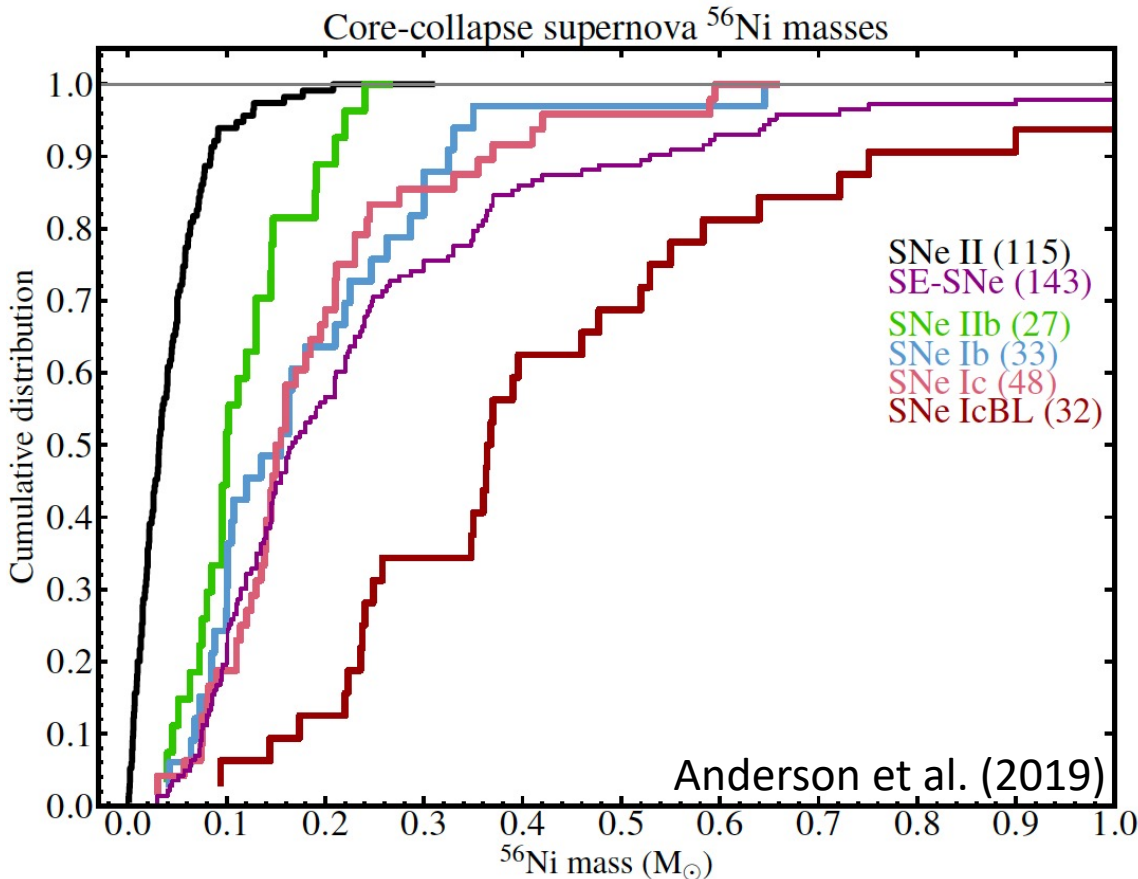
Tanaka et al. (2008)

SNR Radius – Age Plot



CCO SNRsは大きい傾向がある。→ Stripped-envelope SN?

Amounts of Fe Ejecta in CCSNe



^{56}Ni の質量 (M_{\odot})

	Median
SN II	0.032
SE-SN	0.184

Fe (SN II) < Fe (SE-SN)

↑単純には、爆発時の fallback 量は SE-SN の方が少ないはず。
(SE-SN に伴う) CCO の弱磁場が、fallback に起因する可能性には否定的(短絡的すぎ?)

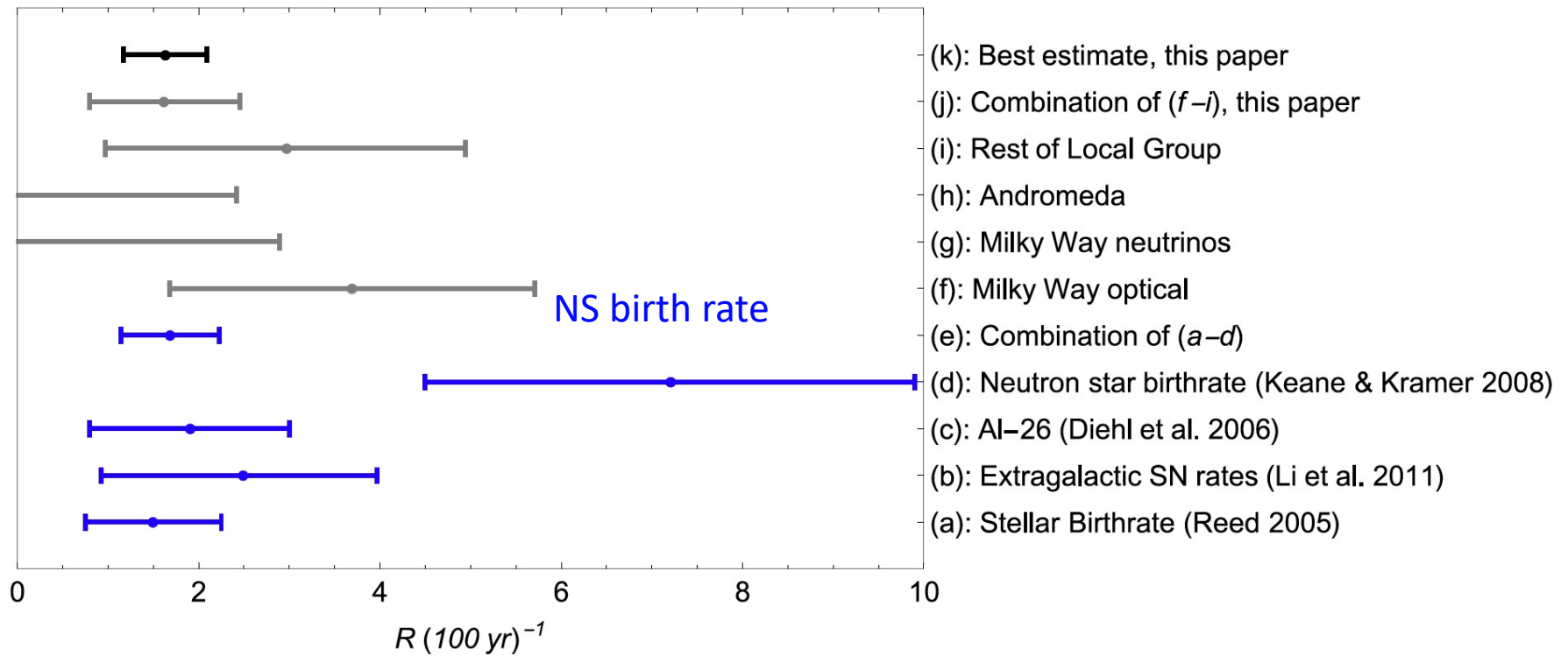
Contents

- 中性子星と超新星爆発タイプ
- 中性子星キックと超新星爆発の非対称
- 中性子星と超新星残骸のサイズ・膨張速度
- 中性子星と超新星の発生頻度

Birth Rate Problem

$$R_{\text{SN}} \ll R_{\text{NS}}$$

超新星の発生頻度



Rozwadowska et al. (2020)

Birth Rate of Galactic CC SNe

From Rozwadowska et al. (2020)

- **大質量星の発生頻度: $R = 1.5 \pm 0.5 / 100 \text{ yr}$**
太陽から 1.5 kpc 以内にある 400 の大質量星から銀河系全体を類推 (Reed 2005)
- **超新星発生頻度: $R = 2.0 \pm 0.4 / 100 \text{ yr}$**
近傍銀河の超新星発生頻度から類推 (Li et al. 2011; updated by using the revised Hubble constant)
- **^{26}Al の存在量: $R = 1.9 \pm 1.1 / 100 \text{ yr}$**
銀河面の ^{26}Al (半減期 70 万年) が、重力崩壊超新星のみに由来すると仮定する (Diehl et al. 2006)。
- **歴史上の超新星発生頻度: $R = 3.2 / 100 \text{ yr}$**
8世紀以降、中国を始め世界中でしっかり観察・記録されている。この 1300 年で肉眼で確認された重力崩壊超新星は2例。一方、可視光のダスト減光で大半は見えない。実際に発生した超新星の数は目撃例の16倍程度と見積もられている (Adams et al. 2013)。

Birth Rate of Galactic (CC) SNRs

	Number of SNRs	SNR age (yr)	Birth Rate
Green catalog	300	< 100 kyr	0.3 / 100 yr
Leahy et al. (2020)	58	Estimated from evolution models	0.5 / 100 yr (3 / 100 yr corrected for incompleteness factor of ~5*)

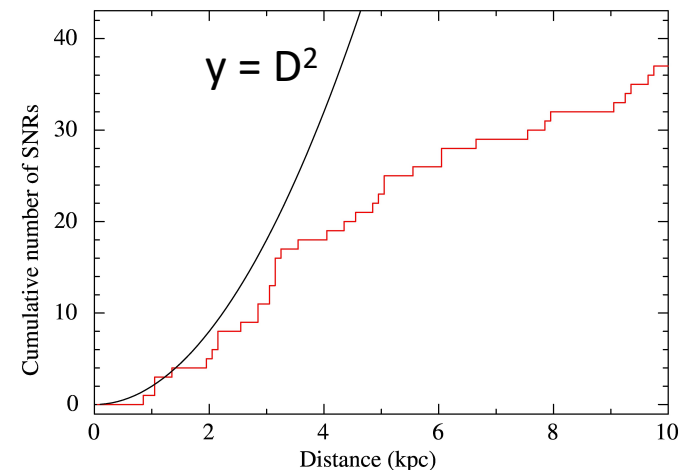
$$R_{\text{SN}} \sim 10 R_{\text{SNR}}$$

Missing SNR problem

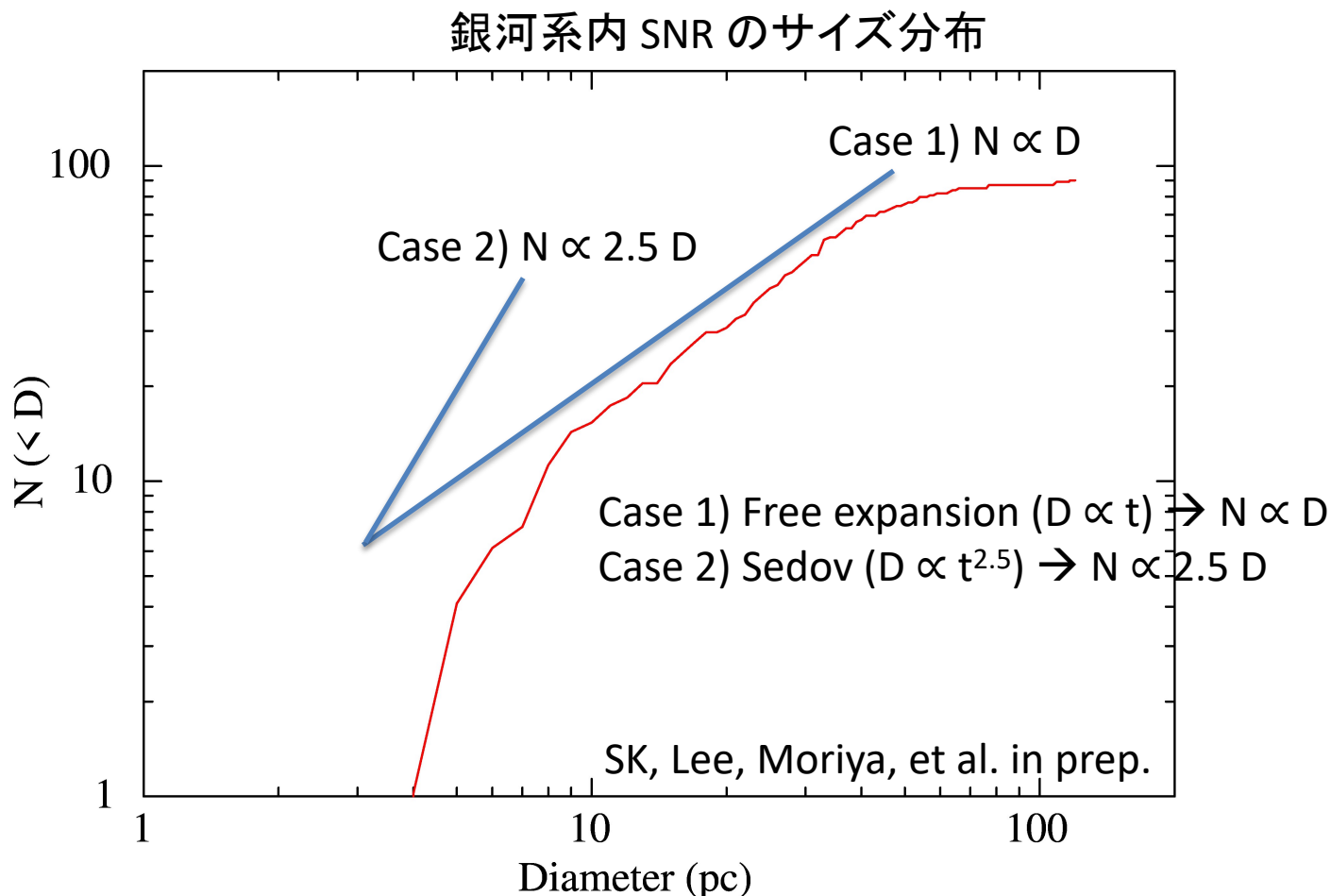
観測されたSNRの数が期待値よりずっと少ない。期待値 = 2000
= $R_{\text{SN}} (2 / 100 \text{ yr}) \times \text{lifetime} (10^5 \text{ yr})$

実は昔から知られている問題
(e.g., Tomisaka et al. 1980)

*) Incompleteness factor
SNRが銀河面 disk に分布するなら、SNR数は D^2 で増えるはずだが、実際にはそんなに増えない。



Diameter Distribution of Galactic CC-SNRs



期待されるのは Case 2 (傾き2.5)だが、観測結果はCase 1 (傾き1)に近い。

→ 仮説1: 大きい SNR は暗いので、見逃している。

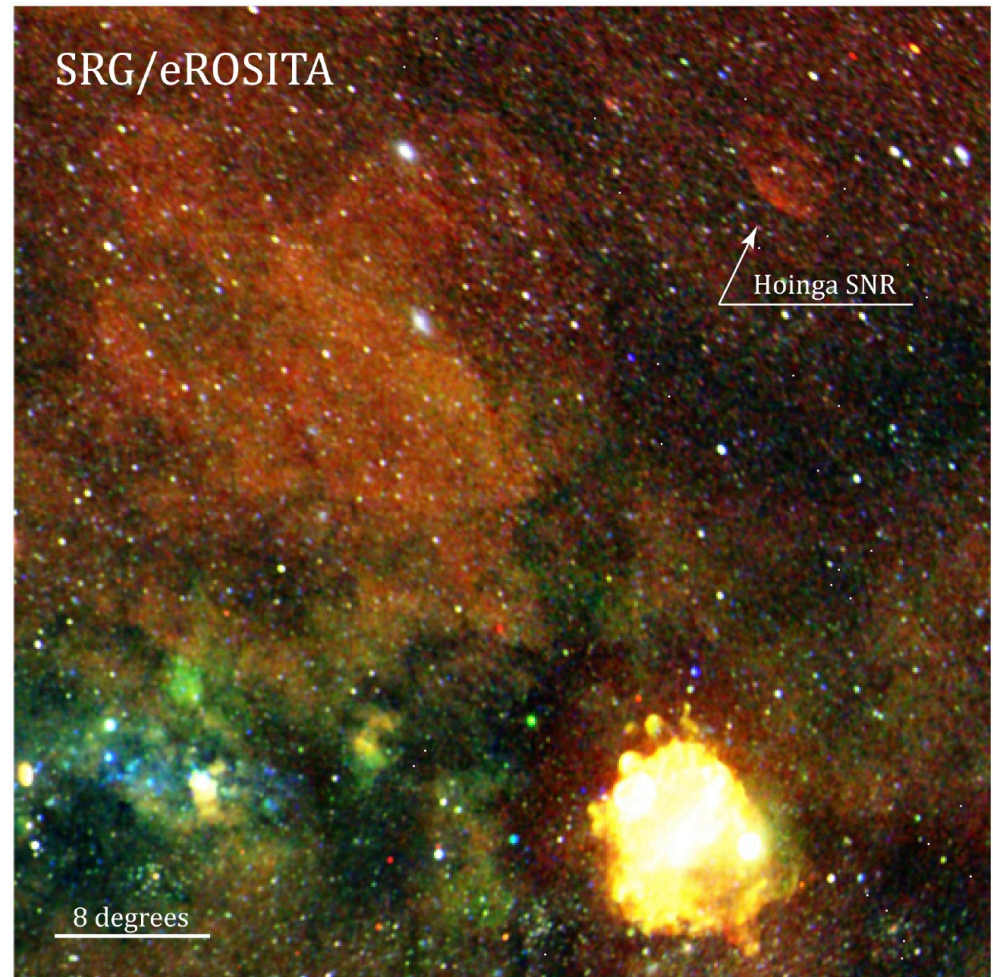
仮説2: 恒星風キャビティ中は自由膨張で、壁に当たって急減速する。

eROSITA Discovery of a Large SNR

巨大で暗い SNR の発見
(Becker et al. 2021)

Hoinga SNR と命名
ちなみに、Hoinga は、
第一著者のホームタウンの
名称(中世時代の名前)

感度の高いサーベイ観測で
多少は増えると思うが、、、そ
こまでは増えない？
佐々木さん講演で勉強したい。



Are CO Bubbles Dark SNRs?

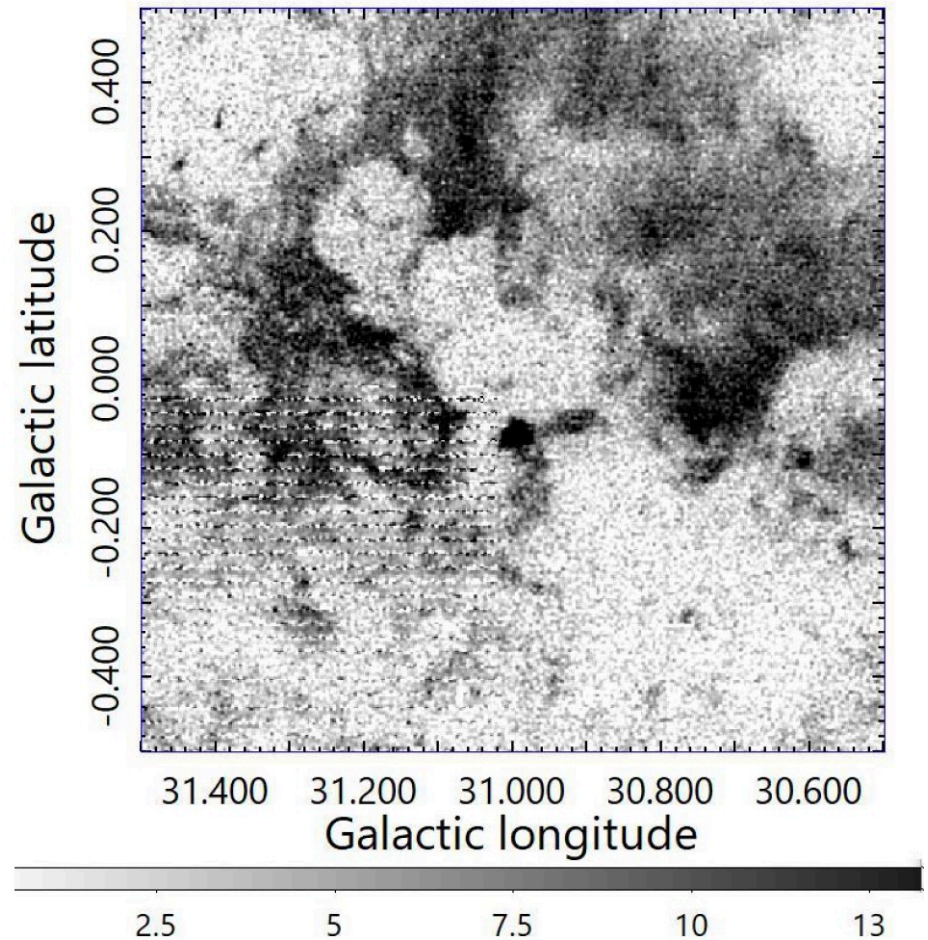
分子雲中で超新星が発生すると、最初は非常に明るくなるが、100年くらいで消滅する(e.g., Wheeler et al. 1980)。

祖父江(2020, 2021ab)らは、星形成領域に分子雲の空洞構を発見し、それらがSNR(dark SNR)とする仮説を提唱している。

この説が正しければ、SNRの数は圧倒的に増える。

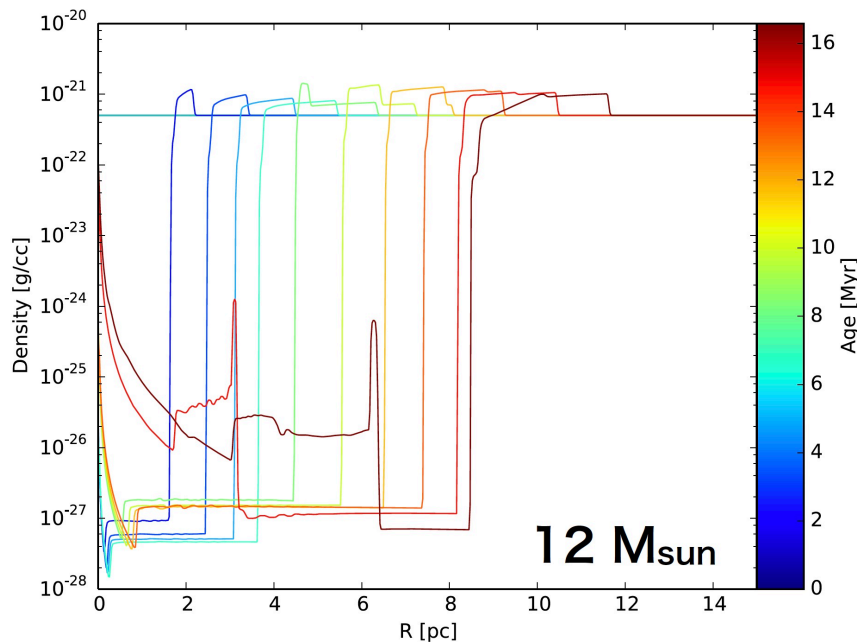
バブルに付随する中性子星が見つければかなり確実な説になるが...

活発な星形成領域(W43)の ^{12}CO マップ

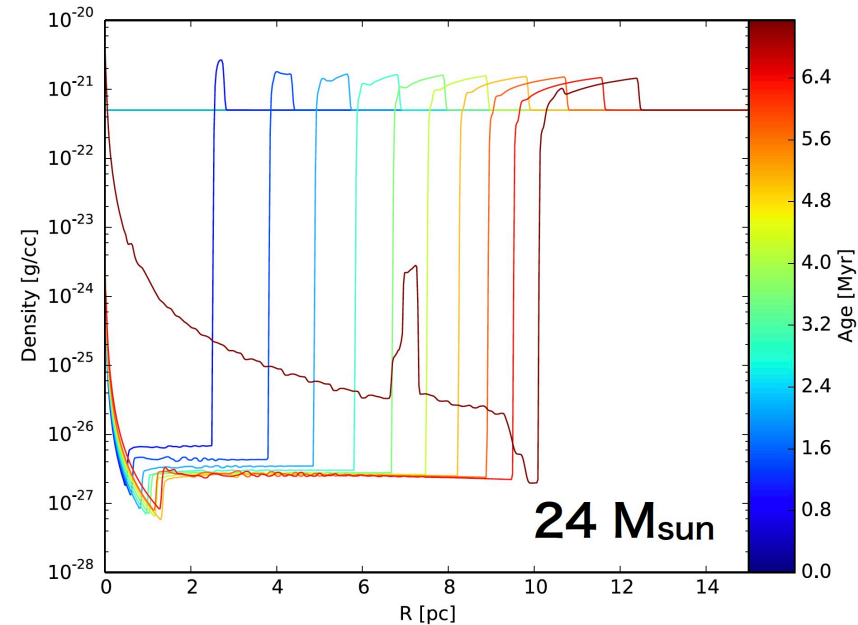


Stellar Wind Bubbles in Dense Clouds

$n_0 = 300 \text{ cm}^{-3}$, $M_{\text{progenitor}} = 12 M_{\odot}$



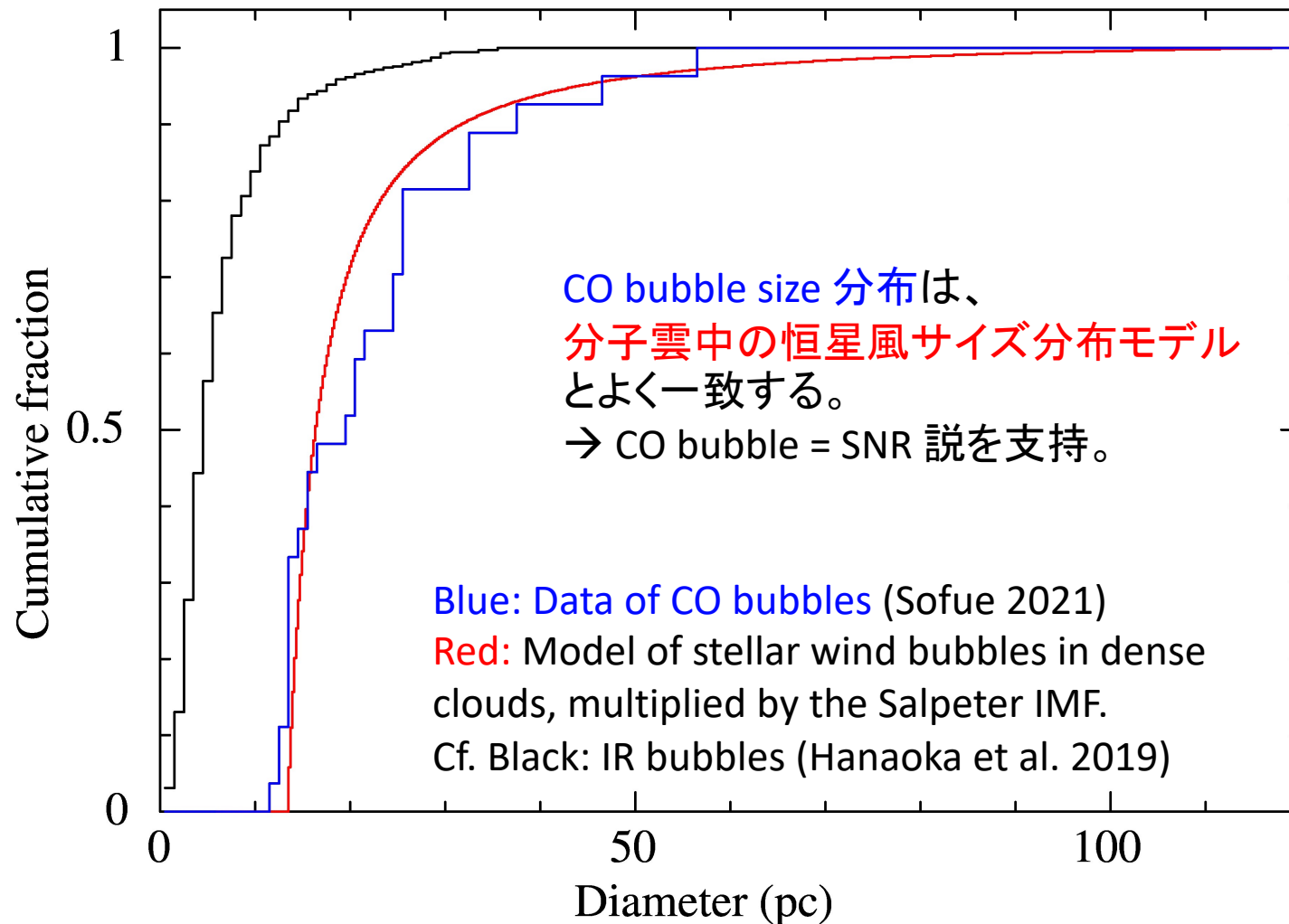
$n_0 = 300 \text{ cm}^{-3}$, $M_{\text{progenitor}} = 24 M_{\odot}$



Simulations by Herman Lee & Takashi Moriya

バブルサイズは、親星質量(星風パラメータ)にあまり依存しない。

Diameter Distribution of CO Bubbles



Birth Rates of NSs

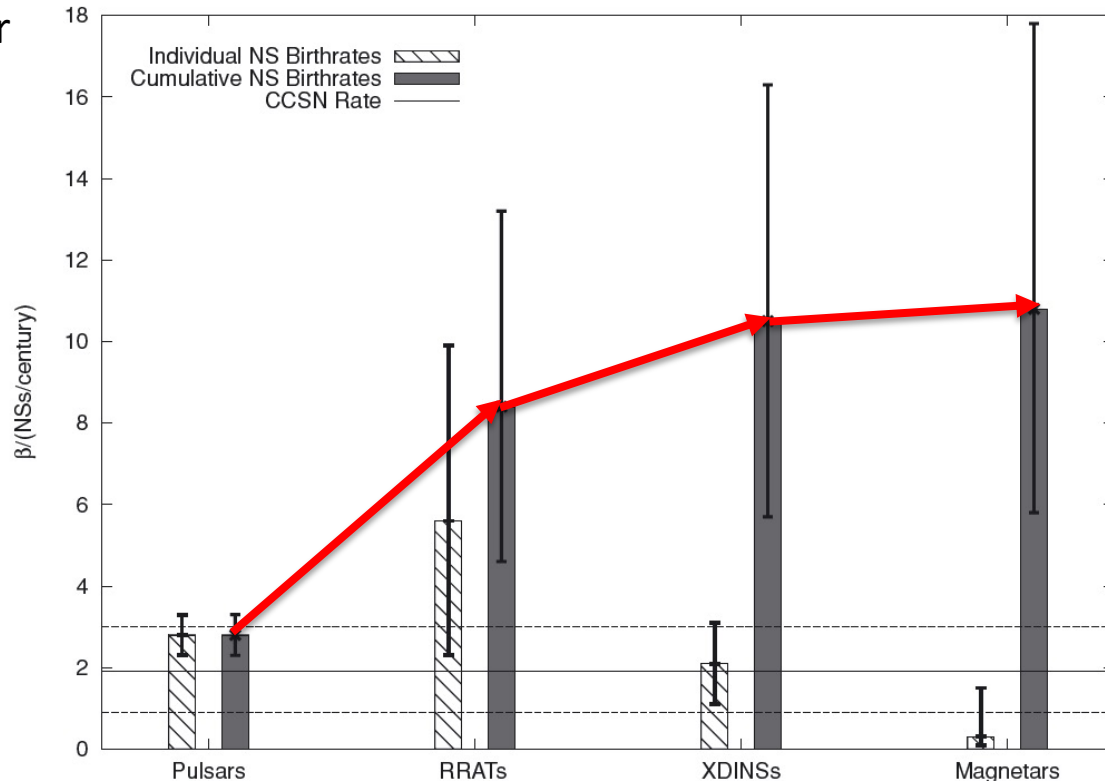
中性子星の発生頻度

- 1) Radio pulsars: $R = 2.8 \pm 0.5 / 100 \text{ yr}$
- 2) RRAT: $R = 5.6 \pm 3.5 / 100 \text{ yr}$
(距離 2—7 kpc; DM が大きい)
- 3) XDINS: $R = 2.1 \pm 1.0 / 100 \text{ yr}$
(距離 < 400 pc)
- 4) Magnetar: $R = 0.3 (< 1.5) / 100 \text{ yr}$

⇒ $R(\text{total}) \sim 11 / 100 \text{ yr}$
超新星の発生頻度の5倍

……さすがに多すぎる。

Keane & Kramer (2008)



Possibility to Reduce the NS Birth Rate

中性子星の多様性は進化段階の違いか?
例えば、normal pulsar → RRAT → XDINS?

この説を支持する観測事実

- そもそも、RRAT の定義が曖昧。
- CCO が Magnetar になったケース(RCW103)
- XDINS と CCO は性質が似ている。

eROSITAへの期待

- XDINS を多数発見?
 - RRAT の微弱な熱放射を検出?
- X線の性質から、多様性の起源に迫れる。

<様々な中性子星>

- Normal pulsars
 - 多数派。
- RRAT
 - Normal より多い?
- XDINS
 - Normal と同程度?
- Magnetars
 - 数は少なそう。
- CCO
 - 数は少なそう。

Summary

中性子星の多様性の原因を超新星残骸との比較から探った。

- 1) SN Type と中性子星の種類には明確な関連はない。但し、Magnetar + CCO は IIb が多そう(3とも一致する)。
- 2) NS kick は爆発の非対称と関連している。偏った爆発の反動で蹴り出される。
- 3) CCO は巨大 SNR (most likely, SE-SN remnant)を好む。
- 4) 発生頻度: $R_{NS} \gg R_{SN} \gg R_{SNR}$
NS, SNR の発生頻度を修正すれば、SN に近づきそうではある。

	1	2	3	4
生まれつき性質が異なる	△	◎	△	--
進化段階によって見せる顔が違う	--	--	--	○
環境要因(一つは連星の有無。他は?)	--	--	--	--