

宇宙生命学特論

恒星内での元素合成と 星間空間への拡散

http://milkyway.sci.kagoshima-u.ac.jp/~imai/SpaceLifeScience_Imai2023.pdf

今井 裕

鹿児島大学

総合教育機構共通教育センター

理工学研究科附属天の川銀河研究センター

講義の全容

生命の構築や維持に必要な元素の起源

❖ 元素の組成と合成

- 生命体内、触媒内に見られる主な元素
- 地球上、星間空間に見られる元素組成
- 元素の合成(宇宙初期・恒星内部・天体合体)

❖ 合成された元素の宇宙空間への拡散

- 宇宙での物質の輪廻
- 恒星風・新星／超新星爆発(・銀河風)・天体合体
- 宇宙での星形成史→宇宙元素組成の進化
- 宇宙での物質循環素過程→物質相進化

参考文献:

シリーズ現代の天文学 (3巻:宇宙論II—宇宙の進化 4巻:銀河I—銀河と宇宙の階層構造 5巻:銀河II—銀河系 6巻:星間物質と星形成 7巻:恒星)
理科年表、山村一誠氏講義資料(2016年度物理学特別講義)、ほか

生命の構築や維持に必要な元素

1 New Original																		18 VIII A																																																																																																																													
IA																		IIA																		IIIA																		IVA																		VA																		VIA																		VIIA																		VIII A																	
1 H 水素 1.00784																		2 He ヘリウム 4.002602																																																																																																																													
3 Li リチウム 6.941	4 Be ベリリウム 9.012182																	5 B ホウ素 10.811	6 C 炭素 12.0107	7 N 窒素 14.00674	8 O 酸素 15.9994	9 F フッ素 18.9984032	10 Ne ネオン 20.1797																																																																																																																								
11 Na ナトリウム 22.989770	12 Mg マグネシウム 24.3050																	13 Al アルミニウム 26.981538	14 Si 珪素 28.0855	15 P リン 30.973761	16 S 硫黄 32.065	17 Cl 塩素 35.453	18 Ar アルゴン 39.948																																																																																																																								
19 K カリウム 39.0983	20 Ca カルシウム 40.078	21 Sc スカンジウム 44.955910	22 Ti チタン 47.867	23 V バナジウム 50.9415	24 Cr クロム 51.9961	25 Mn マンガン 54.938049	26 Fe 鉄 55.8457	27 Co コバルト 58.933200	28 Ni ニッケル 58.6934	29 Cu 銅 63.546	30 Zn 亜鉛 65.409	31 Ga ガリウム 69.723	32 Ge ゲルマニウム 72.64	33 As ヒ素 74.92160	34 Se セレン 78.96	35 Br 臭素 79.904	36 Kr クリプトン 83.798																																																																																																																														
37 Rb ルビジウム 85.4678	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.90585	40 Zr ジルコニウム 91.224	41 Nb ニオブ 92.90638	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム (98)	44 Ru ルテチウム 101.07	45 Rh ロジウム 102.90550	46 Pd パラジウム 106.42	47 Ag 銀 107.8682	48 Cd カドミウム 112.411	49 In インジウム 114.818	50 Sn 錫 118.710	51 Sb アンチモン 121.760	52 Te テルル 127.60	53 I ヨウ素 126.90447	54 Xe キセノン 131.293																																																																																																																														
55 Cs セシウム 132.90545	56 Ba バリウム 137.327	57 to 71		72 Hf ハフニウム 178.49	73 Ta タンタル 180.9479	74 W タングステン 183.84	75 Re レニウム 186.207	76 Os オスマニウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.217	78 Pt プラチナ 195.078	79 Au 金 196.96655	80 Hg 水銀 200.59	81 Tl タリウム 204.3833	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 208.98038	84 Po ポロニウム (209)	85 At アスタチン (210)	86 Rn ラドン (222)																																																																																																																													
87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	89 to 103		104 Rf ラザホージウム (261)	105 Db ドブニウム (262)	106 Sg シーボージウム (266)	107 Bh ボリウム (264)	108 Hs ハッシウム (269)	109 Mt マイタケニウム (268)	110 Ds ダームスタチウム (271)	111 Rg レンドグニウム (272)	112 Uub ウンウンビウム (285)	113 Uut ウンウントリウム (284)	114 Uuq ウンウンクワドニウム (289)	115 Uup ウンウンペンタニウム (288)	116 Uuh ウンウンヘキサニウム (282)	117 Uus ウンウンセプタニウム (284)																																																																																																																														
Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.																																																																																																																																															
Design Copyright © 1997 Michael Dayah (micheal@dayah.com) http://www.dayah.com/periodic/																																																																																																																																															
57 La ランタン 138.9055	58 Ce セリウム 140.116	59 Pr プラセオジム 140.90765	60 Nd ネオジム 144.24	61 Pm プロメチウム (145)	62 Sm サマリウム 150.36	63 Eu ユロピウム 151.964	64 Gd ガドリニウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.92534	66 Dy ジスプロシウム 162.500	67 Ho ホルミウム 164.93032	68 Er エルビウム 167.259	69 Tm ツリウム 168.93421	70 Yb イットリウム 173.04	71 Lu ルテチウム 174.967																																																																																																																																	
89 Ac アクチニウム (227)	90 Th トリウム 232.0381	91 Pa プロトアクチニウム 231.03688	92 U ウラン 238.02891	93 Np ネプツニウム (237)	94 Pu プルトニウム (244)	95 Am アメリシウム (243)	96 Cm キュリウム (247)	97 Bk バークリウム (247)	98 Cf カリホルニウム (251)	99 Es アインシュタインウム (252)	100 Fm フェルミウム (257)	101 Md メンデレビウム (258)	102 No ノーベリウム (259)	103 Lr ローレンシウム (262)																																																																																																																																	

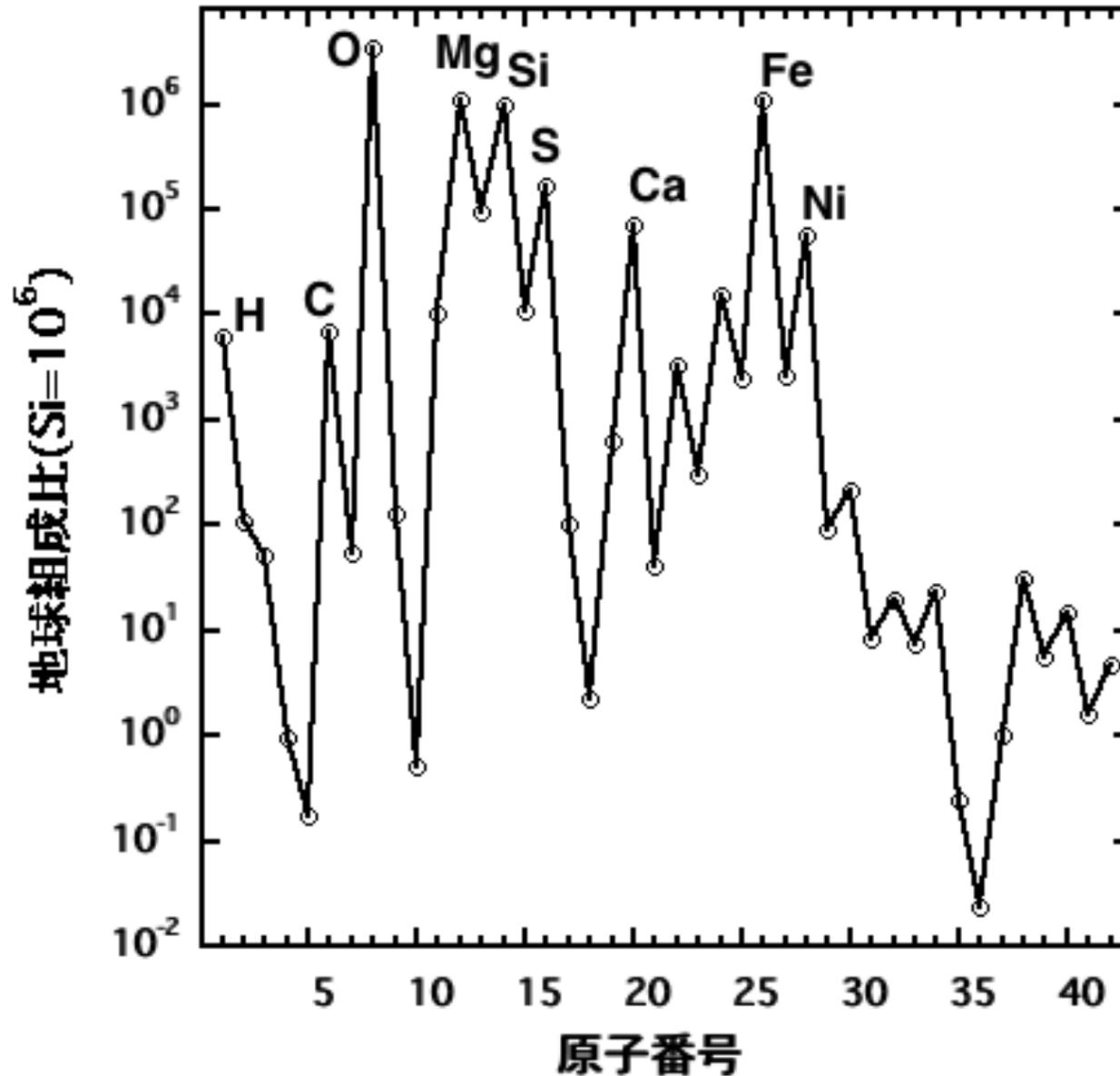
Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

- 生命体 → 非金属元素の組み合わせ <http://www.ptable.com/?lang=ja>
- 生命維持のための触媒 → アルカリ・アルカリ土類金属 + 非金属元素 + 遷移元素
- 温度と圧力による相(気相・液相・固相)の変化・電気的性質 → 利用の可否
液体の水(H₂O)の代わりにメタン(CH₄)を利用する生物も可能?

地球全体の元素組成

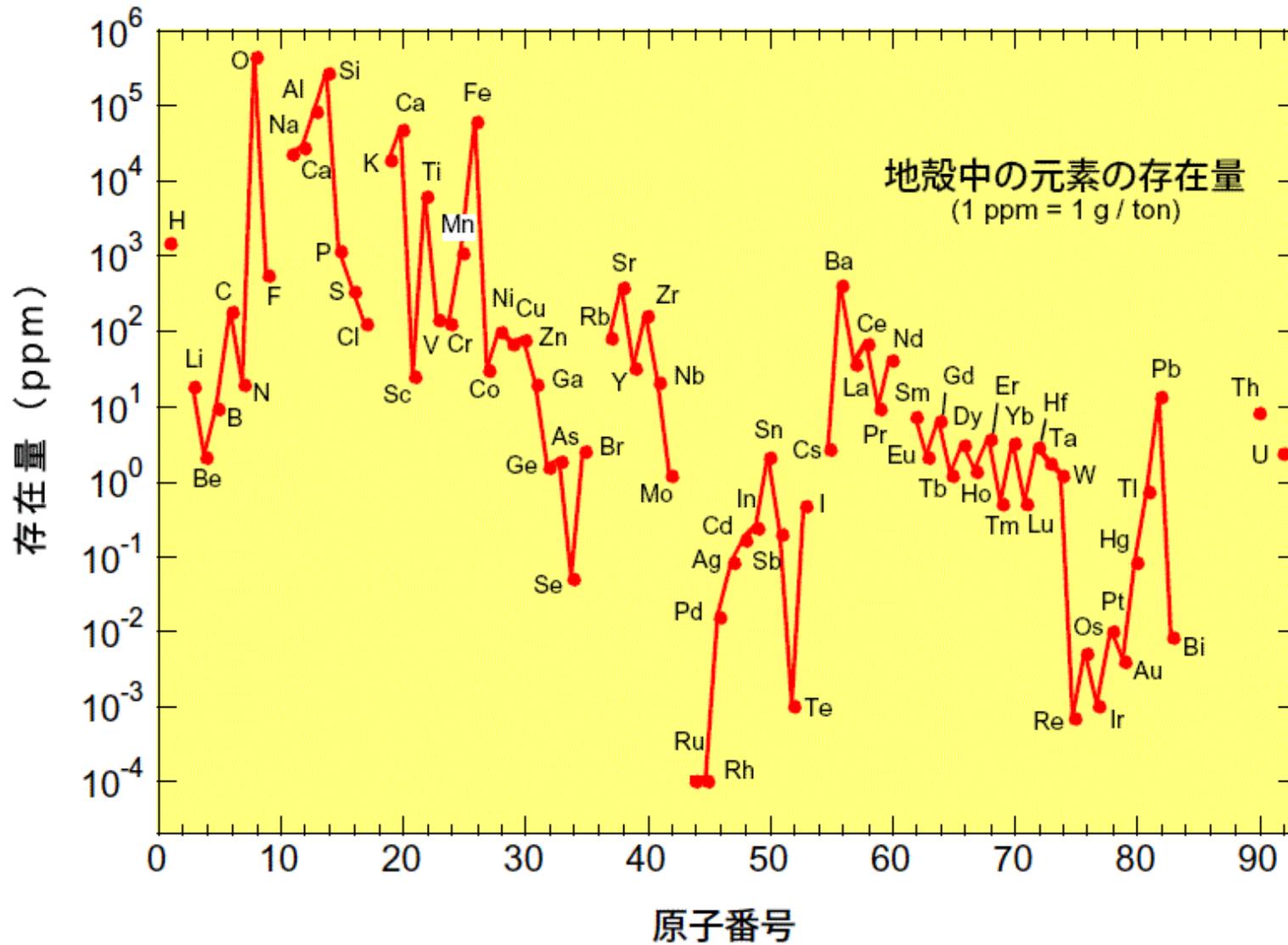
地球元素組成

(海老原 充、地質ニュース、361号、P.8、1984年)



- 地殻・マントル・核
– O, Fe, Si, Mg, ...
- 海洋・地表(少量)
– O, H, Cl, Na, Mg, S, ...
- 大気(微量)
– N, O, C, ...

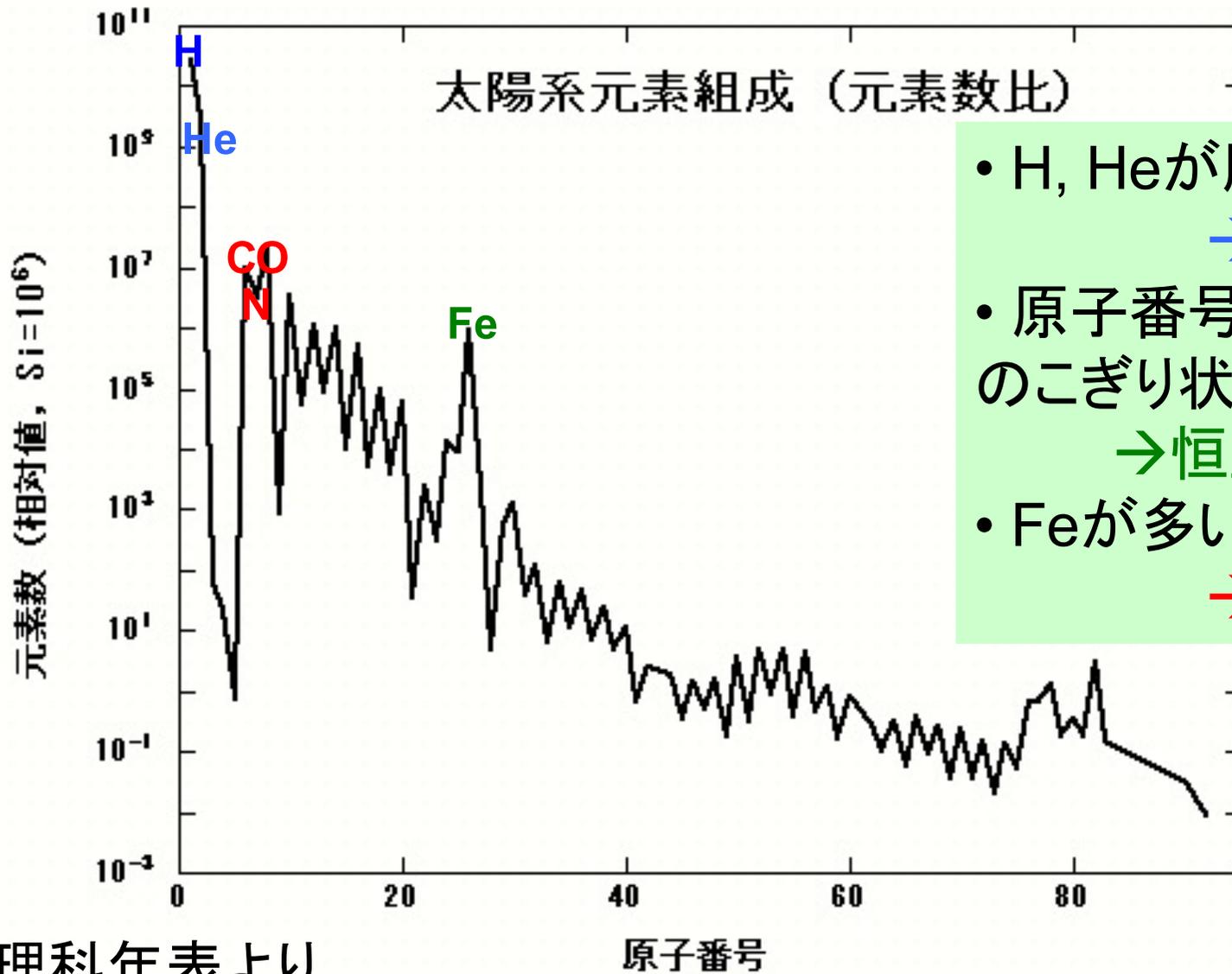
地球地殻の元素組成



N. N. Greenwood and A. Earnshaw, "Chemistry of the Elements", Pergamon Press (1984).

気体になりやすい元素が少ない(宇宙空間へ抜けてしまった)

現在宇宙の元素組成に見られる特徴

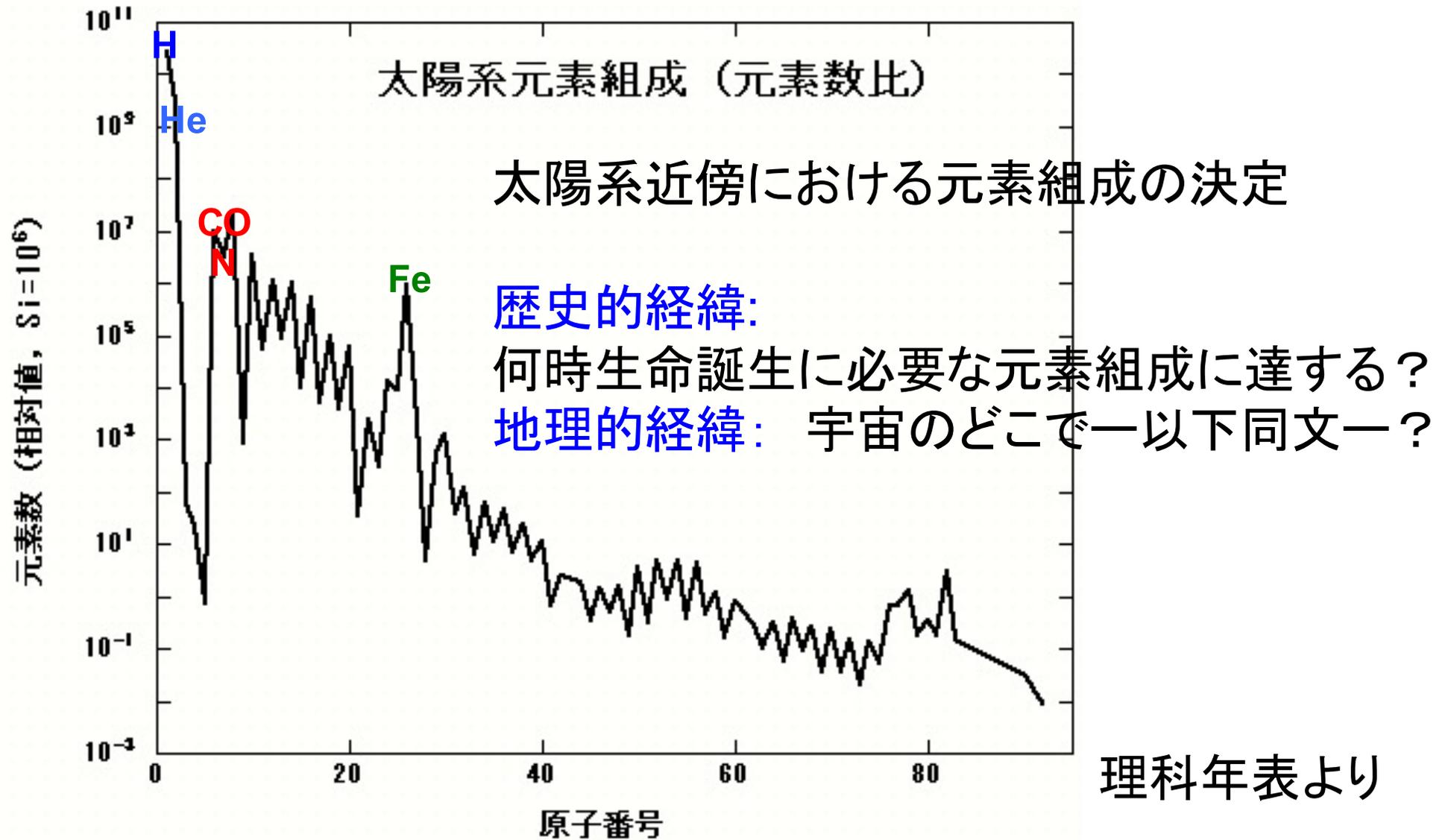


- H, Heが圧倒的に多い
→宇宙初期起源
- 原子番号間隔が2のこぎり状相対値分布
→恒星内部の α 過程
- Feが多い
→大質量星起源

• 原子番号が大きい元素の合成過程が
解明されてきた

恒星内部における／天体合体による元素合成履歴を物語っている

宇宙における元素組成



宇宙元素組成 ≠ 太陽(系)元素組成 (宇宙年代と銀河の中の場所に依存)
≠ 地球元素組成 (惑星形成機構に依存)

初期宇宙と恒星中心部における 元素合成過程の違い

	初期宇宙	恒星中心部
時間尺度	分	億年 (主系列星寿命)
温度	$\leq 10^9$ K (時間と共に急速低下)	$\geq 10^7$ K (時間と共にゆっくり上昇)
密度	$\leq 10^{-5}$ g cm ⁻³ (バリオン形成後)	$\geq 10^2$ g cm ⁻³ (重力平衡状態)
生成元素	軽元素まで (H, D, T, He, Li, Be)	重元素まで (C, O, Si, Fe, Pb, etc.)

元素合成=核融合反応

- 3個のクォーク(素粒子)の結合
→バリオン(原子核)
 - 同じ符号の電荷を持つ粒子同士の合体
→超高温が必要($T > 3 \times 10^6$ K)
- 量子力学的トンネル効果により、ごく僅かな割合で核融合が起きる
- 宇宙の年齢と温度の関係 → 膨張・断熱冷却

$$T[\text{K}] \approx \frac{1.52}{g_*^{1/4} (t/[\text{sec}])^{1/2}} \times 10^{10}$$

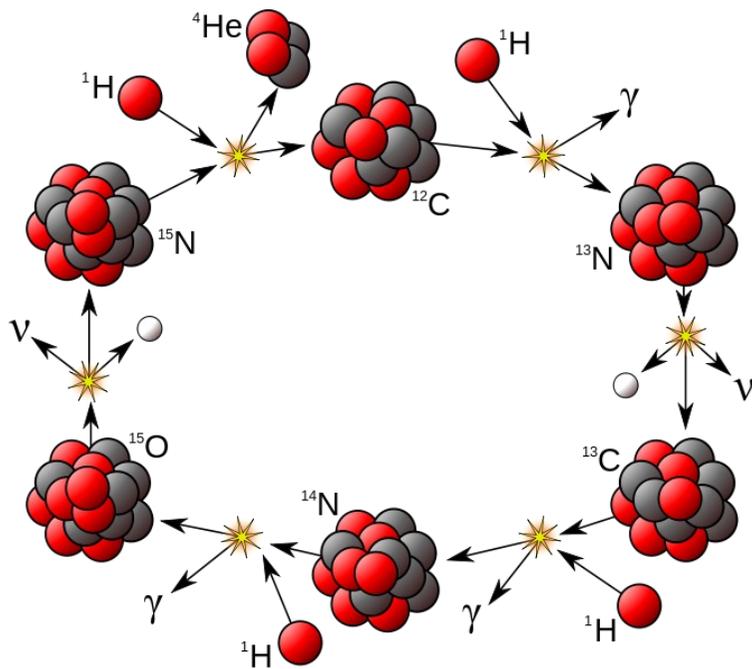
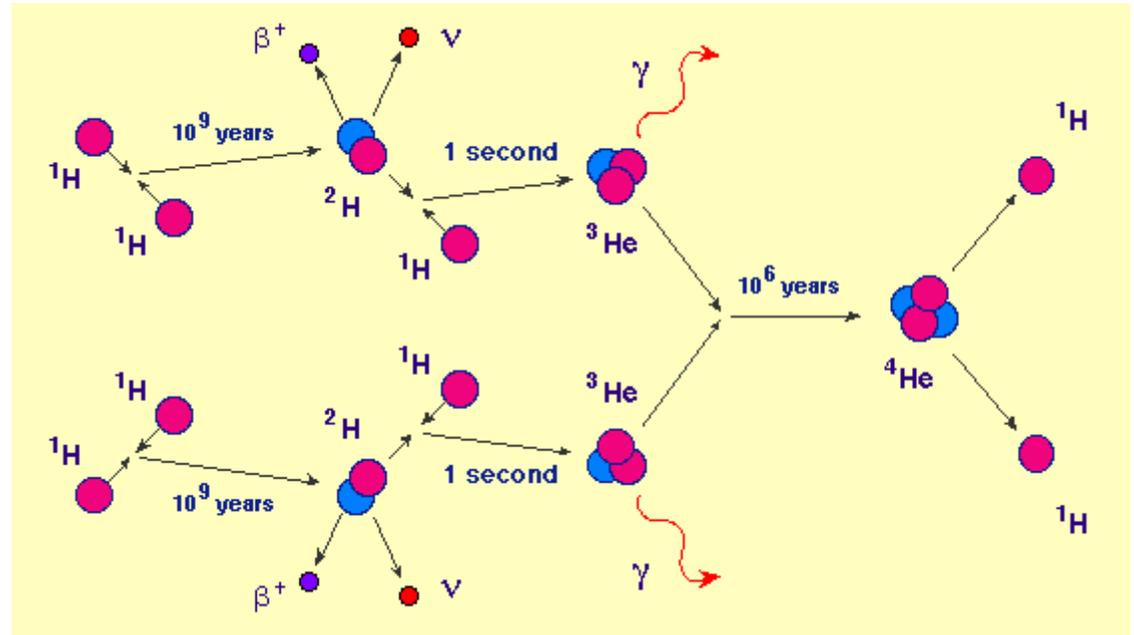
g^* : 粒子の
内部自由度

宇宙初期の元素合成と相転移

- 宇宙初期: **H, He, Li** のみ合成
 - 質量比 70:28:2
 - Beは不安定→Heへ
 - 温度低下による元素合成終了
- 宇宙の暗黒時代から再電離まで
高温プラズマ ($>10^8\text{K}$)
 - ⇒中性ガス:「宇宙の晴れ上がり」(光子が自由に通過可能)
 - ⇒分子ガス:「宇宙の暗黒時代」
 - ⇒初代星の形成:「宇宙の夜明け」 **元素合成再開**
 - ⇒初代銀河の形成:「宇宙の再電離」

恒星内部の熱核反応: 水素からヘリウムへ

- p-p chain (太陽)
@ 1.5×10^7 K



	Proton	γ	Gamma Ray
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

- CNO cycle
(大質量星、第二世代以降)
@ 3×10^7 K

宇宙における生命構築に必要な元素に関する物質輪廻

- 星形成 (+ 惑星形成 + 生命誕生)

- 場所、時間尺度、恒星質量関数

- 恒星進化

- 質量の違い

- 進化の時間的尺度 ($t \propto M_*^{-2.5}$) と

- 合成元素組成の違い

- 恒星からの物質放出

- 質量の違い

- 放出物質の質量と組成の違い

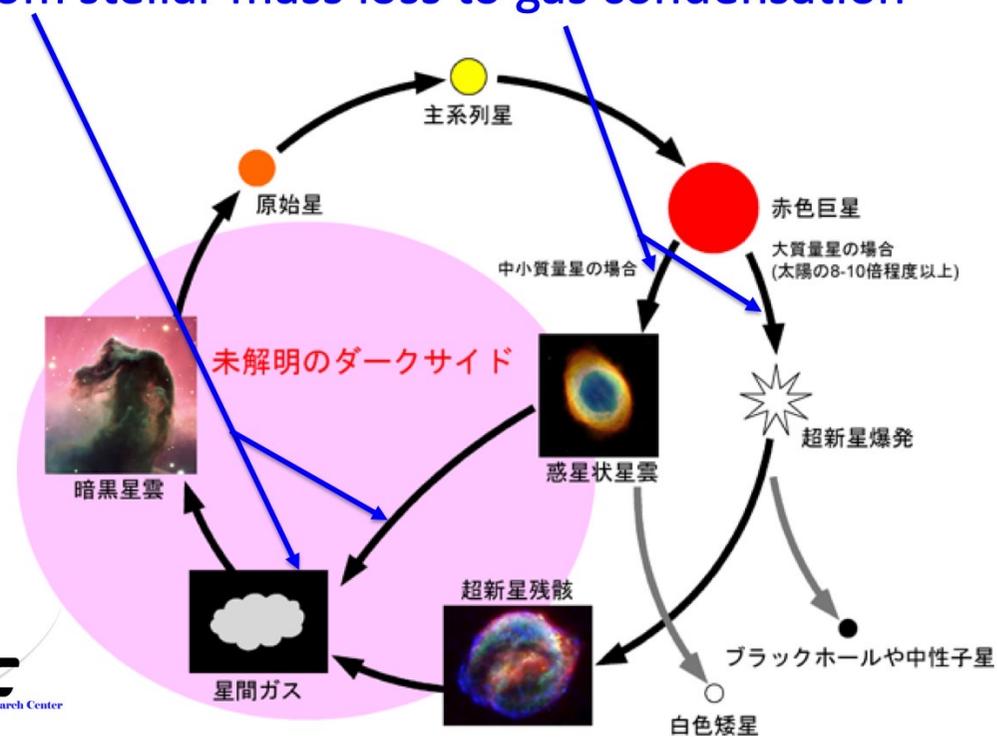
- 物質拡散範囲の違い

- 物質の再集積

- 銀河の中での物質の動きや相に依る (固体微粒子、電離・中性・分子ガス)

Our main approach

From stellar mass loss to gas condensation



この図は一部改訂が必要 (天体合体を含める)

元素合成過程の違いによる恒星分類

(境界は厳密ではない)

• 主系列星の分類

- $M^* < 0.08 M_{\text{sun}}$: 褐色矮星 → 核融合が起きない
- $0.08 M_{\text{sun}} < M^* < 2 M_{\text{sun}}$: 小質量星 → He合成まで
- $2 M_{\text{sun}} < M^* < 10 M_{\text{sun}}$: 中質量星 → Feの手前まで

生命体に欠かせない元素の合成: C, N, O, Na, Mg, P,
漸近巨星枝(AGB)星まで進化して惑星状星雲を形成

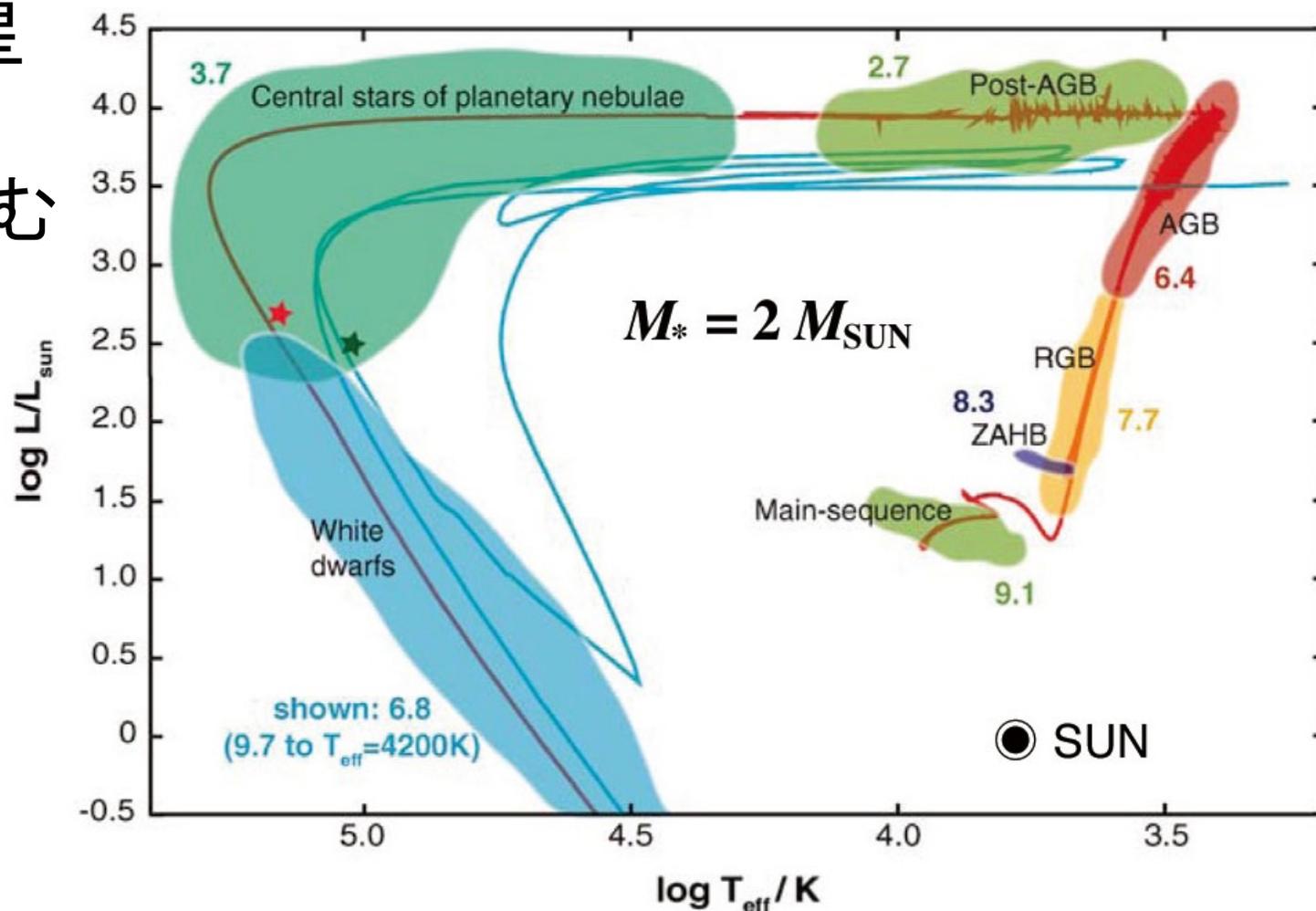
- $M^* > 10 M_{\text{sun}}$: 大質量星 → Feまで

• 物質循環への関与を終えたor関与しない天体

- ブラックホール(宇宙初期に多数発生?)
- 褐色矮星(宇宙の歴史の中で比較的最近出現した天体?)
- 中性子星、白色矮星 → 合体する(or新星になる)と元素合成

恒星進化と元素合成

- 進化末期の中心温度上昇（中心核の電子縮退圧で支える）
→より重い元素の合成が可能となる(AGB段階)
- より重い恒星
ほど中心部の
温度上昇が進む



Stellar evolution in HR diagram (Herwig 2005)

恒星内部の熱核反応: 生命材料の生成

- α 過程: ヘリウム原子核 (α 粒子) との核融合 ($T > 10^8$ K)

- 中心温度が高いほどより重い核子を合成
- 大質量星 ($M_* > 10M_{\text{sun}}$) では鉄 (Fe) まで合成

$T \sim 10^{10}$ K、Fe合成期間は1日程度

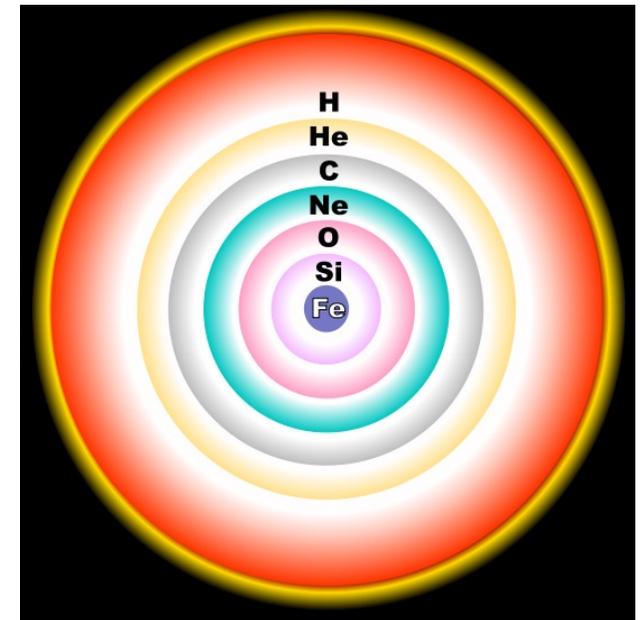
- s(slow)過程: 中性子捕獲 + β 崩壊
(中質量星にて)

- 重力崩壊と重元素の合成

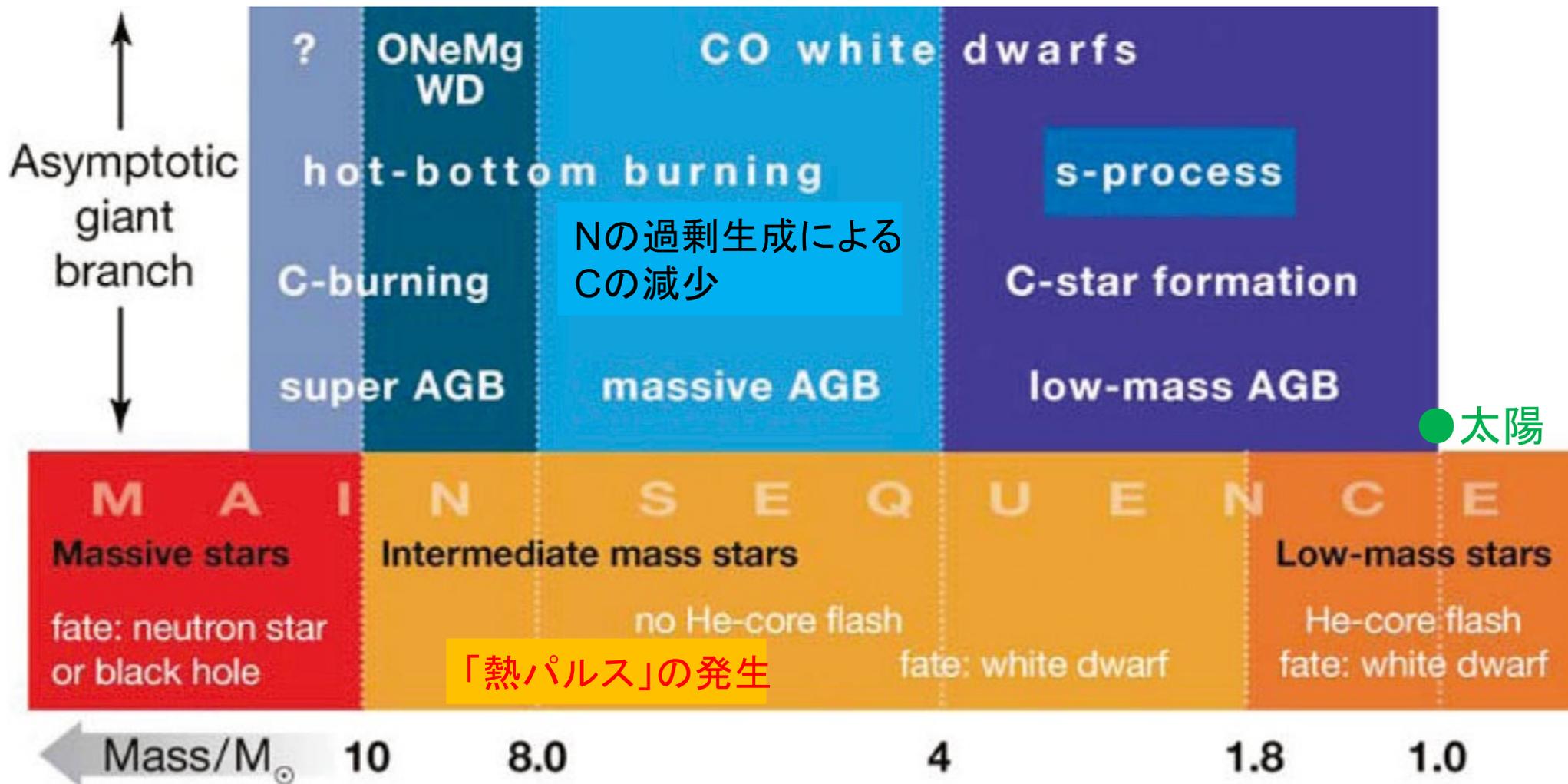
- 電子捕獲 (吸熱反応) \Rightarrow 重力崩壊へ
- 「爆縮」 \Rightarrow 衝撃波 \Rightarrow 超新星爆発
- r(rapid)過程: 中性子捕獲どんどん進む
- 中心の芯: 中性子星 or ブラックホール

- 天体合体による重元素合成

Wikipediaより
(スケールに注意)



恒星の主系列星時代の質量と内部元素組成



質量関数： 軽い恒星ほど多数生まれる

Herwig (2005)

褐色矮星 ($M_* < 0.08 M_{\text{sun}}$): 低温過ぎて核融合反応が起こらない

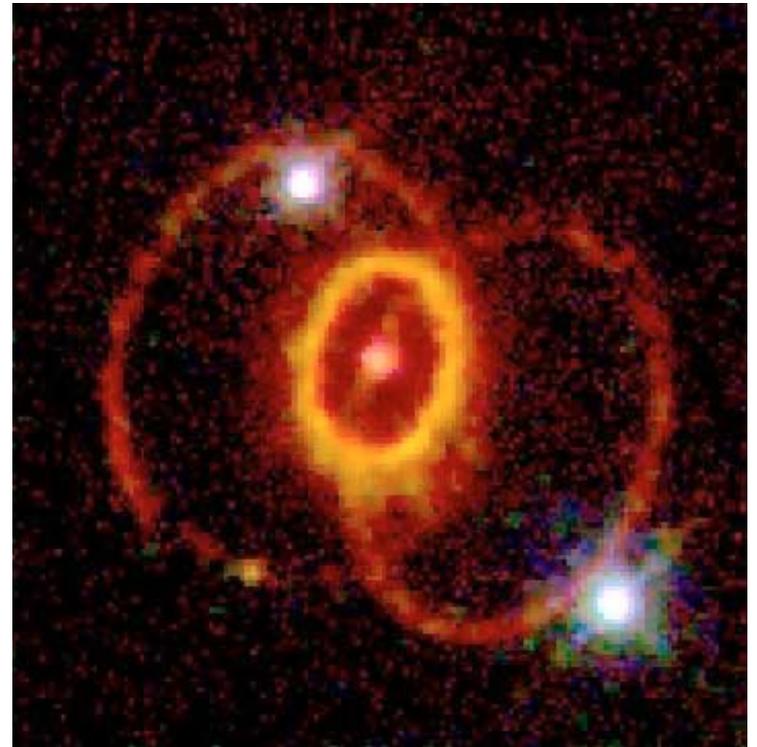
恒星中心部からの表面への元素運搬

- 対流層の発達による中心部生成物の汲み上げ
 - CNO cycleのエネルギー発生率： **温度の15乗**
 - 中心から外側に向けた非常に大きな温度勾配放射よりも物質移動(**対流**)の方がエネルギー運搬効率が高い
- 水平分枝星の誕生： He 3個が合体して炭素(C)に変換
- 3度に渡る大規模な「汲み上げ」(dredge-up)
 - 炭素(C)による核融合が急に進む (**熱パルス**)
 - 漸近巨星枝(AGB)星の誕生： 寿命は 10^5 年程度
 - 窒素(N)・酸素(O)・s過程元素の合成と外層への運搬
- 中質量星($2M_{\text{sun}} < M_* < 10M_{\text{sun}}$)の場合
 - むき出しになった中心部の芯が残る → **惑星状星雲**を光らせる

超新星爆発

- 重力崩壊型 (大質量星: $M_* > 10M_{\text{sun}}$) **II型超新星**
重力崩壊の反動: 中性子星 / ブラックホールが残る
Fe, Pu, U (r-過程元素)などがまき散らされる
 - 熱核反応型 (白色矮星を伴う連星系) **I型超新星**
チャンドラセカール限界質量での
炭素核融合反応の暴走 / 恒星の消滅
Ne, Na, Mg, Si, Niなどが
まき散らされる
 - まき散らされる範囲が広範に及ぶ
- ※超新星爆発が起きる星と起きない星との境目の質量は研究課題

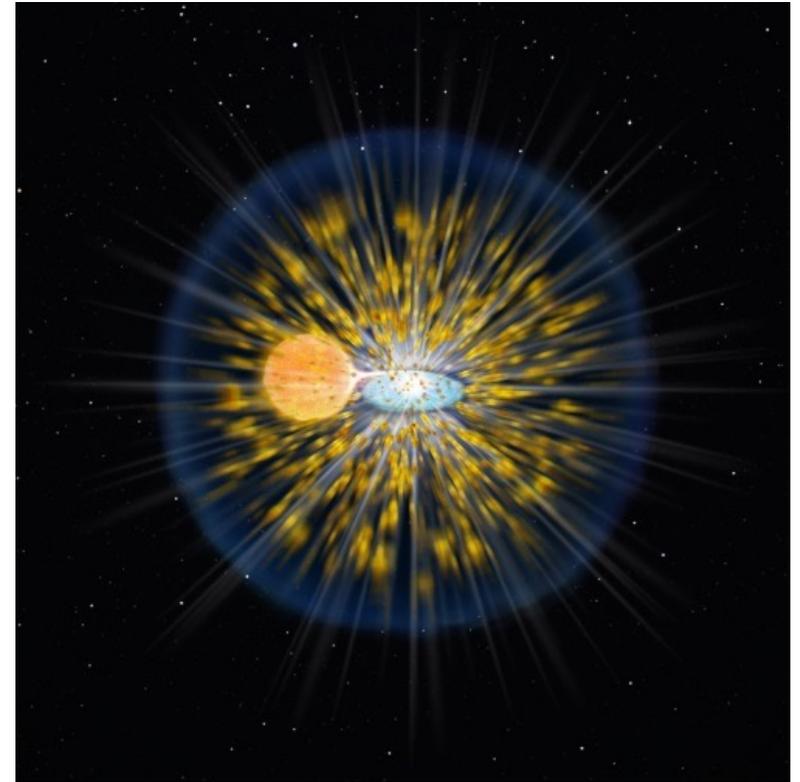
SN1987A (II型)



連星系での元素合成 その1

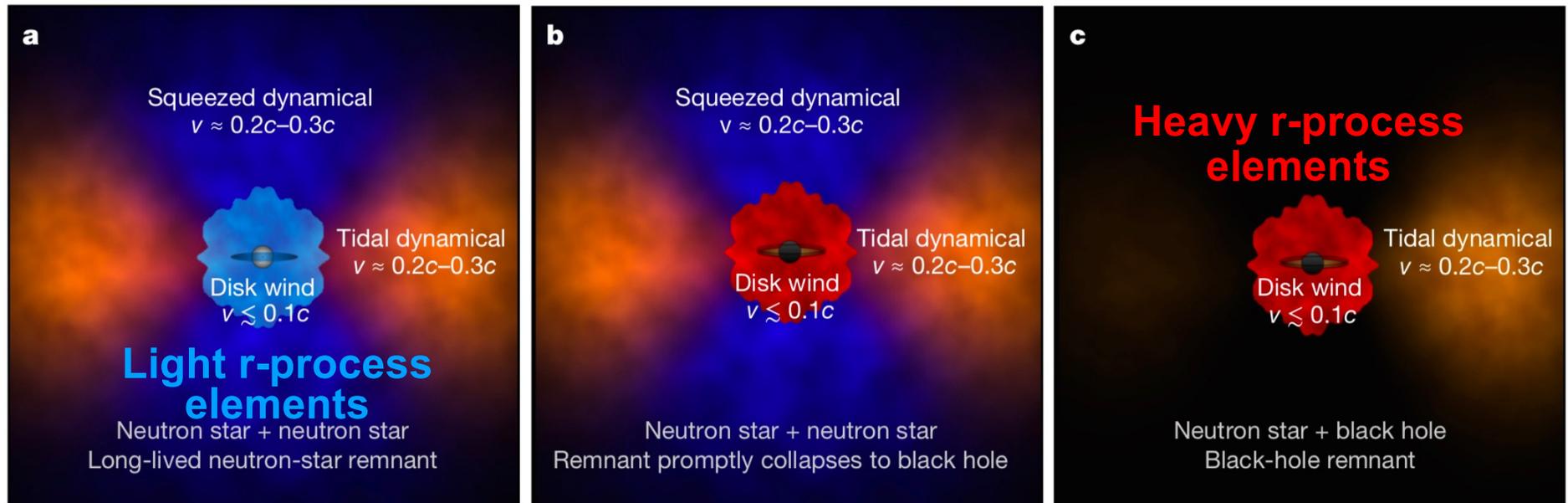
連星系を成す恒星系の割合が高い

- Ia型超新星 (前述)
- 新星爆発
 - Ia型超新星になる白色矮星がその前に数度繰り返す暴走現象
 - 白色矮星(主星)表面に伴星から物質降着
- 観測例: いるか座新星2013 (板垣公一氏発見)
 - ${}^7\text{Be}$ (半減期57日で ${}^7\text{Li}$ に崩壊)の分光検出
(Tajitsu et al. 2015)



連星系での元素合成 その2

- 天体合体による元素合成
 - 重力波源 GW170817の発見→中性子星同士の合体
 - 光度曲線に基づくr過程元素合成への示唆 (J-GEM collaboration 2017)
 - ランタノイド系列元素の分光同定(Pian et al. 2017)
 - Fast radio burst (FRB)の正体も中性子星合体？(Totani 2013)
 - 白色矮星同士の合体されるはず(でも連星が存在し得る)？



恒星進化と質量放出

- 星の進化段階と質量放出率 ($M_* \sim 2M_{\text{sun}}$ の場合)

主系列星

$10^{-12} M_{\text{sun}}/\text{yr}$

(太陽の場合)

赤色巨星枝星

$10^{-8} M_{\text{sun}}/\text{yr}$

漸近巨星枝星

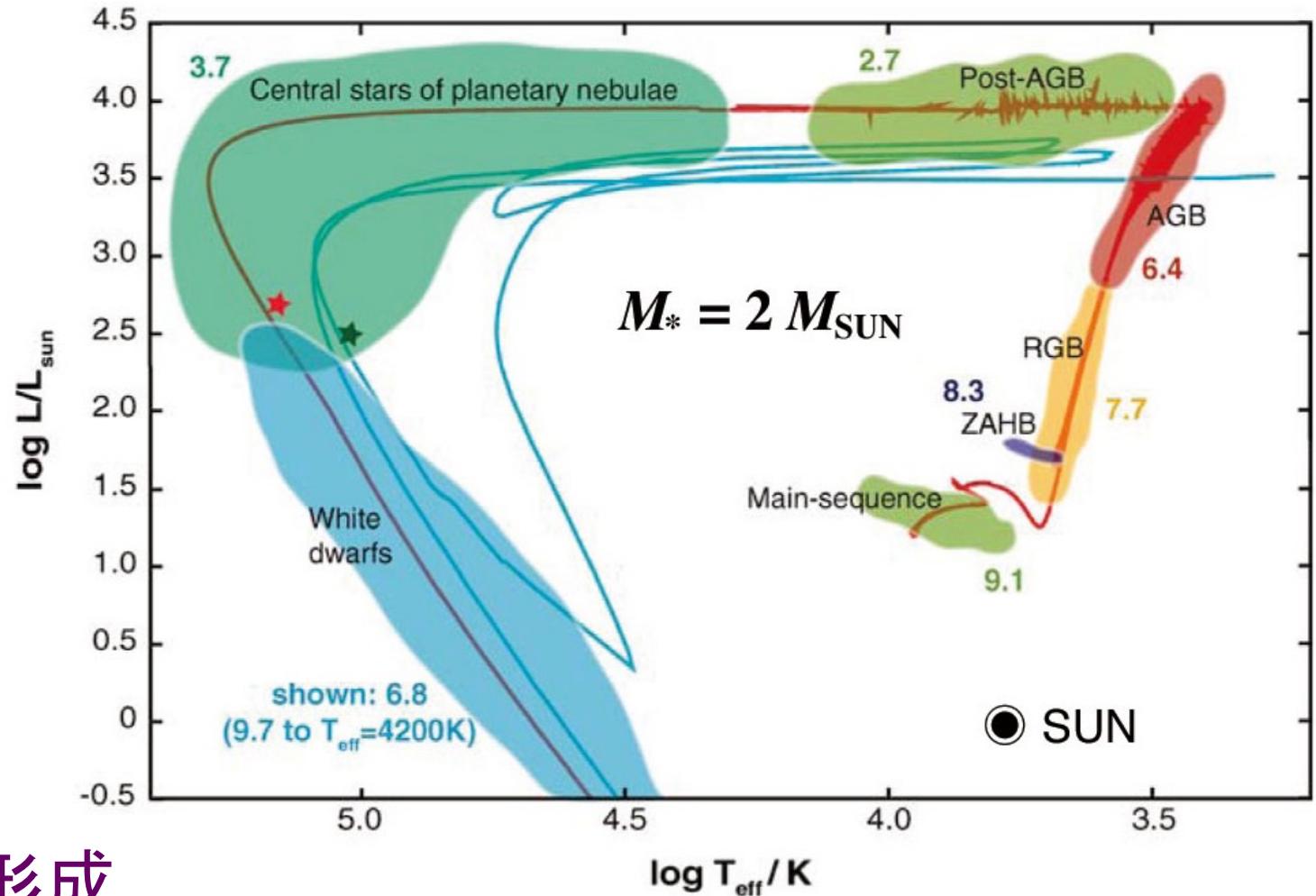
$10^{-6} M_{\text{sun}}/\text{yr}$

光度の増加

+大気の膨張/

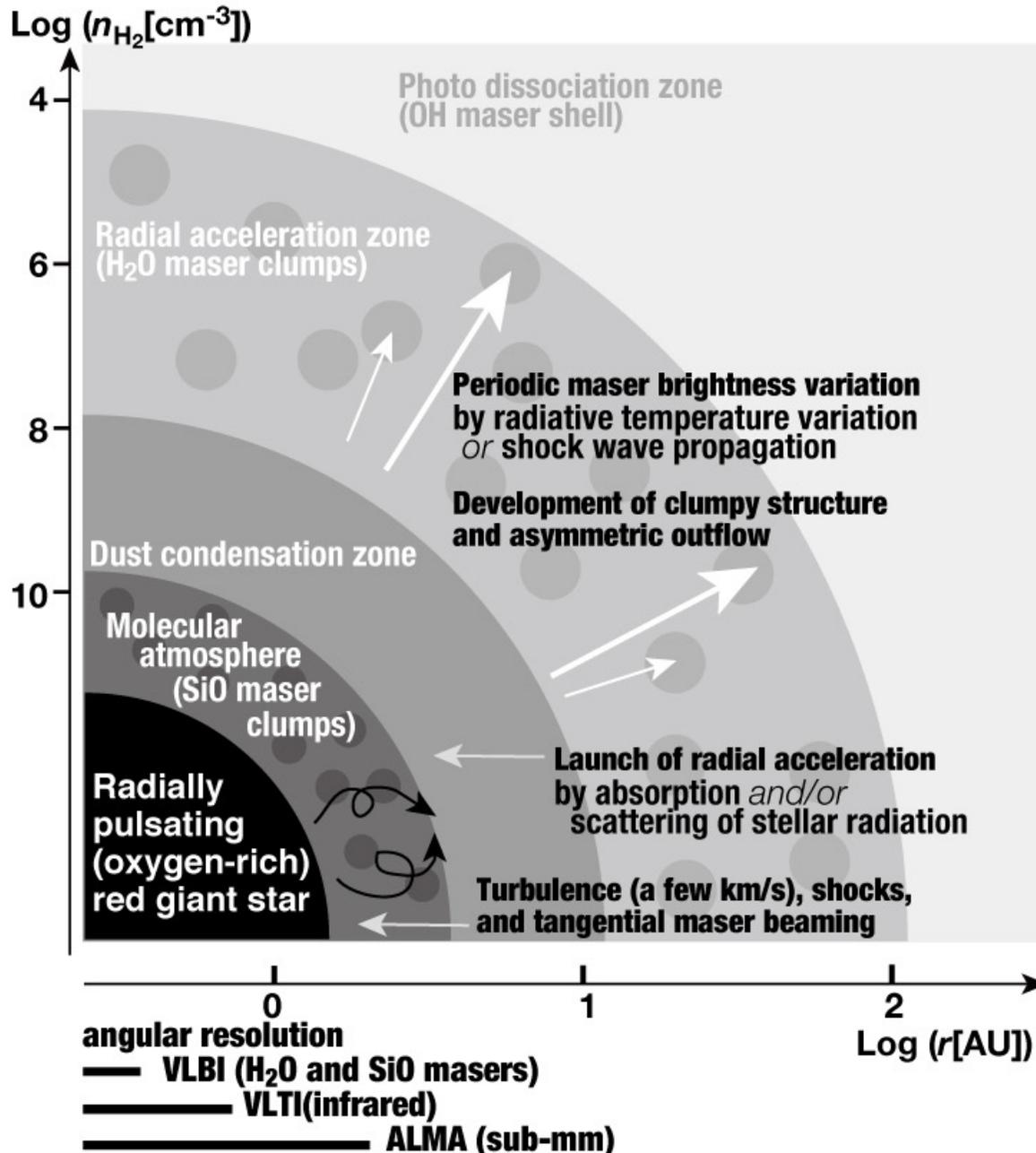
温度低下/塵形成

= 放射圧の増加



Stellar evolution in HR diagram (Herwig 2005)

終末星からの物質放出模式図



VLBI=超長基線電波干渉法
VERA, EAVN など

メーザー放射塊
=分子ガスの塊

• SiOメーザー

星半径の1-2倍の範囲

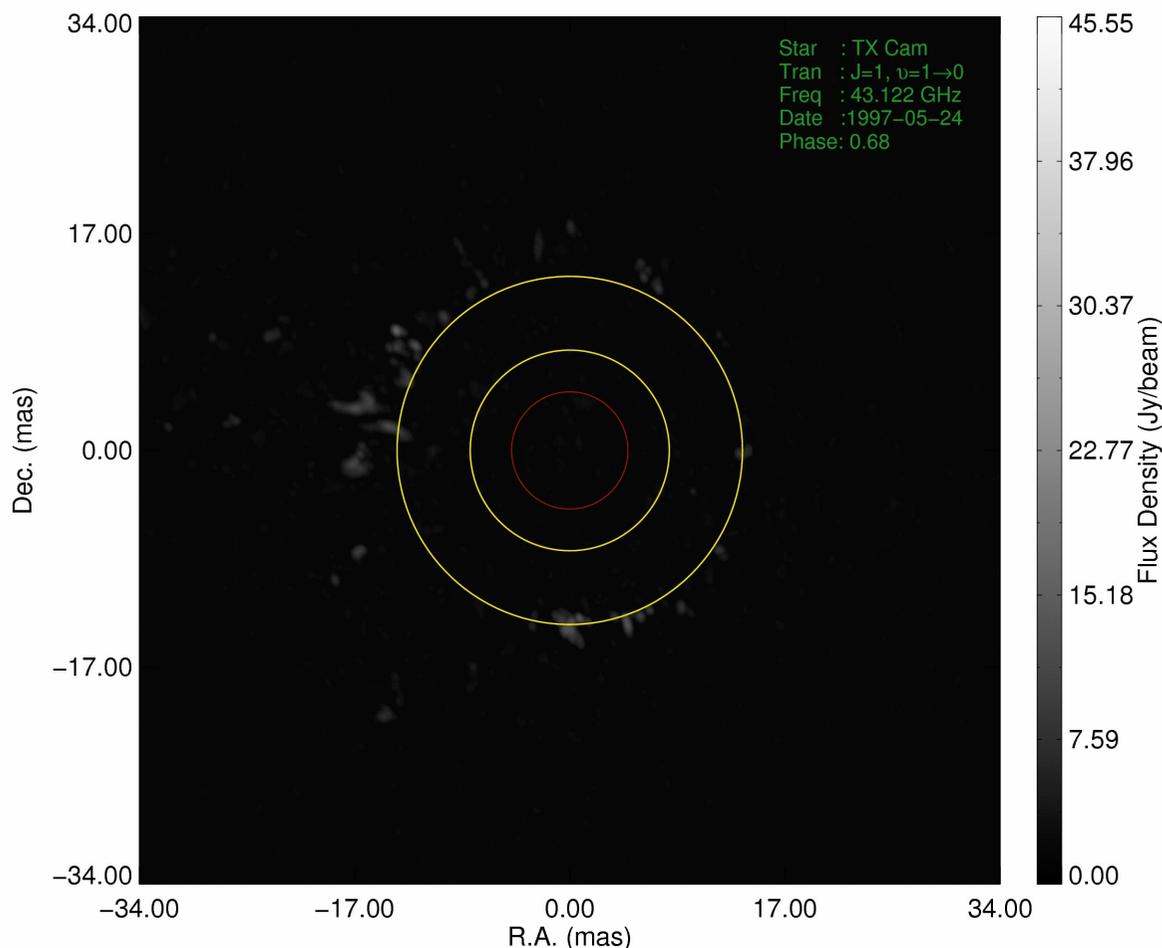
• H₂Oメーザー

星半径の数倍-数10倍

• OH(1612 MHz)メーザー

星半径の数100倍の範囲

漸近巨星枝(AGB)星を取り囲む宇宙メーザー放射のVLBI観測

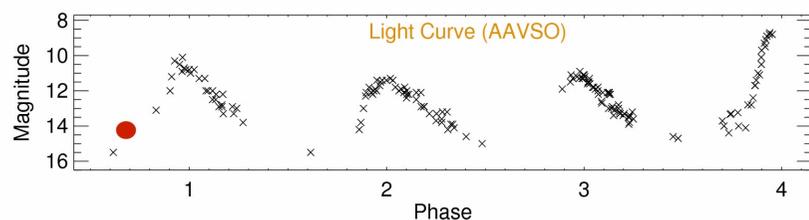


2—4週間ごとにVLBI撮像
によるメーザー放射動画
が作成可能

1990年代
SiO $v=1$ $J=1 \rightarrow 0$ のみ
(TX Cam, R Cas, S Per)

2010—2020年代
ESTEMA
(EAVN Synthesis of Stellar
Maser Animations)
H₂O, SiO ($J=1 \rightarrow 0$, $2 \rightarrow 1$)

SiO masers around TX Cam
(Gonidakis et al. 2014)



恒星表面からの物質放出

- 温度低下： 原子 → 分子・固体粒子（塵）
- 猛烈な放射 ($L \gg 1000 L_{\text{sun}}$) による放射圧
星（赤色巨星）付近には留まることができない
- 恒星質量による塵組成の違い： C/O 比が1つの指標
CとOが真っ先に結合しCOを形成
 - 小質量星： C/O > 1, Oが欠乏、Cが豊富
炭素質： graphite, amorphous,
polycyclic aromatic hydrocarbons (PHAs)
星の中で作られた炭素からそのまま形成される
中小質量星から大量に放出される
 - 大質量星： C/O < 1, Oが豊富、H₂OなどOを含む分子を生成
珪素質： silicate (SiO₂), pyroxenes
金属量の高い環境でしか作られない
酸素過多星（比較的重い中質量星）で主に形成

放射圧による星周塵の加速の仕組み

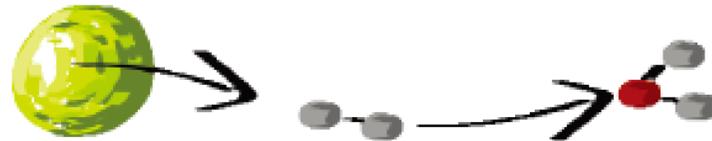


星周塵への星からの放射(光子)
(可視光線・赤外線)の照射



星周塵による光子の吸収、
再放射または散乱

星周塵が光子から
受けた運動量が
ガス粒子との衝突
に伴って移動

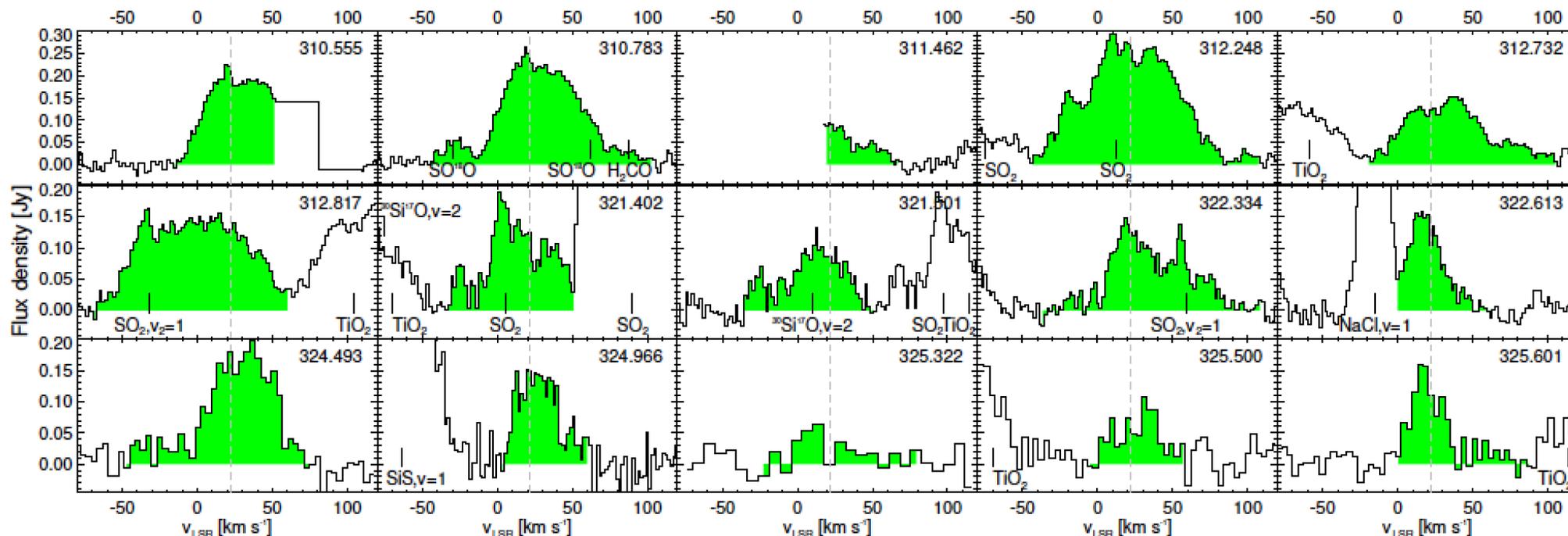


ガス粒子同士の
衝突による
運動量の再配分

Höfner (2011)

- 炭素質塵(黒っぽい)は光子を効率よく**吸収**→効率良く加速される
 - 炭素過多の環境(比較的小質量の進化末期星)
- 大きな酸素質塵(透明)は光子を効率よく**散乱**→効率良く加速される
 - 酸素過多の環境(比較的大質量の進化末期星)

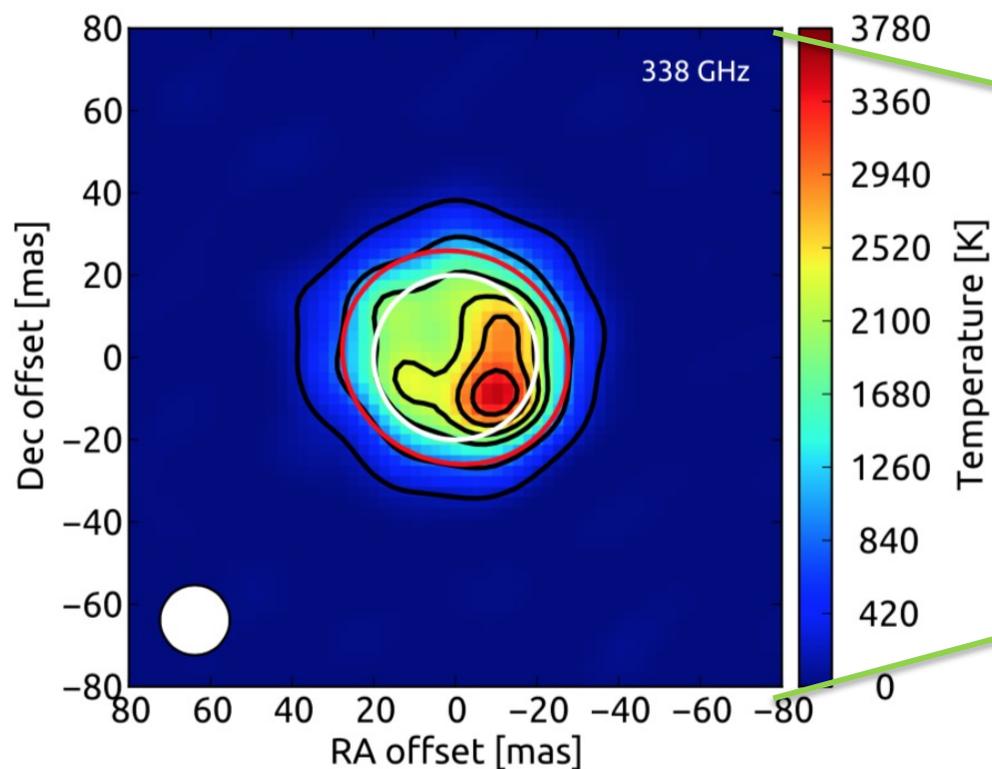
星周縁に見られる気相のTiO₂



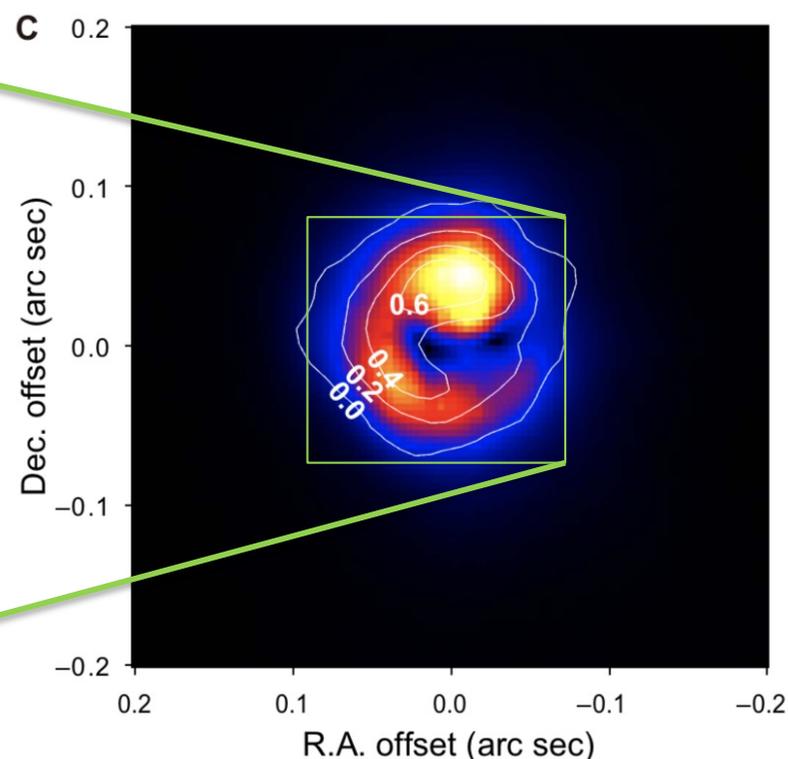
星周領域での塵形成には時間が掛かる
とても小さい塵しかできない
(@VY CMa, De Beck et al. 2015)

星周縁に見られる気相のAIO

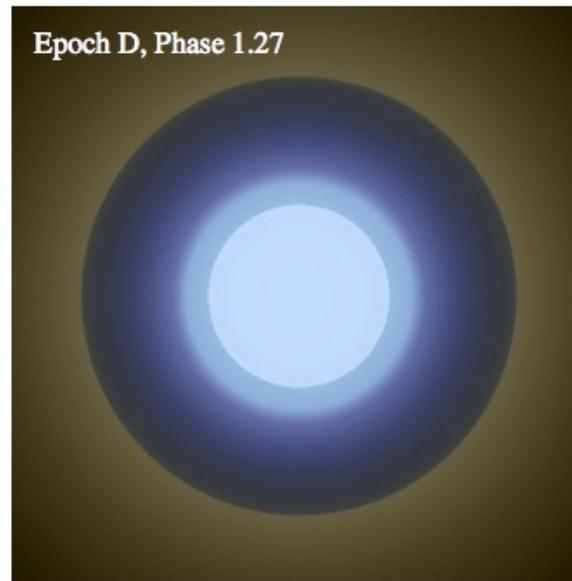
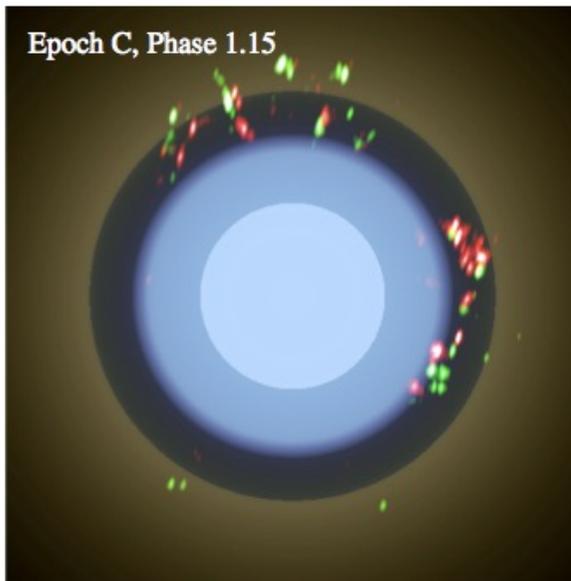
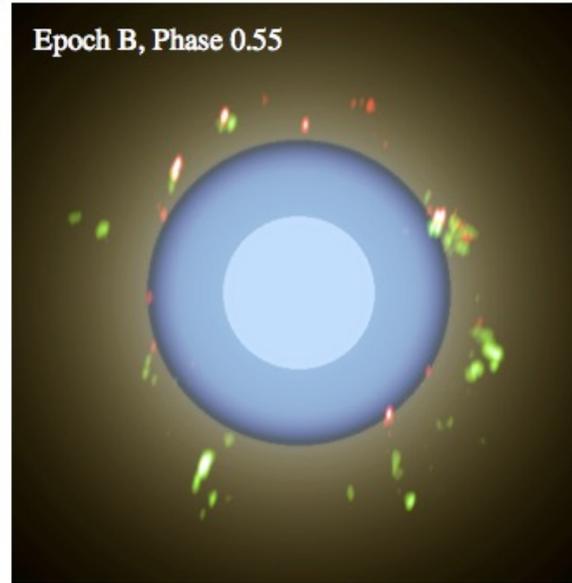
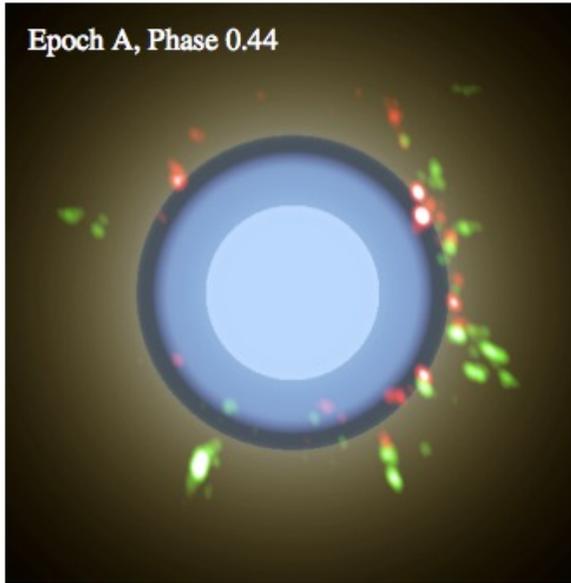
1 mm帯ダスト連続波放射
(Vlemmings et al. 2017)



AIO分子輝線放射
(Takigawa et al. 2017)



恒星からの物質放出と脈動変光

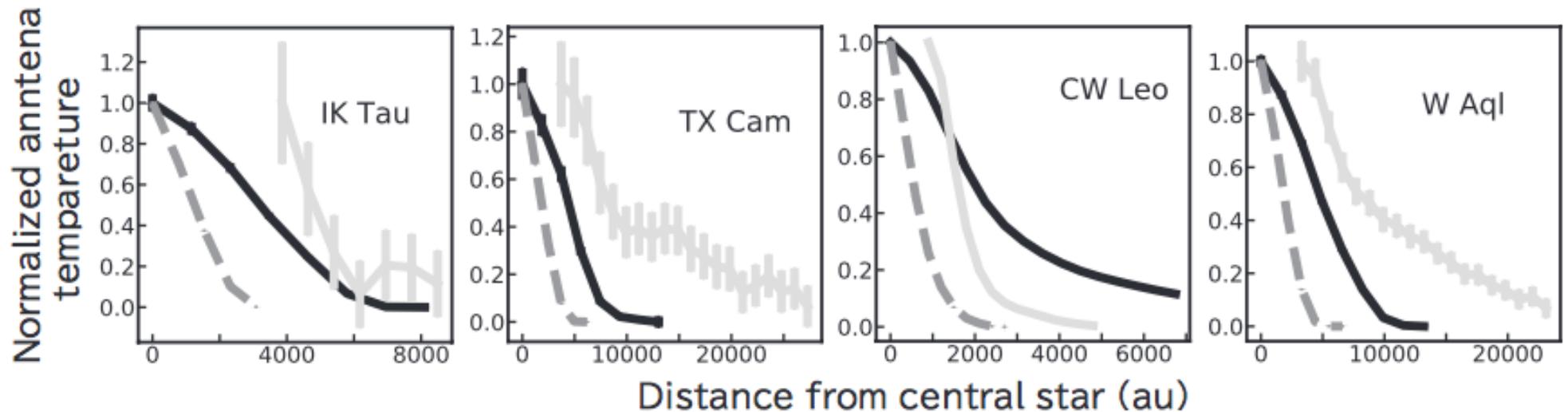


恒星寿命の末期で巨大化
太陽表面の数万
太陽光度の数1000倍
恒星表面は力学的に
不安定：脈動のはじまり
浮き上がった物質から
分子／塵形成

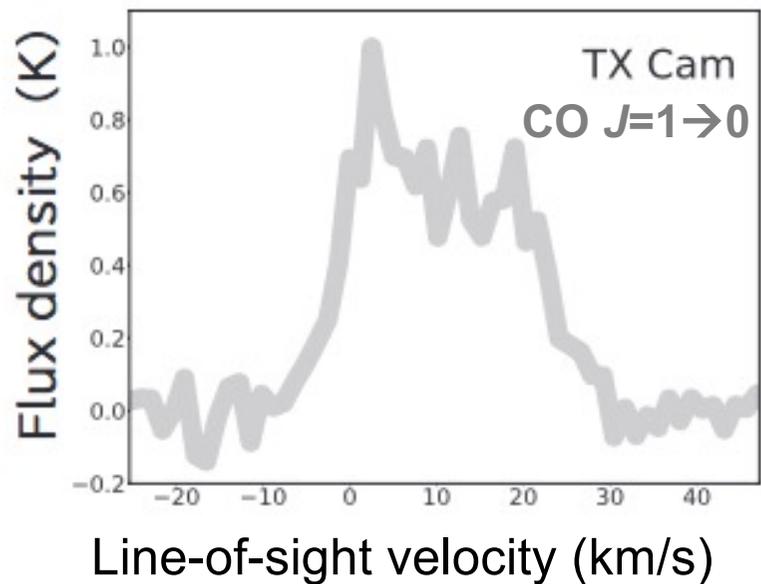
SiO masers and Al_2O_3
dust grain emission
around a pulsating star
S Ori

(Wittkowski et al. 2007)

AGB段階の大量物質放出期間～数千年



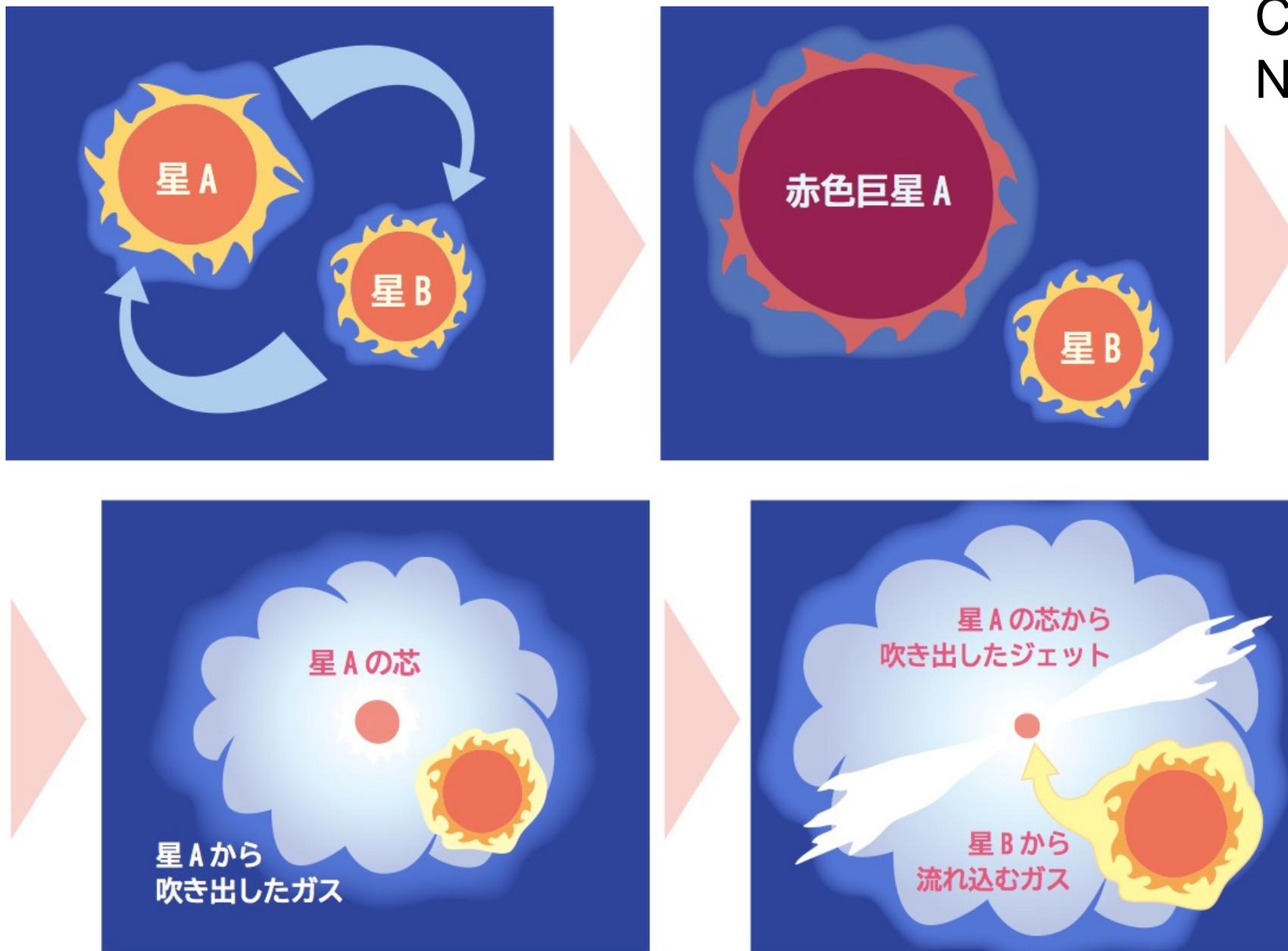
- CO $J=1 \rightarrow 0$ (NRO 低温)
- CO $J=3 \rightarrow 2$ (JCMT 高温)
- 850 μm 塵放射 (JCMT)



野辺山45m 鏡で撮像された
最も広がった星周物質の分布
(Amada et al. in prep.)

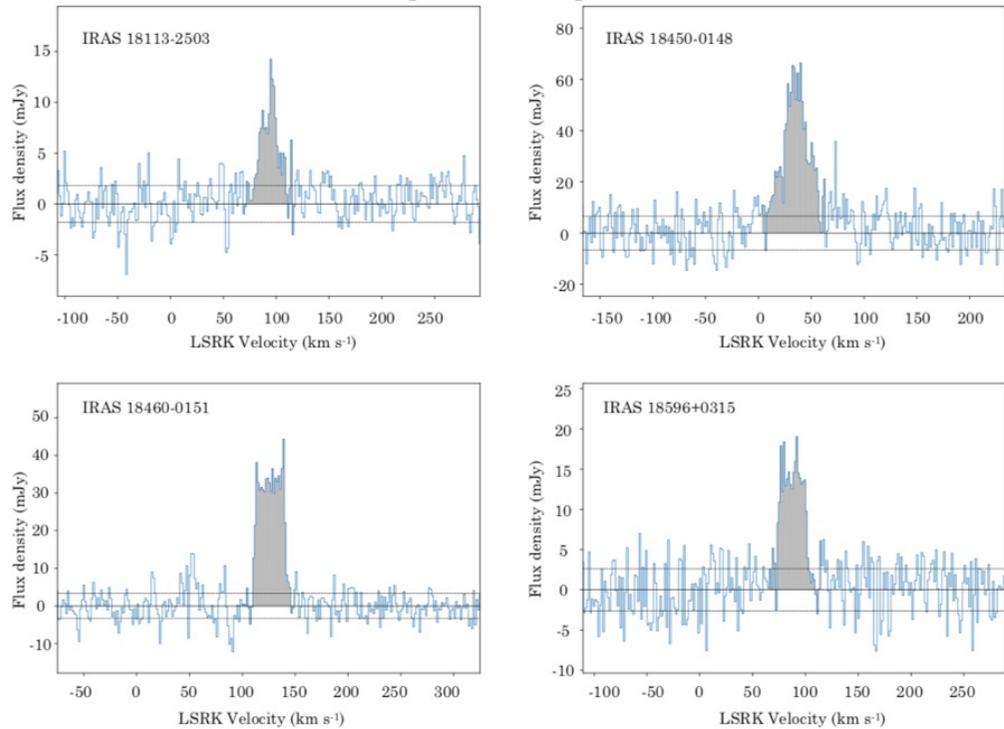
「宇宙の噴水」天体の進化

Credit:
NAOJ



連星系で一気に質量放出される

C¹⁸O J=2→1 (ALMA)



Khouri et al. (2021) Nature Astronomy, accepted

> 0.075 water fountain per year
a mass loss rate of up to $10^{-3} M_{\text{sun}}\text{yr}^{-1}$

Estimated events in the Milky Way

Mass range (M_{\odot})	CE events/yr	End of AGB phase/yr
0.8-1.2	0.061 ± 0.020	0.406 ± 0.134
1.2-2.0	0.063 ± 0.021	0.243 ± 0.080
2.0-5.0	0.017 ± 0.006	0.047 ± 0.016
5.0-8.0	0.007 ± 0.002	0.011 ± 0.004
Total (0.8-8.0)	0.148 ± 0.049	0.706 ± 0.233

Scaled to the Galactic star formation rate $\sim 1.65 M_{\text{sun}}\text{yr}^{-1}$

- 「共通星周縁」の生成： 存在期間は100年程度
→天の川銀河全体で毎年0.1個出現
→毎年15個程度存在(観測事実)
- 「宇宙の噴水」天体だけで、天の川銀河にある星々からの物質還元の数%を担う

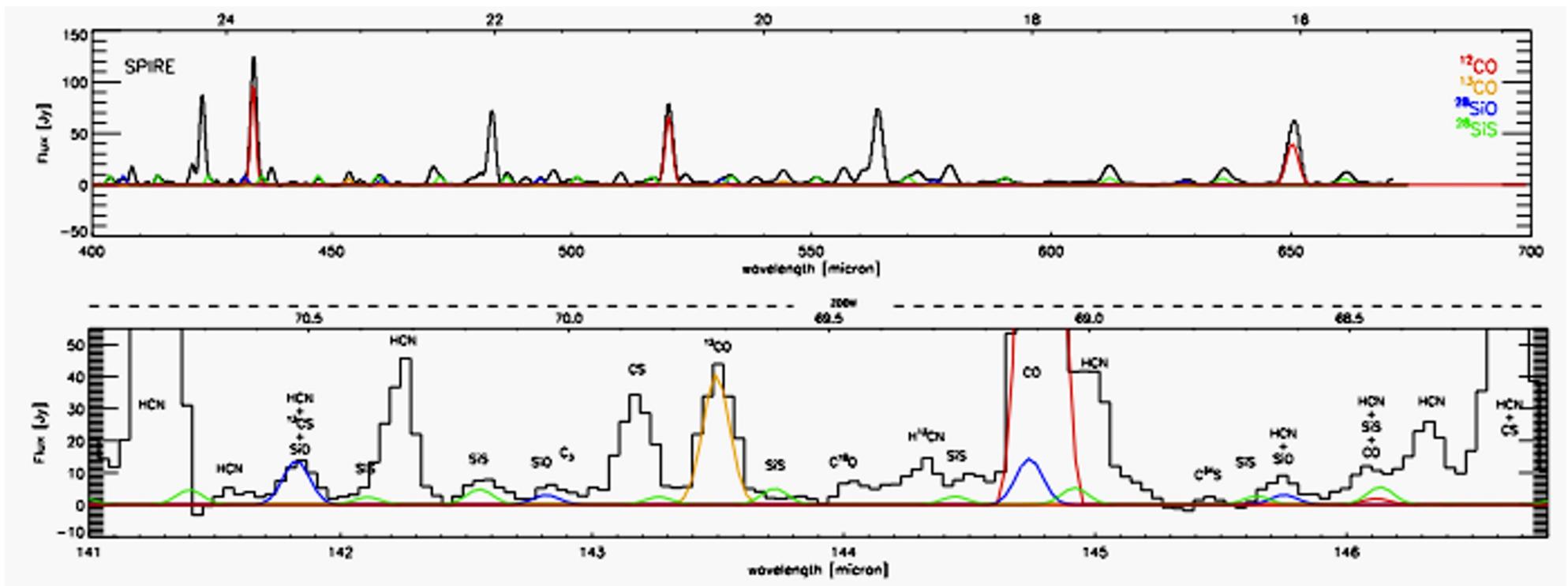
電波分光による星周縁内の星間物質探査

ハーシェル宇宙遠赤外線望遠鏡

CO, HCN, CS, SiO,
SiS, C₃,

(地球背景放射を避けて観測可能)

珪素質星間塵形成の現場



Decin et al. 2010

惑星状星雲からの C_{60} 、 C_{70} の検出

Polycyclic aromatic hydrocarbon (多環芳香族炭化水素, PAH) Fullerene (フラーレン)

スピッツァー宇宙赤外線望遠鏡による惑星上星雲Tc1の中間赤外線分光観測
(Cami et al. 2010)

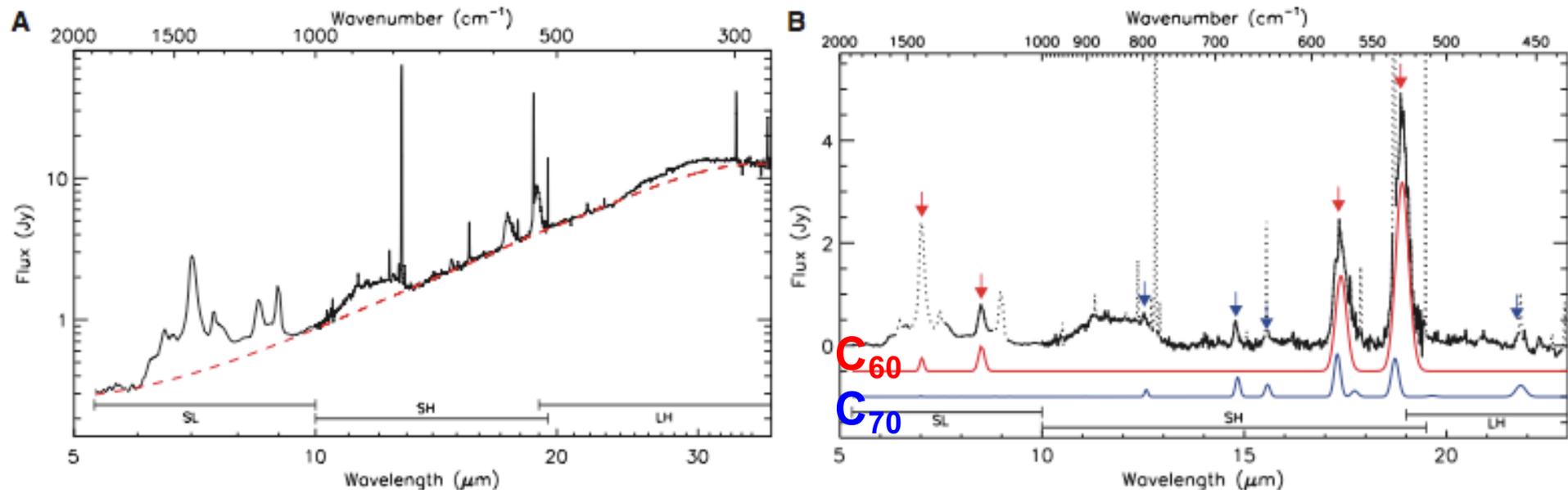
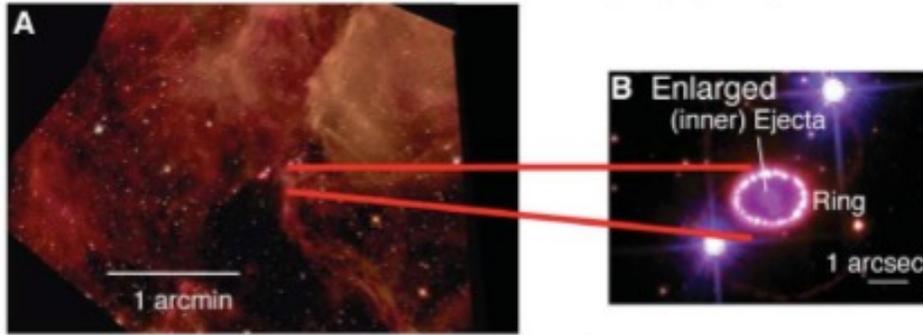


Fig. 1. The Spitzer IRS spectrum of Tc 1. **(A)** The entire range, 5 to 37 μm . **(B)** Continuum-subtracted spectrum between 5 and 23 μm , where known forbidden emission lines are masked (19). We fitted a cubic spline to spectral ranges devoid of features to determine the dust continuum (red dashed line). The broad plateau between 11 and 13 μm is attributed to emission from SiC dust (34, 35), and the well-known broad feature longward of 23 μm is believed to be due to MgS (36). Red arrows mark the wavelengths of all infrared active modes for C_{60} ; blue arrows denote those of the four strongest, isolated

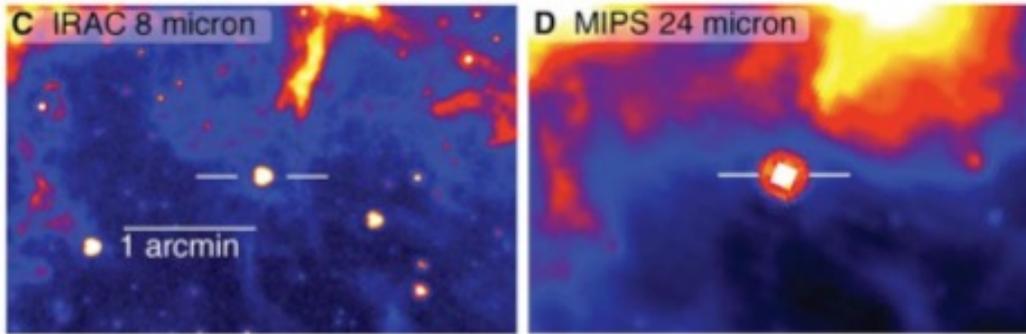
C_{70} bands. The red and blue curves below the data are thermal emission models for all infrared active bands of C_{60} and C_{70} at temperatures of 330 K and 180 K, respectively (19). We convolved the bands with a Gaussian profile ($\sigma = 2.55 \text{ cm}^{-1}$ for all C_{70} bands, $\sigma = 4.5 \text{ cm}^{-1}$ for the C_{60} bands in the SH/LH module, and $\sigma = 10 \text{ cm}^{-1}$ for those in the SL module). Apparent weak emission bumps near 14.4, 16.2, 20.5, and 20.9 μm are artifacts. The nature of the weak feature near 22.3 μm is unclear because it appears differently in both nods.

Hubble Space Telescope (Optical)



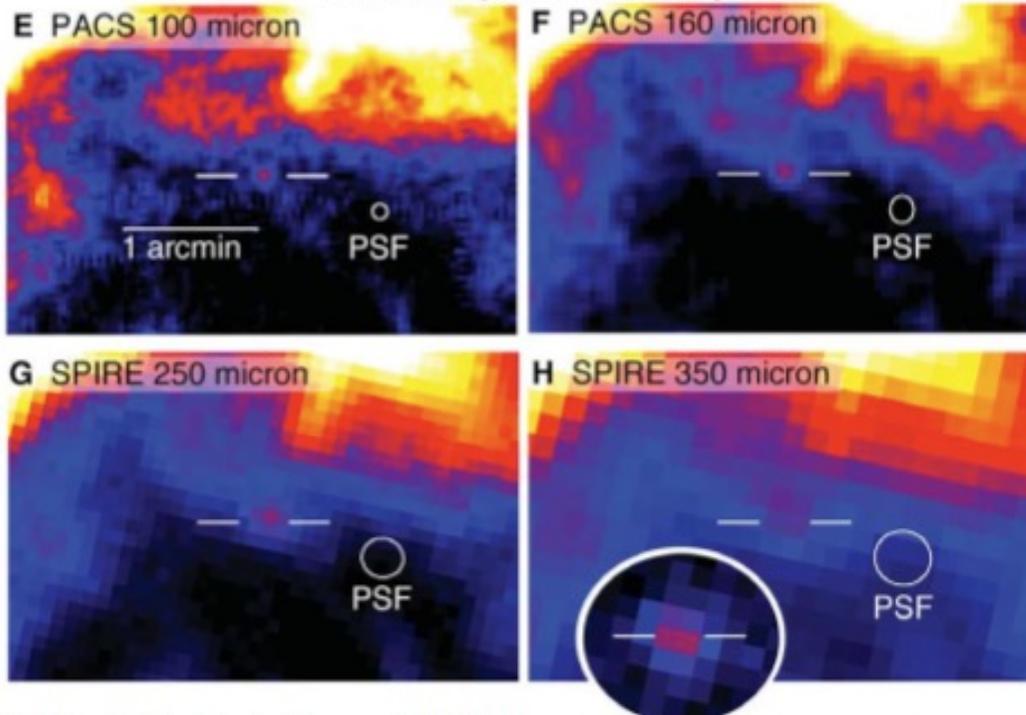
超新星残骸中で生成される塵(1/3)

Spitzer Space Telescope



冷却された後の塵殻からの遠赤外線放射

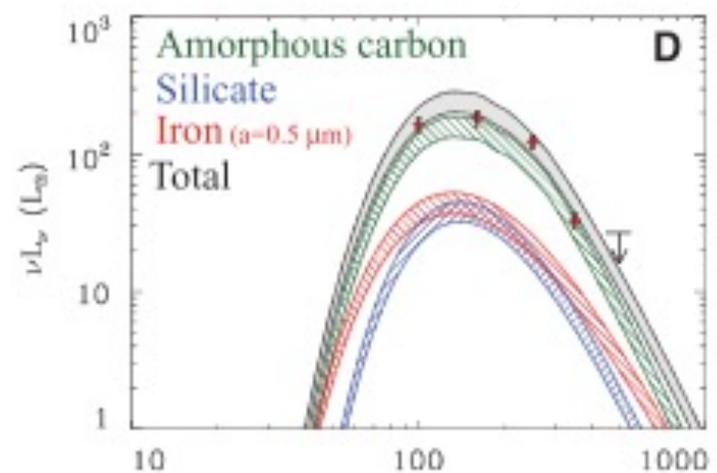
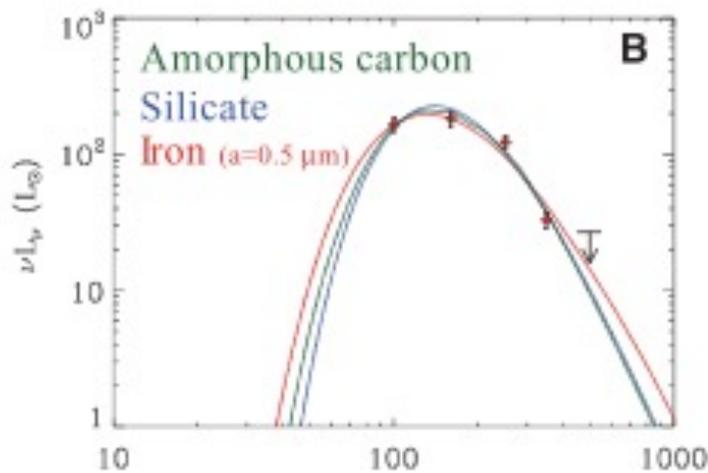
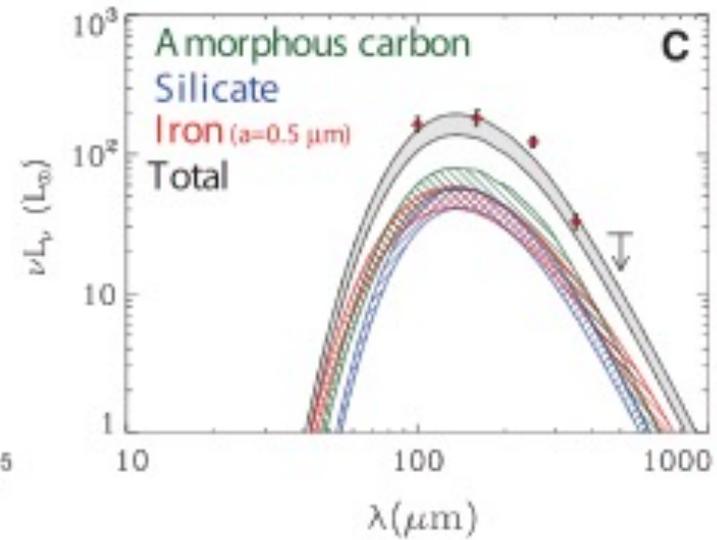
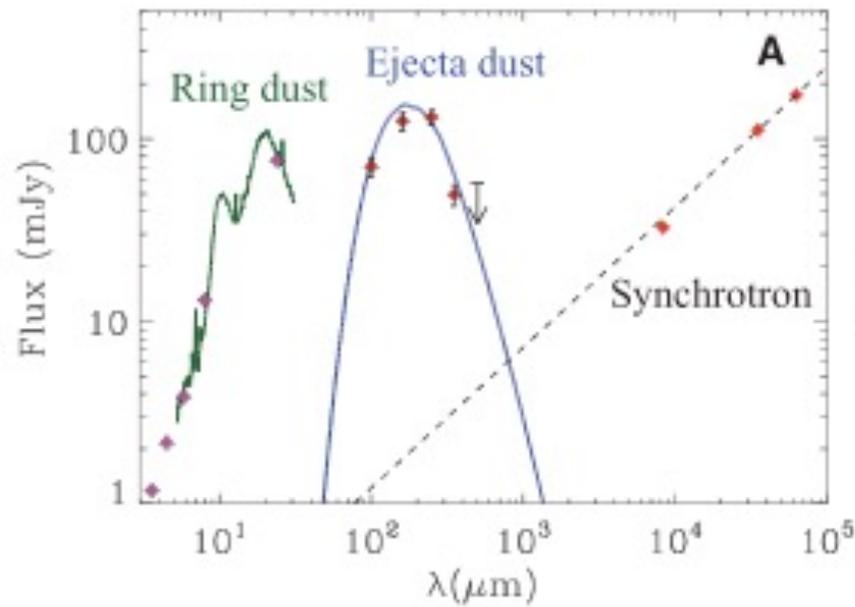
Herschel Space Observatory



1-3太陽質量
~20 K

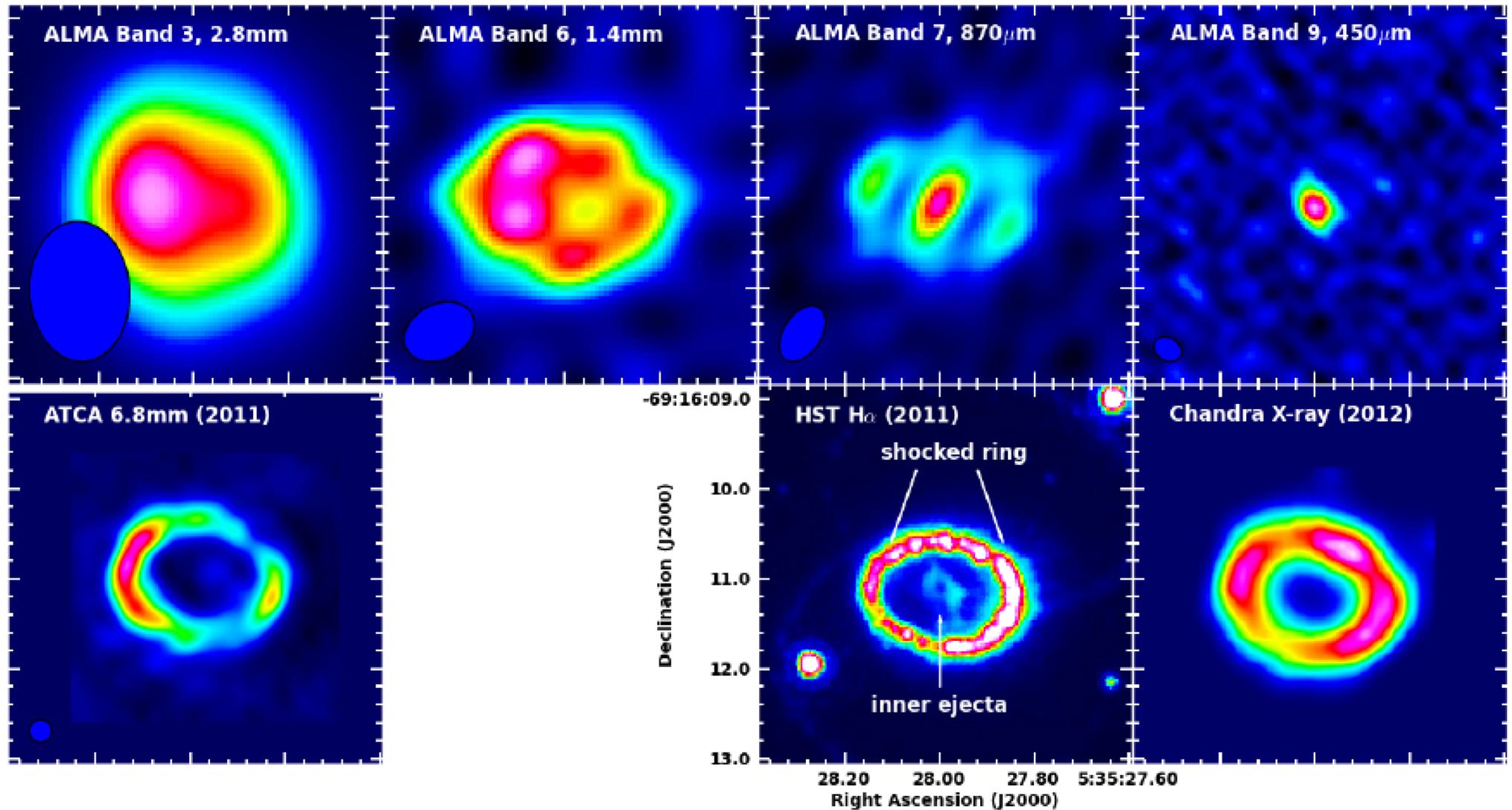
Matsuura et al. (2011)

超新星残骸中で生成される塵(2/3)



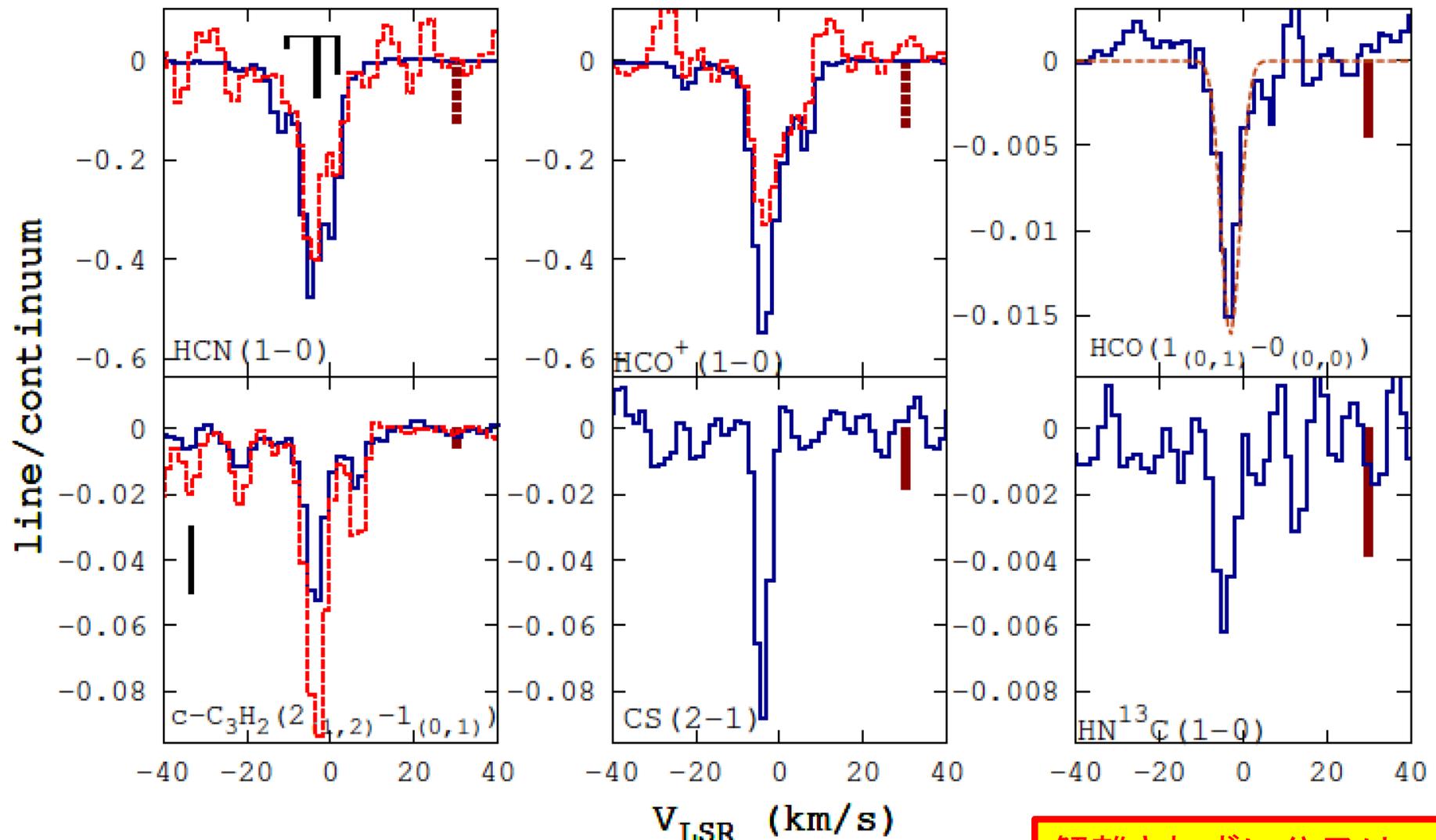
Matsuura et al. (2011)

超新星残骸中で生成される塵(3/3)



$M_{\text{dust}} > 0.2 M_{\text{sun}}$ (Indebetouw et al. 2014)

背景クエーサー方向に見られる天の川銀河起源の吸収線



¹²C-based line ¹³C-based line (x30)

解離されずに分子は
星間空間で生き残れる？

ALMA (Band-3)で検出されたクエーサー J1717-337 方向に見られる
天の川中星間ガスからの分子吸収線 (Ando et al. 2015)

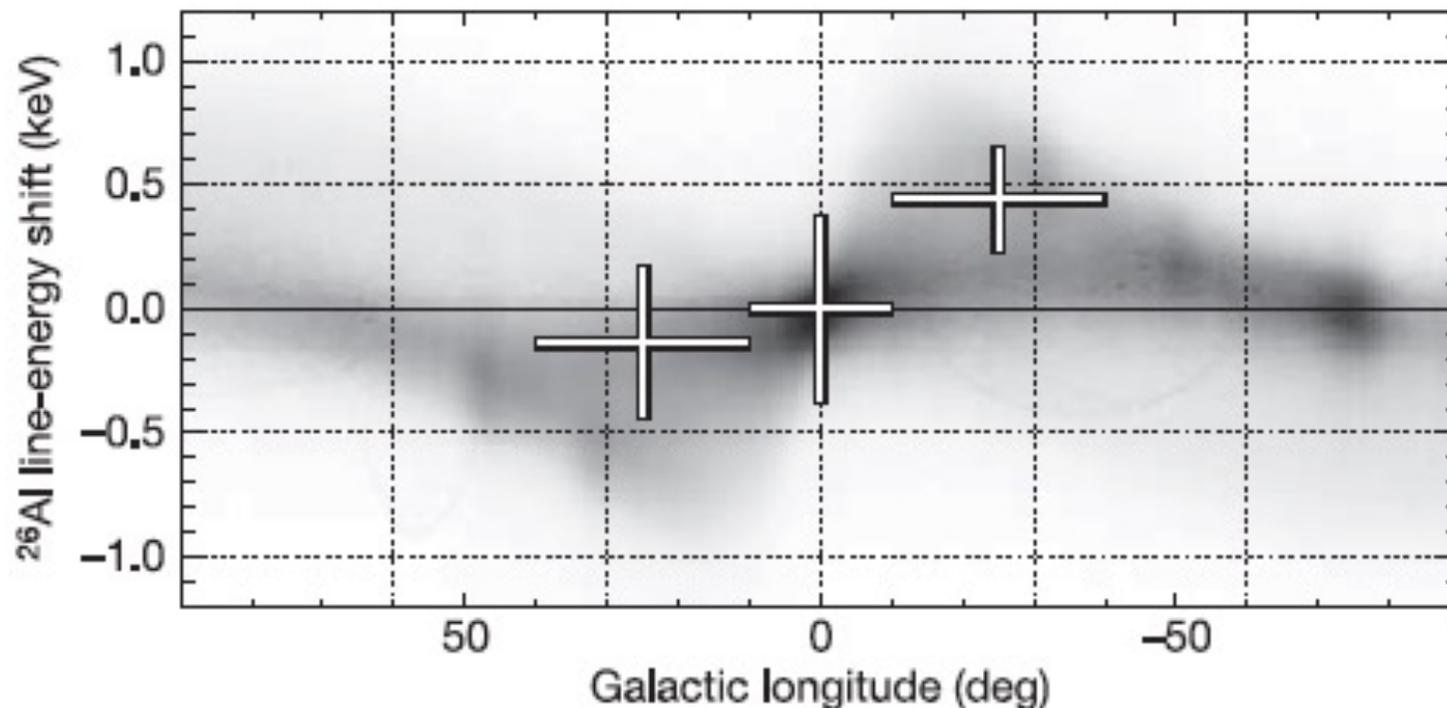
銀河系内での現在での重元素合成

銀河系では100年に2個程度の頻度で超新星爆発
(Diehl et al. 2006)

– ^{26}Al の半減期: 7.2×10^5 年

–ガンマ線衛星 INTEGRALで輝線分布観測

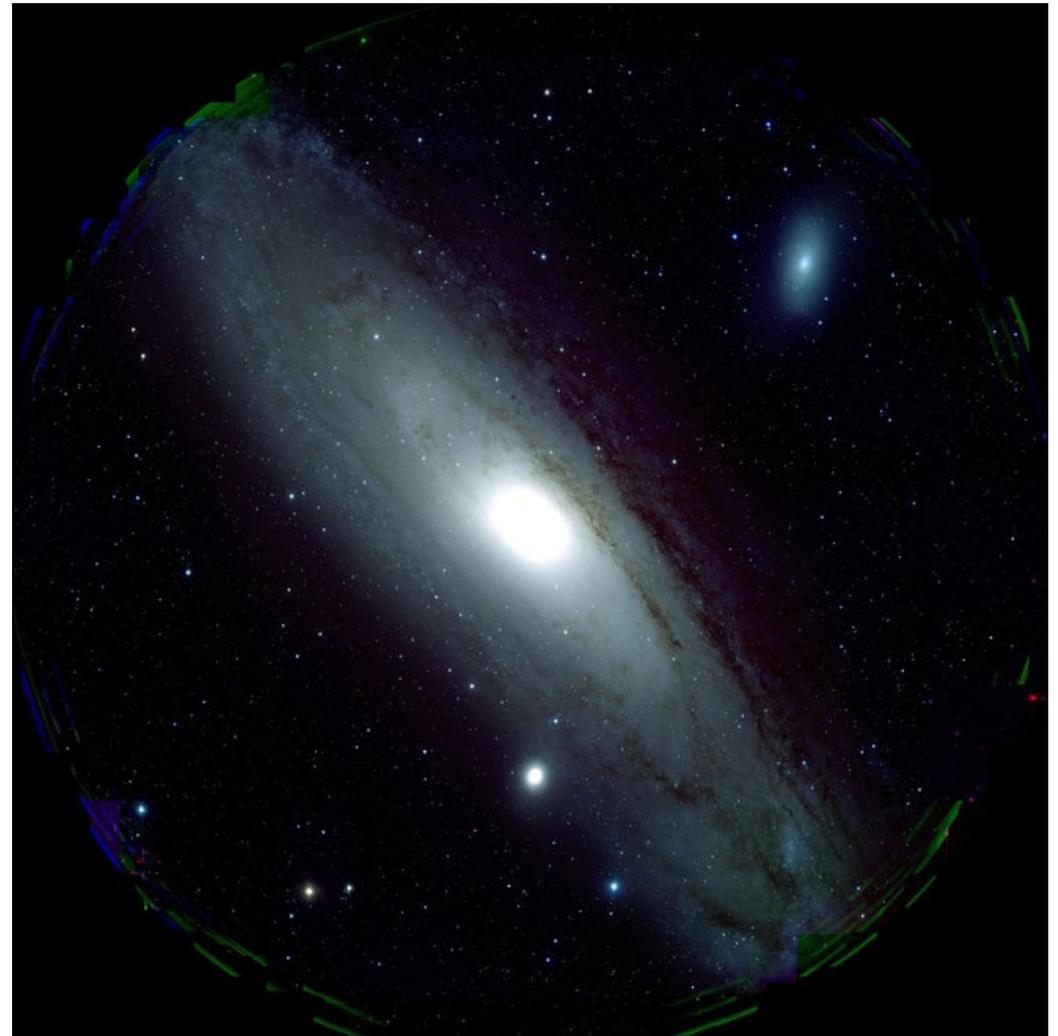
–現存する ^{26}Al の総質量: 3太陽質量程度



銀河系の
総質量
 10^{12} 太陽質量
程度

銀河： 宇宙における物質輪廻の大舞台

- 星間物質の集積→星団の形成 物質循環のはじまり
- 星形成の促進
 - 宇宙初期
 - 渦状腕
 - 銀河合体→スターバースト
(爆発的星形成)
- 星形成の抑制
 - 電離領域の形成
 - 高エネルギー現象
(活動銀河中心核、等)
- 生命の材料となる素は
何処に集まる？
→銀河ハビタブル・ゾーン
(中西先生講義)



まとめ

- 宇宙生命発生につながる「物質」の合成
 - 宇宙での元素合成(宇宙初期・恒星内部・天体合体)
 - 恒星からの質量放出(恒星風・超新星爆発)
 - 宇宙での物質相転移(元素合成→高分子合成)
- 現在の主な研究アプローチ:
 - 分光(γ 線から電波まで)→組成分析(星、星間物質、銀河)
 - 電波干渉計撮像→物質の分布と運動

恒星物質放出の直接検出

まき散らされた元素が天の川銀河の中のどのような場所で生命が発生／維持し易い環境を作るのか、手掛かりを提供する

レポート課題

宇宙初期以降の元素合成は、恒星絡みで進む。これらに関して、主に3つの元素合成の局面について概要を論ずること。その上で、それらと地球上の生命を形成・維持する為に必要な元素との関連性について考察すること。これらについて、1200—2000字程度のレポートでまとめること。必要とあらば、図説を加えること。