

Okayama Observatory, Kyoto University

SEIMEI
TELESCOPE



中小質量星の元素合成環境を

Seimei Telescope
GAES-RV と **KOOLS-IFU**

で探る：

惑星状星雲NGC7027におけるRbとKr

大塚雅昭（京大岡山天文台）

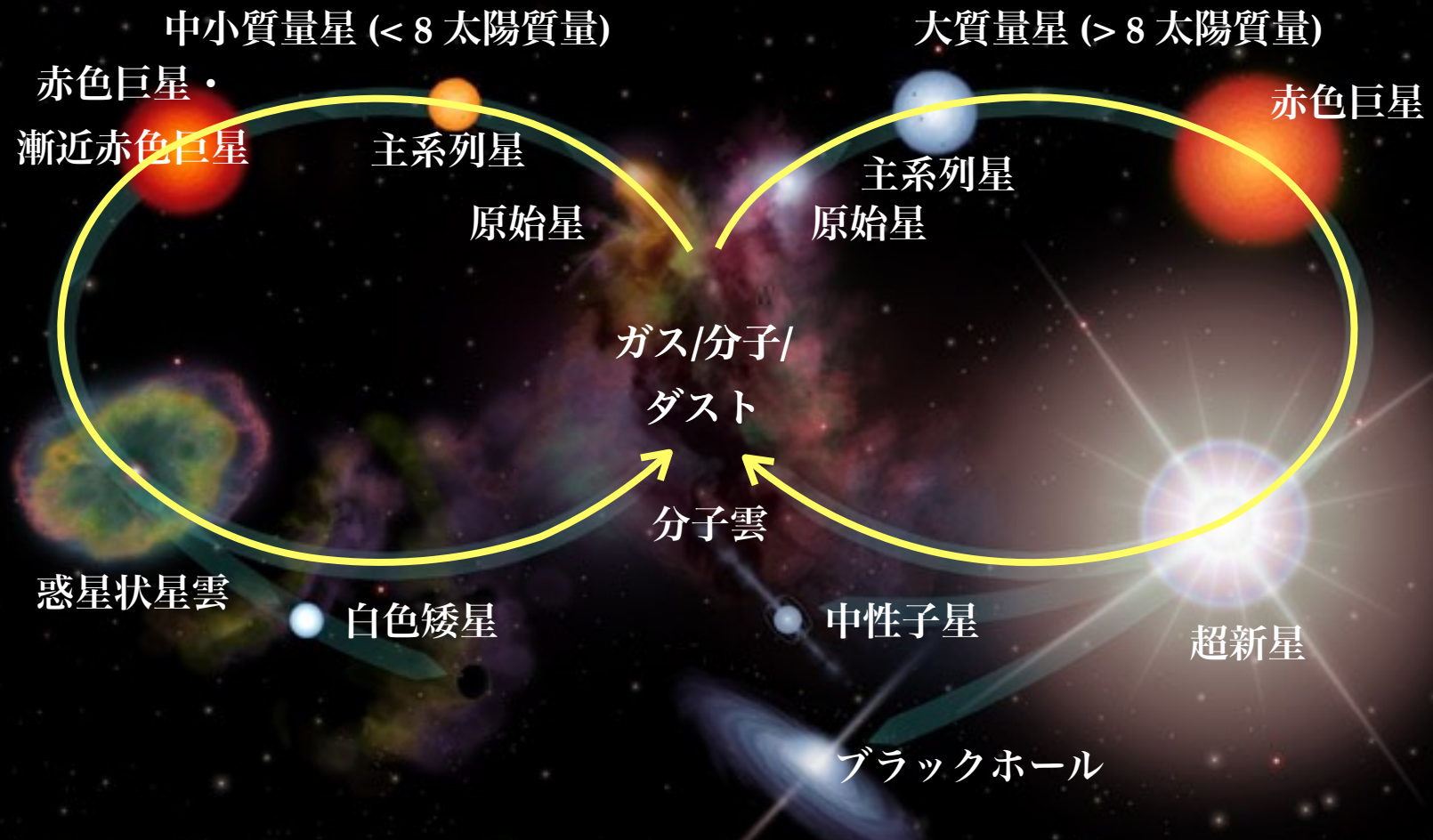
コイツらが
今日の主役

^{37}Rb 中性子捕獲元素
ルビジウム



宇宙の物質循環

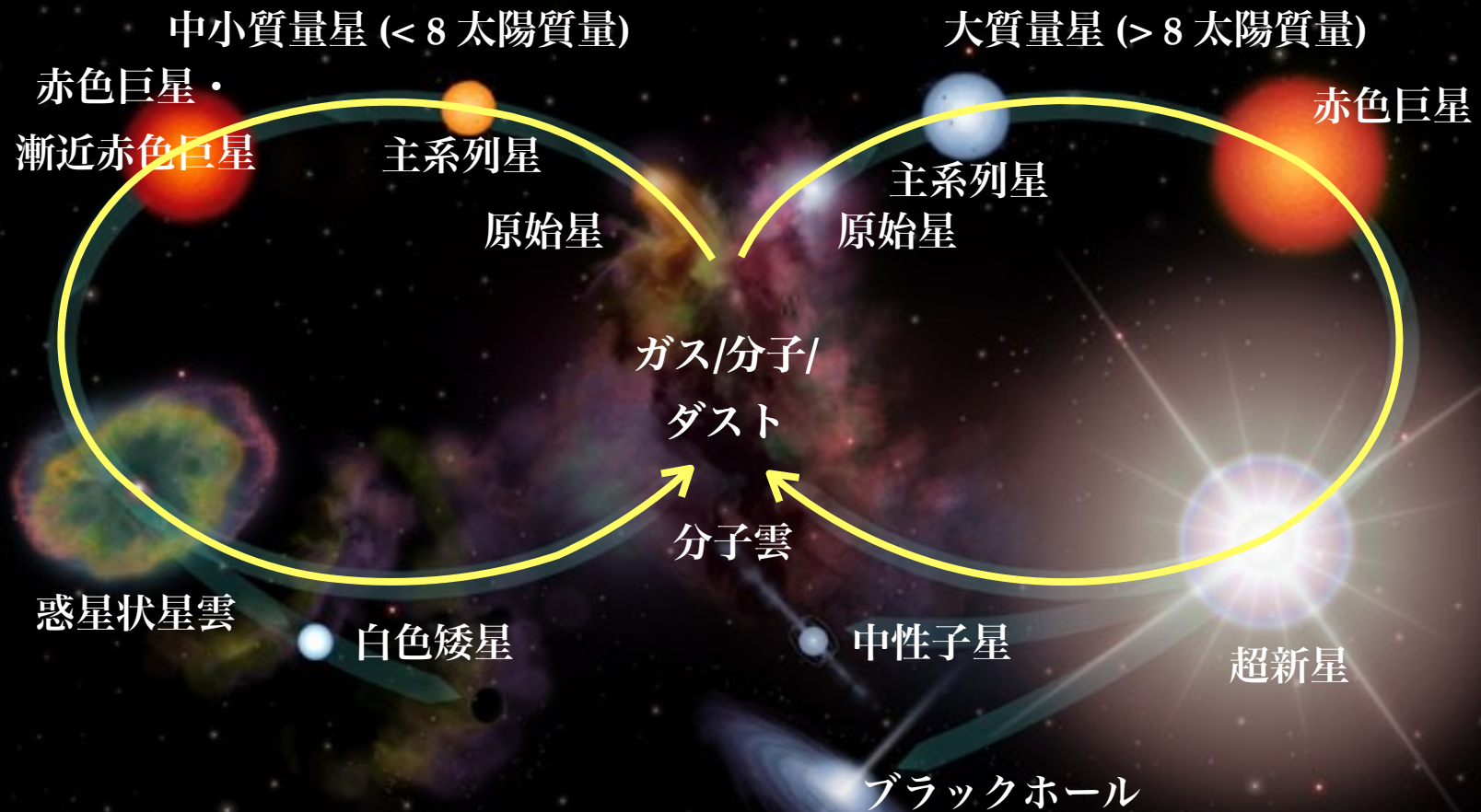
credit: <http://hea-www.cfa.harvard.edu/CHAMP/EDUCATION/PUBLIC/ICONS/>



星間空間へと返還された「星内部で合成された元素、分子、ダスト」によって「宇宙が物質的に豊かに」


宇宙の物質循環

credit: <http://hea-www.cfa.harvard.edu/CHAMP/EDUCATION/PUBLIC/ICONS/>



Rb (ルビジウム) と Kr (クリプトン) から
「星質量」「内部環境」を探る

周期表

 <p>Atomic Weight 1.008 Density 0.0899 g/l Melting Point -259.14 °C Boiling Point -252.87 °C</p> <p>By weight, 75% of the visible universe is hydrogen, a colorless gas. In space, vast quantities interact with starlight to create spectacular sights such as the Eagle Nebula (seen by the Hubble Space Telescope).</p>																		https://periodictable.com																	
H 1 Hydrogen																		He 2 Helium																	
Li 3 Lithium	Be 4 Beryllium																	B 5 Boron	C 6 Carbon	N 7 Nitrogen	O 8 Oxygen	F 9 Fluorine	Ne 10 Neon												
Na 11 Sodium	Mg 12 Magnesium																	Al 13 Aluminum	Si 14 Silicon	P 15 Phosphorus	S 16 Sulfur	Cl 17 Chlorine	Ar 18 Argon												
K 19 Potassium	Ca 20 Calcium	Sc 21 Scandium	Ti 22 Titanium	V 23 Vanadium	Cr 24 Chromium	Mn 25 Manganese	Fe 26 Iron	Co 27 Cobalt	Ni 28 Nickel	Cu 29 Copper	Zn 30 Zinc	Ga 31 Gallium	Ge 32 Germanium	As 33 Arsenic	Se 34 Selenium	Br 35 Bromine	Kr 36 Krypton																		
Rb 37 Rubidium	Sr 38 Strontium	Y 39 Yttrium	Zr 40 Zirconium	Nb 41 Niobium	Mo 42 Molybdenum	Tc 43 Technetium	Ru 44 Ruthenium	Rh 45 Rhodium	Pd 46 Palladium	Ag 47 Silver	Cd 48 Cadmium	In 49 Indium	Sn 50 Tin	Sb 51 Antimony	Te 52 Tellurium	I 53 Iodine	Xe 54 Xenon																		
Cs 55 Cesium	Ba 56 Barium	La 57 Lanthanum		Hf 72 Hafnium	Ta 73 Tantalum	W 74 Tungsten	Re 75 Rhenium	Os 76 Osmium	Ir 77 Iridium	Pt 78 Platinum	Au 79 Gold	Hg 80 Mercury	Tl 81 Thallium	Pb 82 Lead	Bi 83 Bismuth	Po 84 Polonium	At 85 Astatine	Rn 86 Radon																	
Fr 87 Francium	Ra 88 Radium	Ac 89 Actinium		Rf 104 Rutherfordium	Db 105 Dubnium	Sg 106 Seaborgium	Bh 107 Bohrium	Hs 108 Hassium	Mt 109 Meitnerium	Ds 110 Darmstadtium	Rg 111 Roentgenium	Cn 112 Copernicium	Nh 113 Nihonium	Fl 114 Flerovium	Mc 115 Moscovium	Lv 116 Livermorium	Ts 117 Tennessine	Og 118 Oganesson																	

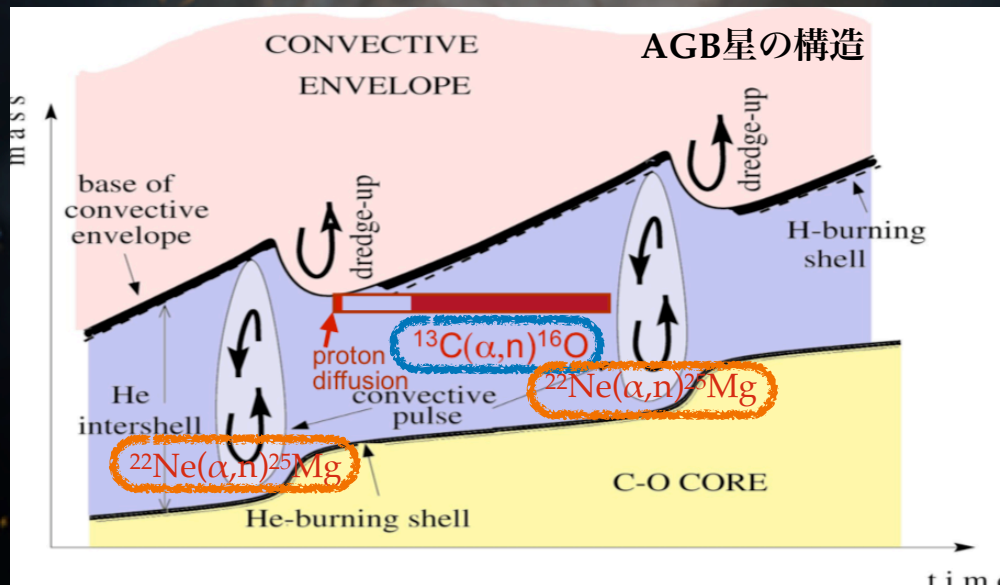
クリプトン (Kr) とルビジウム (Rb) はどのようにしてできるのか？

クリプトン (Kr) とルビジウム (Rb) のナニが面白いのか？

鉄より重い元素の合成：中性子捕獲

二つの中性子 (n) の供給源 @ He intershell (He 中間層)

- $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$: $> 0.9 \times 10^8$ K、パルス休止の間、He intershell上面にて。
 - 長期にわたり中性子を供給、安定核種を通して重元素を合成。
 - 軽い星はこっちが主。
- $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$: $> 3.5 \times 10^8$ K、対流パルスの間、He intershell底面にて。
 - 短期間に中性子を大量供給、不安定核種もなんのその。
 - 重い星はこっちが主。



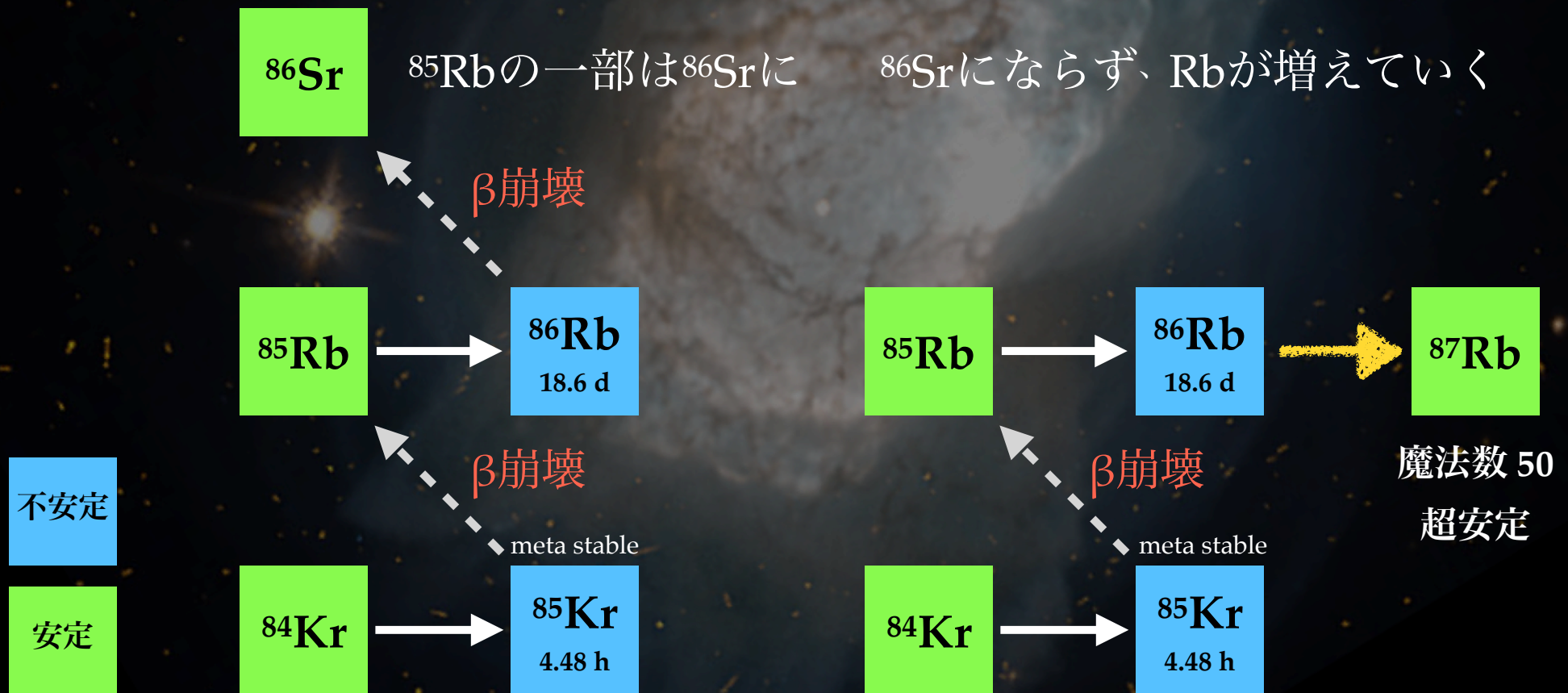
RbとKrは
どのパスを通して
合成されるのか？

RbとKrの
何が面白いのか？

KrとRbに注目するワケ：「Kr/Rb存在量比」で「元素合成環境」と「中心星初期質量」に制限がつく

軽い星でのRbの作り方

重い星でのRbの作り方

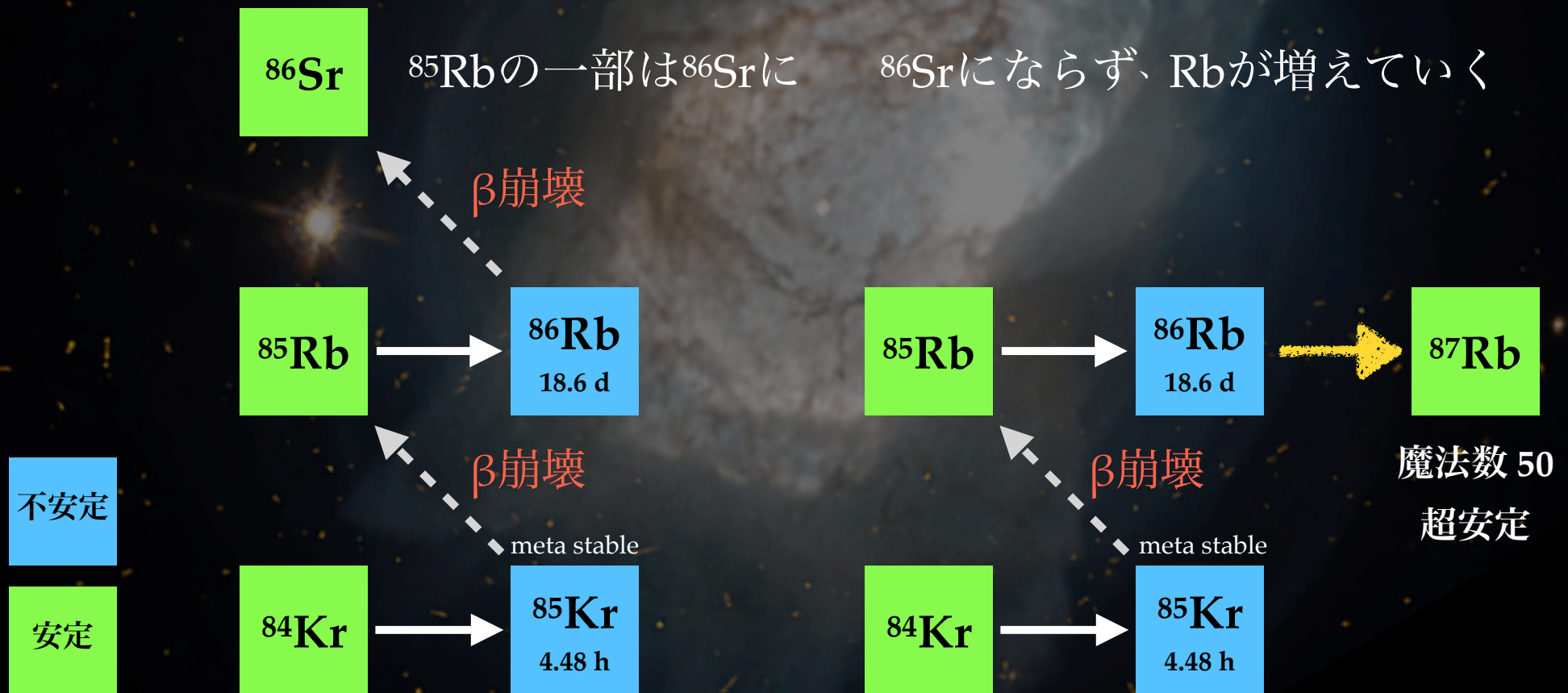


研究の着眼： $n(\text{Kr})/n(\text{Rb})$ 比は「元素合成環境」と「初期質量」に関係

KrとRbに注目するワケ：「Kr/Rb存在量比」で「元素合成環境」と「中心星初期質量」に制限がつく

軽い星でのRbの作り方

重い星でのRbの作り方



私的思惑：初期質量に制限がつけば、星-銀河間の質量交換が検証できる

せいめい「GAOES-RV」と「KOOLS-IFU」で 惑星状星雲のRb/Krを調査

1. 全般

- Rb/Krラインは5000-5900 Åに複数あるが、強度は極弱（H β の~10-100万分の1）
- Krなど希ガスの測定（ダスト/分子凝縮少）は惑星状星雲が得意。

2. KOOLS-IFU

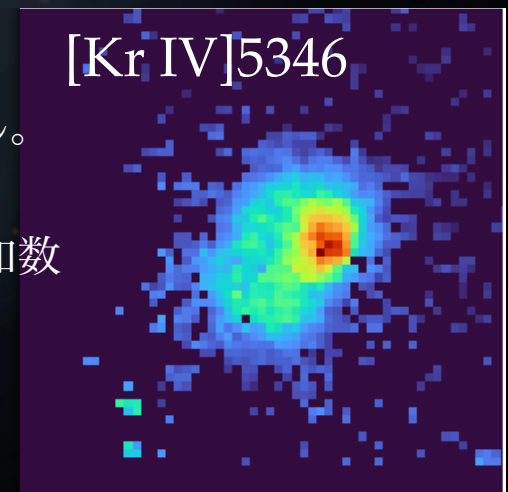
- 波長守備範囲がひろい且つ高空間分解スペクトルが得られる。
スペクトル切り出しの場所および形状は思うがまま。

3. GAOES-RV

- ライン検出は高分散が良い（high contrast wrt continuum）、楽ちん。
He IIラインの海からRbをアイソレートできる。
- 現在推しのせいめい用観測装置だが、ラインにどの程度強いのか未知数

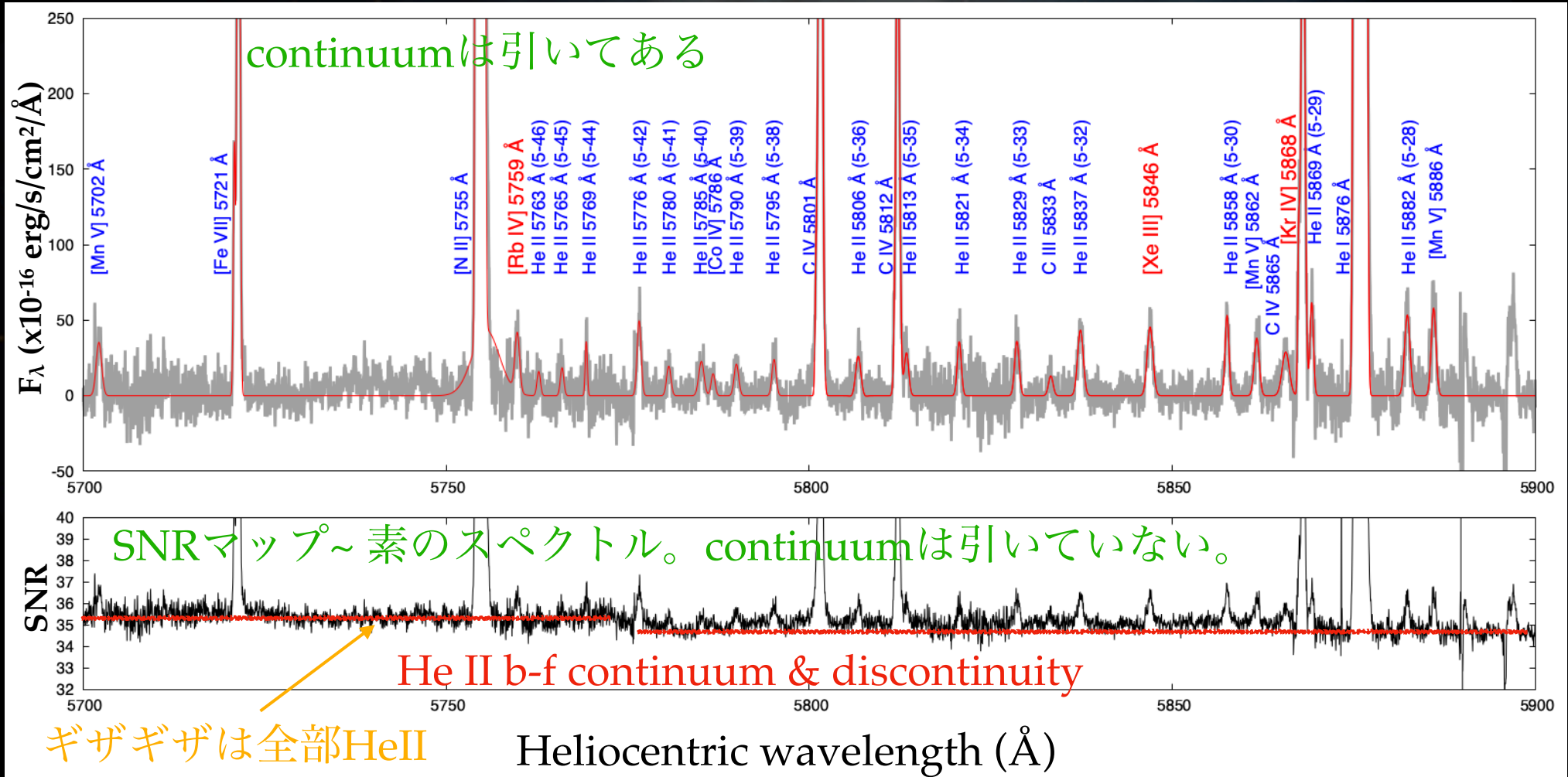
KOOLS-IFU map

[Kr IV]5346



ということで、1200秒積分のサイエンスフレーム「1枚」のみで挑んでみた

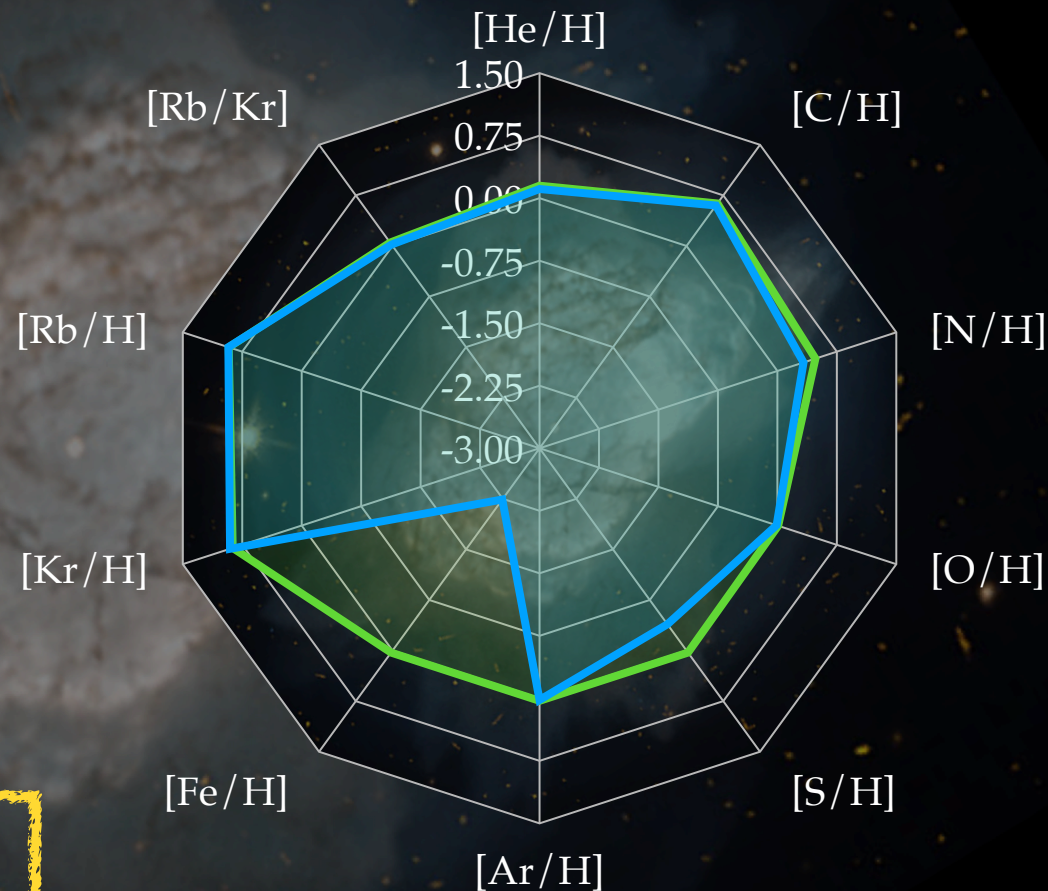
GAOES-RV 5700-5900Å spec of NGC7027



実験室系波長と de-redshifted 観測波長との差：0.036Å (検出ライン93本の平均)

完全データドリブンによる元素組成解析

- 初期質量3.0太陽質量の AGB星元素合成モデルと合致。
- AGB星元素合成モデルで $[Rb/H] > [Kr/H]$ となるのは、初期質量 ≥ 3.0 太陽質量。



$1-\sigma < 0.04$ dex

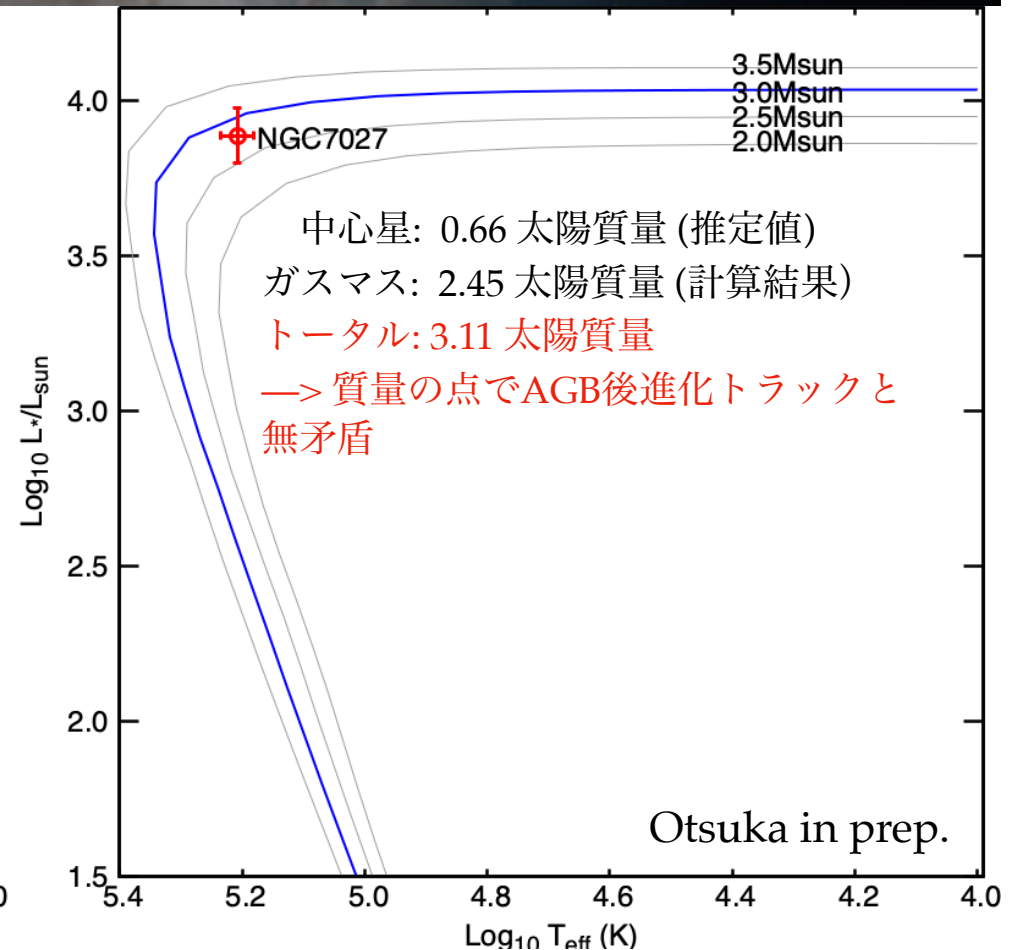
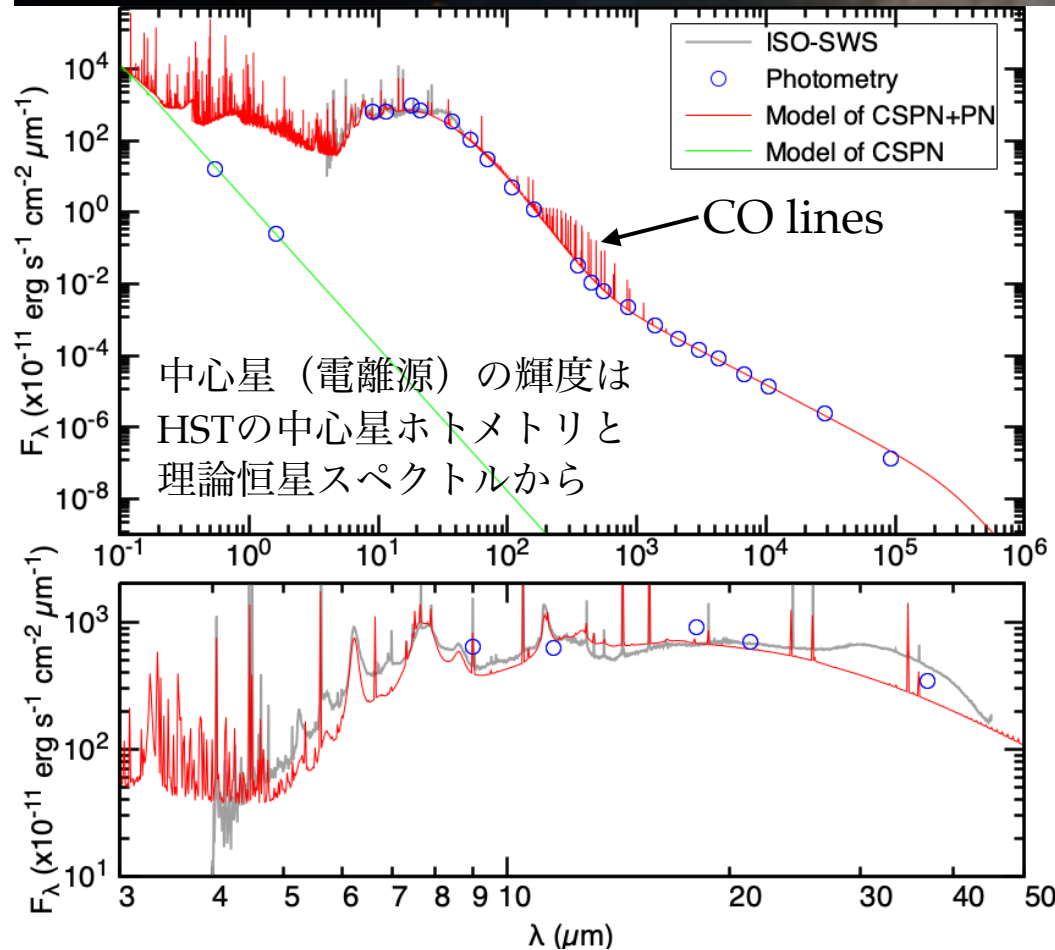
	[Kr/H]	[Rb/H]	[Rb/Kr]
NGC7027	0.91	0.93	0.10
AGB model	0.87	0.92	0.05

結論：NGC7027の初期質量は「~3.0太陽質量」、Rb > Krが達成される「高中性子密度環境下で元素合成」を行っていた「？」

初期質量~3.0太陽質量の推定は妥当なのか？：

「観測量すべて」を再現する光電離・解離モデリング（左）で得た中心星輝度と有効温度を
AGB星後進化トラック（右）にプロットし、初期質量を推定してみる

結論：NGC7027の初期質量は「~3.0太陽質量」、Rb > Krが達成される
「高中性子密度環境下で元素合成」を行っていた！



まとめ / 興味 / 今後の予定

まとめ：ルビジウム(Rb)とクリプトン(Kr)を観測すると、
「初期質量」と「中性子環境」の見当をつけられる。

興味：Rb過剰とゼノン(Xe、rプロセス、中性子密度大)過剰の相関

今後の予定：年内に論文投稿