

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**

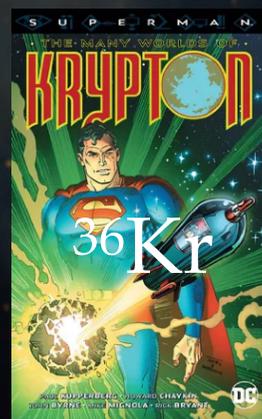
で探る：

惑星状星雲NGC7027におけるRbとKr

大塚雅昭（京大岡山天文台）

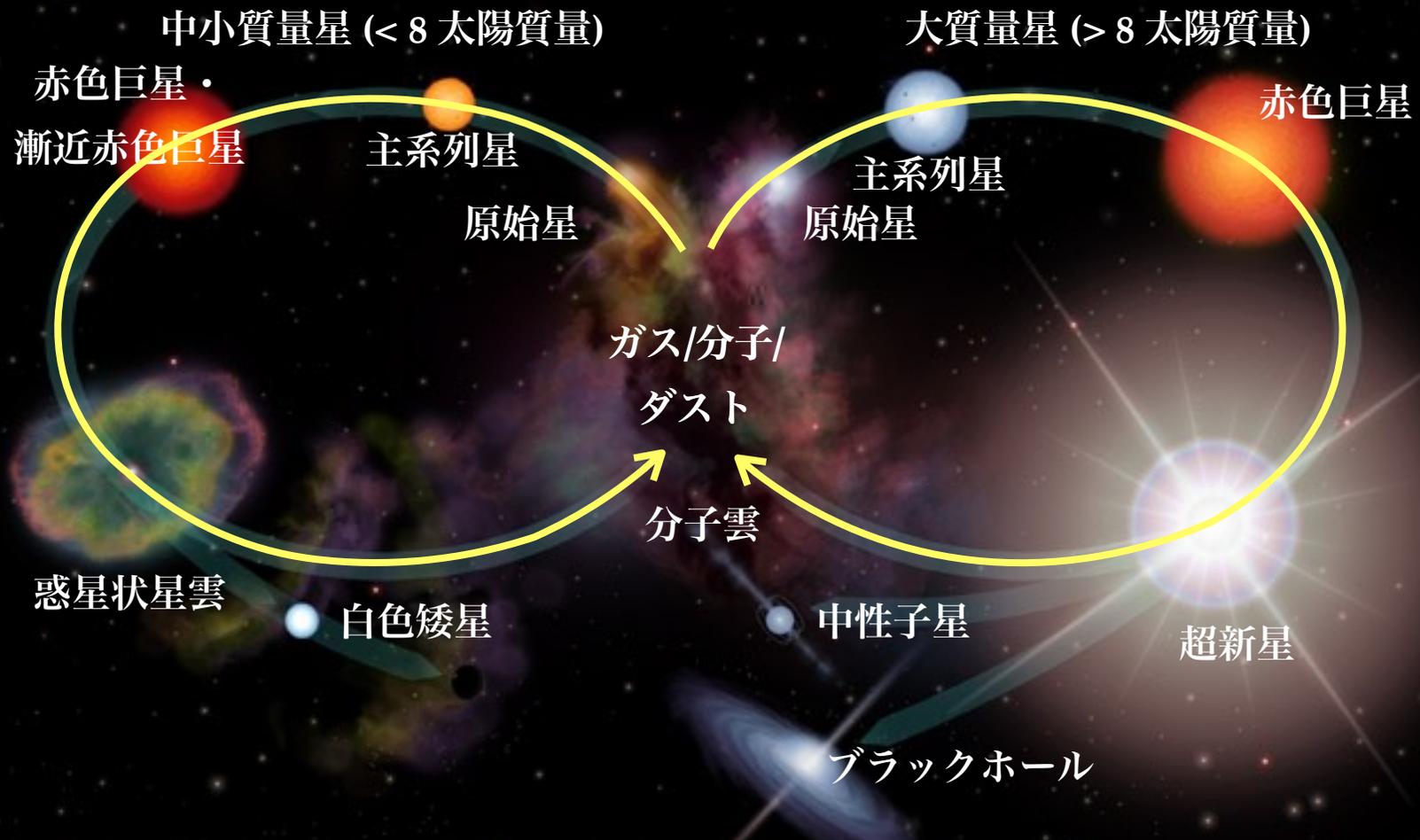
コイツらが
今日の主役

^{37}Rb 中性子捕獲元素
ルビジウム



宇宙の物質循環

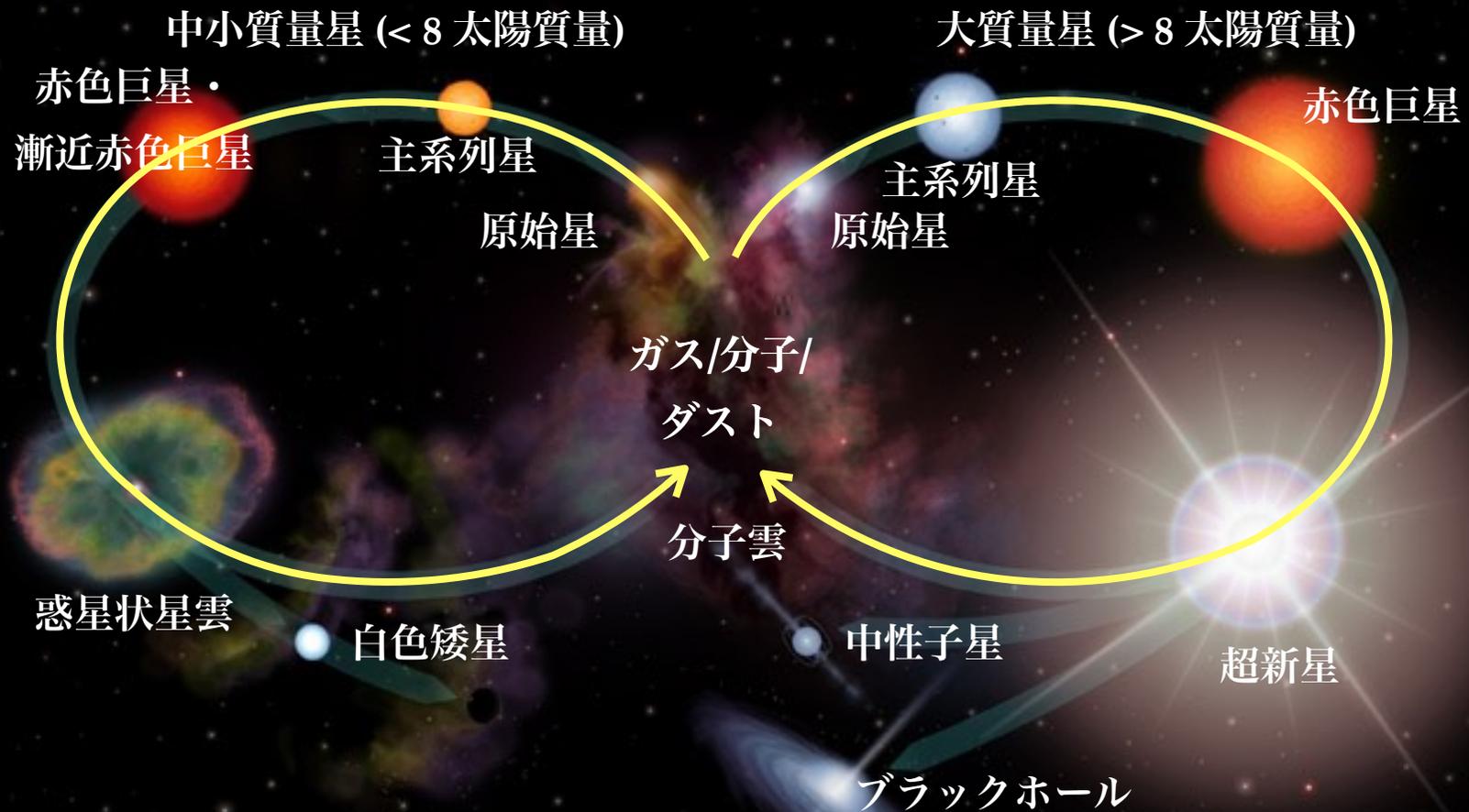
credit: <http://hea-www.cfa.harvard.edu/CHAMP/EDUCATION/PUBLIC/ICONS/>



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」

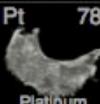
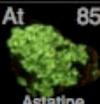
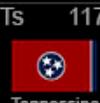
宇宙の物質循環

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																		 <p>He Helium</p>	
 <p>Li Lithium</p>		 <p>Be Beryllium</p>		 <p>Na Sodium</p>		 <p>Mg Magnesium</p>		 <p>B Boron</p>		 <p>C Carbon</p>		 <p>N Nitrogen</p>		 <p>O Oxygen</p>		 <p>F Fluorine</p>		 <p>Ne Neon</p>																			
 <p>K Potassium</p>		 <p>Ca Calcium</p>		 <p>Sc Scandium</p>		 <p>Ti Titanium</p>		 <p>V Vanadium</p>		 <p>Cr Chromium</p>		 <p>Mn Manganese</p>		 <p>Fe Iron</p>		 <p>Co Cobalt</p>		 <p>Ni Nickel</p>		 <p>Cu Copper</p>		 <p>Zn Zinc</p>		 <p>Ga Gallium</p>		 <p>Ge Germanium</p>		 <p>As Arsenic</p>		 <p>Se Selenium</p>		 <p>Br Bromine</p>		 <p>Kr Krypton</p>			
 <p>Rb Rubidium</p>		 <p>Sr Strontium</p>		 <p>Y Yttrium</p>		 <p>Zr Zirconium</p>		 <p>Nb Niobium</p>		 <p>Mo Molybdenum</p>		 <p>Tc Technetium</p>		 <p>Ru Ruthenium</p>		 <p>Rh Rhodium</p>		 <p>Pd Palladium</p>		 <p>Ag Silver</p>		 <p>Cd Cadmium</p>		 <p>In Indium</p>		 <p>Sn Tin</p>		 <p>Sb Antimony</p>		 <p>Te Tellurium</p>		 <p>I Iodine</p>		 <p>Xe Xenon</p>			
 <p>Cs Cesium</p>		 <p>Ba Barium</p>		 <p>Hf Hafnium</p>		 <p>Ta Tantalum</p>		 <p>W Tungsten</p>		 <p>Re Rhenium</p>		 <p>Os Osmium</p>		 <p>Ir Iridium</p>		 <p>Pt Platinum</p>		 <p>Au Gold</p>		 <p>Hg Mercury</p>		 <p>Tl Thallium</p>		 <p>Pb Lead</p>		 <p>Bi Bismuth</p>		 <p>Po Polonium</p>		 <p>At Astatine</p>		 <p>Rn Radon</p>					
 <p>Fr Francium</p>		 <p>Ra Radium</p>		 <p>Rf Rutherfordium</p>		 <p>Db Dubnium</p>		 <p>Sg Seaborgium</p>		 <p>Bh Bohrium</p>		 <p>Hs Hassium</p>		 <p>Mt Meitnerium</p>		 <p>Ds Darmstadtium</p>		 <p>Rg Roentgenium</p>		 <p>Cn Copernicium</p>		 <p>Nh Nihonium</p>		 <p>Fl Flerovium</p>		 <p>Mc Moscovium</p>		 <p>Lv Livermorium</p>		 <p>Ts Tennessine</p>		 <p>Og Oganesson</p>					

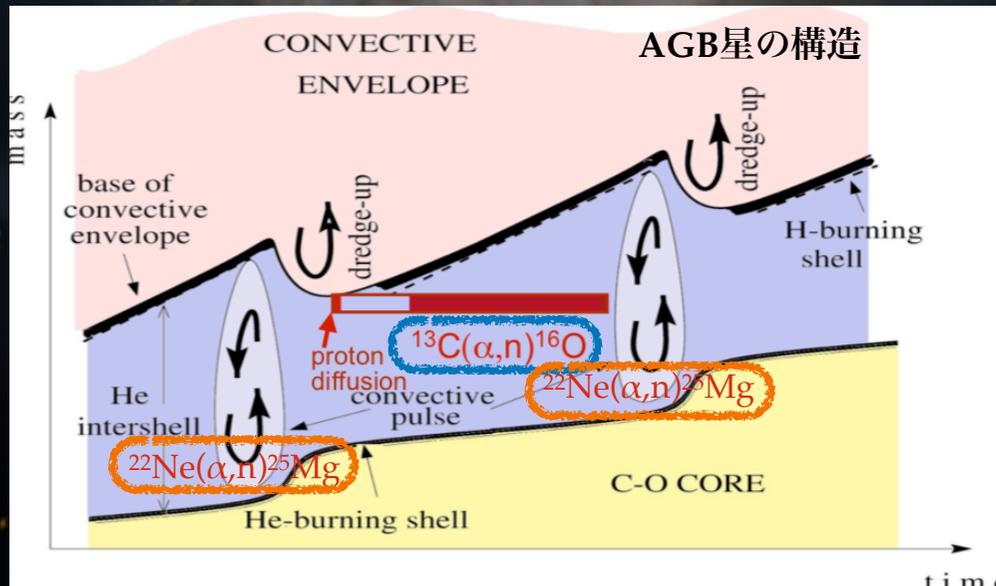
クリプトン (Kr) とルビジウム (Rb) はどのようにしてできるのか？

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。



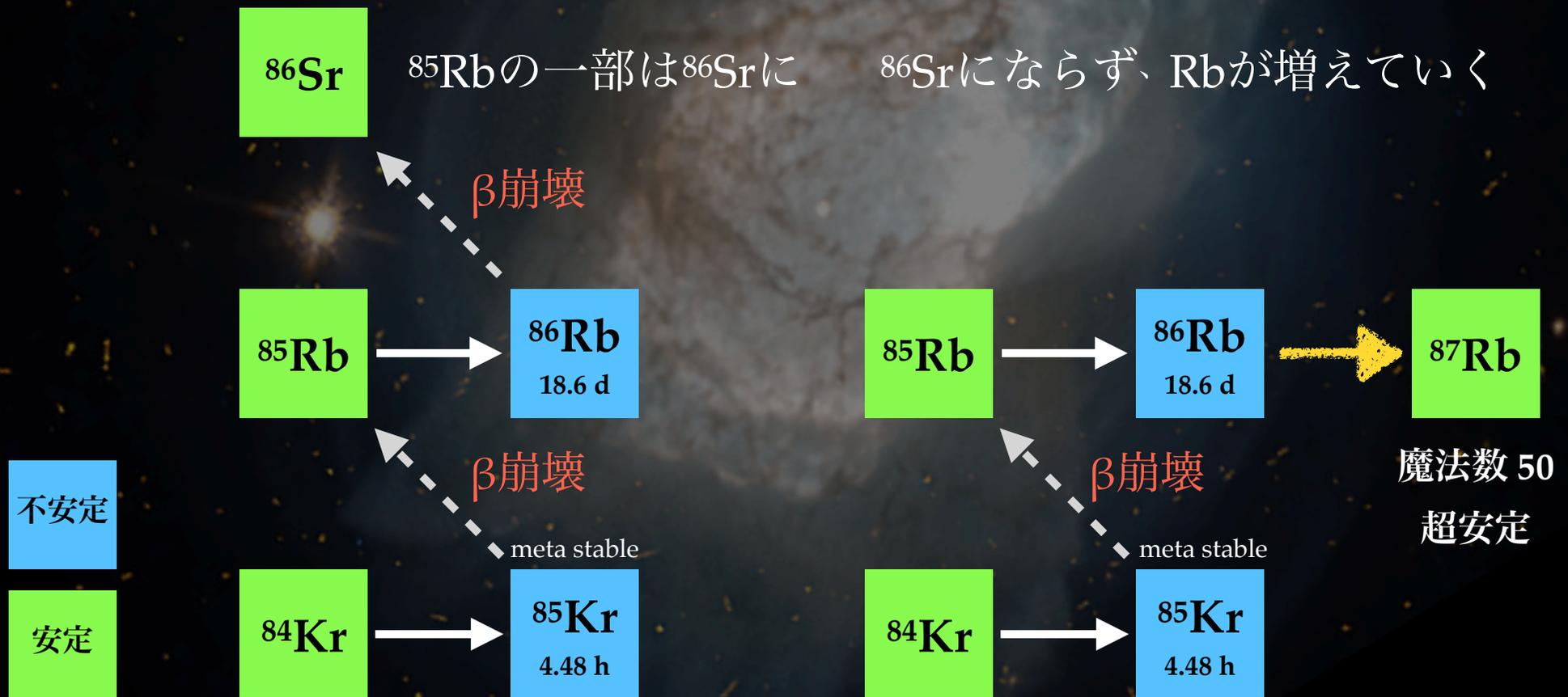
RbとKrは
どのパスを通して
合成されるのか？

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

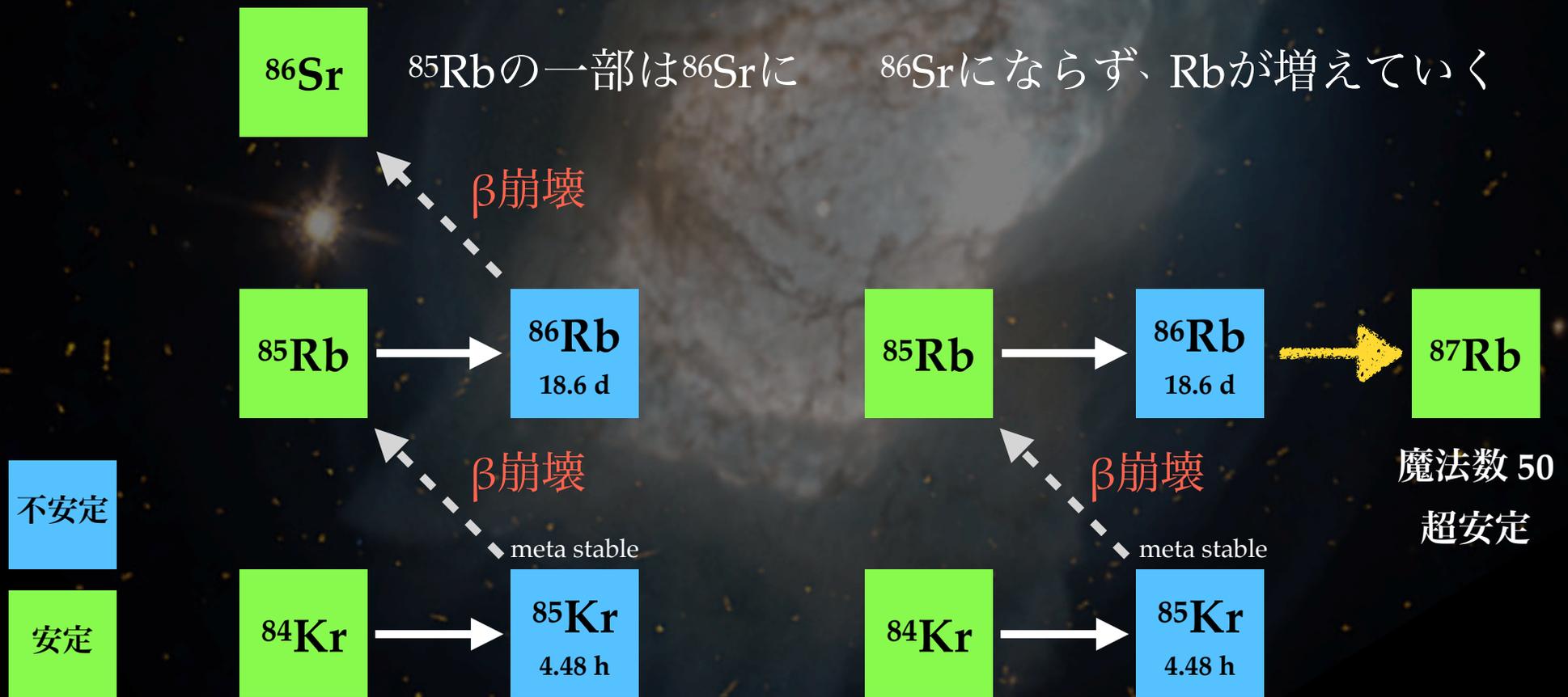


研究の着眼： $n(\text{Kr})/n(\text{Rb})$ 比は「元素合成環境」と「初期質量」に関係

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（Hβ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

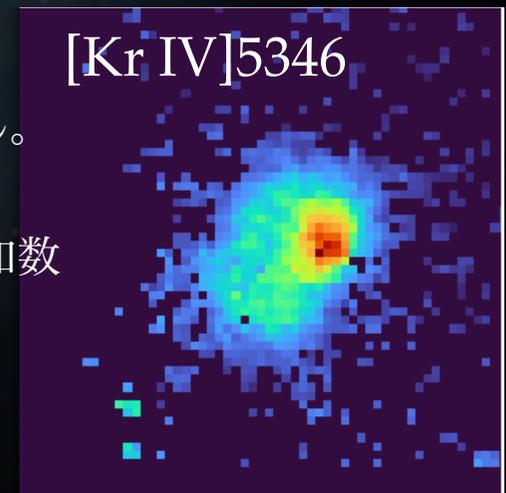
- 波長守備範囲がひろい且つ高空間分解スペクトルが得られる。
スペクトル切り出しの場所および形状は思うがまま。

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

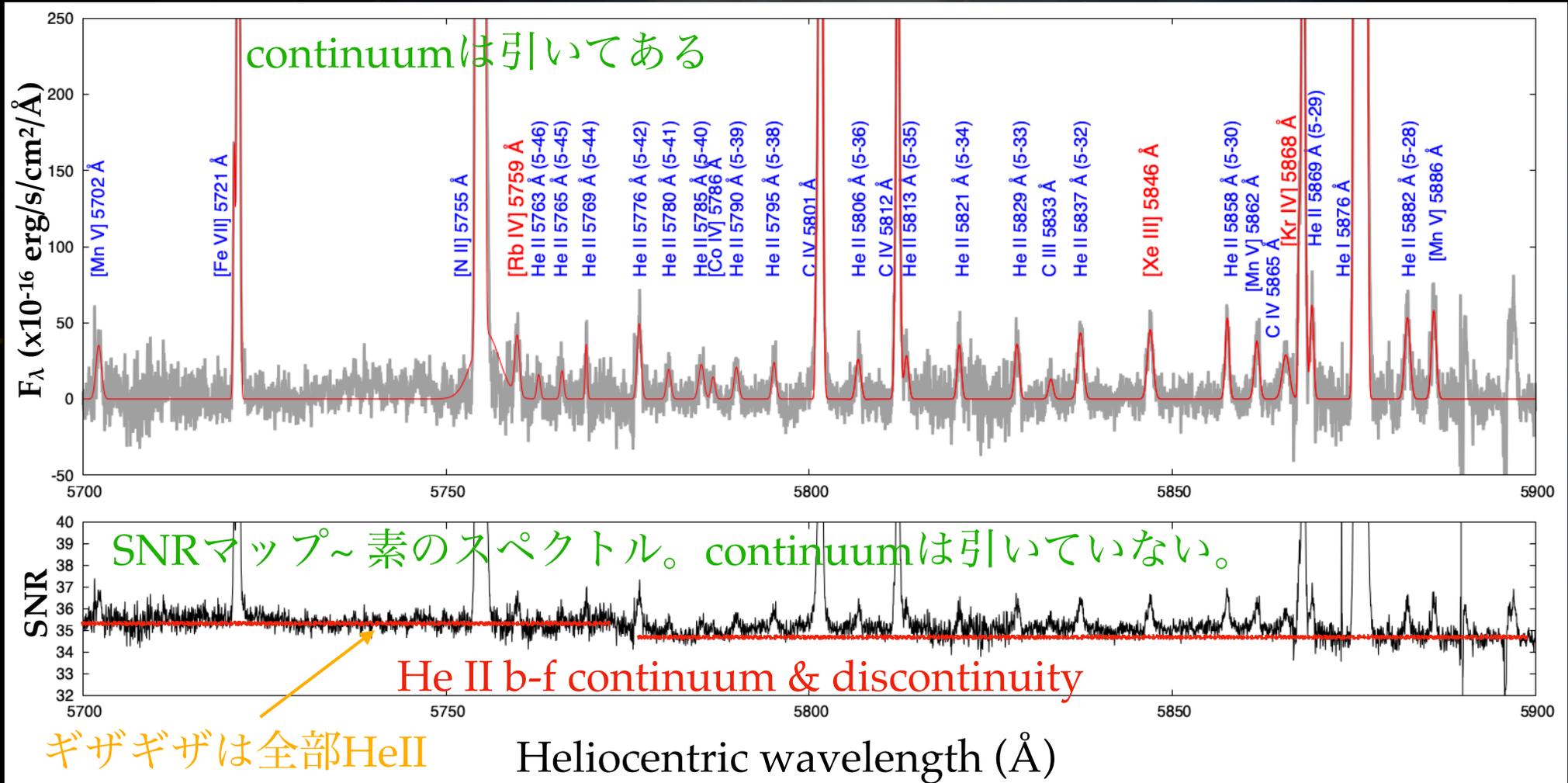
KOOLS-IFU map

[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

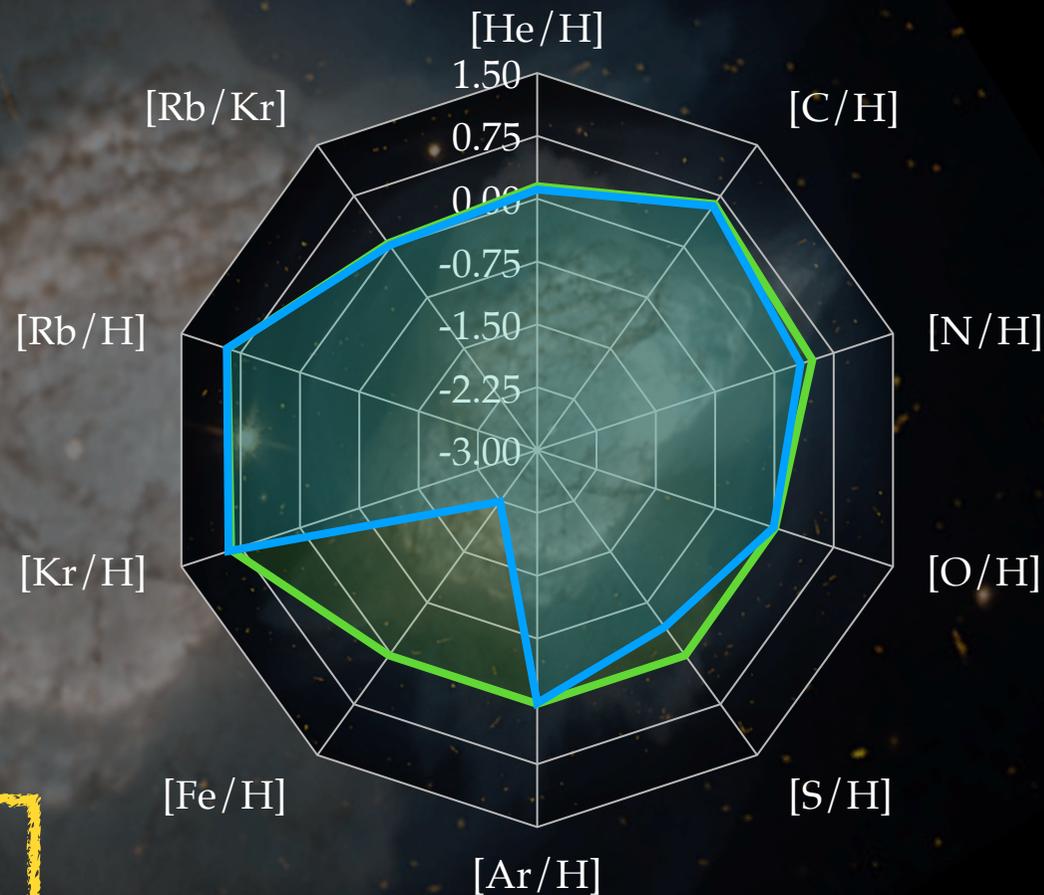
GAOES-RV 5700-5900Å spec of NGC7027



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

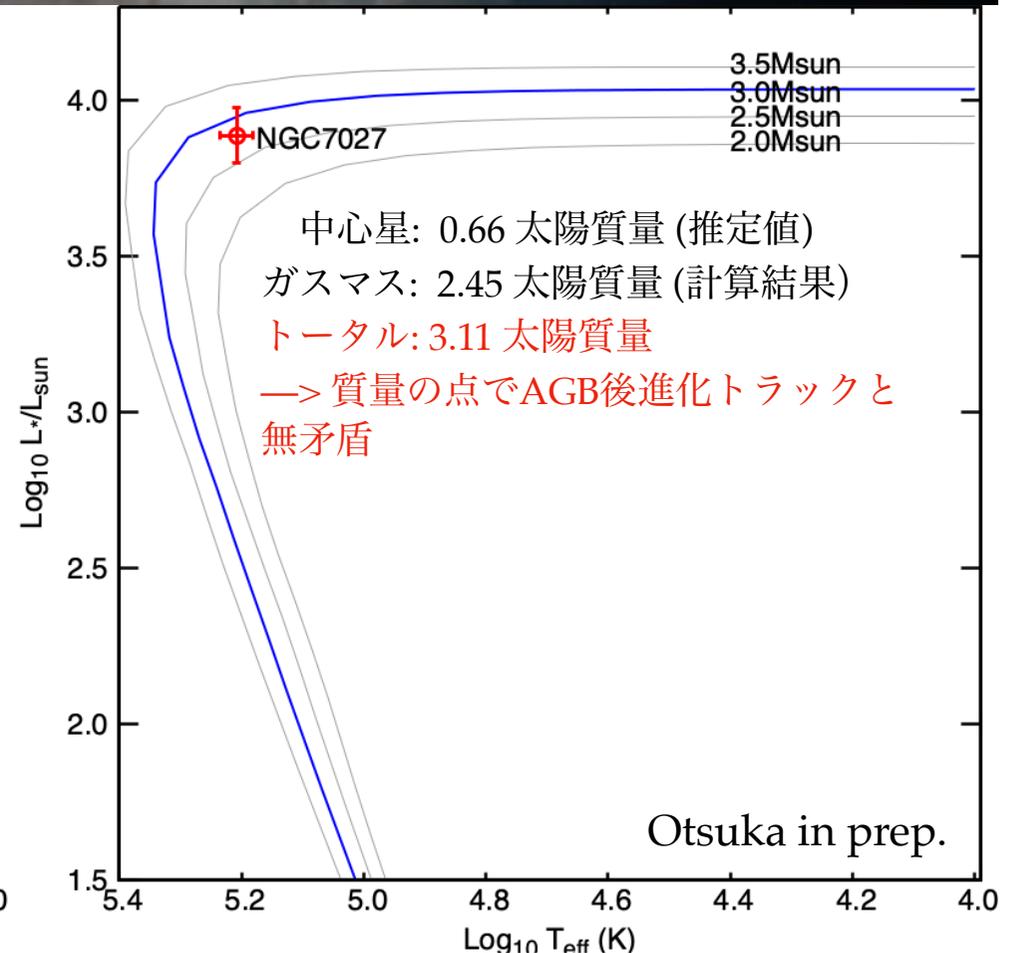
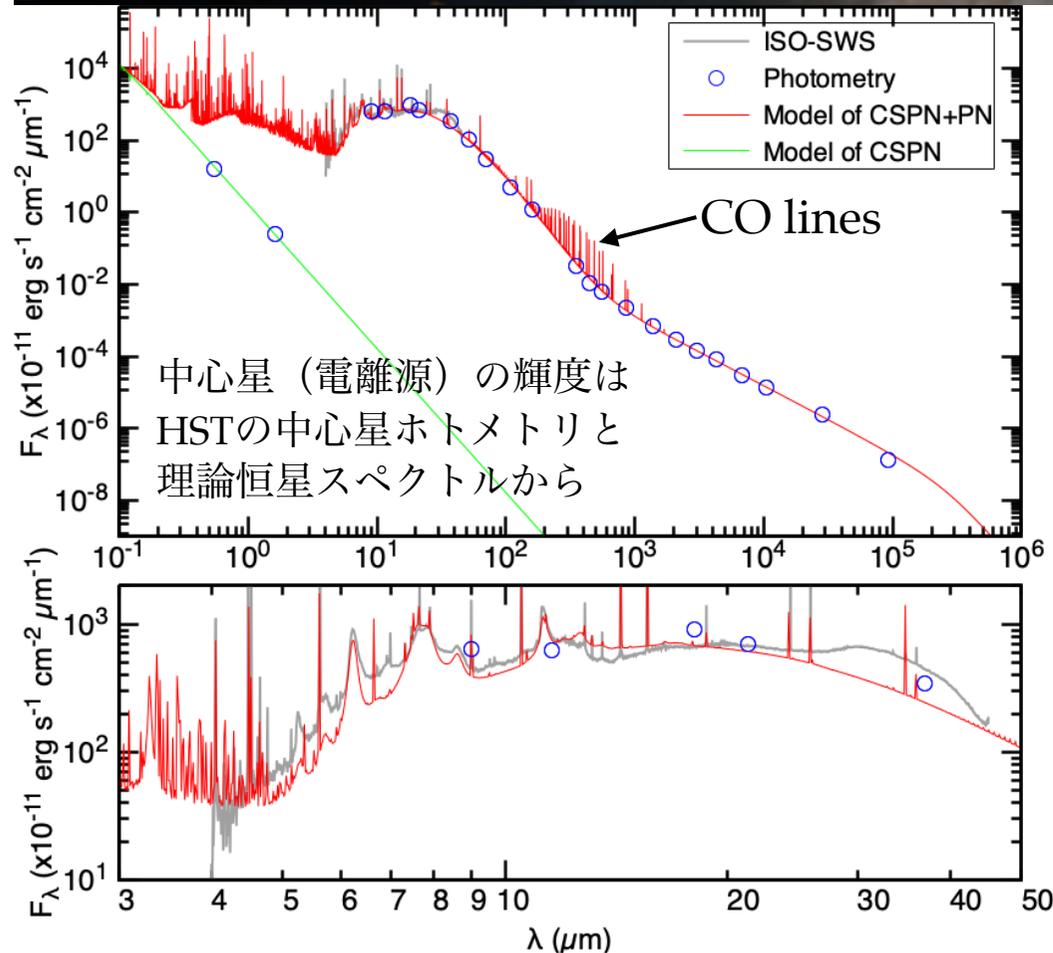
	[Kr/H]	[Rb/H]	[Rb/Kr]
NGC7027	0.91	0.93	0.10
AGB model	0.87	0.92	0.05

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