

多次元超新星爆発・元素合成計算 と初期世代星観測で探る 重元素の生成・拡散

富永望

(国立天文台/甲南大学)



26th Jun 2025

学術変革領域「地下稀現象」領域研究会

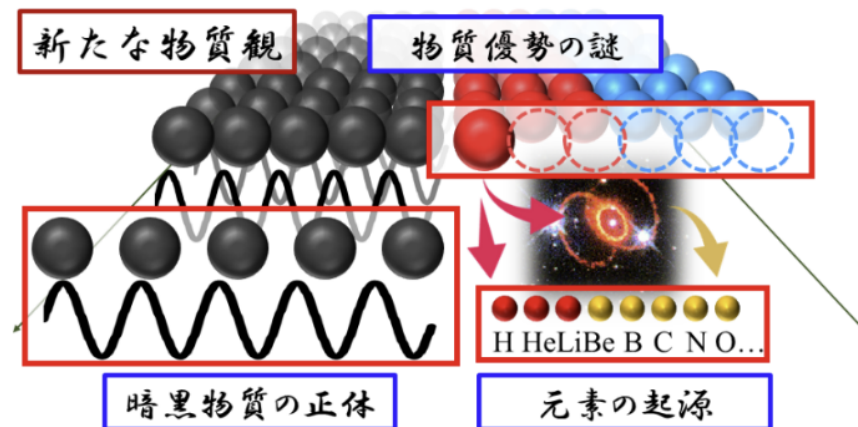
これまでの研究から、宇宙の物質は、宇宙の歴史に沿って、

- 1) 宇宙の誕生時には、同数あった物質・反物質からわずかの量の物質だけが残ри、
- 2) その物質の4倍もの量の未知の暗黒物質の引力の作用によって、銀河が形成され、
- 3) 我々にとって既知である20%の物質についても、宇宙当初の水素、ヘリウム、リチウムというわずか3種の元素から、恒星内でその他元素が生成され、

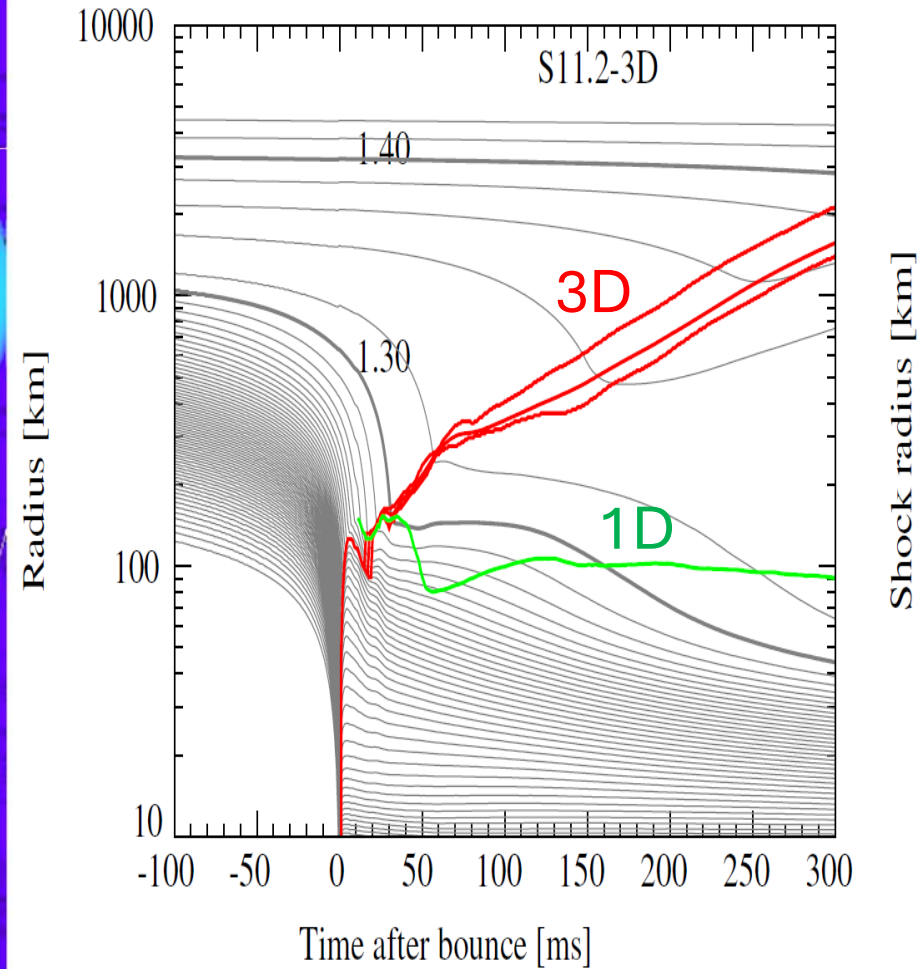
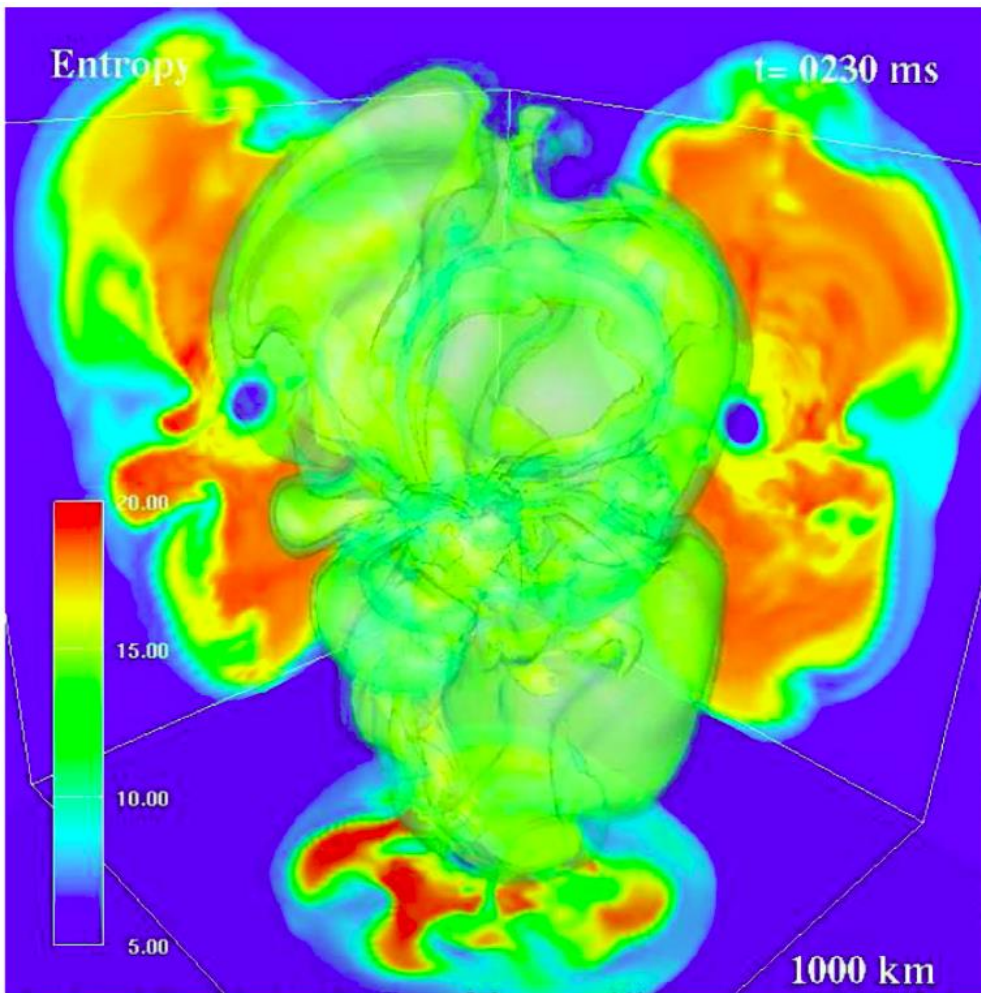
本公募研究

現在に至っている、と考えられています。しかし、この物質の歴史について深く掘り下げていくと、「どうして物質だけが残ったのか」「暗黒物質の正体は何か」「**元素がどのように作られ、拡散したのか**」について、実は答えることができません。つまり、「我々の周りにあふれる『物質』は、実は謎に満ちた存在」なのです。これは驚愕の事実で、物質に対しての考え方が一変するほどです。その衝撃の大きさを考えると、素粒子・原子核物理学と言った枠を大きく越えて、文化や歴史にまで影響を及ぼす可能性すらあります。

本領域研究は、「物質優勢の謎」「暗黒物質の正体」元素合成と拡散の場である「超新星爆発」の3テーマを主に研究し、物質の起源の謎の解明に挑みます。本領域は、この謎を解明することで、我々が当然視している「物質」について、新たな視点、つまり、**新たな物質観の創造**を目標に研究を行います。

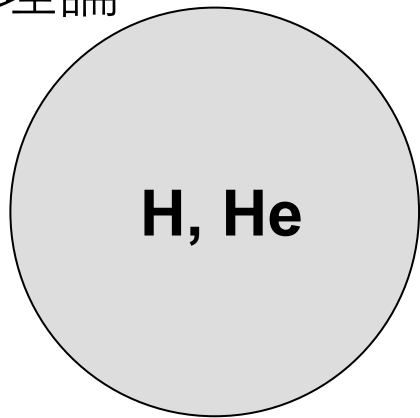


ニュートリノ駆動 多次元超新星爆発計算

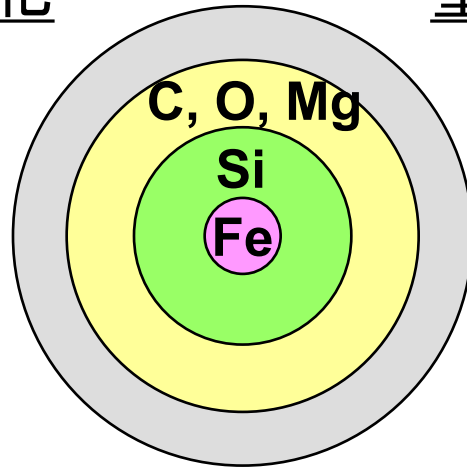


観測で検証可能に

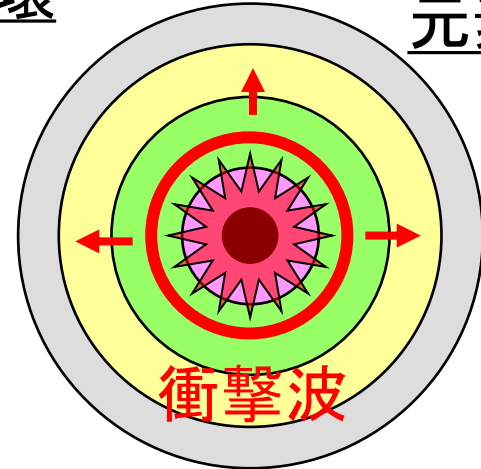
理論



星の進化



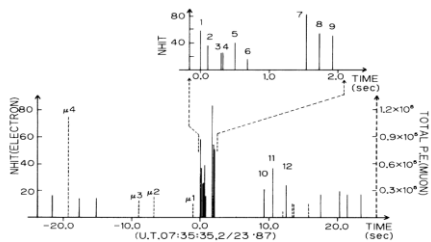
重力崩壊



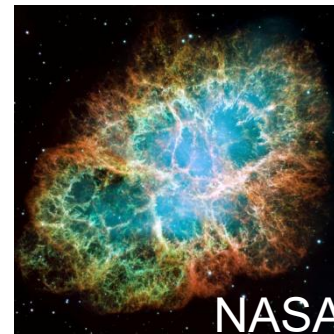
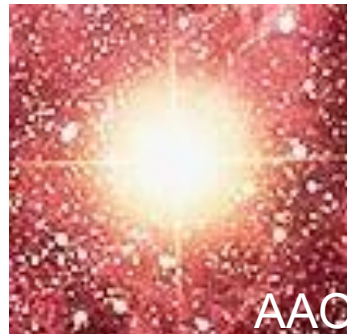
爆発的
元素合成



観測



Hirata+87



ニュートリノ

超新星

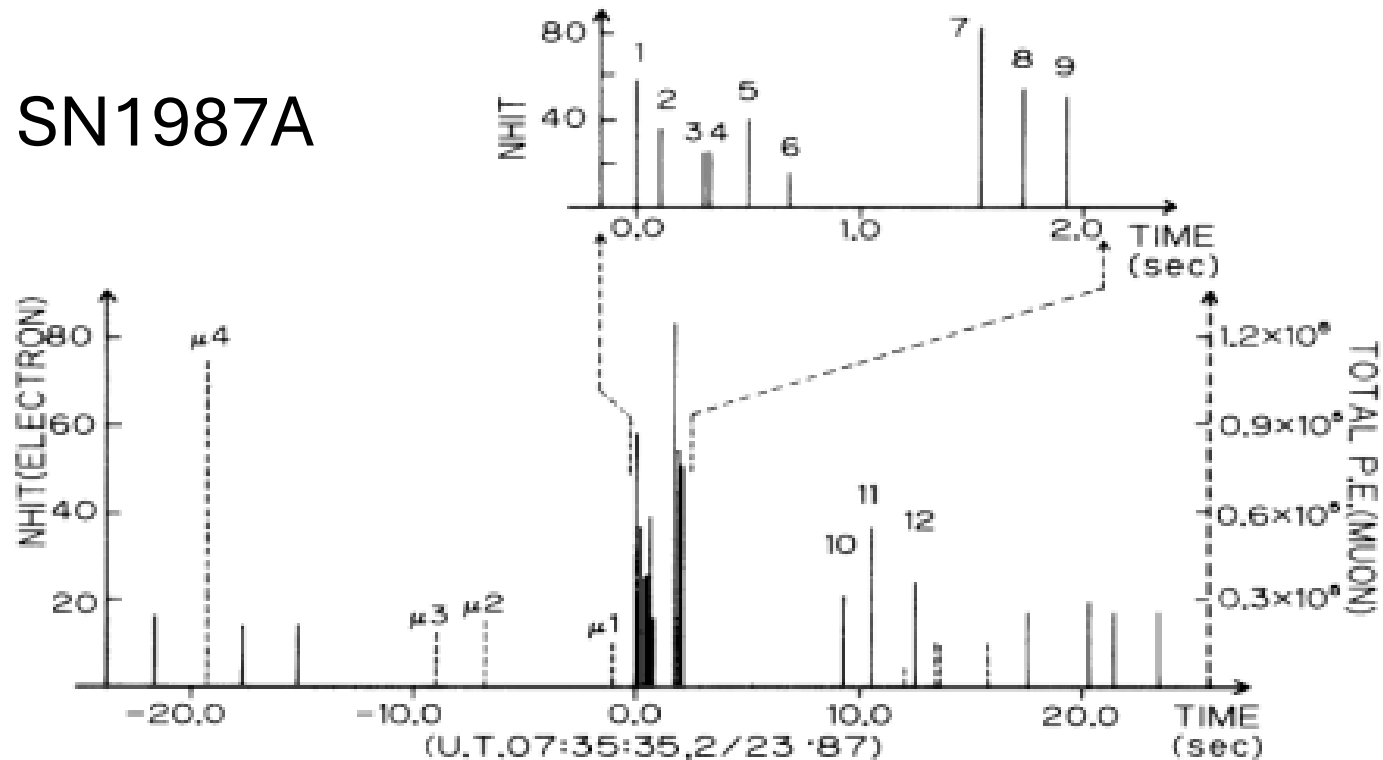
超新星残骸

次世代星

観測から何がわかるか?

- ニュートリノ -

SN1987A



Hirata+87

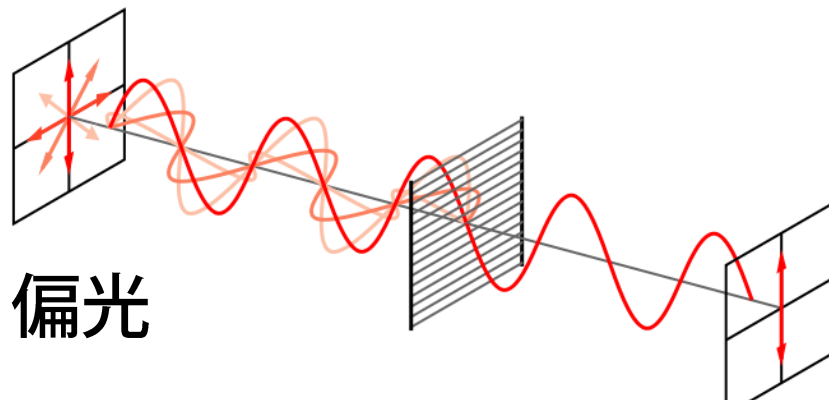
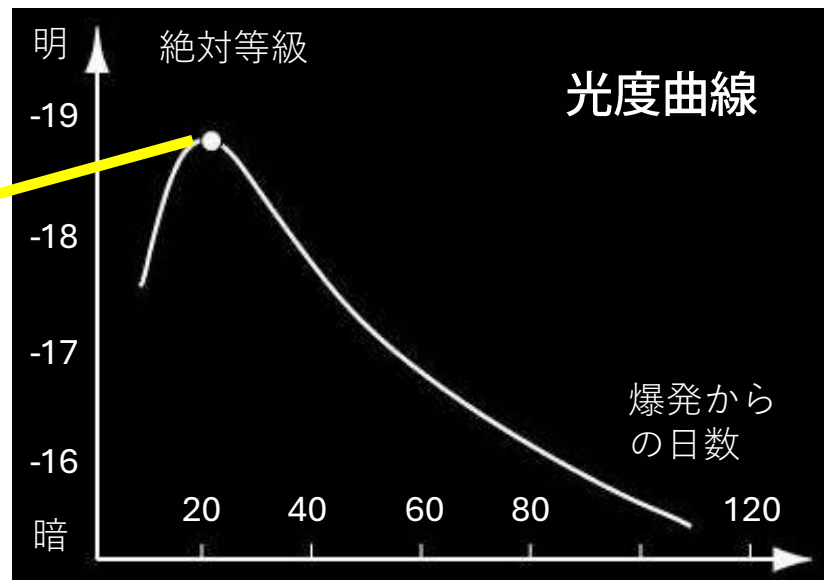
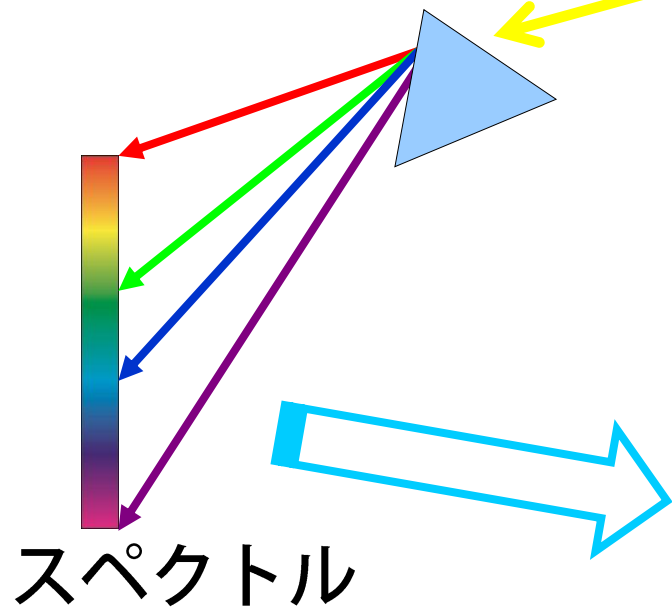
- 計画研究 **C01**：万能超新星ニュートリノ検出器で切り拓く稀事象宇宙フロンティア
- 計画研究 **E02**：全ニュートリノフレーバーを用いた超新星ニュートリノの理論研究



観測から何がわかるか?

-超新星爆発-

- 観測量: 光度曲線、スペクトル、偏光





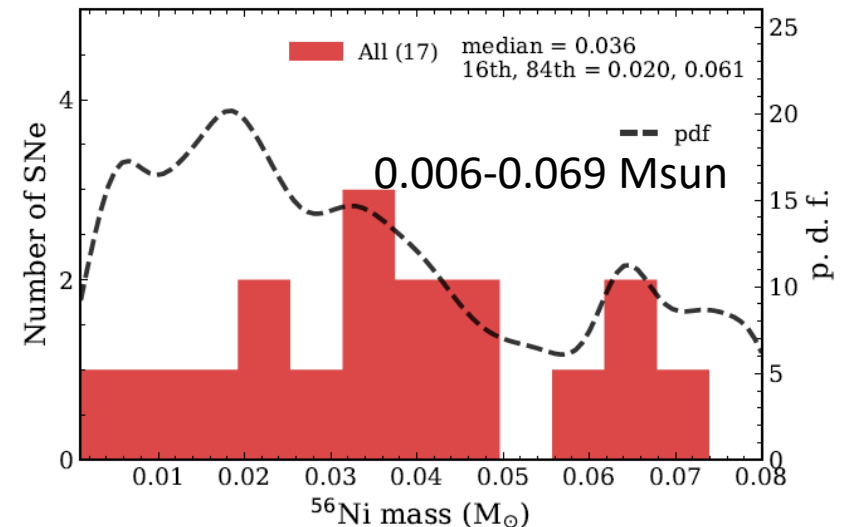
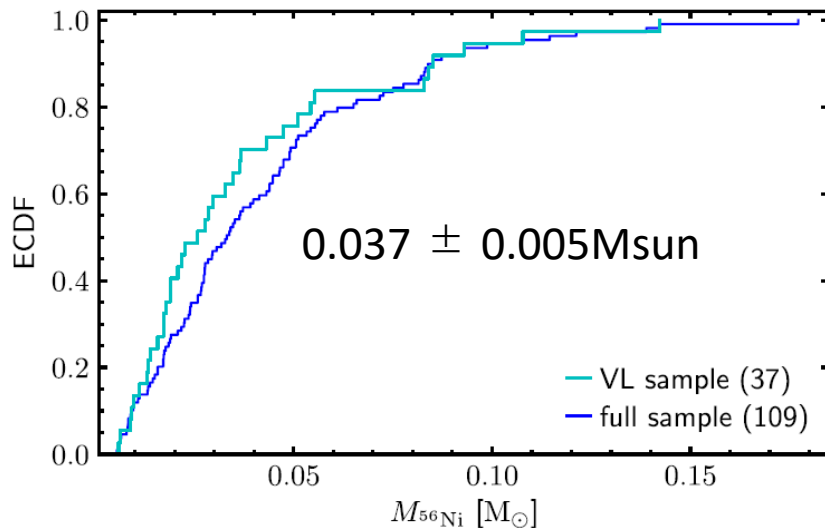
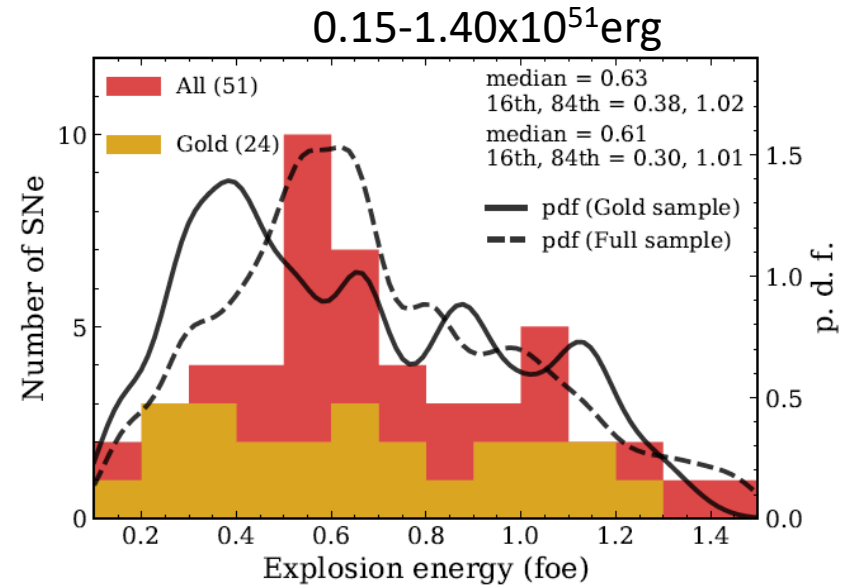
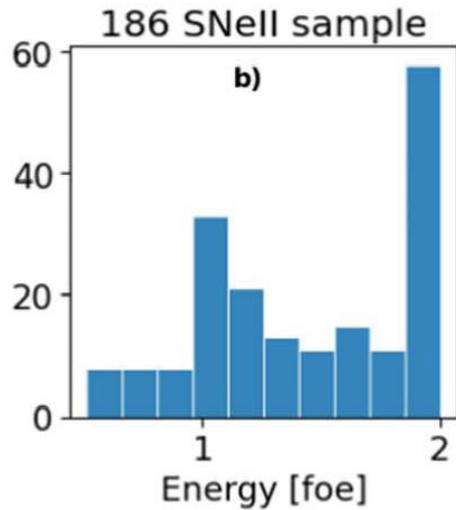
観測から何がわかるか？

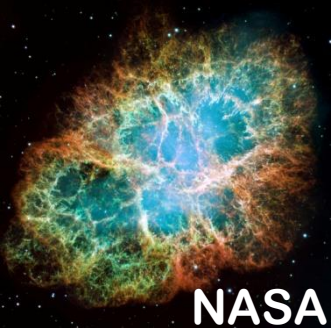
-超新星爆発-

- 観測量: 光度曲線、スペクトル、偏光
- 測定できる物理量
 - 速度
 - 鉄(^{56}Ni)の量
 - 主要な元素(酸素、ケイ素、カルシウム)の組成
- 導ける物理量
 - 爆発エネルギー
 - 放出物質の質量
 - (大雑把な) 非球対称性
 - 親星の質量 (連星かどうか)

超新星爆発の性質

- II型超新星 (Rodriguez+21; Martinez+22; Silva-Farfán+24)





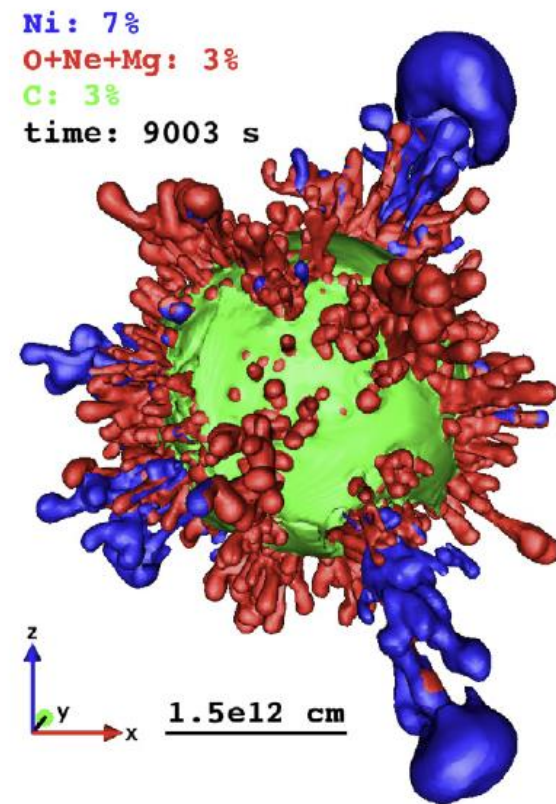
観測から何がわかるか?

-超新星残骸-

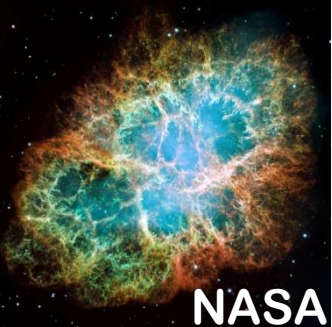
- 観測量：スペクトル、空間構造



Chandra; DeLaney+10



Wongwathanarat+15



観測から何がわかるか？ -超新星残骸-

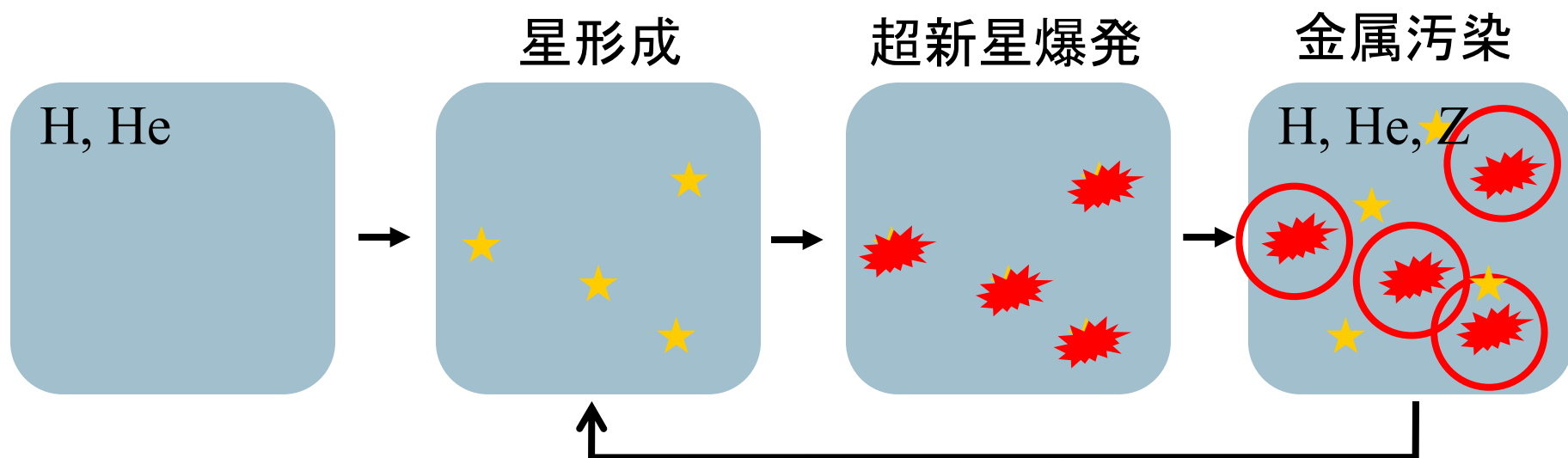
- 観測量：スペクトル、空間構造
- 測定できる物理量
 - **放射性元素(^{44}Ti)や鉄(^{56}Ni)の量**
 - 速度
 - 空間構造
 - **主要な元素(鉄族元素まで)の元素組成比**
- 導ける物理量
 - 爆発エネルギー
 - 放出物質の質量
 - 爆発の空間構造
 - 星周物質の構造



観測から何がわかるか?

-次世代星-

宇宙の化学進化



金属量は時間とともに増える

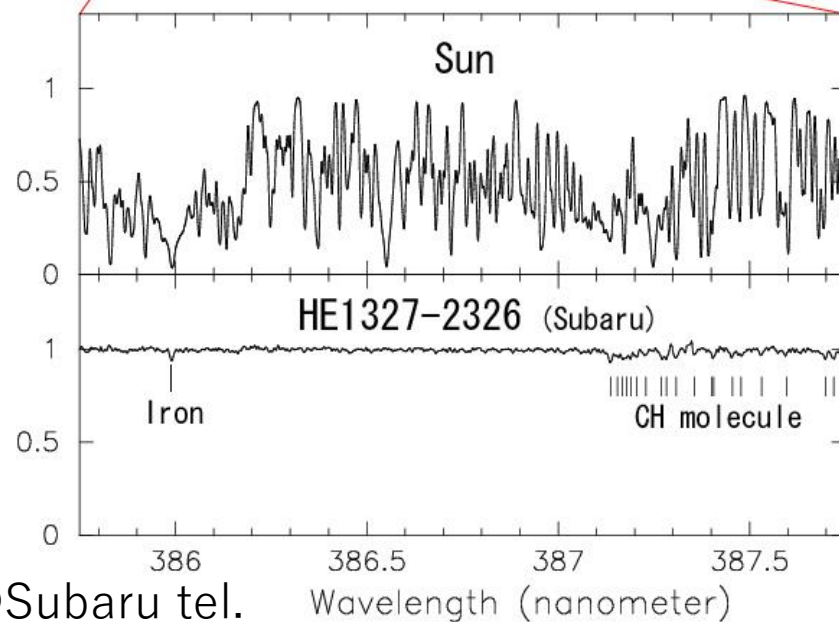
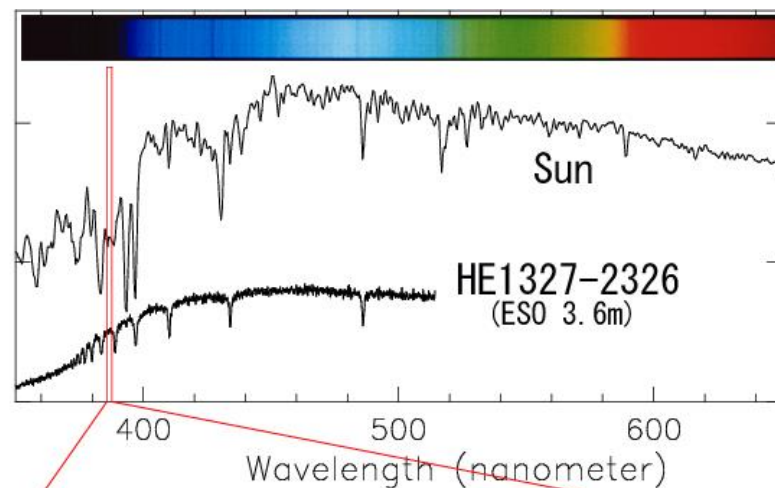
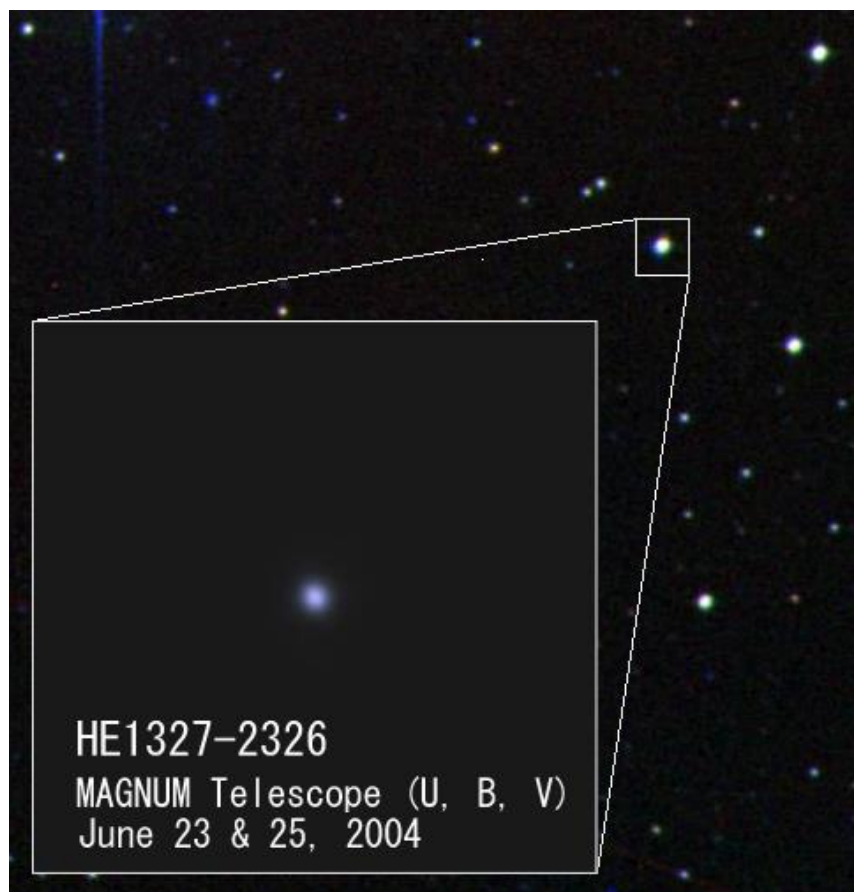


観測から何がわかるか?

-次世代星-

MAGNUM

- 観測量：スペクトル



©Subaru tel.

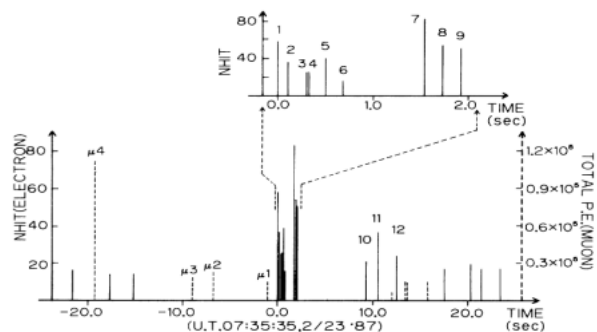


観測から何がわかるか？ -次世代星-

- 観測量：スペクトル
- 測定できる物理量
 - **量の少ない元素も含む(希ガス除く)詳細な元素組成**
- 導ける物理量
 - **元素組成の宇宙開闢からの進化**
 - 爆発エネルギー
 - 放出物質の質量
 - ニュートリノの量
 - 親星の質量、回転
 - (大雑把な) 非球対称性

多様な元素の起源

理論と観測の比較

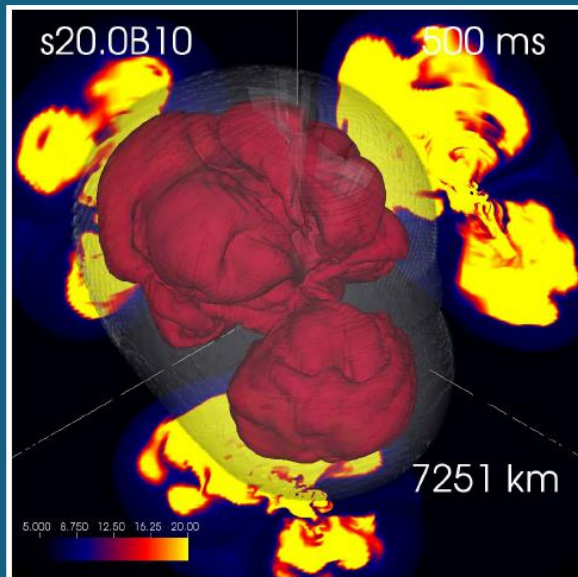


ニュートリノ

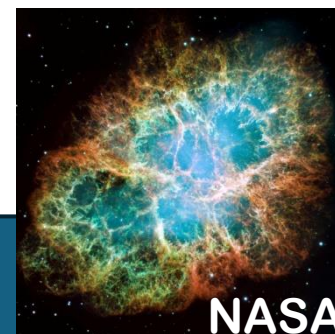
超新星爆発



C01
E02



Nakamura+24



超新星残骸

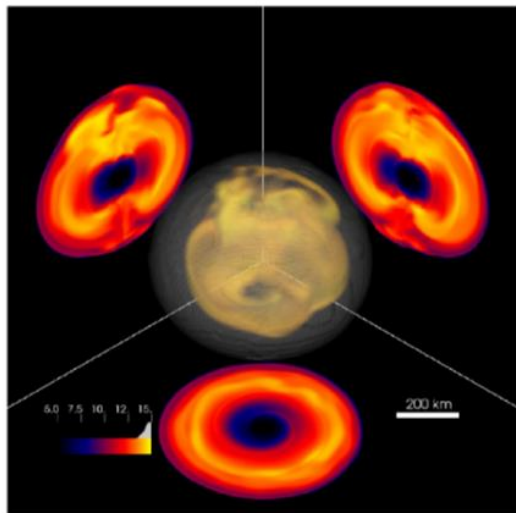
本公募研究

次世代星



本研究の概要

(a) 超新星爆発計算



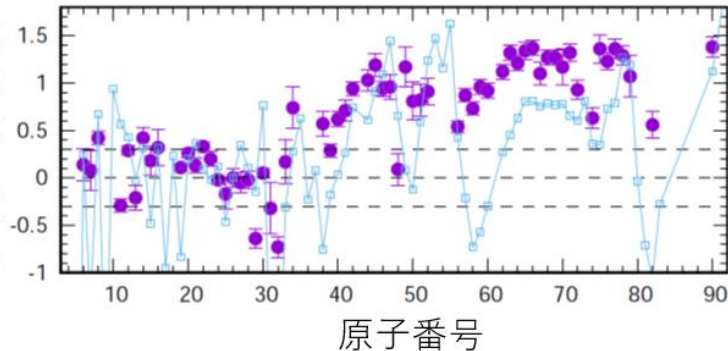
(b) 初期世代星観測



元素合成計算

高分散分光

太陽値で規格化した
鉄に対する
各元素の組成比



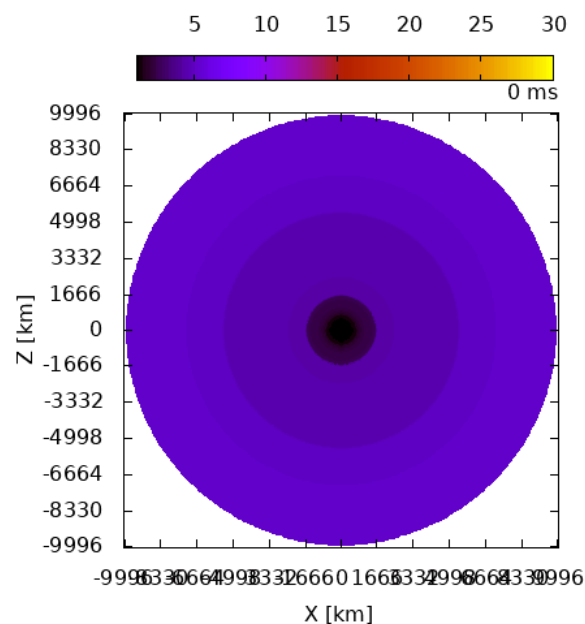
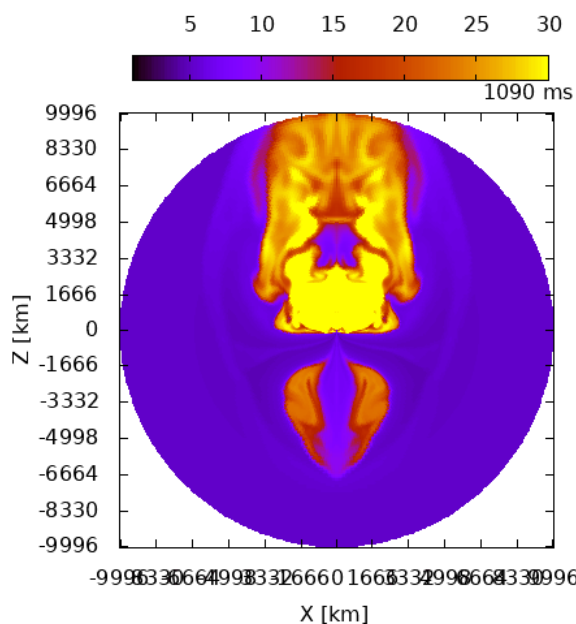
(a) 理論モデル
(b) 観測

宇宙初期に存在しなかった重元素が
どのようにして生成・拡散されたのか

(a) 多次元超新星爆発・元素合成計算

研究協力者： 播田實りょう太（総研大D1）、
滝脇知也（国立天文台）

- $Z=0$ の親星モデル
- 多次元超新星爆発計算



- （今後）ニュートリノ反応を含む元素合成計算

(b) 明るい初期世代星の高分散分光観測

研究協力者： 岡田寛子（兵庫県立大D3）、本田敏志（兵庫県立大）、
青木和光（国立天文台）

Survey design

STEP 01

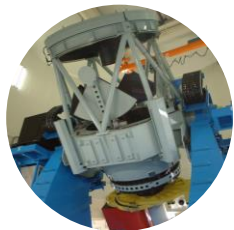


Kiso (1.05 m)

狭帯域測光探査観測

- Narrow-band photometry with Tomo-e Gozen
- Select bright MP candidates with $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$

STEP 02



Nayuta (2 m)

中分散分光による金属量測定

- Medium-res. Spectroscopy with MALLS
- $R \sim 7500$
- Opt. (4900-5300Å)
- Metallicity(Fe) and $\alpha(\text{Mg})$ abundance

STEP 03



Seimei (3.8 m)

高分散分光による組成測定

- High-res. spectroscopy with GAOES-RV
- $R \sim 65000$
- Opt. (5160-5930 Å)
- Individual elements (Mg, Ca, Sc, Ti, Cr, Fe, Ni, Ba)

STEP 04



Subaru (8 m)

広帯域高分散分光による 詳細な組成測定

- High-res. spectroscopy with HDS
- $R > 45000$
- Opt. and UV
- Individual elements incl. rare elements

Summary

- **多様な元素の起源**
- 多次元超新星爆発・元素合成計算
 - ニュートリノ加熱機構に基づいて、多次元超新星爆発・元素合成計算を行い、自己無撞着な重力崩壊型超新星爆発の重元素合成量を求める。
- 初期世代星の高分散分光観測
 - これまでに発見した明るい初期世代星の高分散分光観測により高精度で元素組成を測定する。
- 超新星爆発においてどのような重元素が生成され、宇宙に拡散したのかを明らかにする。
- C01ニュートリノ観測、E02超新星ニュートリノ理論研究と相補的