

原子核物理でつむぐrプロセス

– Nuclear Physics of r-process Nucleosynthesis –

2019年5月22日-24日 (22-24 May 2019)

京都大学基礎物理学研究所 (YITP, Kyoto University)



「はじめに」

西村 信哉

京大・基研

世話人： 井岡邦仁（京大基研），板垣直之（京大基研）

宇都野 穰（原子力機構），緒方 一介（阪大RCNP）

西村 信哉（京大基研），萩野 浩一（東北大理）

堀内 渉（北大理），吉田 賢市（京大理），和南城 伸也（AEI）

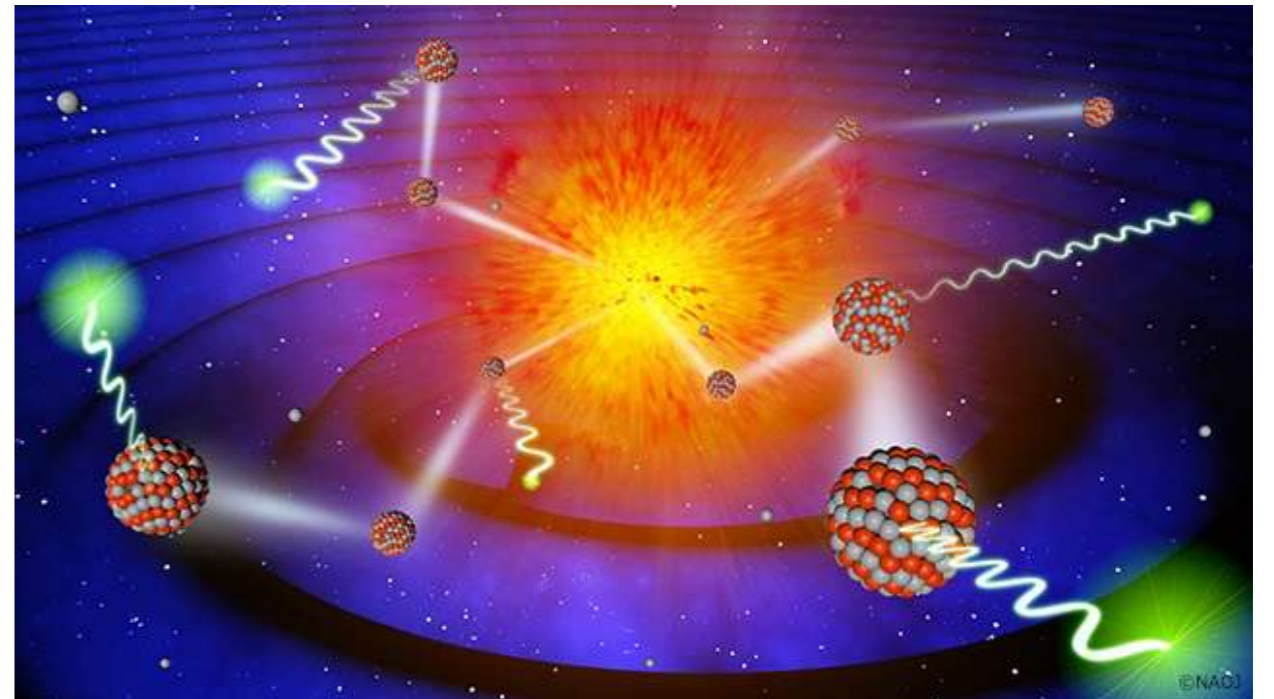
rプロセスがつなげる

ミクロ マクロ
原子核と宇宙

- 本研究会の背景
- 「rプロセス」の背景

rプロセス?

- 「速い(rapid)」中性子捕獲による元素合成
- 宇宙の「元素合成」の代表格
- 金・プラチナやウランの生成過程
 - 宇宙での「錬金術」
- 広範な中性子過剰核の核反応と崩壊が関与
- 爆発的天体現象（超新星・中性子星）で起こる



中性子星合体（イメージ） ©国立天文台

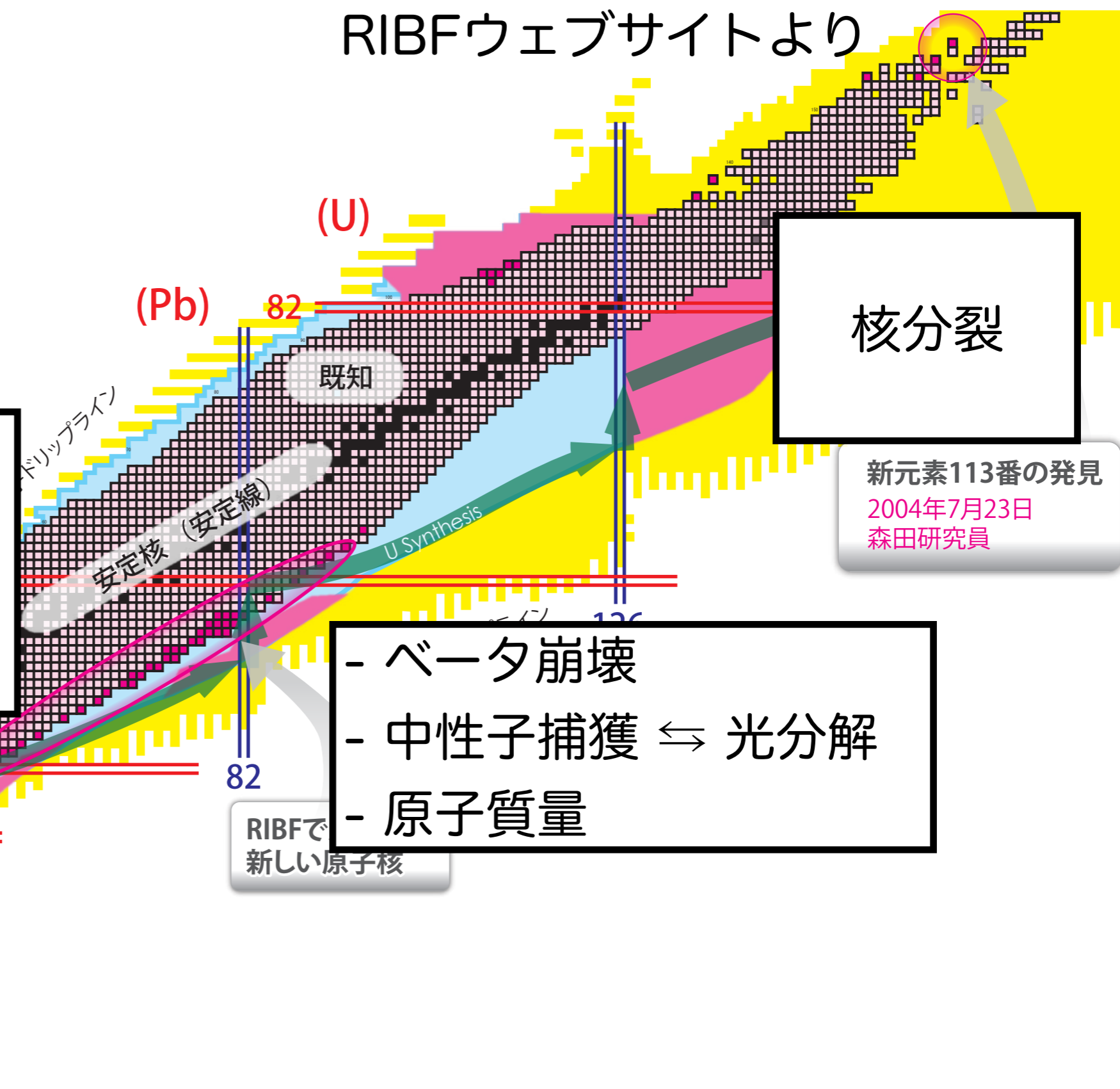
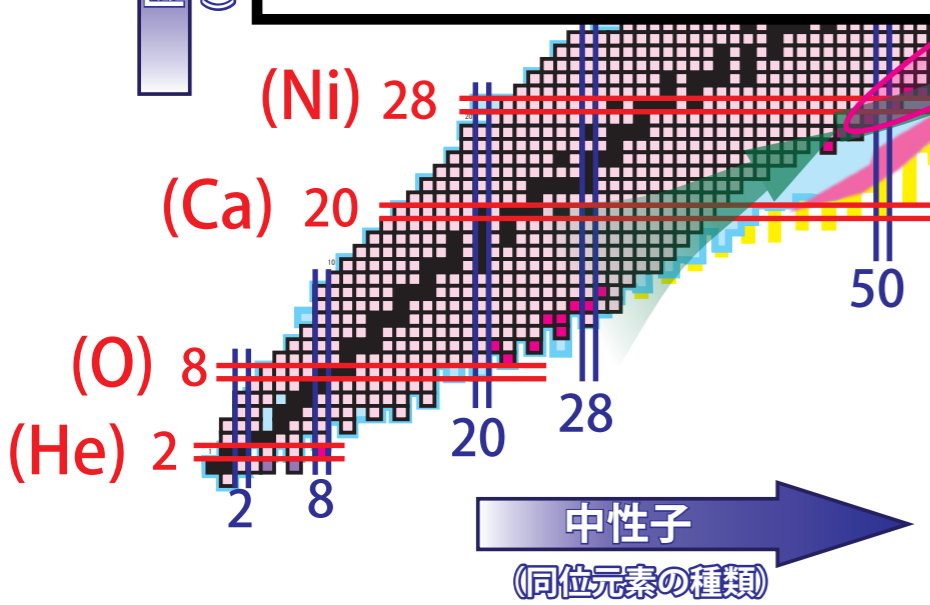
rプロセスと原子核

RIBFウェブサイトより

- 天然に安定に存在する原子核
- 不安定な原子核
- 理研で初めて見つけた原子核
- 原子核の存在限界 (理論的予想)
- 魔法数 (マジックナンバー)
- ➡ 超新星爆発で作られた不安定核の道筋 (ウランまでの元素が合成)
- 安定核の破碎
- ウランの

状態方程式

- 中性子星の構造
- rプロセス環境・ダイナミクス



核分裂

新元素113番の発見
2004年7月23日
森田研究員

- ベータ崩壊
- 中性子捕獲 ⇔ 光分解
- 原子質量

RIBFで新しい原子核

rプロセスの理論計算では、ほぼ全て理論値を使用

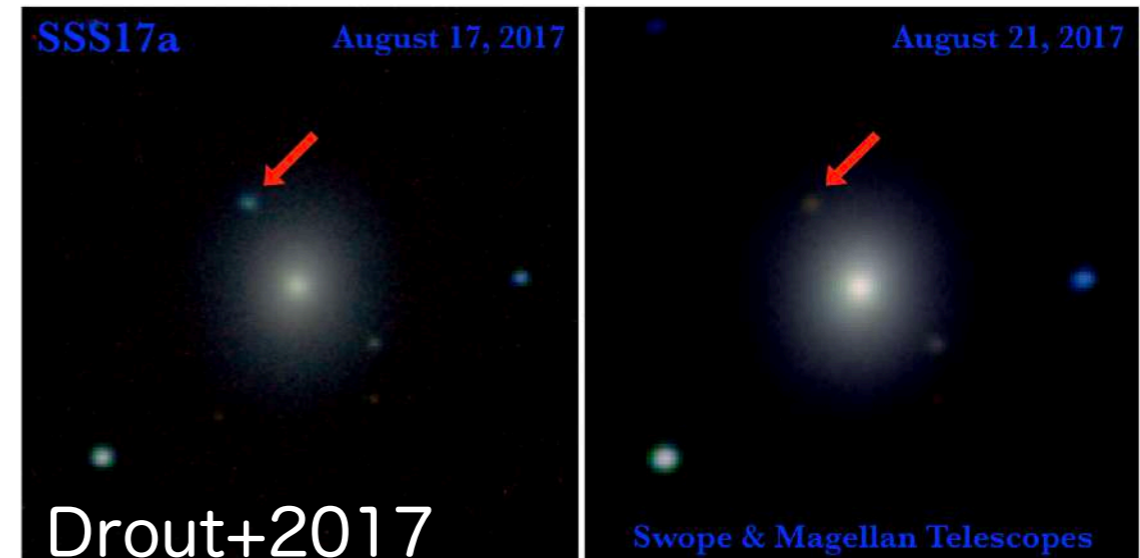
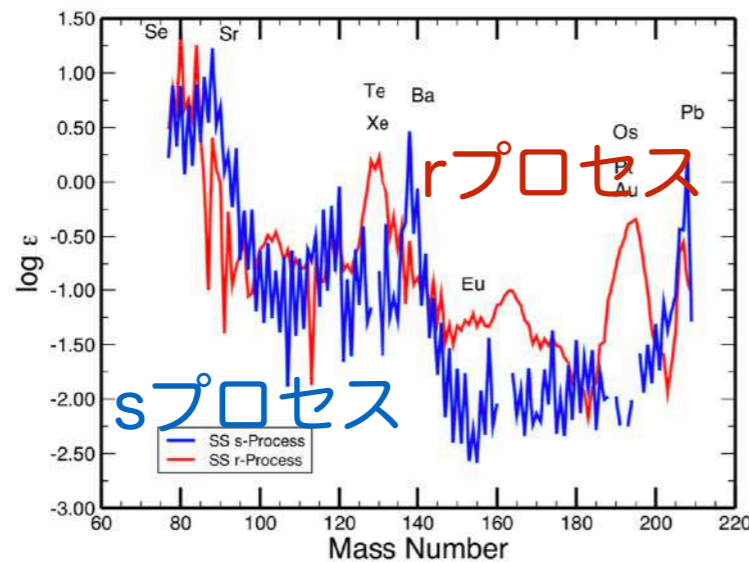
➡ rプロセス (元素組成) から、原子核の情報を探る

「rプロセス研究」の発展史

– rプロセスとは？

- 鉄より重い元素の半数の起源、特に、金やウラン等の唯一の生成過程：B2FH論文（1957）で提案
- ベータ崩壊よりも速い(rapid)中性子捕獲により達成

太陽系組成



- 金属欠乏星（=古い星）の元素組成（2000年代～）
 - 連星中性子星合体からの重力波を初観測（2017年8月）
 - 同時に、電磁波での突発天体（=キロノバ）を観測
 - キロノバの熱源はrプロセス（での核崩壊）
- rプロセス初の直接観測

「rプロセス2018」研究会

開催報告：重力波観測時代のrプロセスと不安定核(6/20-22)

投稿日: 2018年6月25日 作成者: 計算基礎科学連携拠点 広報室

✓ Like 1 Tweet

2018年6月20日（水）～22日（金）に理化学研究所（和光キャンパス）RIBF棟2階大会議室にて、研究会「重力波観測時代のrプロセスと不安定核」が開催されました。**参加者は119人でした。**

この研究会の中心的なテーマとなったrプロセスとは、速い（“rapid）中性子捕獲による元素合成で、宇宙における金やウランなど鉄よりも重い元素の起源です。中性子星が関わる爆発的な天体現象で起こると考えられており、近年の研究では連星中性子星の合体が最も有力な候補です。昨年、連星中性子星合体による重力波（GW170817）が初めて検出されましたが、同時に、可視光を含む光学望遠鏡での観測でキロノヴァ/マクロノヴァと呼ばれる突発天体現象も発見されました。キロノヴァはrプロセスを熱源として輝く現象で、これ



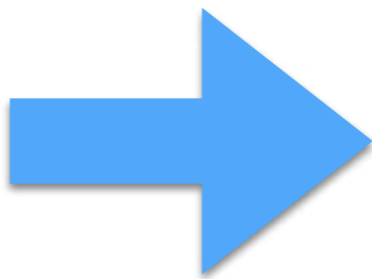
JICFuSウェブサイトより
参加者総数119人

- 理研仁科センターのサポート：2017年にRIBF10周年（共同主催：ポスト「京」重点課題9）
- 中性子星合体（GW170817）の観測後初の国内rプロセス研究会
- 「不安定核の加速器実験」＋「重力波＋電磁波観測」
＋「天体シミュレーション」

rプロセス計算が両者を繋げる← 原子核理論（予言）に依存

「rプロセス2018」から「rプロセス2019」に

「Nishina」から「Yukawa」に



「重力波天文学」と「不安定核実験」の最新知の出会い

→ 性質の異なる実験・観測を繋ぐのは「理論」

- ・原子核に由来する（現状の）rプロセスの不定性
 - ・核崩壊、核反応、核分裂の諸量の理解の現状
- ・キロノバ観測によるrプロセス天体の理解の進展
 - ・観測量の予言に影響しうる原子核の未解決問題

後援：RIBF理論研究推進会議 (RIBF Theory Forum)

目的：今後RIBFで行う物理の探求

第2期 2014年秋より

メンバー：阿部 喬（東大）、有友 嘉浩（近畿大）、
木村 真明（北大）、中里 健一郎（九大）、西村 信哉（京大）、
堀内 渉（北大）、松本 琢磨（九大）、湊 太志（原研）、
吉田 賢市（京大）、H Liang（理研）

各WG毎に議論

多体相関、集団運動、超重核、状態方程式、元素合成

これまでの主催研究会

前回「rプロセス研究会」

2017年7月, 2019年2月「RIBF若手放談会」@理研神戸

→ 若手でRIBFを中心とする核物理の今後を展望

(第3回を**来年2月**に予定)

rプロセス研究

3つの根源的な疑問

- ① rプロセス元素とは何か？
- ② rプロセスが起こる天体現象は何か？
- ③ 素過程（核物理）は分かっているか？

① rプロセス元素とは何か？

VOLUME 29, NUMBER 4

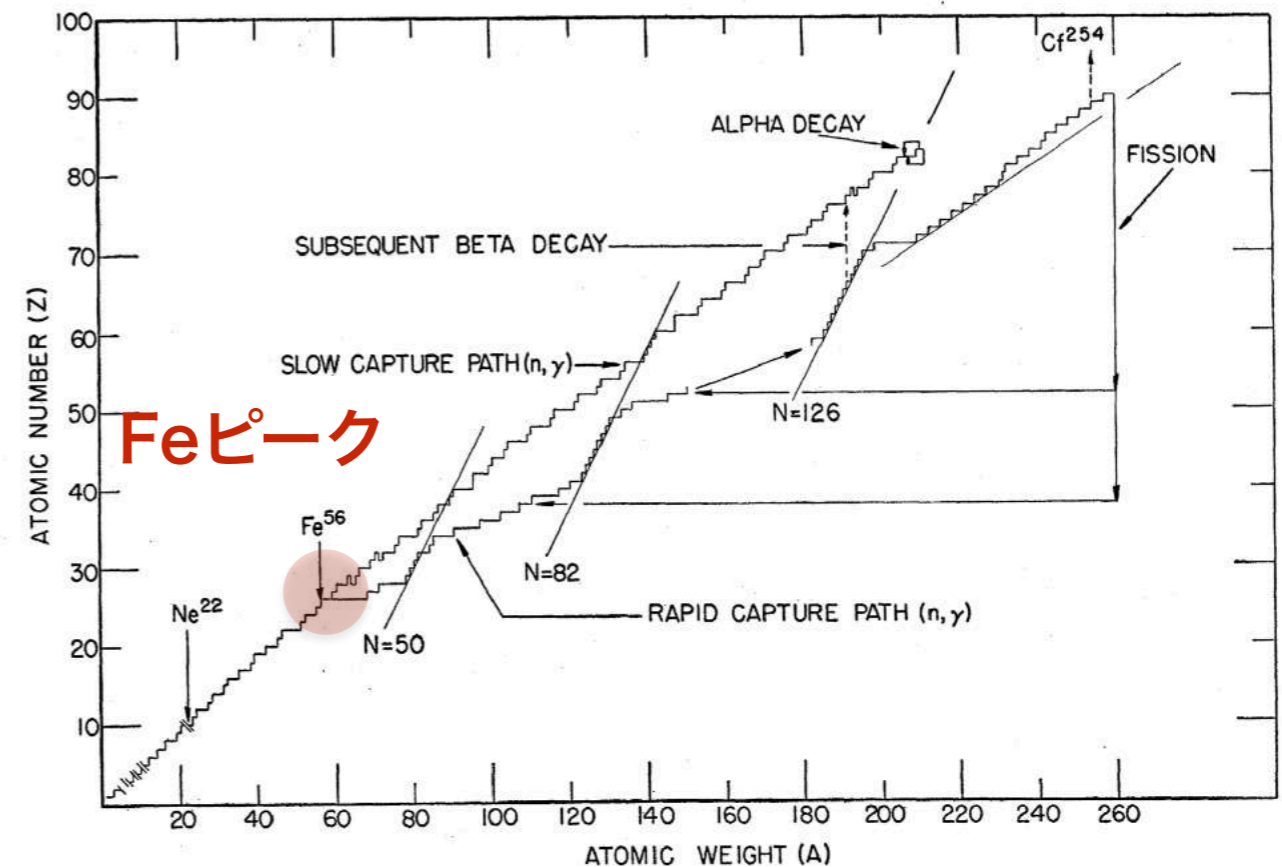
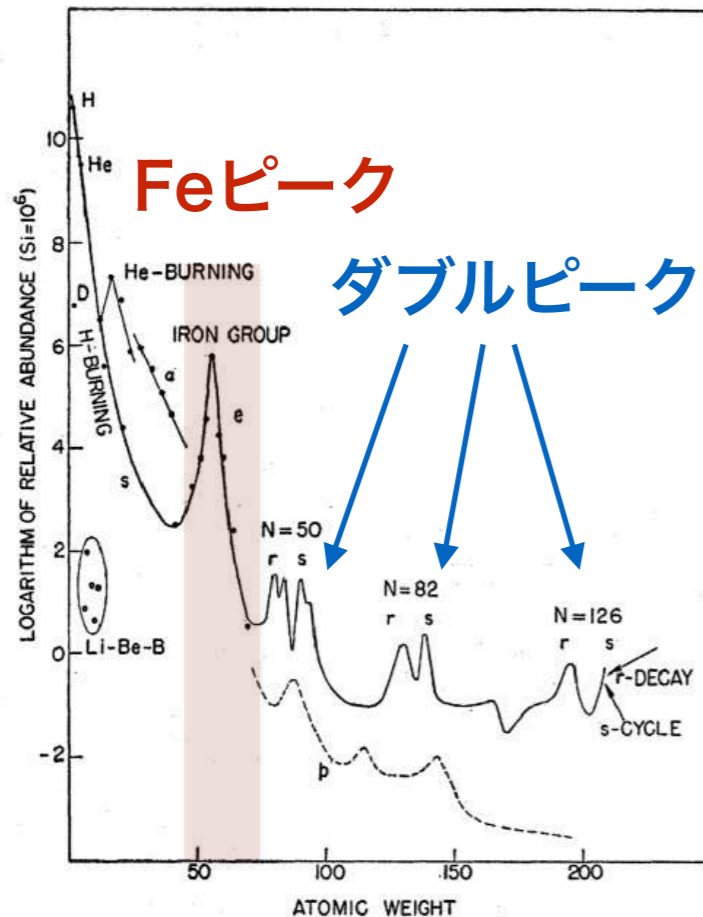
OCTOBER, 1957

Synthesis of the Elements in Stars*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,
California Institute of Technology, Pasadena, California*

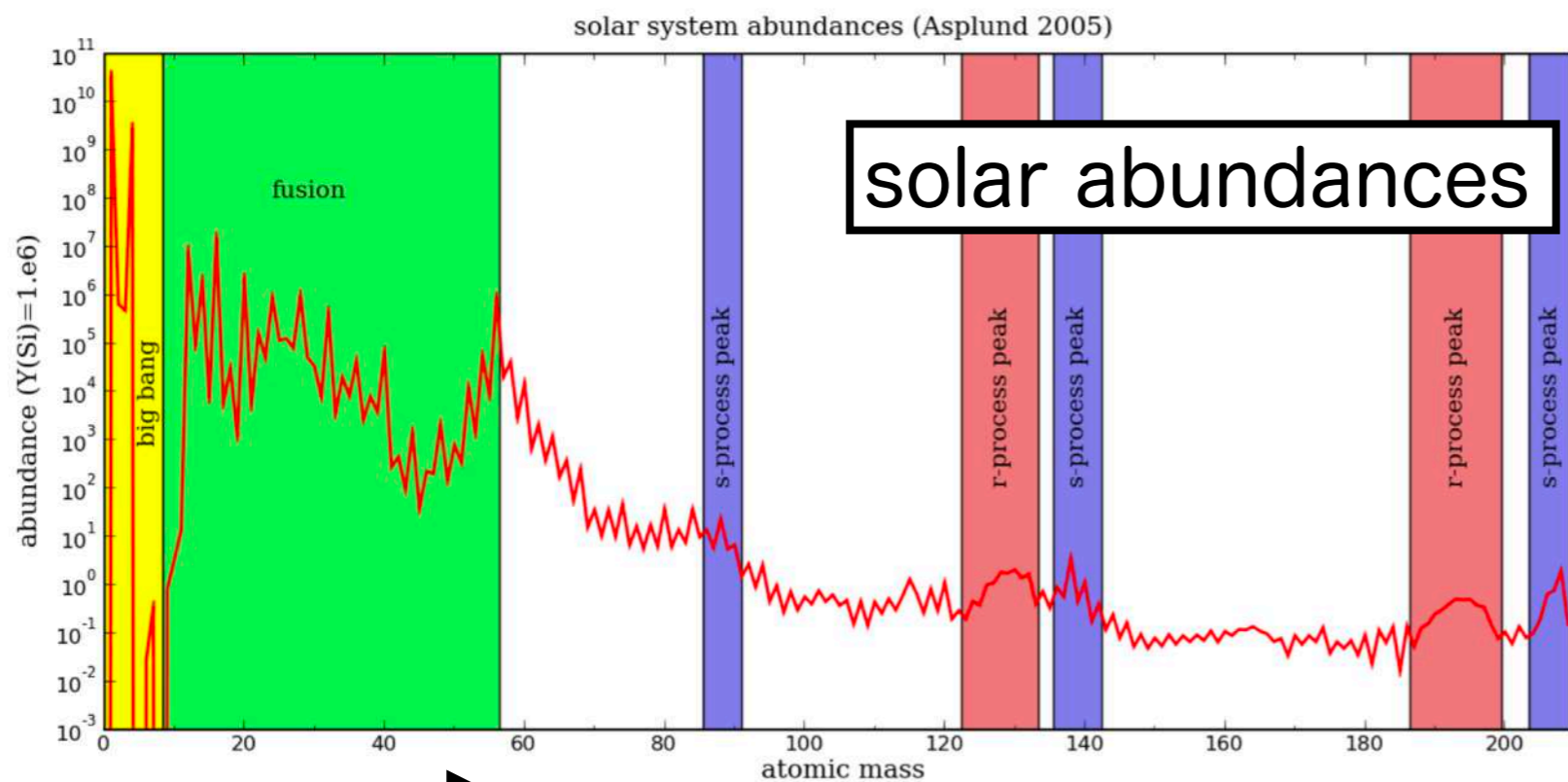
- B²FH paper: Burbidge, Burbidge, Fowler & Hoyle (1957)
- (and also, CRL-41: A. Cameron 1957)



① rプロセス元素とは何か？

- sプロセス理論をベースに「rプロセス元素」を計算
 - r核 = 太陽系組成 - s核 - (p核)
- 質量数 $A < 100$ は他の過程との競合する
(超新星・爆発的元素合成、弱sプロセスなど)

Cowan+2019

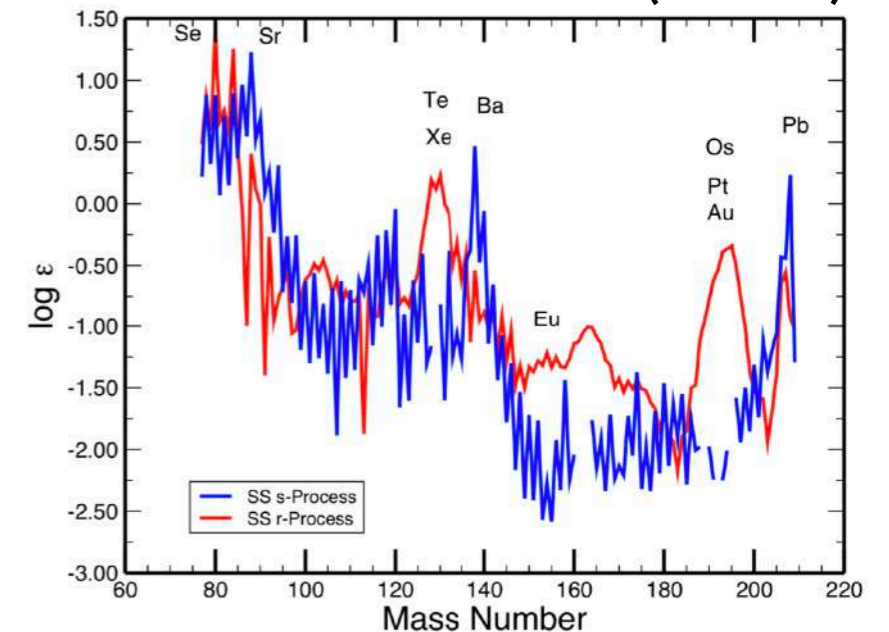


星の進化



超新星爆発

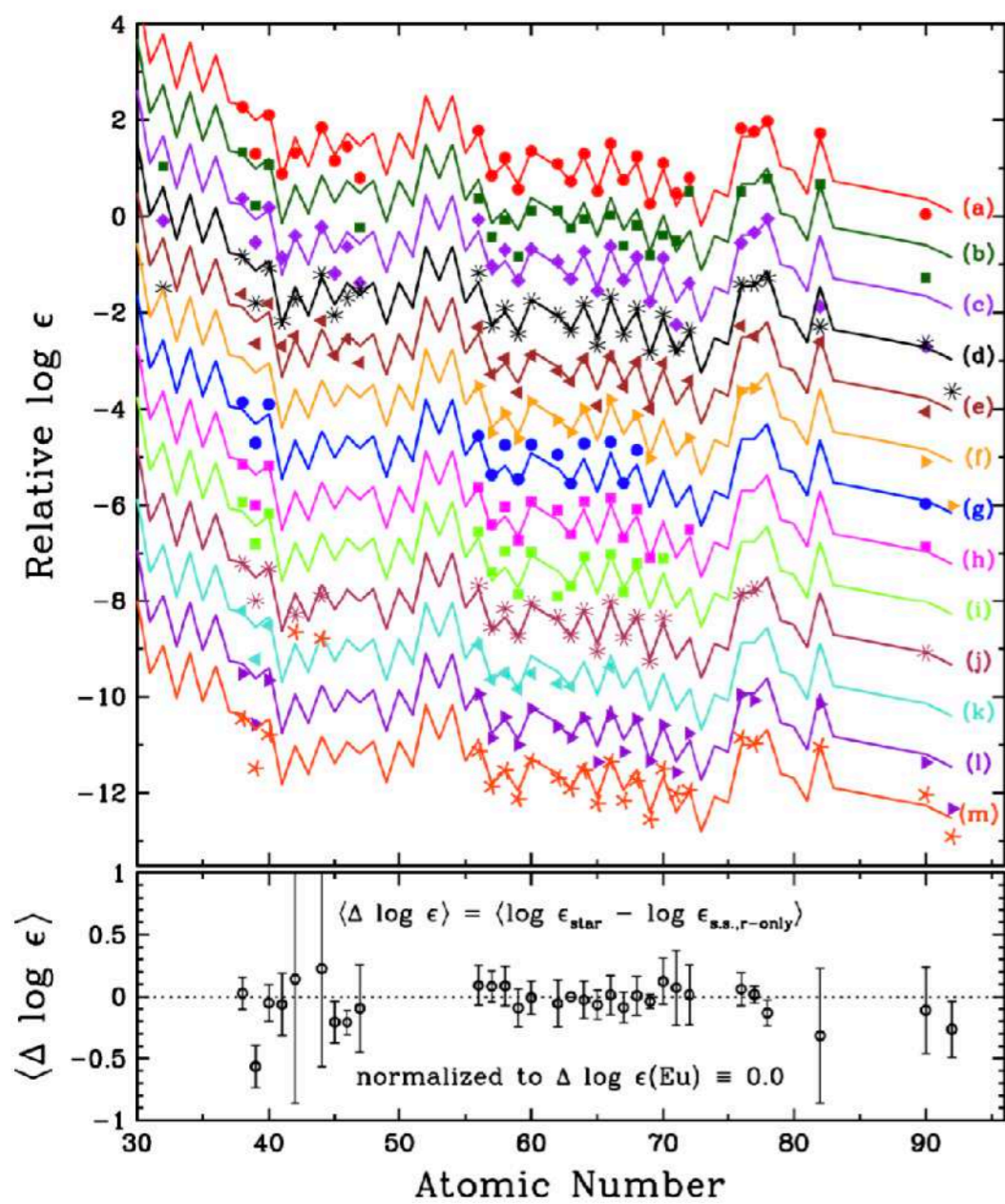
Cowan&Thielemann(2004)



① rプロセス元素とは何か？

本研究会の最終セッション
(24日午後)のテーマ

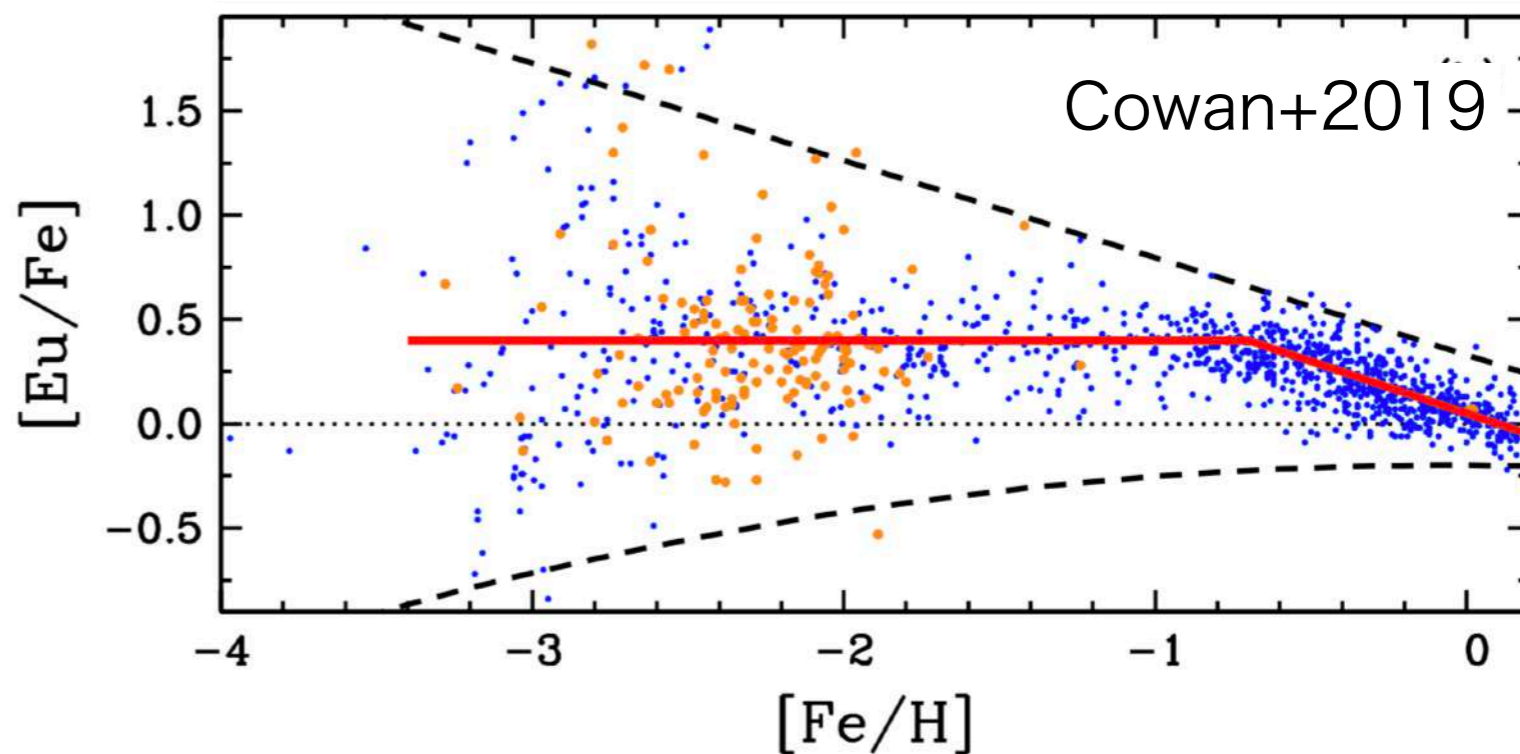
金属欠乏星での
rプロセス元素パターン



Cowan+2019

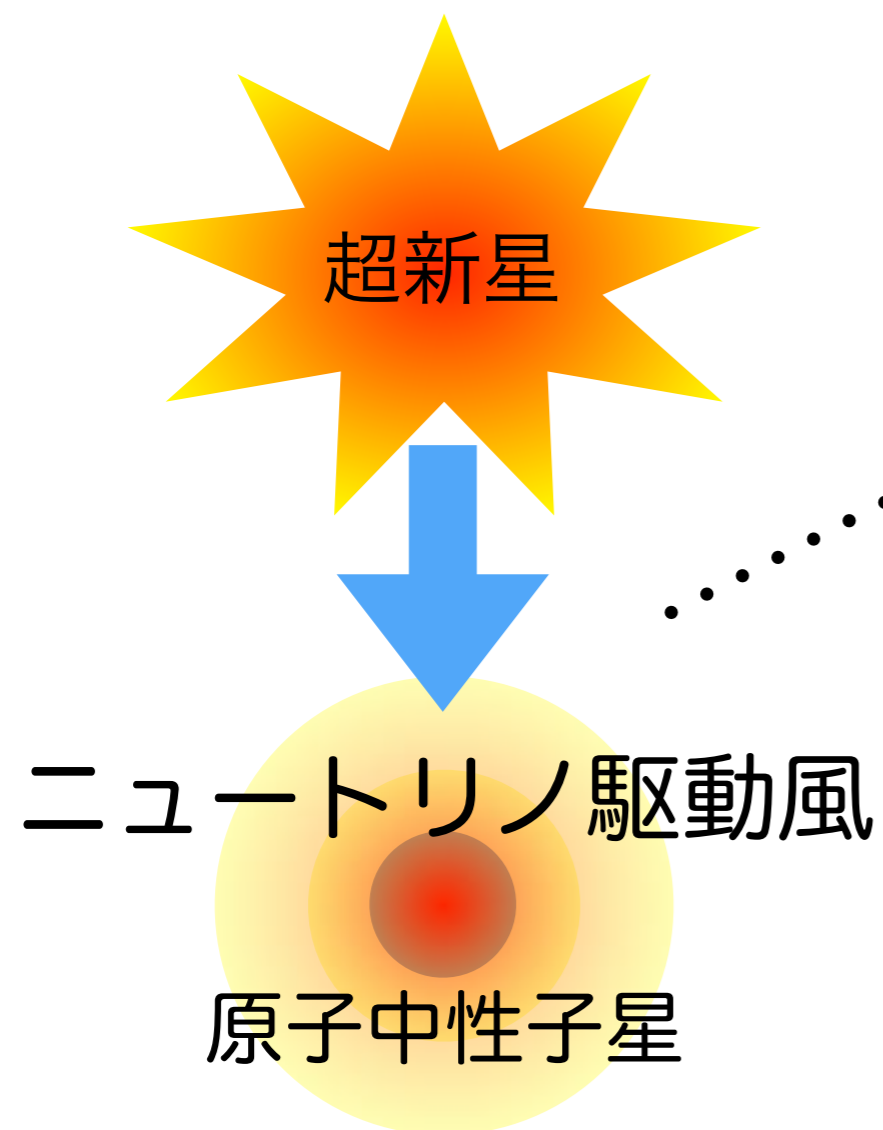
- 金属欠乏星の元素組成観測
→ 一回のrプロセスイベント
- 様々な金属量での元素観測
→ rプロセス元素の時間進化

銀河系でのrプロセス元素 (Eu) の進化

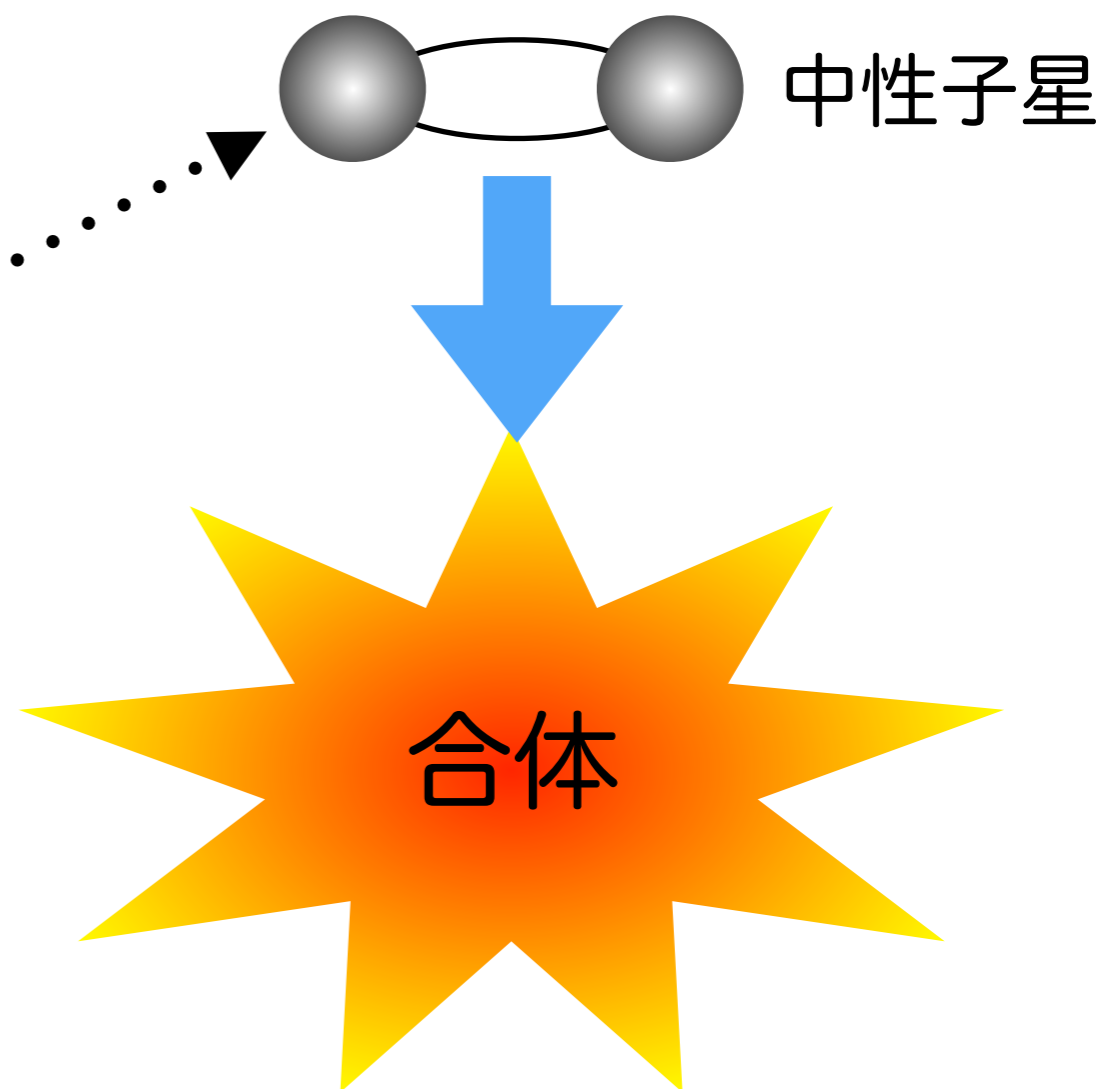


② rプロセスが起こる天体現象は何か？

(重力崩壊型) 超新星？



連星中性子星合体



- ・直接観測なし
- ・理論的な困難
- ・(十分に中性子過剰でない)

キロノヴァによって
rプロセスの「現場」
が観測？ (GW170817)

② rプロセスが起こる天体現象は何か？

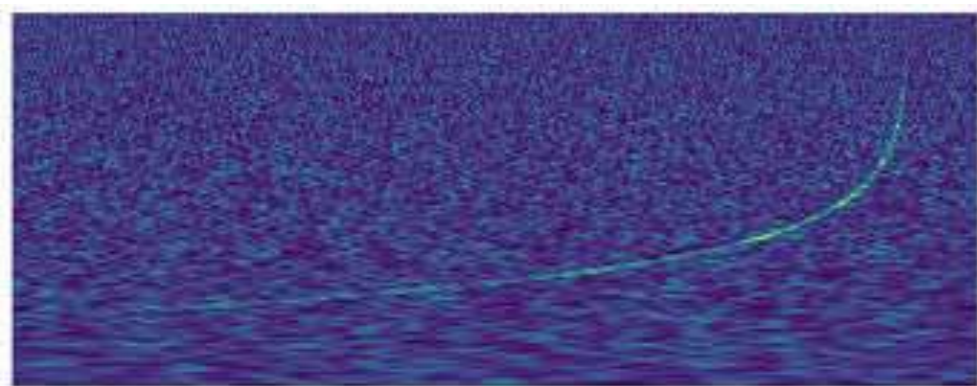
詳細は次セッションにて

電磁波対応天体キロノヴァの発見（確認）

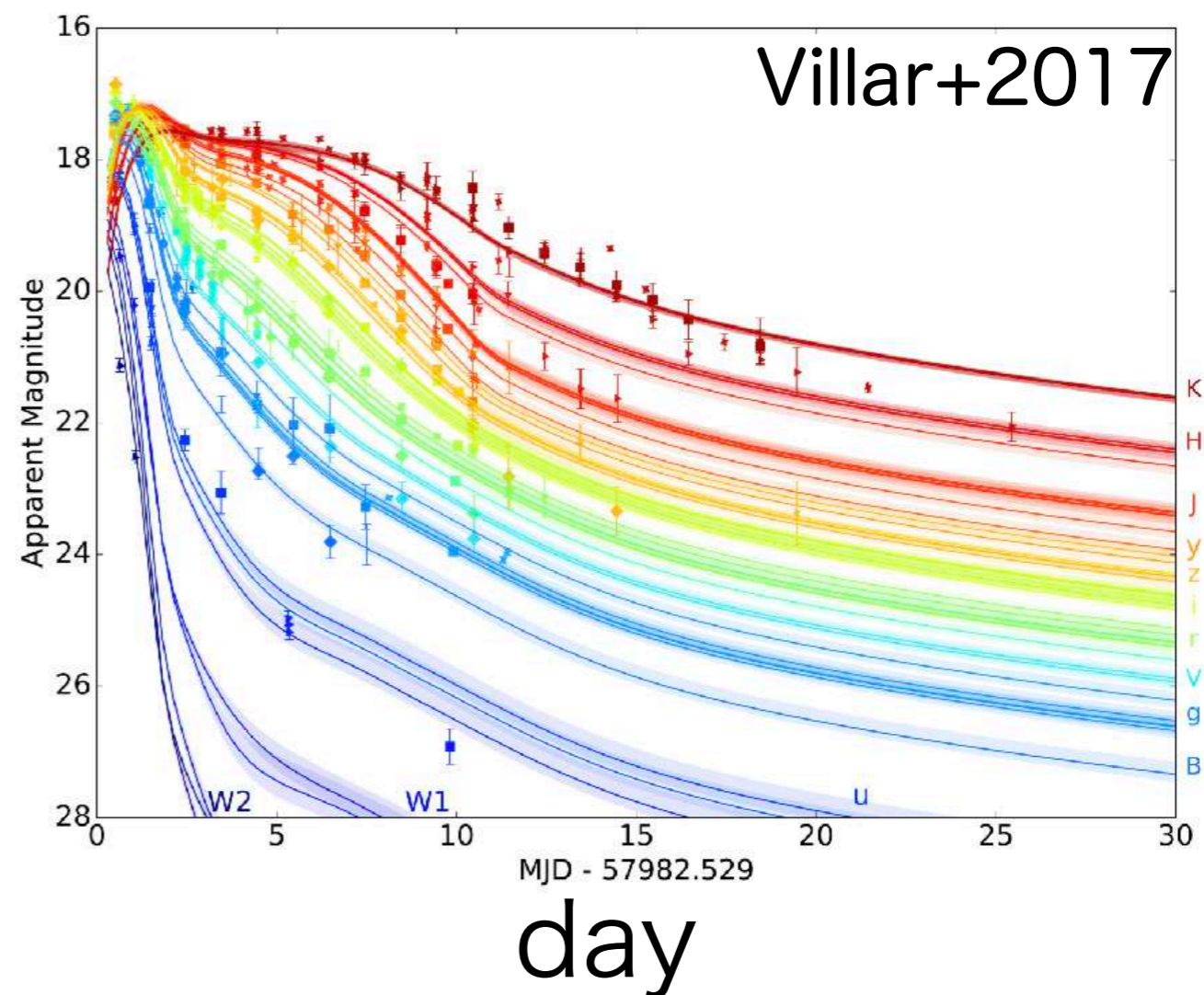
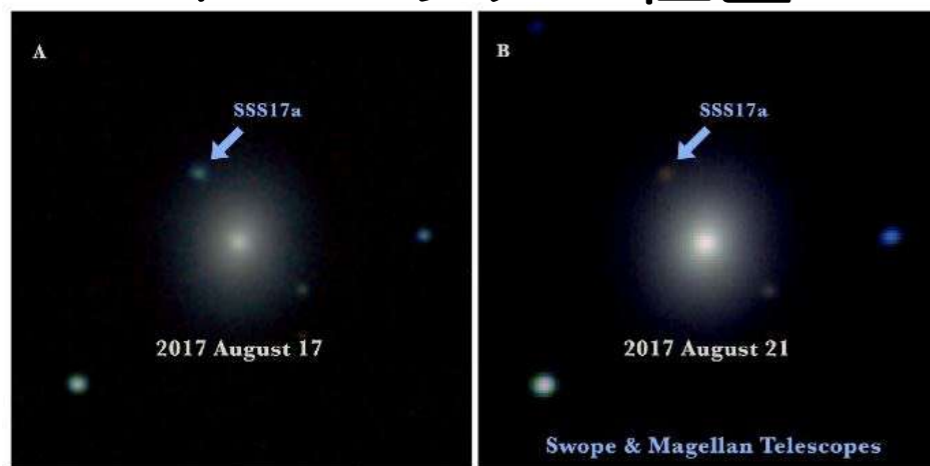
→ rプロセス（の崩壊熱）を熱源

重力波シグナル

光度曲線



キロノヴァの位置

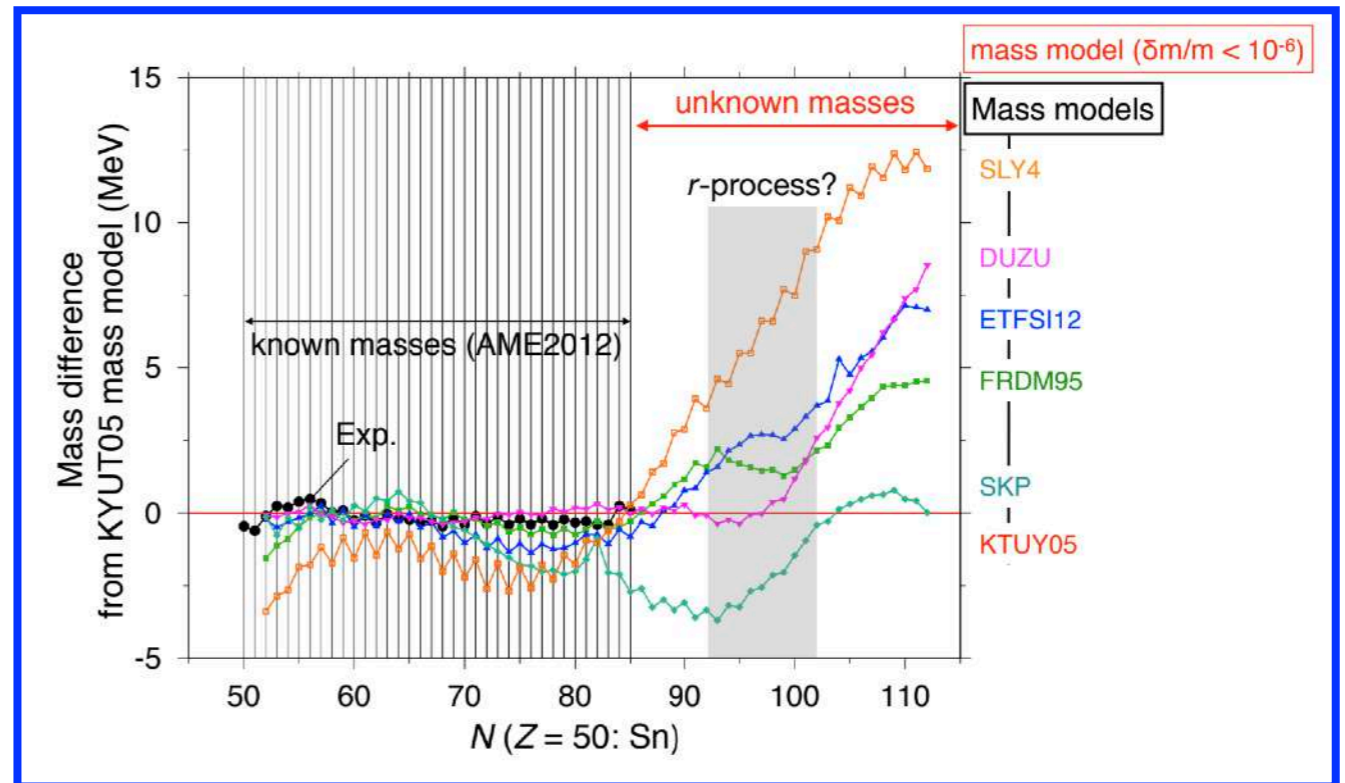


- GW170817や今後のイベントで何が期待されるのか？
- rプロセス天体 = 中性子星合体・キロノヴァ・ γ 線バースト??

③ 素過程（核物理）は分かっているか？

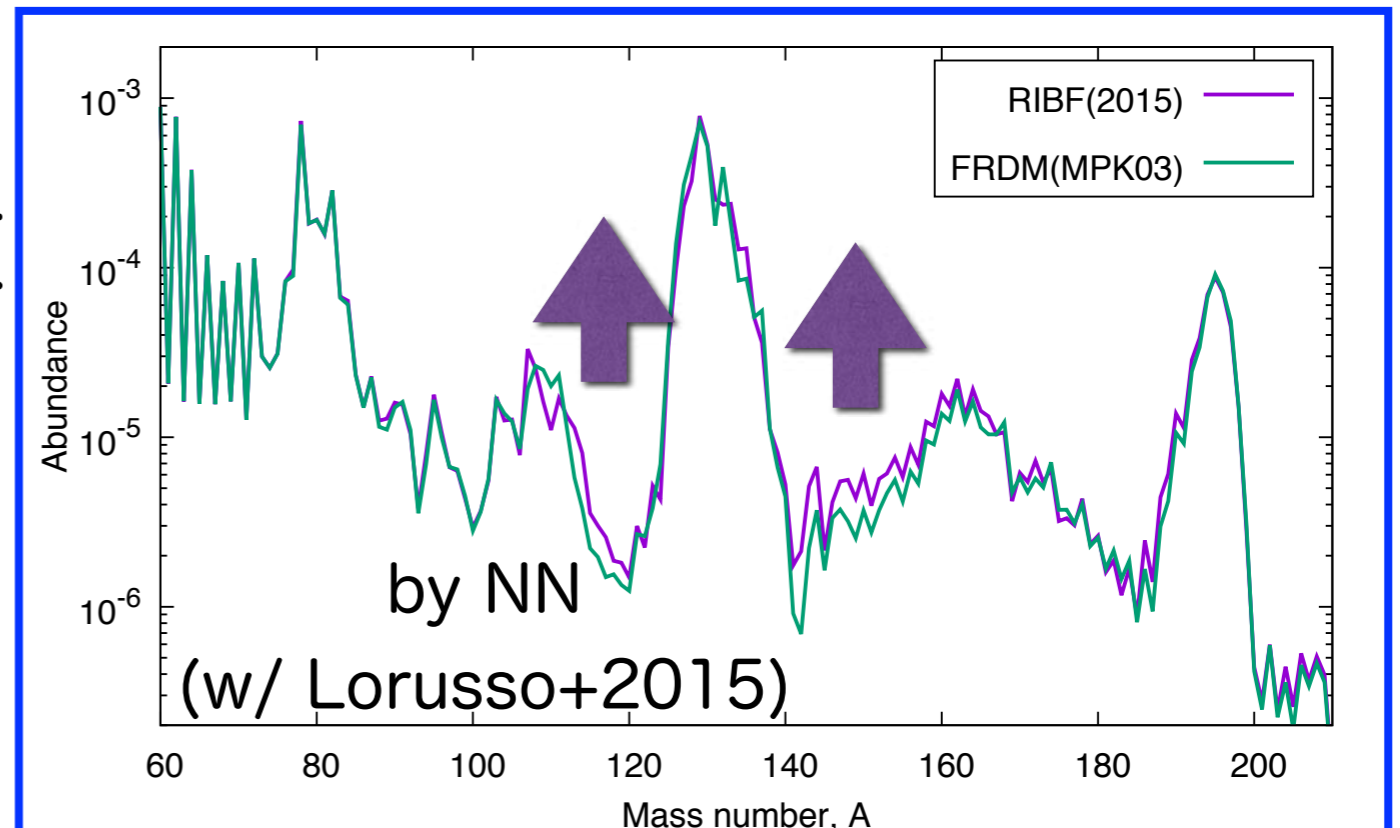
質量公式

実験値にはよく合う
(合わせられる) が、
「rプロセス領域」
では一致しない。



β 崩壊

理研RIBFにより、中重核
から軽いrプロセス核に
のみ ($A \sim 100$) 到達



※加えて、核反応（中性子捕獲）や核分裂にも不定性

rプロセス計算の「信頼性」

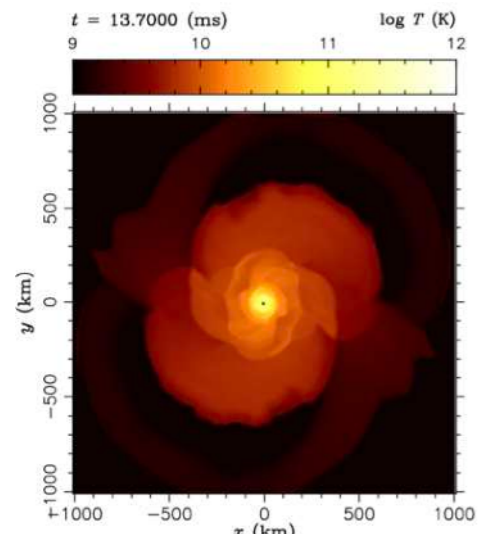
※研究の流れのイメージ

天体シミュレーション

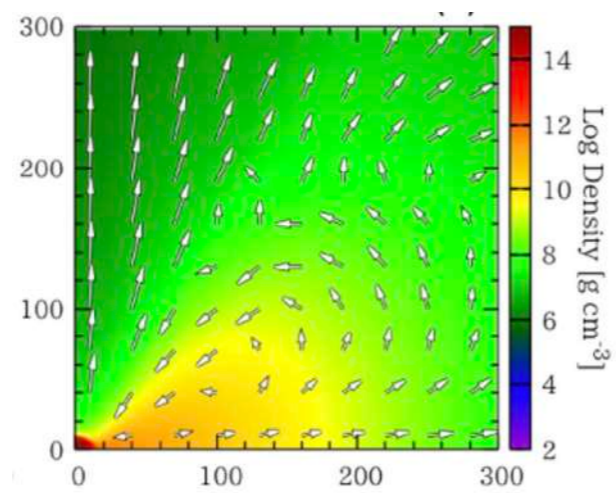
元素合成シミュレーション

天体環境での核反応ネットワーク

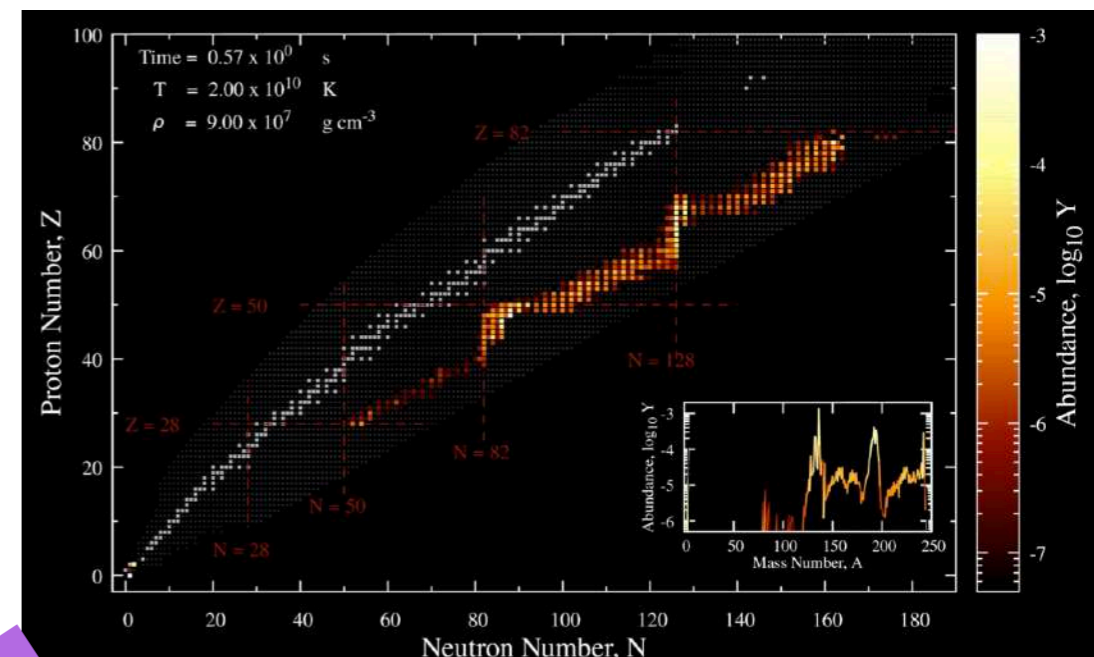
中性子星合体など様々なケース



by Sekiguchi



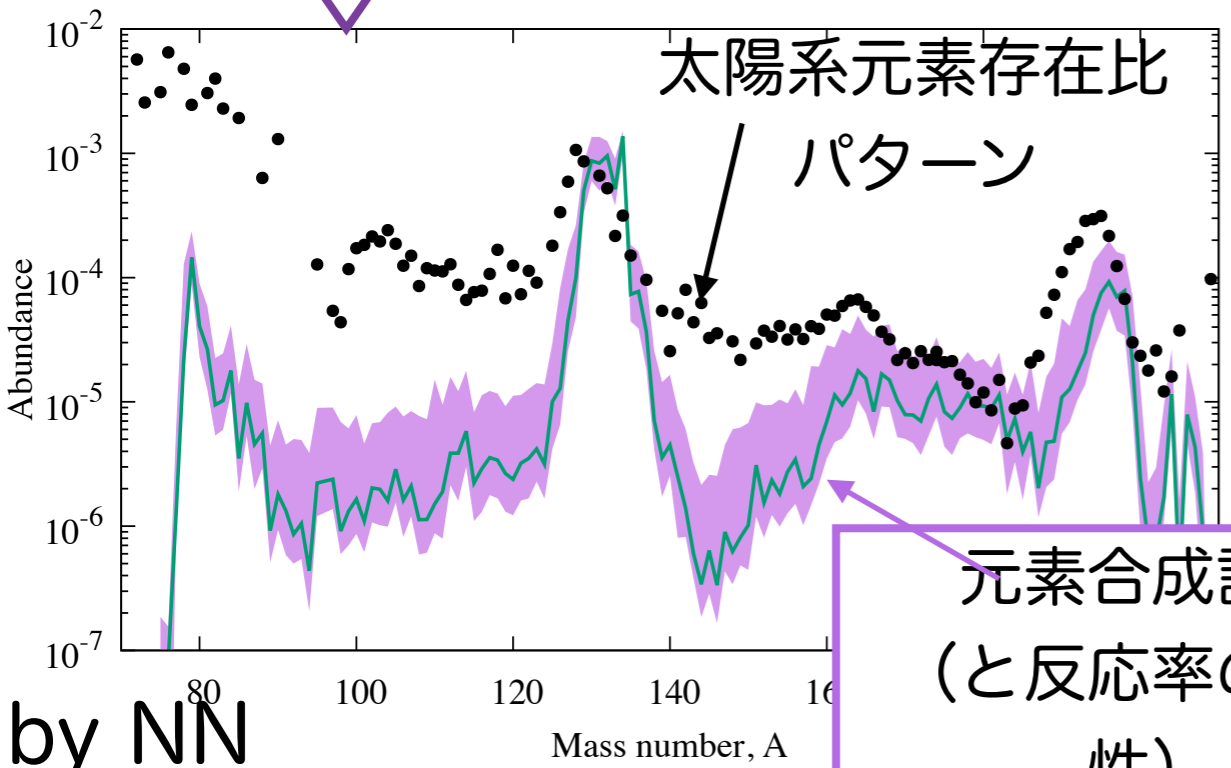
by Fujibayashi



by NN

観測量との比較

- 宇宙での元素組成との比較
 - キロノバの光度曲線 など
- 全てにおいて「不確定性」が影響：
天体モデルや核反応・崩壊率



元素合成計算
(と反応率の不確
定性)

元素合成を軸にミクロとマクロの物理がつながる

