「高エネルギー現象で探る宇宙の多様性I」東大宇宙線研 2021年10月18日-19日

### 宇宙における元素の起源と進化: rプロセスを中心に



#### 理化学研究所

CPR・長瀧天体ビッグバン研究室

& 仁科加速器科学センター



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

<u>B<sup>2</sup>FH paper</u>: Burbidge, Burbidge, Fowler & Hoyle (1957)
 (and also, CRL-41: A. Cameron 1957)



#### <u>鉄より重い元素</u>



・鉄より重い元素は、重い元素同士の核融合で生成されない。

・鉄よりも重い元素は、元素パターンの特徴から3種類に分類される
 ・それぞれのパターンは、s, r, p プロセスという元素合成により
 「同時に」生成される。(複数の重ね合わせかもしれない)



・ 鉄より重い元素は、重い元素同士の核融合で生成されない。

- ·鉄よりも重い元素は、元素パターンの特徴から3種類に分類される
- ・それぞれのパターンは、s, r, p プロセスという元素合成により
  - 「同時に」生成される。(複数の重ね合わせかもしれない)



#### <u>太陽系におけるs/r/pプロセス元素</u>

・太陽の組成(光球):天体観測 → 元素の組成(化学的性質) Abundance ・隕石の質量分析:太陽系、地球化学 → 同位体比 ・原子核の性質 (核図表上の位置) → いくつかの s/r/p 核が同定 → sプロセスの理論でs, r, s/r, p 核が決定 "太陽系 s" = (純粋な s 核) + (s-process 計算) "太陽系 r" = (太陽系組成) - ("太陽系 s") 太陽系 p = p過剰核 (n deficient) p-process isotopes (おそらく単一の合成過程ではない)





#### Solar neutron-capture elements





目次

#### ・ <u>rプロセスの基礎</u>

- ・ 古典的rプロセスから元素合成ネットワークへ
- ・ 天体モデルから元素合成へ

#### ・ <u>中性子星合体とrプロセス:GW170817を中心に</u>

- ・ 重力波とキロノヴァの観測
- ・ 理論モデルの成功

#### ・ <u>rプロセス天体と銀河の化学進化</u>

- ・ 元素の観測と多様性
- ・ rプロセスの進化と多様性

#### ・<u>原子核物理の問題</u>

- 不安定原子核実験
- ・ 原子核理論の不定性とrプロセスへの影響

#### ・ <u>まとめ</u>

## rプロセスの基礎

#### ・rプロセスの「メカニズム」 ・天体シミュレーションとrプロセス

#### <u>元素合成を軸にミクロとマクロの物理がつながる</u>



#### <u>rプロセスのより詳細について</u>

#### • <u>レビュー論文</u>

- Horowitz et al. (38 authors), JPhG, (2019)
- Cowan et al., Rev of Mod. Phys., (2021)
- <u>rプロセス研究会 (</u>ポストGW170817のrプロセス):rプロセス三部作





#### rプロセスに関係する核物理

・核物理の影響 ・<u>"古典的"解法:(n,γ)/(γ,n)平衡、停滞点近似、</u> ①rプロセス経路:(n,γ)/(γ,n)平衡 → 原子核の質量 ②rプロセス組成:経路上の $\beta$ 崩壊率(の比)  $\rightarrow \beta$ 崩壊 (組成)/(β崩壊半減期)=(一定) ③崩壊過程: $\beta$ 遅延中性子放出によりスムーズに  $\rightarrow \beta$ 遅延崩壊 (核分裂:扱えない?) → 核分裂 ①中性子捕獲の逆反応(光分解)はdetailed balanceより:  $\lambda_{\gamma}(Z,N) \propto T^{3/2} \exp\left[-\frac{S_n(Z,N)}{kT}\right] \langle \sigma v \rangle_{(Z,N-1)}$ 中性子分離エネルギー 中性子捕獲率 |rプロセス経路=(n,γ)と(γ,n)が釣り合う点←質量で決定|

② 経路上の組成

隣り合う核のβ崩壊率の比で決まる(省略);

(安定核の中性子捕獲率により決まるsプロセスと対照的)

#### <u>古典的rプロセス</u> <u>(n,g)⇄(g,n)平衡化での「経路」付近の組成比</u>



<u>β崩壊による陽子数(Z)の上昇</u>



それぞれのZ(同位体)では平衡 ベータ崩壊でZを変える (中性子捕獲と逆反応が十分速い)

 $\frac{dn(Z)}{dt} = \lambda_{Z-1}n(Z-1) - \lambda_Z n(Z) \quad \text{where} \quad \lambda_Z = \sum_A n(Z,A)\lambda_\beta(Z,A)$ 

#### rプロセスに関係する核物理





※天体環境(の成分)で、(n,g)/(g,n)平衡の達成具合が異なる。 → 元素合成の「メカニズム」が(定量的に)異なる。

#### r-process nucleosynthesis "flow"



<u>中性子捕獲・β崩壊のタイムスケール</u>



 $\begin{array}{ll} (1) \rightarrow \blacktriangle : (n, \gamma) \rightleftharpoons (\gamma, n) \& \underline{\beta} \text{-decay} \\ (2) \blacktriangle \rightarrow \bigstar : \underline{\tau}(n, \gamma) < \tau(\beta \text{-decay} + \beta_n) \\ (3) \bigstar \rightarrow : \underline{\tau}(n, \gamma) > \underline{\tau}(\beta \text{-decay} + \beta_n) \\ \end{array}$ 

#### r-process: nucleosynthesis mechanism





#### Physical conditions for the r-process

- 中性子化(low Y<sub>e</sub>):電子捕獲(p + e<sup>-</sup> → n + v<sub>e</sub>) vs.ニュートリノ吸収

$$Y_e = Y_{p} = \Sigma(A_i/Z_i)X_i \sim N_p/(N_n + N_p)$$
  
低  $Y_e = 中性子過剰$ 

- 種核形成 (参考:Hoffman et al. 1997)

- ・中性子捕獲のための種核:A~100 程度
- ・<u>種核生成の起点:  $\alpha + \alpha + n \rightarrow {}^{9}Be$ ;  ${}^{9}Be + \alpha \rightarrow {}^{12}C + n$ )</u> (中性子過剰<u>でなければ</u>、トリプル  $\alpha + \alpha + \alpha \rightarrow {}^{12}C$ ) ・第3ピーク生成の条件: n/seed > 100

・種核を作った上で、自由中性子を残す

※エントロピー:温度に対して密度「逆数」

#### <u>rプロセスの元素合成計算の結果</u>



Ye

#### <u>重い核を生成するための条件</u>



Hoffmanの式と核反応ネットワーク計算の比較



#### <u>簡単なまとめ</u>

- ・<u>rプロセスに関する天体観測・原子核物理での事実</u>
  - ・太陽系組成に特徴的なパターンがある
  - ・金属欠乏星にも特徴的なパターンがある
  - ・核図表上で中性子過剰側の元素合成「経路」で説明 → 安定核上が経路のsプロセスと全て対比的。
- ・<u>rプロセス元素合成の「理論」</u>
  - ・ひとまず古典的rプロセスで理解 (n,g)平衡近似では、元素合成の経路は原子核の質量比で決まり、 生成量はベータ崩壊の半減期(の逆)で決まる。
  - ・現実的には核反応ネットワーク計算
    - ・崩壊、反応率の詳細な核データが必要
- ・<u>rプロセスの天体環境</u>
  - ・重いrプロセス核の生成条件(Yeへの依存が強い)
    - ・低Ye、(適度に)高エントロピー、(適度に)低い膨張時間
  - ・現実的には天体シミュレーションで決定(膨張過程は割と単純)

## 中性子星合体とrプロセス: GW170817を中心に

·Wanajo, Sekiguchi, NN+(2014), ApJL

• Fujibayashi, Kiuchi, NN+(2018), ApJ

#### Astronomical site(s) of the r-process



#### The "kilonova/macronova" with GW



The electromagnetic counter part of GW170817 (17. Aug. 2017) Energy source? —> <u>radioactive decay</u> (e.g,  $\beta$ ,  $\alpha$  & fission etc.) of neutron-rich matter during r-process nucleosynthesis

NGC4993 (39.5Mpc)



By Magellan telescope; Drout+2017, Science

#### Sr in the remnant



Watson+2019 Nature

#### "Classic" view: dynamical + post-merger



tidal ejection of "pure" <u>n-rich matter with Y<sub>e</sub> << 0.1</u> strong fission recycle



Korobkin+ 2012 (e.g., Goriely+ 2011, Rosswog+ 2013)

#### Modern view: dynamical + post-merger



#### The r-process in dynamical ejecta



#### **NS-NS merger: post-merger evolution**

Ye: electron faction (green: heavy nuclei; blue : lighter nuclei)

post-merger ejecta <u>Y<sub>e</sub> evolution</u> based on 2D hydro (Fujibayashi+NN+2018)







#### Simulation models vs Kilonova



heavy r-process elements (= lanthanide-rich) w/ high opacity

- $\rightarrow$  peak temperature becomes low (in low density)
- $\rightarrow$  late IR peak

```
(\Leftrightarrow La-poor -> early "blue" peak)
```



30

#### **Short Summary**

- <u>NS mergers can produce (all) r-process elements in</u>
  - based on "Modern" hydrodynamical simulations
    - dynamical ejecta: lanthanide- and actinide-rich
    - post-merger ejecta: lanthanide poor
- observations confirmed theoretical models
  - kilonova w/ GW170817
    - the light curve: blue -> red
    - detection of Sr in the remnant?
      (indicate "weak" r-process components)

# rプロセス天体と 銀河の化学進化

- ·Winteler+NN+ (2012) ApJL
- ·NN, Takiwaki & Thielemann (2015) ApJ
- Tsujimoto & NN (2015) ApJL
- ·NN, Sawai, Takiwaki+(2017) ApJL
- ·NN, Matsumoto+, in prep.
- ·Hasegawa+NN+, in prep.

金属欠乏星と「銀河考古

Cowan+2021

- many r-rich Galactic halo stars show the solar r-pattern
- r-process has happened from the early Galaxy
- astrophysical models reproduce this common pattern (Z>40; A>90)



金属欠乏星と「銀河考古学」 Cowan+2021より



#### Multiple r-process sources in GCE?

NS mergers cannot explain early chemical evolution

of r-process elements, e.g., Eu?

 $\rightarrow$  shorter delay time or another source

comprehensive GCE analysis after GW170817 (e.g., Côté+2018)

standard DTD cannot explain

Eu evolution? (Côté+2018)

 $\rightarrow$  single r-process source scenario fails to explain



Wehmeyer+(2015,2019):

different event rates for MR-SNe



#### Eu evolution by MR-SNe in dSph galaxies



-2.5

[Fe/H]

-2

-1.5

-3

-3.5

-1

-2

-3

-4

-5

[Eu/H]



#### GCE models suggest:

- event rate: 0.5 % of CC-SNe
- large Eu ejection:  $\sim 10^{-5}$  M<sub>sun</sub>
- agree with our MR-SN models (e.g. NN+2015, 2017)



-1

#### What we learned from faint dwarf galaxies



#### cc-SNe as a long-expecting r-process site

Wanajo 2013



#### **Astrophysical r-process sites**



#### Magneto-rotational SN scenario



hypernova/jet-like SN

#### Magnetars

•strong magnetic field ~1015 G

- (~1 % of all neutron stars)
- Magneto-driven Supernovae?
  - •GRB central engine
  - •Hypernovae??
  - •Super luminous SNe

r-process

 $\cdot$  variety of r-process pattern in metal-poor stars

- can be rare 1%
- $\cdot$  Galactic chemical evolution
  - large DTD problem of NS mergers?
- needs external sources?
  - MR-SNe, hypernovae, "collapsars"?? (see, Wehmeyer+2015, Tsujimoto&NN 2015, Cescutti+2017, Siegel+2019, Kobayashi+2020 etc.)





#### magnetic-field amplification process?

#### axi-symmetric (2D); long-term, high-resolution







#### magnetic-field amplification process?

axi-symmetric (2D) w/ detailed  $\nu$ -transport





#### Various r-process in several jet SNe

very neutron-rich matter in SN core ("proto-magnetar")

significant effect of e-capture (off  $\beta$  -equilibrium)

$$Y_{e} = Y_{"p"} = \sum \frac{A_{i}}{Z_{i}} X_{i} \sim \frac{N_{p}}{N_{n} + N_{p}} \qquad \qquad Y_{e} = 0 \longleftrightarrow Y_{e} = 1 \\ \text{only n} \qquad \text{only p}$$



solar r



metal-poor stars



#### **Brief summary: MR-SNe**

- MR-SNe are (still) possible r-process sites
- However, strong magnetic jet explosions are required to produce heavy r-process elements?
  - · difficult for "canonical" progenitors and MHD conditions  $\rightarrow$  initial rapid rotation and strong magnetic fields?

We want to discuss possible "observational" properties of such events (if happened): r-process-jet supernovae.

long-term evolution of r-process ejection (propagation of r-process-rich ejecta in the progenitor)

#### <u>もう一つのアプローチ:超新星の光学観測で探す</u>

- ・rプロセスの"直接観測"
  - ・中性子星合体のキロノヴァ (GW170817)が唯一
    - ・Srの同定 (Watson+2019)
  - ・重力波による探索
- ・<u>超新星でのrプロセスは未確認</u>
  - ・しかし、多くの超新星(特異なものも)観測されている ・rプロセスの痕跡が発見できるのか?

#### 長谷川さんトーク



## 原子核物理の不定性と 元素合成への影響

**Collaboration with** 

T.Rauscher, R. Hirschi, G. Cescutti, A. Murphy



#### <u>共同研究者</u>

T. Rauscher (Basel/Hertfordshire), R. Hirschi (Keele),

G. Cescutti (INAF), A. St. Murphy (Edinburgh) and guest authors



不定性大

- ・rプロセス → ここで議論
  - ・<u>rpプロセス</u> → 別の研究

#### <u> 文献</u>

- Rauscher, NN+2016, MNRAS 463 NN+2017, MNRAS 469
- NN+2018, MNRAS 474

- Cescutti, Hirschi, NN+2018, MNRAS 478

- NN+2019, MNRAS 489



※「観測により反応率を制限」「反応率測定により宇宙の謎を解明」系の研究は、片方の軸によってないと成り立ちにくい?

#### 「rプロセスのインプット」に関する問題点:

![](_page_53_Figure_1.jpeg)

※加えて、核反応(中性子捕獲)や核分裂にも不定性

![](_page_54_Picture_0.jpeg)

![](_page_54_Figure_1.jpeg)

Mumpower+2015

![](_page_54_Figure_3.jpeg)

#### Monte-Carlo network code

- Monte-Carlo framework
  - PizBuin MC-driver
    (developed by Rauscher, NN, Hirschi)
  - a simple "Brute-force" approach
  - parallelized by OpenMP for shared memory architectures
     (paralleled easily, but harder debugging. . .)

![](_page_55_Picture_5.jpeg)

Piz Buin (mountain)

- <u>Nuclear Reaction network</u>
  - Network solver:
    - WinNet: the latest Basel network, Winteler+, 2012
  - Reaction rates:
    - Reaclib: (Rauscher & Thielemann 2000)
    - T-dependent beta-decay (Takahashi & Yokoi 1987, Goriely 1999)
  - T-dependent uncertainty:
    - Provided by Reaclib format, based on Rauscher 2012 56

#### Impacts of (n,g) and *B*-decay

![](_page_56_Figure_1.jpeg)

![](_page_57_Figure_0.jpeg)

#### Individual impacts of rates

#### The impacts of rates on r-process abundances

中性子過剰の鉛の中性子捕獲率

※理研RIBF+東大CNSで実験計画(SAKURAプロジェクト)が進行中

 $\beta$ -decay & (n,g)

Х

X

140

120

0.3

0.2

0.1

-0.1

-0.2

-0.3

**´100** 

0

rcor

 $\beta$ -decay & (n,g) variation

![](_page_58_Figure_4.jpeg)

![](_page_58_Figure_5.jpeg)

Mass number. A

160

![](_page_58_Figure_6.jpeg)

$$\begin{array}{ccc} {}^{130}{\rm Sn(n,g)} & + \\ {}^{131}{\rm Sn(n,g)} & \times \\ {}^{132}{\rm Sn(n,g)} & \times \end{array}$$

![](_page_59_Picture_0.jpeg)

科研費プロジェクト始動(ポスドク公募予定)

![](_page_59_Figure_2.jpeg)

まとめ

- ・<u>rプロセスの基礎</u>
  - ・中性子過剰不安定核の性質・崩壊・核反応が重要
  - ・中性子過剰な天体環境で適切な物理環境が必要
- ・<u>連星中性子星合体</u>
  - ・GW170817によるrプロセスの確認
  - ・理論モデルの成功
    - → 今後の展開に期待(現状:本研究会のトーク)
- ・銀河の化学進化へ
  - ・中性子星合体シナリオに残された問題点
  - ・超新星起源が必要? →磁気駆動型超新星への(過剰な)期待
    →直接観測、あるいは制限が欲しい。(長谷川トークも)
- ・<u>原子核物理の不定性</u>
  - ・実験でrプロセス核に届き始めている(半減期、質量、反応率)
  - ・理論に頼るが、不定性は大きい。宇宙からの制限!
    - → 国内の協力関係も築けてきたので、ここから何かやりたい。(西村)