

稀少核種の精密質量測定による 重元素合成天体環境の解明

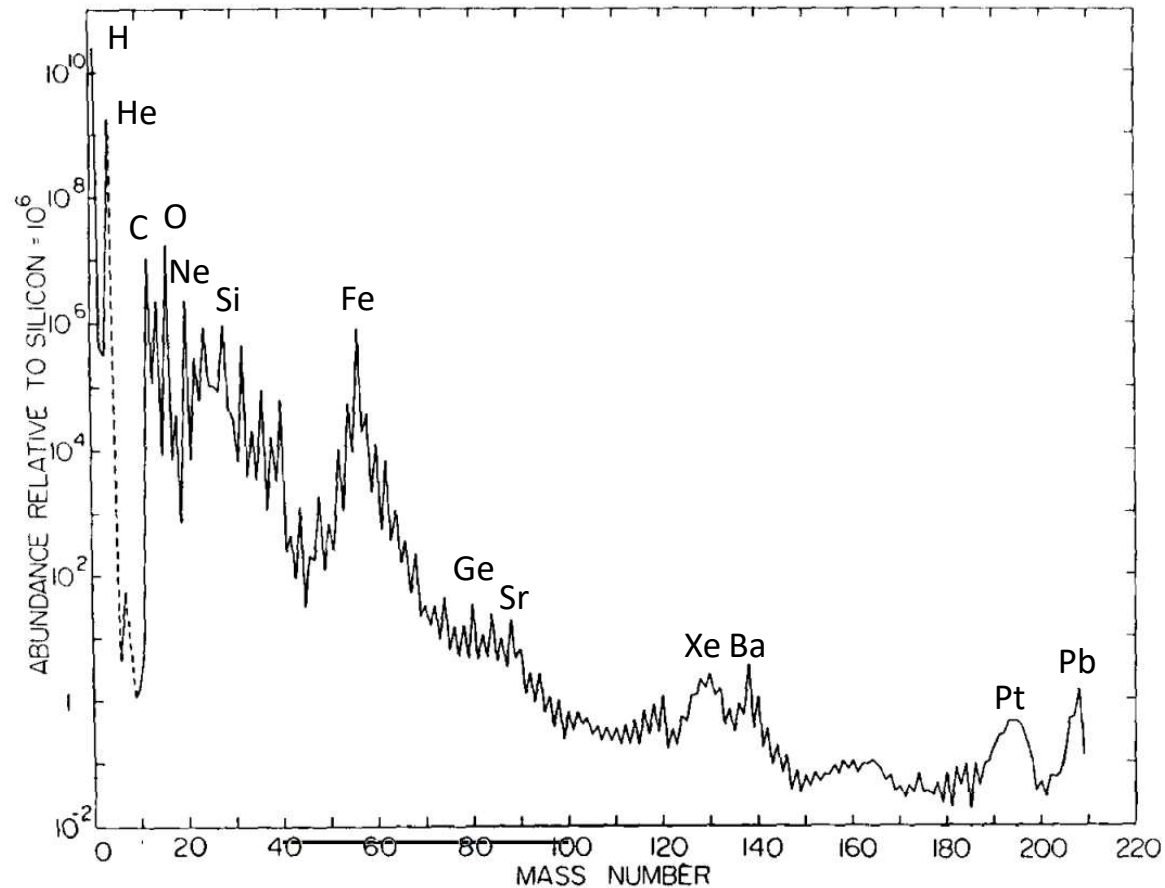
小沢研究室

向井もも

宇宙元素合成の概要

元素の存在比分布

J.J. Cowan et al., Phys. Rep. 208, 267 (1991).



隕石の化学分析
太陽の分光分析

- 恒星や爆発的な天体環境中での不安定核の合成が関与
- 特徴的なピークは合成される不安定核の性質と関連
- 原子核の性質を調べる -> 元素の起源を知る

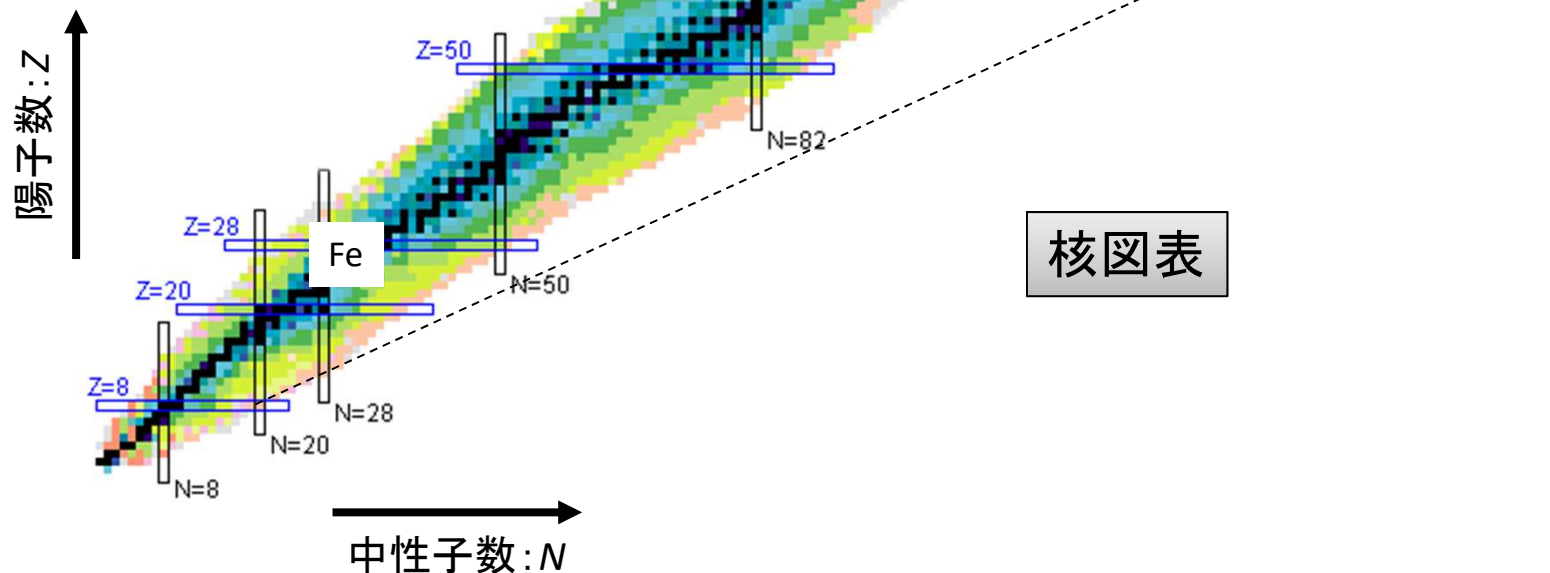
宇宙元素合成の概要

原子核の種類:

存在できる原子核 約6000個
発見されている原子核 約3000個
安定な原子核 約300個

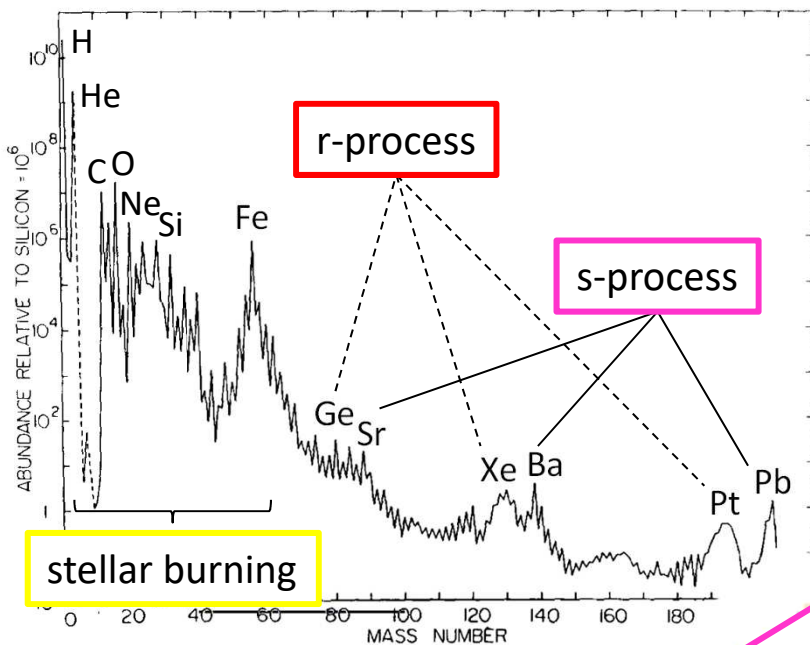
原子核の殻構造(魔法数):

陽子数 $Z = 8, 20, 28, 50, 82$
中性子数 $N = 8, 20, 28, 50, 82, 126$
核子がより強く束縛されている。
天体環境中での原子核の合成経路と強く関連している。

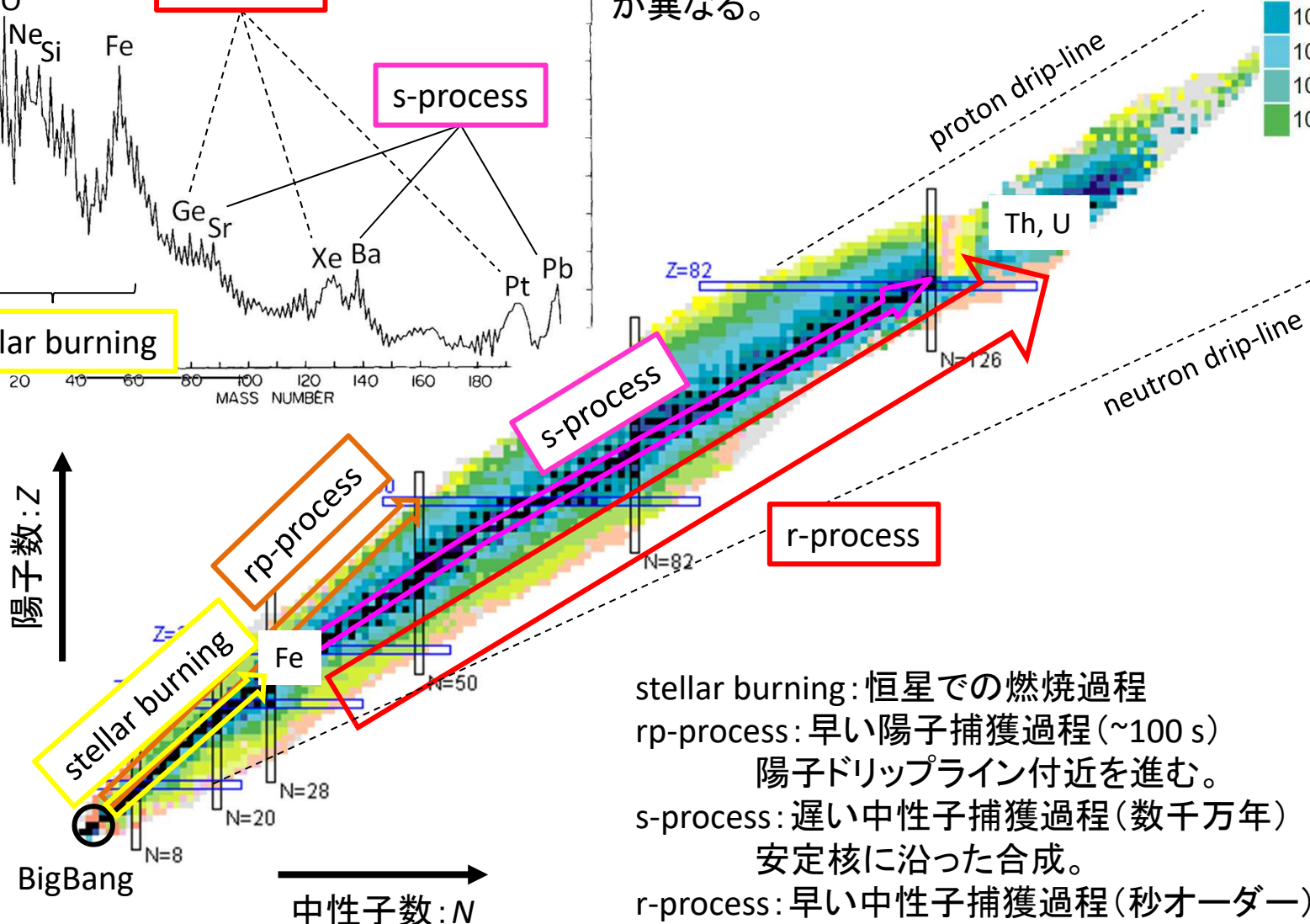
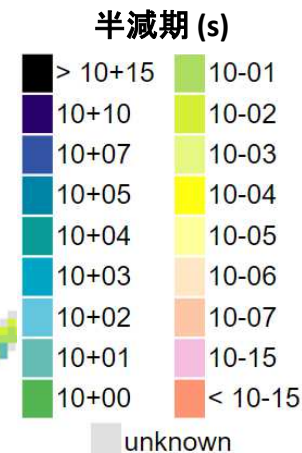


宇宙元素合成の概要

J.J. Cowan et al., Phys. Rep. 208, 267 (1991).



元素の起源となる合成過程は主に4つ。
各過程で天体環境、合成される原子核
が異なる。



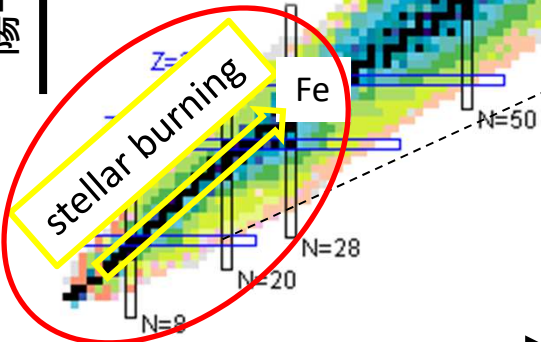
- stellar burning: 恒星での燃焼過程
- rp-process: 早い陽子捕獲過程 (~100 s)
陽子ドリップライン付近を進む。
- s-process: 遅い中性子捕獲過程 (数千万年)
安定核に沿った合成。
- r-process: 早い中性子捕獲過程 (秒オーダー)
非常に中性子過剰な不安定核が合成される。

宇宙元素合成の概要

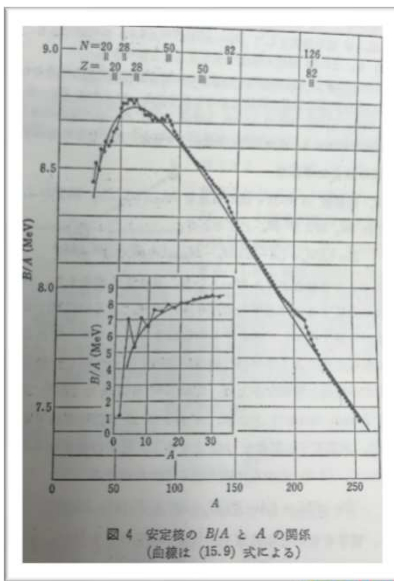
stellar burning:

恒星内での水素、ヘリウム、重元素燃焼
 結合エネルギーの大きな $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ までを生成。

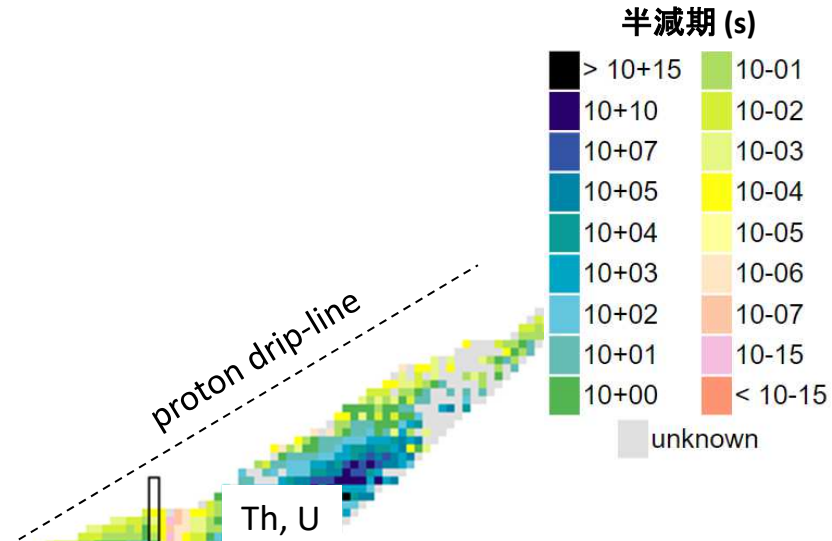
陽子数: Z



中性子数: N



原子核物理学
 (八木浩輔著、朝倉書店)



燃焼段階	おもな反応	おもな生成物	温度 (10 ⁸ K)
H	pp チェイン CNO サイクル	⁴ He ¹⁴ N	0.15-0.2
He	³⁴ He → ¹² C ¹² C + ⁴ He → ¹⁶ O + γ	¹² C ¹⁶ O	1.5
C	¹² C + ¹² C → { ²³ Na + p ²⁰ Ne + α	Ne, Na Mg, Al	7
Ne	²⁰ Ne + γ → ¹⁶ O + α ²⁰ Ne + α → ²⁴ Mg + γ	O Mg	15
O	¹⁶ O + ¹⁶ O → { ²⁸ Si + α ³¹ P + p	Si, P, S, Cl, Ar, Ca	30
Si	²⁸ Si + γ → ²⁴ Mg + α ²⁴ Mg + γ → { ²³ Na + p ²⁰ Ne + α 多くの反応 → 統計平衡	Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu	40

元素はいかにつくられたか(野本憲一編,岩波書店)

宇宙元素合成の概要

rp-process:

早い陽子捕獲過程

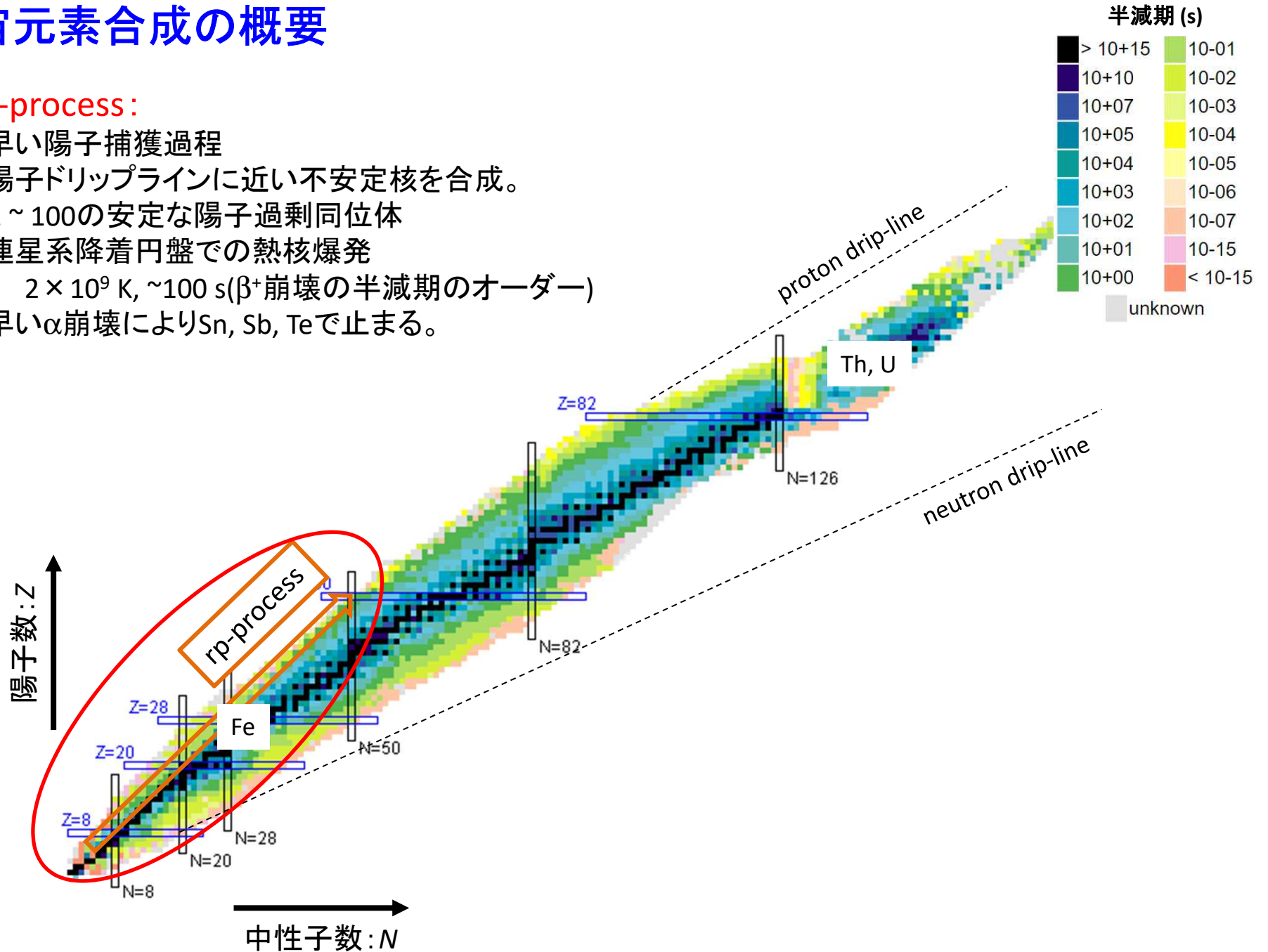
陽子ドリップラインに近い不安定核を合成。

A ~ 100の安定な陽子過剰同位体

連星系降着円盤での熱核爆発

2 × 10⁹ K, ~100 s(β⁺崩壊の半減期のオーダー)

早いα崩壊によりSn, Sb, Teで止まる。



宇宙元素合成の概要

rp-process:

早い陽子捕獲過程

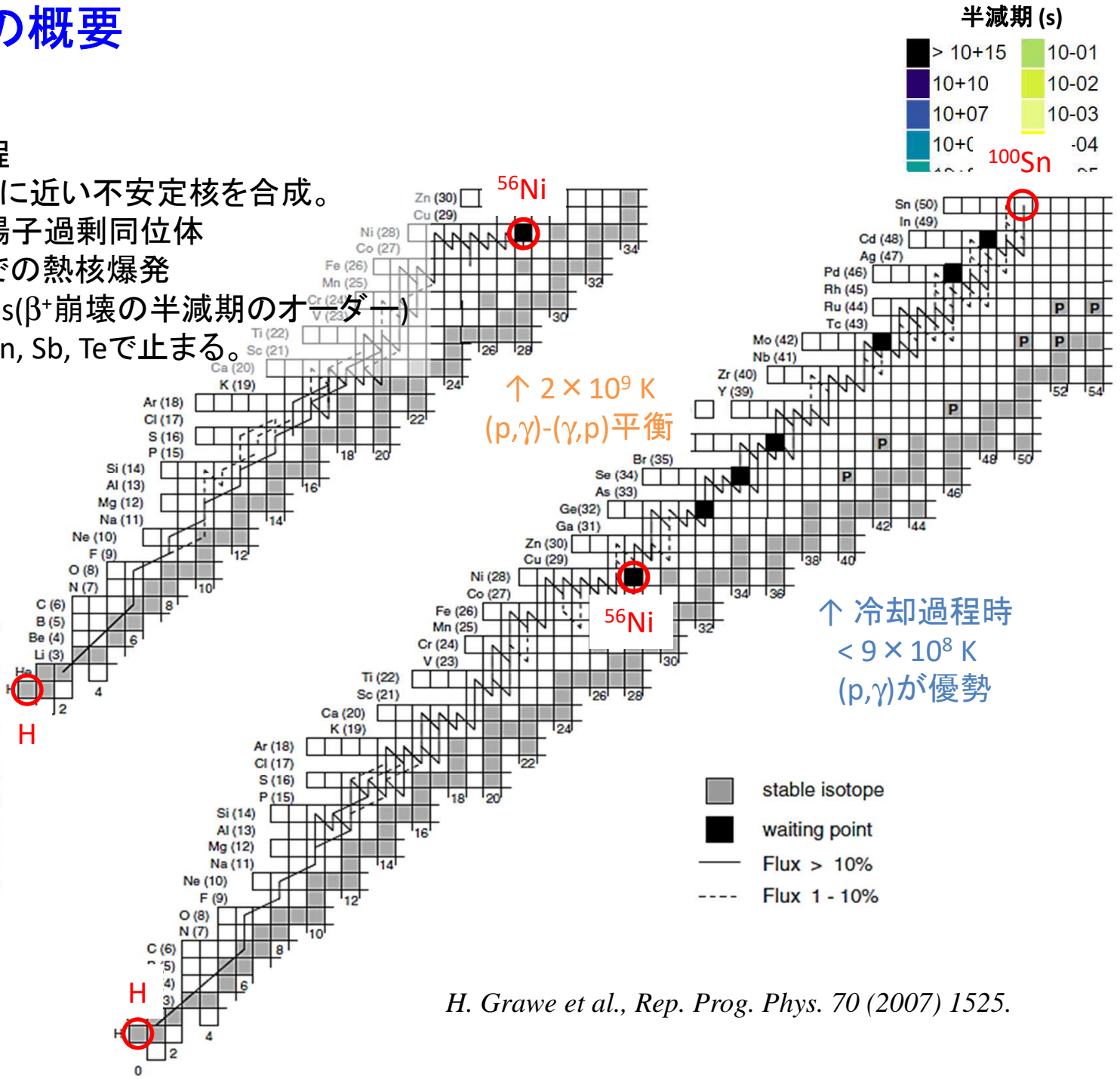
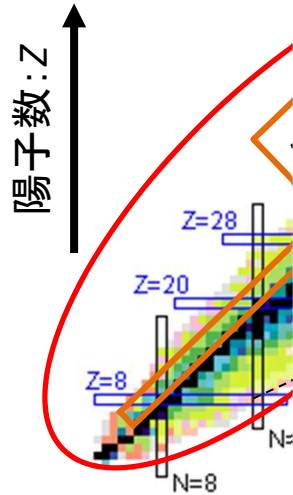
陽子ドリップラインに近い不安定核を合成。

A ~ 100の安定な陽子過剰同位体

連星系降着円盤での熱核爆発

2×10^9 K, ~100 s (β^+ 崩壊の半減期のオーダー)

早い α 崩壊によりSn, Sb, Teで止まる。



↑ 2×10^9 K
(p,γ)-(γ,p)平衡

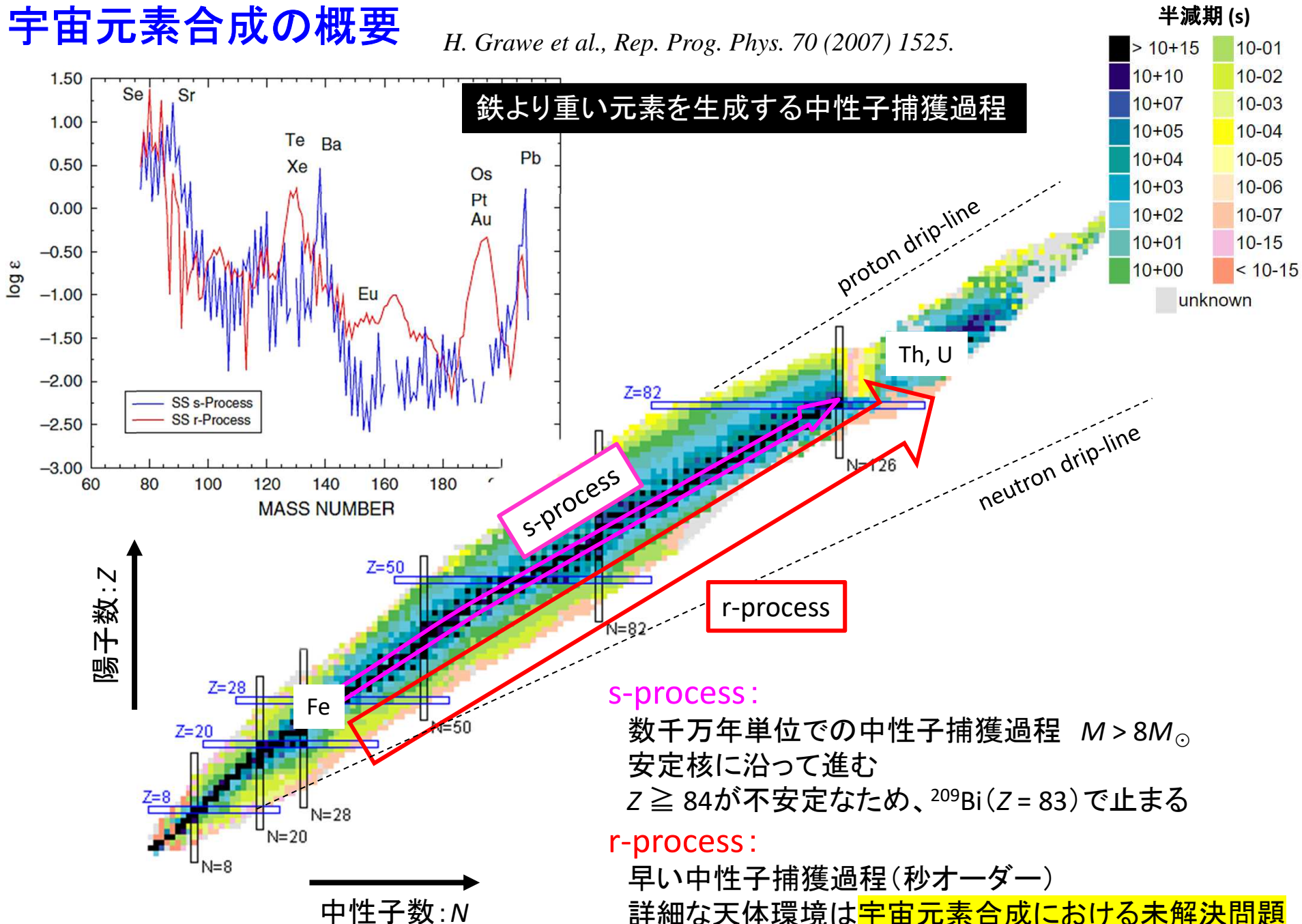
↑ 冷却過程時
< 9×10^8 K
(p,γ)が優勢

- stable isotope
- waiting point
- Flux > 10%
- - - Flux 1 - 10%

H. Grawe et al., Rep. Prog. Phys. 70 (2007) 1525.

宇宙元素合成の概要

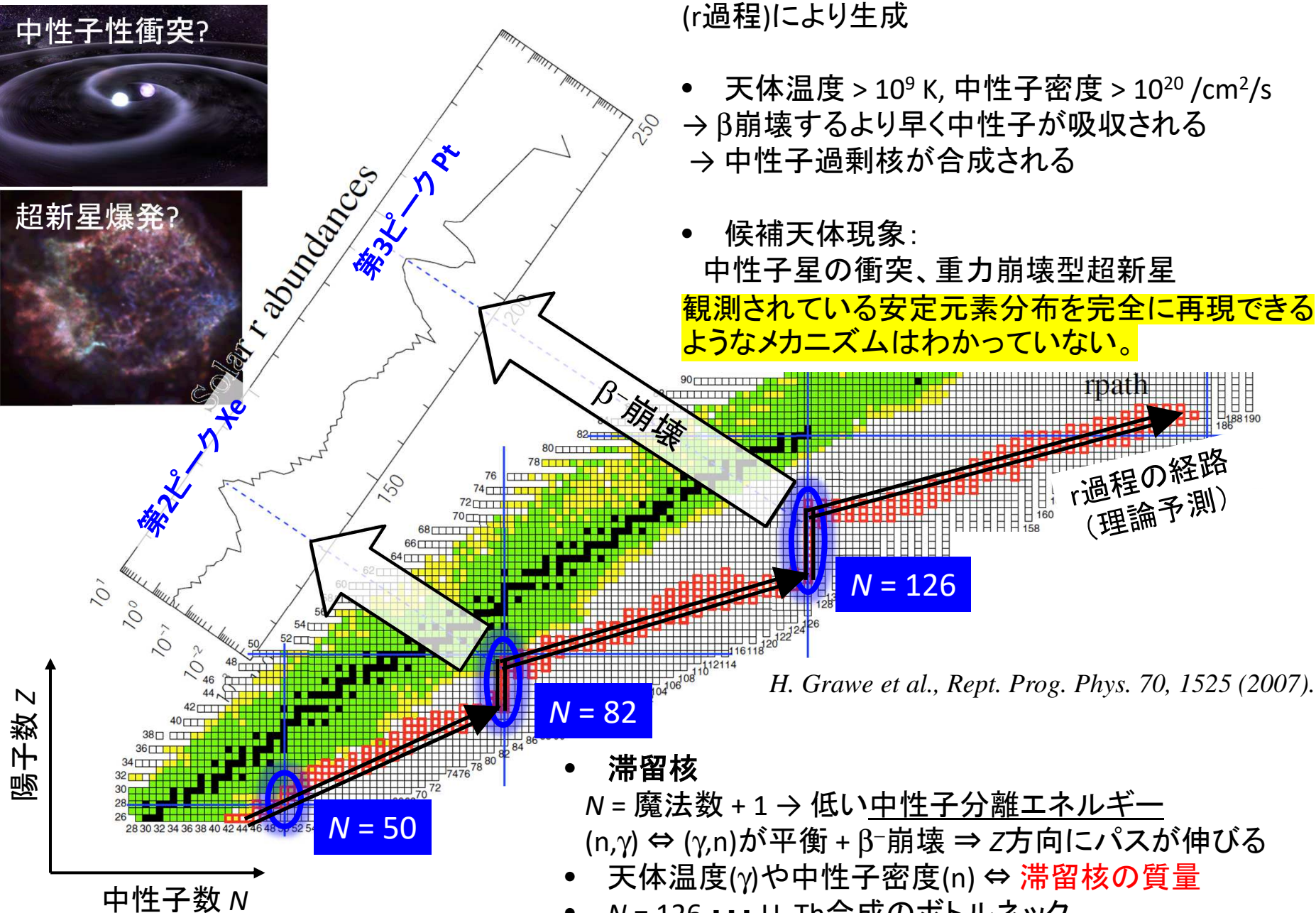
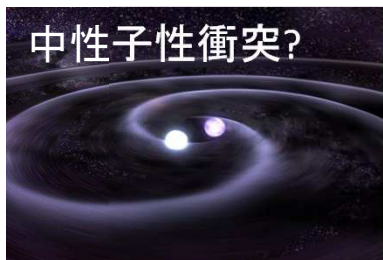
H. Grawe et al., Rep. Prog. Phys. 70 (2007) 1525.



s-process:
 数千万年単位での中性子捕獲過程 $M > 8M_{\odot}$
 安定核に沿って進む
 $Z \geq 84$ が不安定なため、 ^{209}Bi ($Z = 83$)で止まる

r-process:
 早い中性子捕獲過程 (秒オーダー)
 詳細な天体環境は宇宙元素合成における未解決問題
 どちらも、 $N = 50, 82, 126$ に対応するピークを形成する。

r過程の起源天体環境



- 鉄より重い元素の約半分
→ 爆発的な天体環境中での早い中性子捕獲過程 (r過程)により生成

- 天体温度 $> 10^9$ K, 中性子密度 $> 10^{20}$ /cm²/s
→ β 崩壊するより早く中性子が吸収される
→ 中性子過剰核が合成される

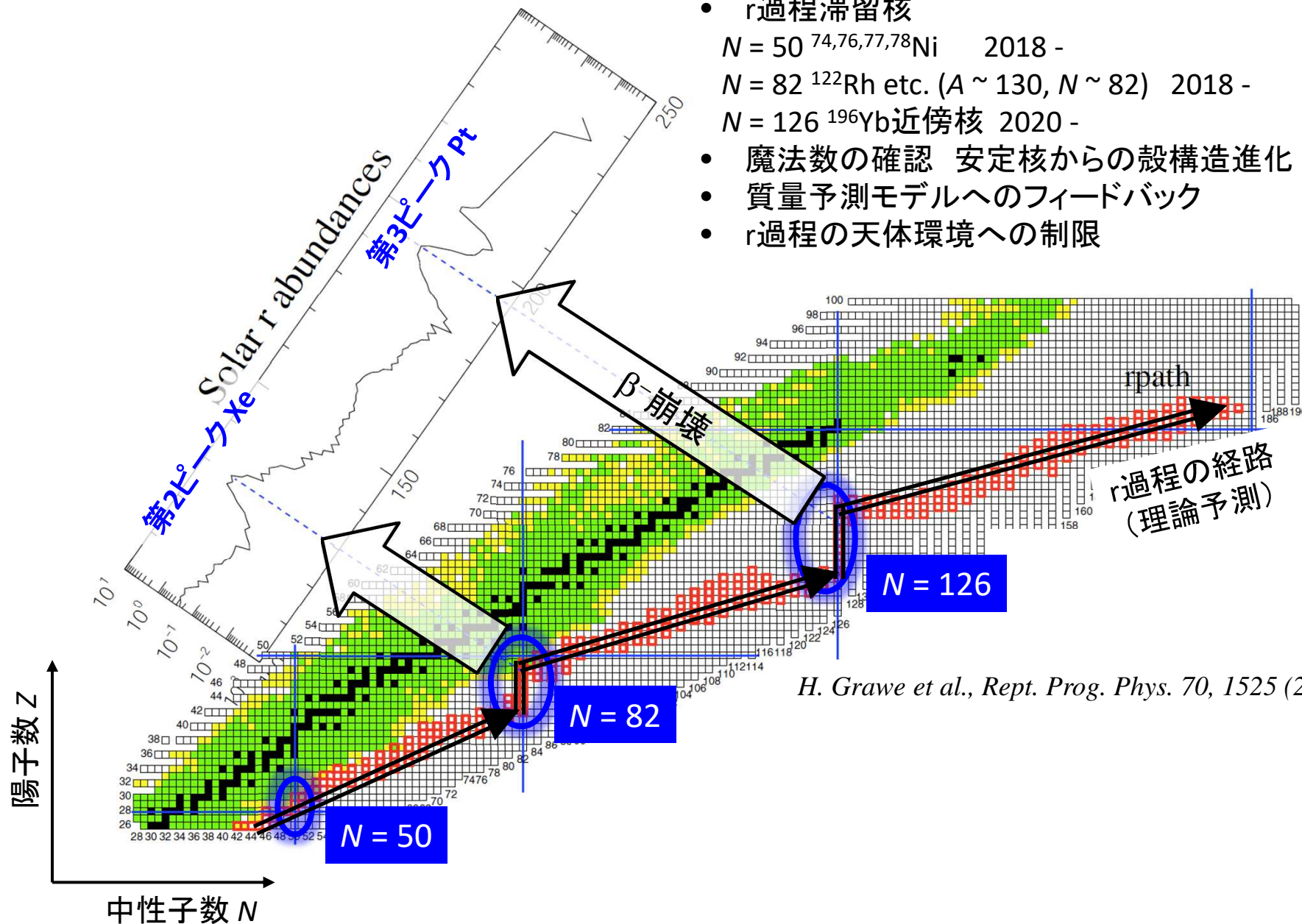
- 候補天体現象:
中性子星の衝突、重力崩壊型超新星
観測されている安定元素分布を完全に再現できるようなメカニズムはわかっていない。

H. Grawe et al., Rept. Prog. Phys. 70, 1525 (2007).

- 滞留核
N = 魔法数 + 1 → 低い中性子分離エネルギー
(n, γ) \leftrightarrow (γ , n)が平衡 + β -崩壊 \Rightarrow z方向にパスが伸びる
- 天体温度(γ)や中性子密度(n) \leftrightarrow 滞留核の質量
- N = 126 ... U, Th合成のボトルネック

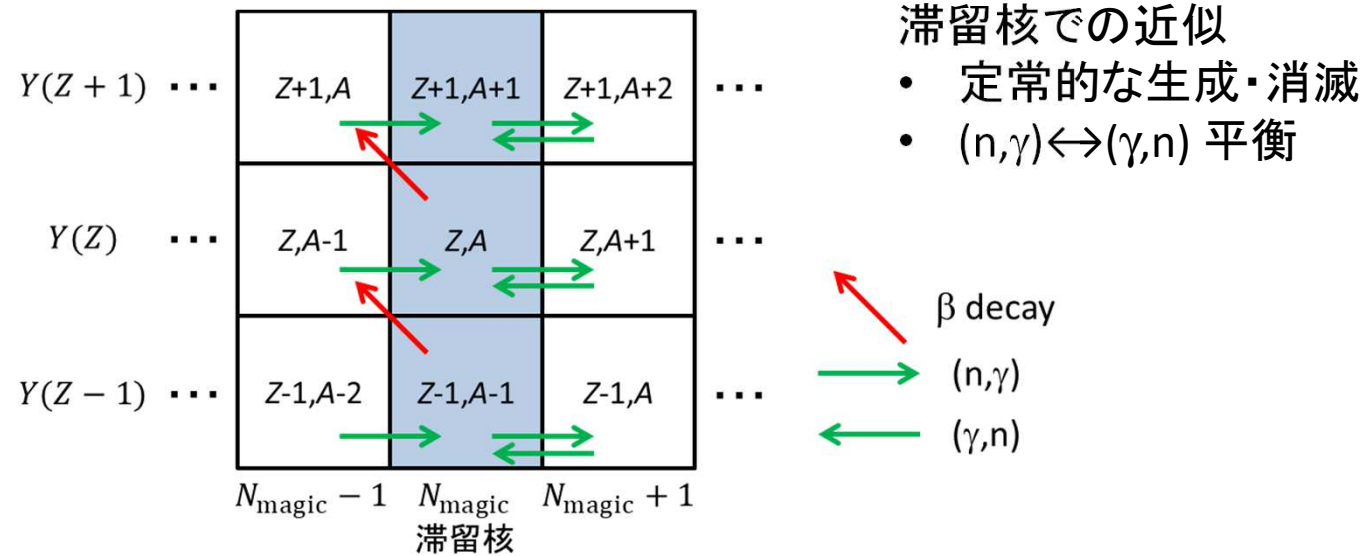
研究の目的 r過程滞留核および近傍核の精密な質量測定

- r過程滞留核
 $N = 50$ $^{74,76,77,78}\text{Ni}$ 2018 -
 $N = 82$ ^{122}Rh etc. ($A \sim 130, N \sim 82$) 2018 -
 $N = 126$ ^{196}Yb 近傍核 2020 -
- 魔法数の確認 安定核からの殻構造進化
- 質量予測モデルへのフィードバック
- r過程の天体環境への制限



H. Grawe et al., Rept. Prog. Phys. 70, 1525 (2007).

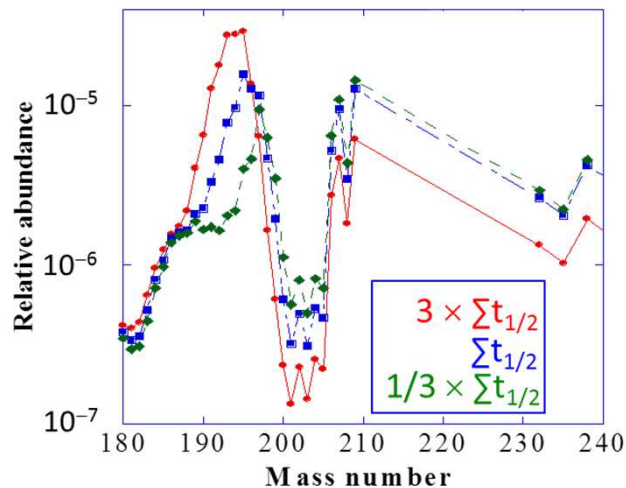
原子核の性質と天体環境との関係



➤ 定常的な生成・消滅 ($\dot{Y}(Z) = 0$)

$$Y(Z) \sum_A P(Z, A) \lambda_{\beta}^{Z,A} = Y(Z-1) \sum_A P(Z-1, A) \lambda_{\beta}^{Z-1,A} = \text{一定.}$$

S. Chiba, priv. comm. (2009).



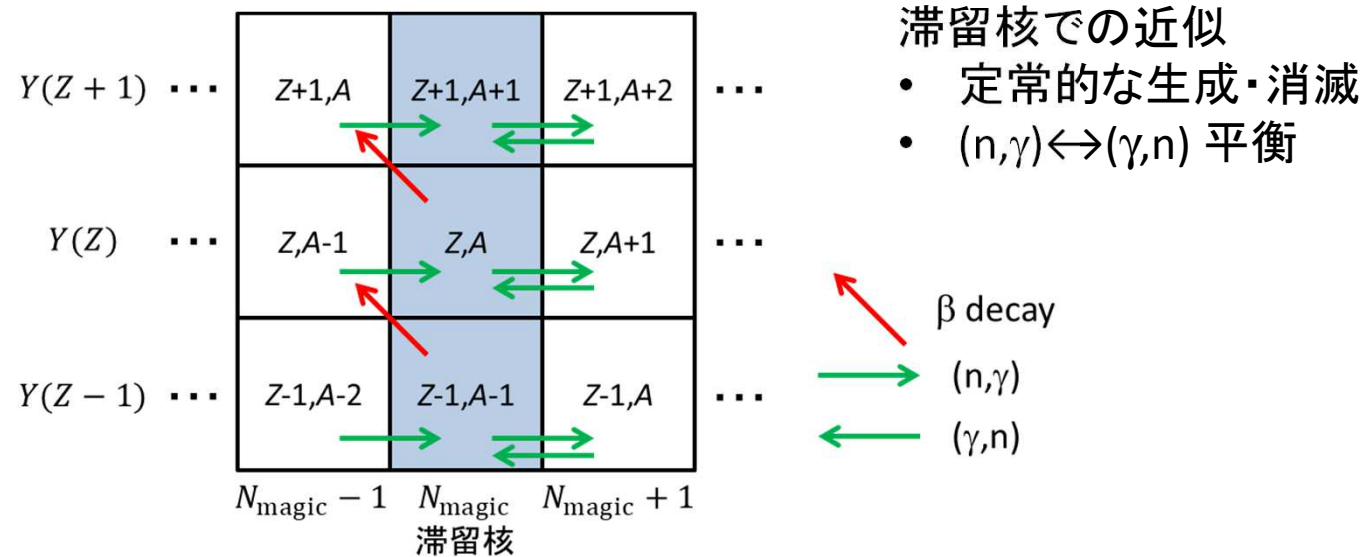
$$\text{崩壊率 } \lambda_{\beta} = \frac{1}{\tau_{\beta}}$$

安定元素の存在比
 \propto 滞留核の生成量 $Y(Z)P(Z, A)$
 \propto^{-1} 寿命 τ_{β}
 という関係

- 寿命や崩壊様式はシミュレーションの重要なinput
- 滞留核の寿命がr過程のタイムスケールを決める。

$\Rightarrow T_{1/2}$ の必要決定精度 < 30%

原子核の性質と天体環境との関係



➤ $(n, \gamma) \leftrightarrow (\gamma, n)$ 平衡 ($\tau_{n, \gamma} \ll \tau_{\beta}$)

$$\frac{Y(Z, A+1)}{Y(Z, A)} = N_n \left(\frac{A+1}{A} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{2J_{A+1} + 1}{2(2J_A + 1)} \left(\frac{m_n \cdot kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{-\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{S_n}{kT}\right) \cong 1$$

中性子分離エネルギー: $S_n = M(A, Z) - M(A+1, Z)$

- 質量 $M(A, Z)$, $M(A+1, Z)$ を測定することで、中性子過剰核を生成するような天体環境 (T, N_n) に制限を付けることができる。

⇒ r-過程による重元素合成シナリオの特定に大きく貢献。

- S_n が 100 keV のオーダーで変わると天体環境は一桁以上の幅を持つ。

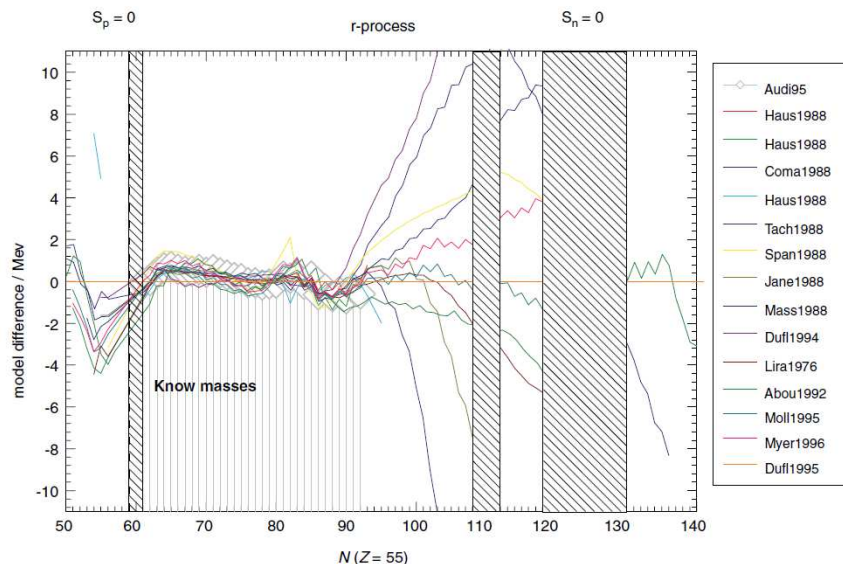
⇒ 必要な質量決定精度は、 $< 100 - 200 \text{ keV } (10^{-6}) @ A \sim 100 - 200$

質量を測る必要性

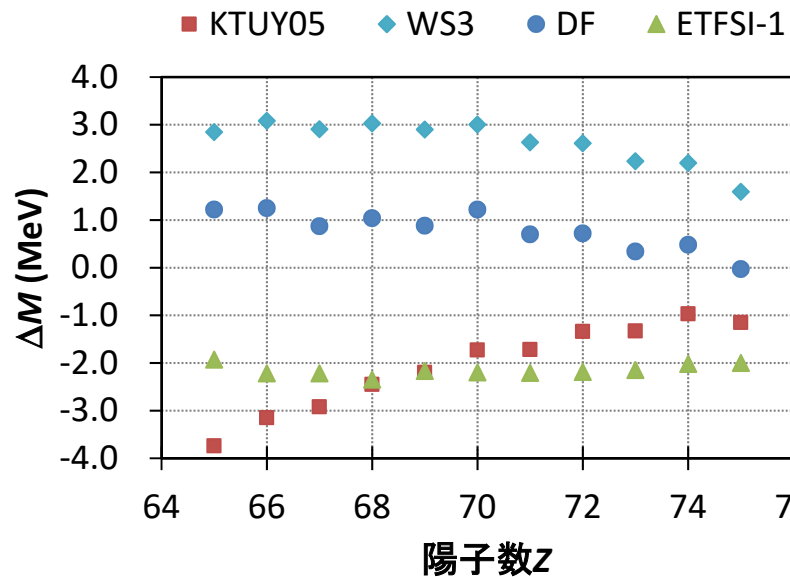
- 質量の理論予測値のばらつき

N = 55領域

K. Blaum, Phys. Rep. 425, 1 (2006).



N = 126領域

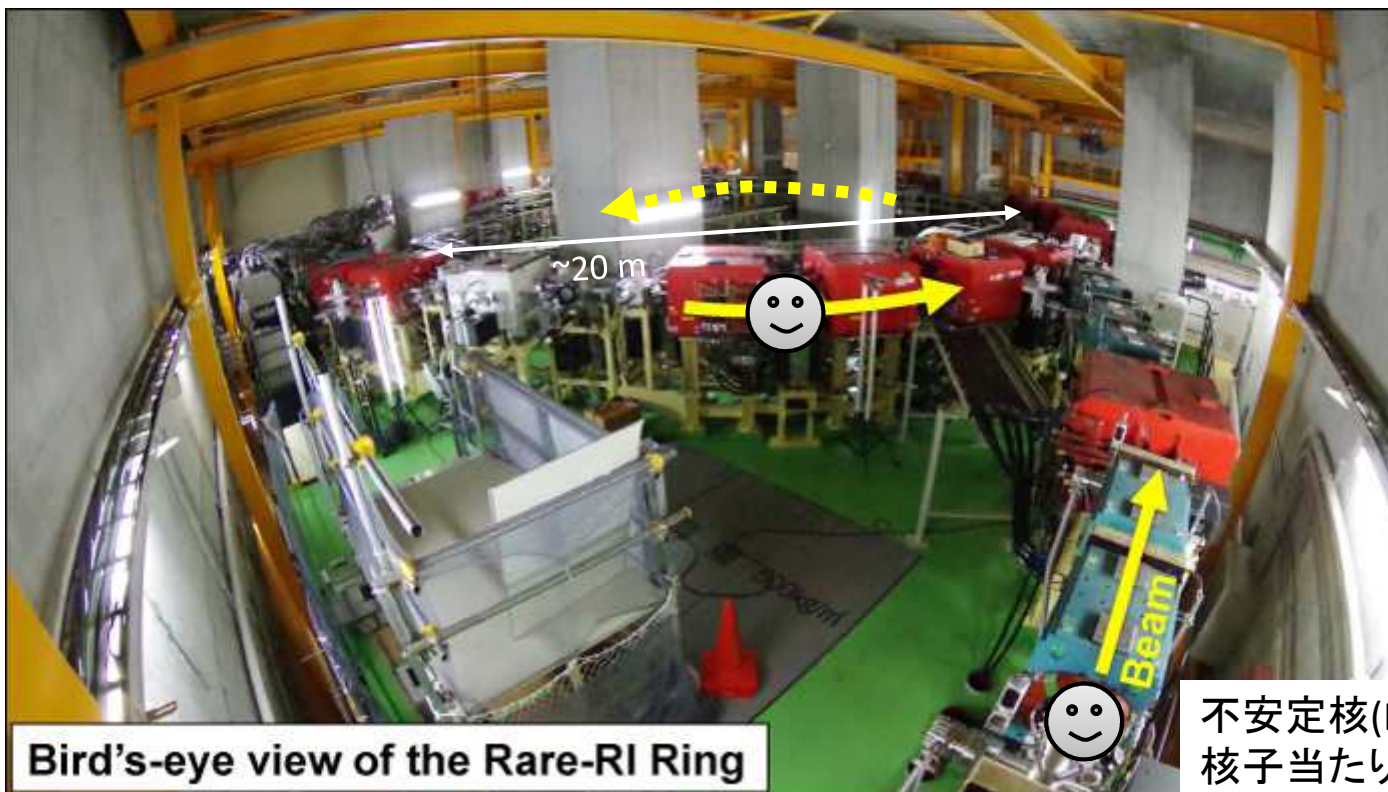


P. Moller et al., At. Data Nucl. Data Tables 109–110, 1 (2016).
H. Koura et al., Prog. Theo. Phys. 113, 305 (2005).
N. Wang et al., JPCS 420, 012057 (2013).
J. Duflo et al., Phys. Rev. C 52, 1 (1995).
Y. Aboussir et al., At. Data Nucl. Data Tables 61, 127 (1995).

必要な質量測定精度は、100 – 200 keV ($\delta m/m = 10^{-6}$)。
 理論モデルによる質量予測値はMeVオーダーでばらついている。
 精密質量測定が不可欠！

- 極端に中性子過剰な原子核で魔法数が保存するのか？
 軽い原子核では魔法数の消失・新たな魔法数の出現が実験的に確認されている。
 元素合成過程に大きな影響をあたえる。

Rare RI Ring (R3) @ RIBF/RIKEN



Bird's-eye view of the Rare-RI Ring

不安定核(RI)ビーム
核子当たり200 MeV
($\beta \sim 0.5$)

サイクロトロン周波数

$$f_c = \frac{qB}{2\pi m} = \frac{1}{T}$$

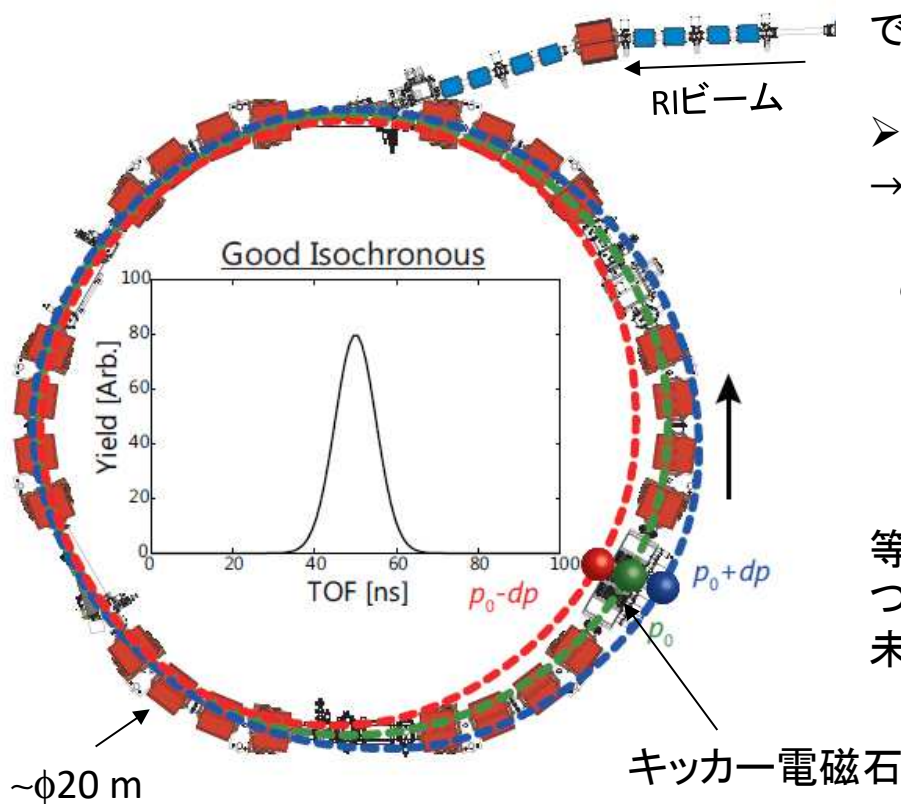
リングの電磁石の磁場

周回時間 = 飛行時間 / 周回数

原子核の質量
ただし、 $m_0 \gamma \Rightarrow$ 等時性磁場 $B_0 \gamma$ による γ の補正

R3の特徴

- 等時性磁場
 - 質量が速度に依らない
 - 速度をそろえるための冷却過程がいらない
 - 短寿命核に適する
- キッカー電磁石による個別入射イオンを周回軌道にけり入れる
 - 無駄なく測定



➤ サイクロトン周波数の式より

$$\frac{m_0}{q} = 2\pi \frac{\gamma}{TB}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

→ 質量(m_0/q)の精度は、周期 T , 磁場 B , 速度 β の精度で決まる。

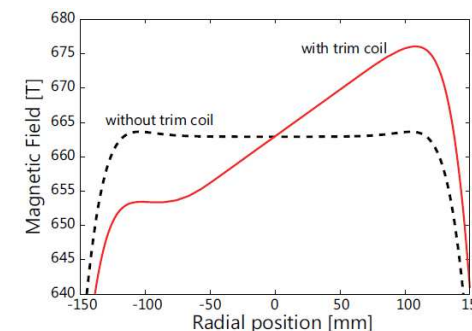
➤ 等時性磁場 $B = B_0\gamma$
→ β に非依存

このときの分解能は、

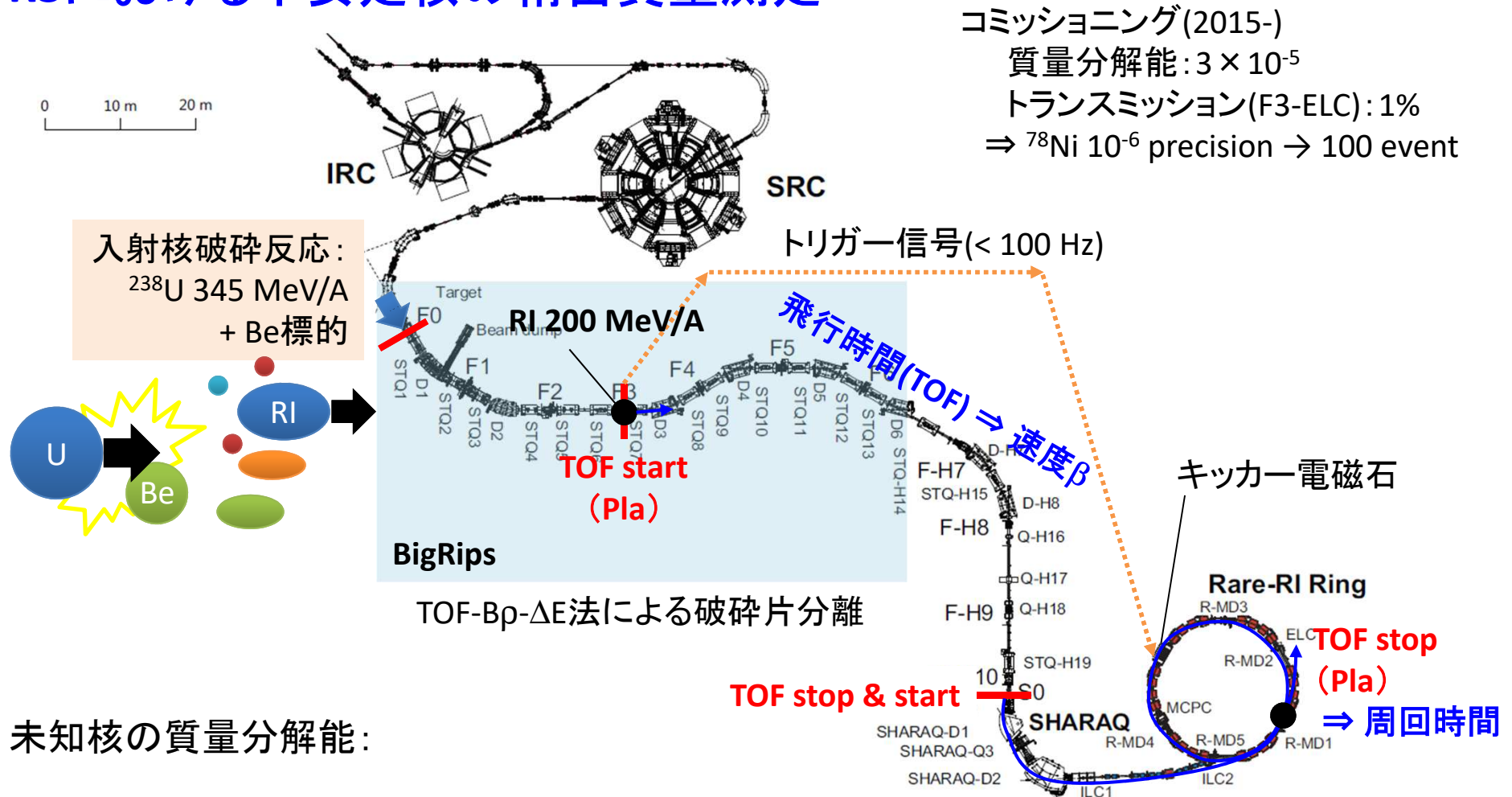
$$\frac{\delta(m_0/q)}{m_0/q} = \frac{\delta T_0}{T_0} + \frac{\delta B_0}{B_0}$$

等時性条件で質量既知核(リファレンス粒子)を測定しつつ、質量未知核も同時に質量測定を行う。
未知核の質量:

$$\frac{m_1}{q_1} = \frac{m_0}{q_0} \frac{T_1}{T_0} \sqrt{\frac{1 - \beta_1^2}{1 - \left(\frac{T_1}{T_0} \beta_1\right)^2}}$$



R3における不安定核の精密質量測定



コミッショニング(2015-)
 質量分解能: 3×10^{-5}
 トランスミッション(F3-ELC): 1%
 ⇒ ^{78}Ni 10^{-6} precision → 100 event

未知核の質量分解能:

$$\frac{\delta(m_1/q)}{m_1/q} = \frac{\delta(m_0/q)}{m_0/q} + \gamma_0^2 \frac{\delta(T_1/T_0)}{T_1/T_0} + k \frac{\delta\beta_1}{\beta_1}$$

\downarrow 10^{-6} \downarrow 10^{-6} \downarrow 10^{-4}

$$k = f(T_0, T_1, \beta_1) = O(10^{-2})$$

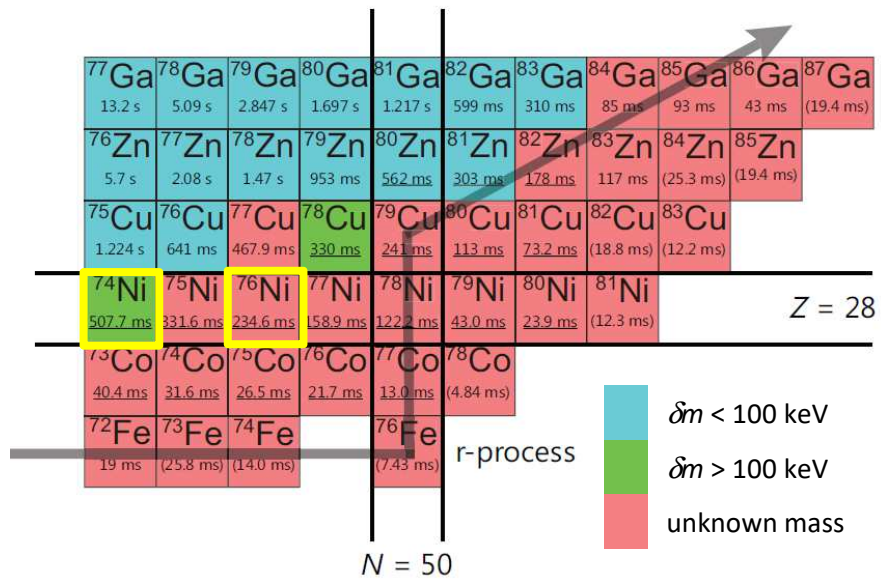
F3-S0間の飛行時間 ~700 ns

$\frac{\delta\beta_1}{\beta_1} \sim 10^{-4}$ に必要な飛行時間の決定精度は、

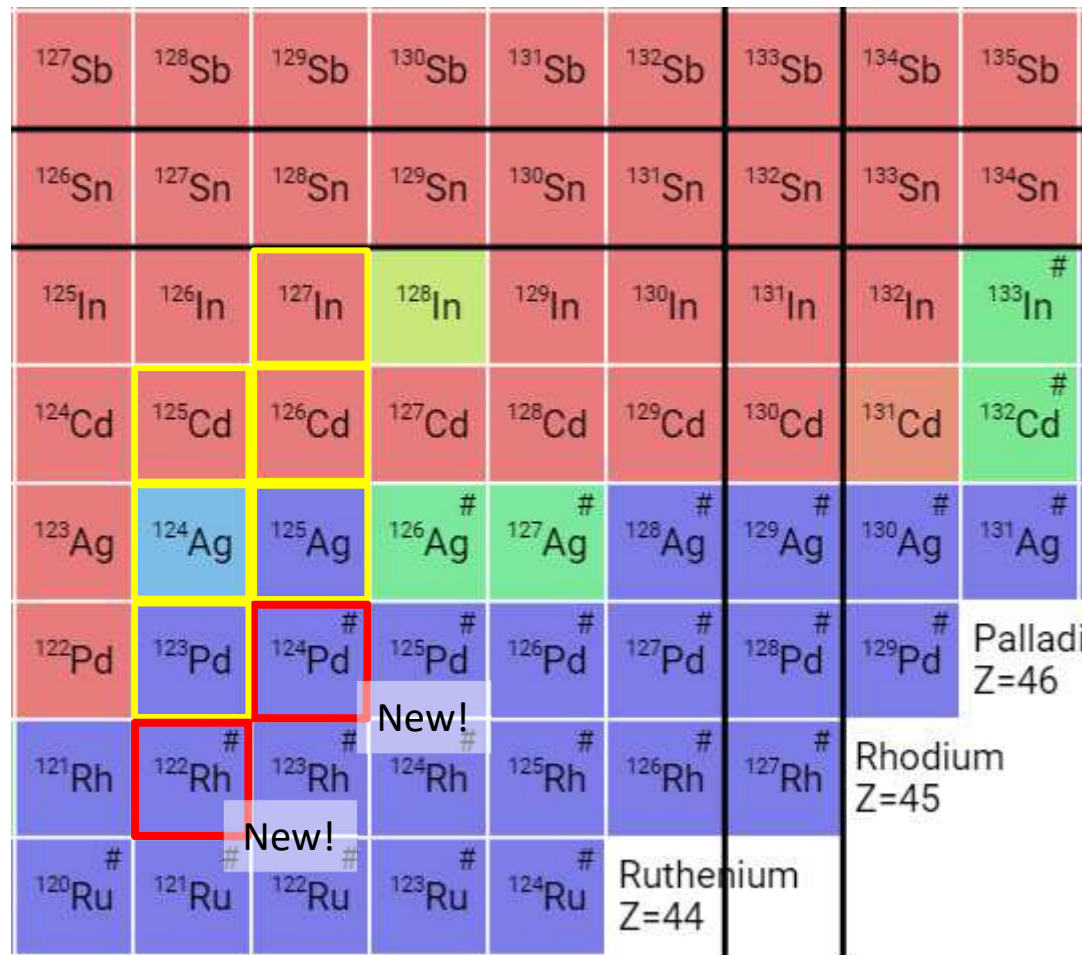
$700 \text{ ns} \times 10^{-4} = 70 \text{ ps}$

⇒ 高時間分解能な飛行時間検出器 @ S0(後述)

$^{74,76}\text{Ni}$ 質量測定結果 @ R3 on 2018/11/4 - 8



^{122}Rh , ^{124}Pd 質量測定 @ R3 on 2018/11/23 - 28



質量未知核

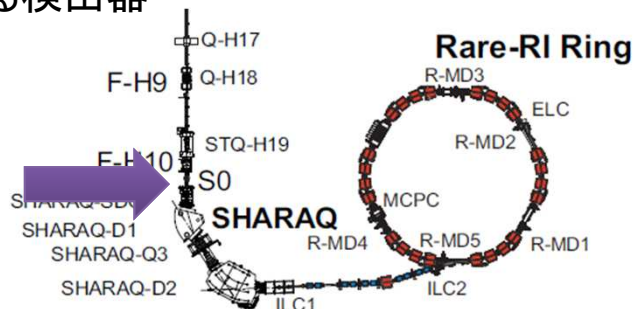
Atomic Mass Uncertainty [micro-u]

100 150 200 250 300



飛行時間検出器の開発

TOFのstop信号(β 測定)とstart信号(T 測定)を発生する検出器

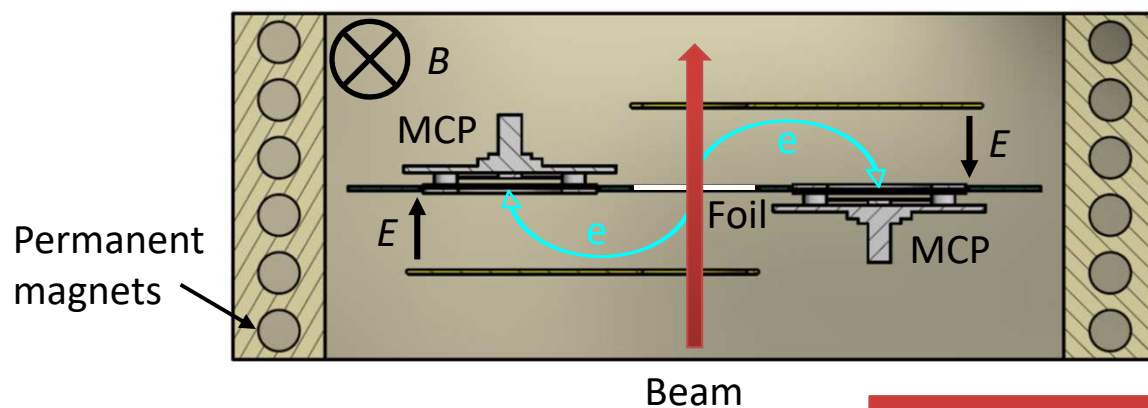


飛行時間検出器に要求されるスペック:

- ✓ 質量分解能 200 keV \Rightarrow 時間分解能 < 70 ps
- ✓ 稀少核種 \Rightarrow 高検出効率 \sim 100%
- ✓ 一週間程度の安定動作
- ✓ 広い有効領域 > ϕ 30 mm

BE-MCP検出器

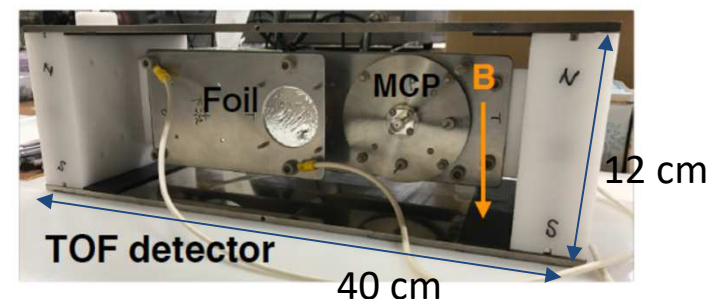
- ビーム通過時の二次電子を電磁場で検出器へ誘導
- 等時性電磁場により二次電子の飛行時間が通過位置に非依存
=> 高い分解能と広い有効領域
- 薄膜 1 μ m \Rightarrow 通過ビームへの影響が無視できる



$B = 130$ Gauss
 $E = 480$ V/mm

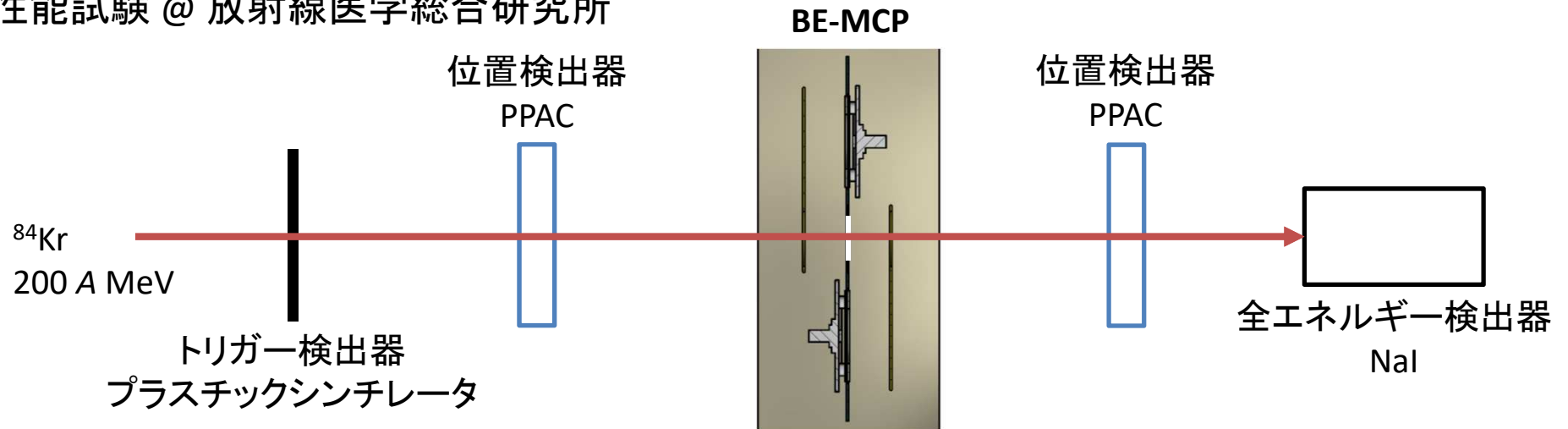
ホイルからMCPまでの飛行距離:

$$D = \frac{2\pi m_e E}{eB^2}$$



飛行時間検出器の開発

性能試験 @ 放射線医学総合研究所



時間分解能 < 70 ps 達成！
検出効率 100% 達成！
有効領域 ~φ40 達成！

来年度のR3実験で導入予定

まとめ

- 天体環境中での元素合成過程で生成される不安定核の性質を調べることで、重元素合成の起源天体環境を知ることができる。
- 早い中性子捕獲過程(r過程)の起源天体環境は未知
非常に中性子過剰な原子核が関与するため、実験的に性質を調べるのが困難。
- BigRips + 稀少RIリングで、r過程に関与する未踏核種の精密質量測定が可能になった。
- 2018年度- Ni, Sn領域の中性子過剰核の質量測定開始
- 精密質量測定に不可欠な飛行時間検出器を開発中
- $N = Z$ 核のR3での質量測定のためのプロポーザル提出 (rp過程)
2019年度- 実験開始?

クォーク・核物質研究部門 (2)

元素合成の研究

— 21世紀に解決すべき科学上の11大問題 —
3番目: 重元素はいかにして造られたのか?

重元素合成仮説(Rプロセス)

↓ 検証には、..

不安定核の質量測定が必須!

2018年10月
実験プロポーザル提出



2018年度前期の活動

- 重いN=Z核の質量測定プロポーザル提出
- Ni領域の質量測定

2017 12月 実験2採択

2016 12月 実験1採択

2018年10月 最初の質量測定実験

11月