

# $^{138}\text{La}$ の原子核構造と重元素合成過程への影響

日本原子力研究機構  
量子ビーム応用研究部門  
早川岳人

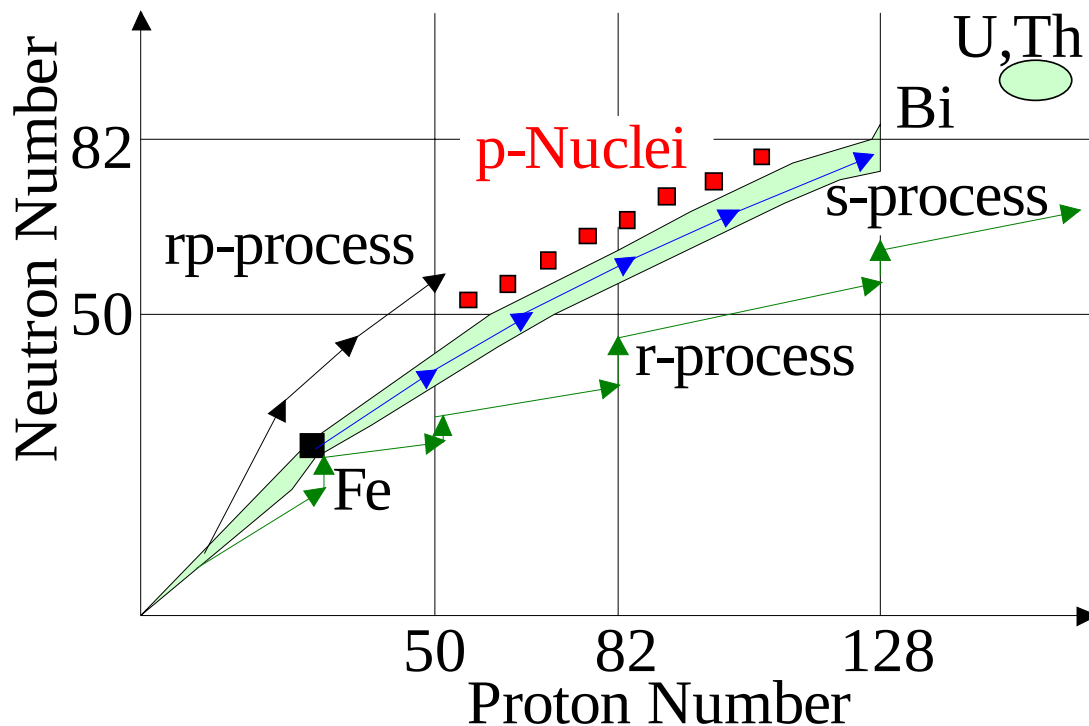
# はじめに

---

## $^{138}\text{La}$ に関する話題

- 元素の起源問題
- 原子核宇宙時計の提案
- 原子核構造が、元素の起源、宇宙時計等を与える影響
- 原子核宇宙温度計の提案

## 重元素合成過程と天文学的サイト



重元素の99%は中性子捕獲で生成

r-Process: 超新星爆発での急速な中性子捕獲反応

s-Process: 漸近巨大分岐星への遅い中性子捕獲反応

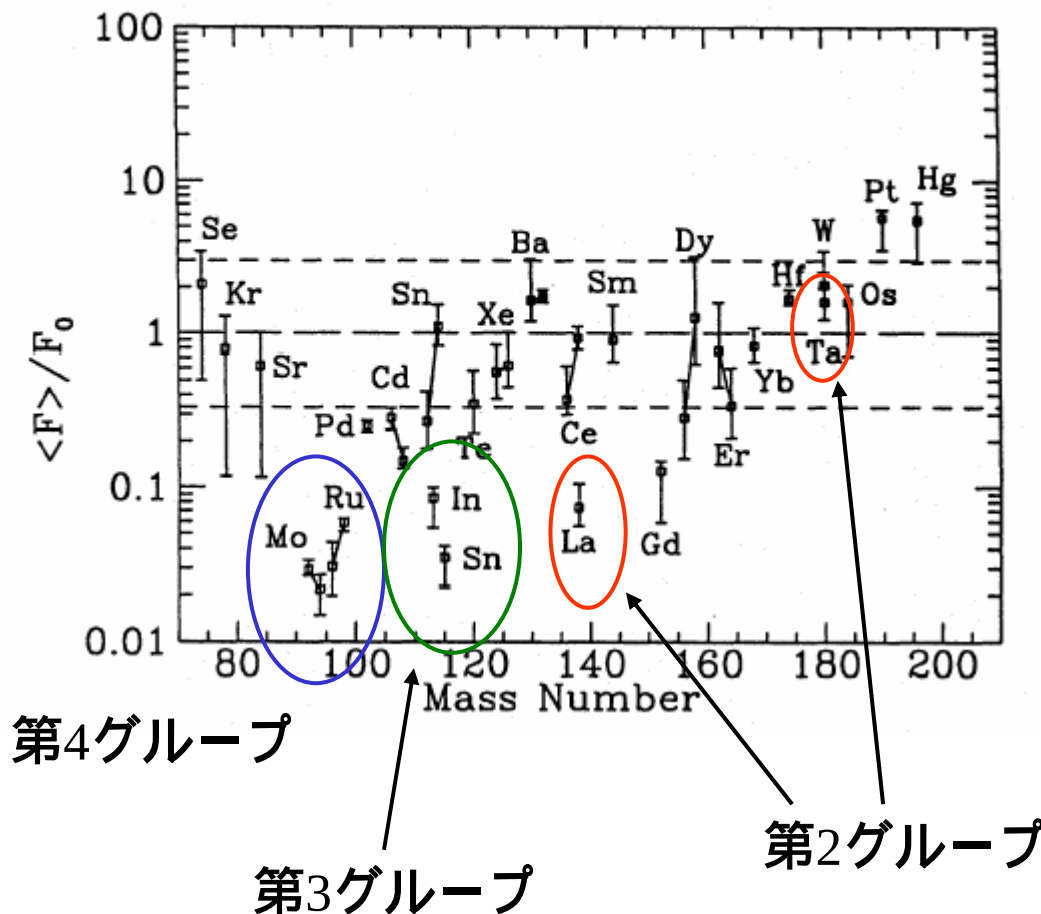
約35個のp核は中性子捕獲では生成できず。

超新星爆発の光核反応(p過程)か？

# 標準的p過程の理論計算

Rayet, Astrom. Astrophys. 298, 517 (1995)

標準: 27個前後  
第1グループ



第2～4グループは、photodisintegration reactionsでは太陽組成より少なすぎる

# p核の起源

Group 1. 27個の偶偶核 ( $Z=N$ =偶数): 超新星爆発の光核反応  
太陽組成における証拠(Hayakawa, Phys. Rev. Lett. 93, 161102 (2004))

Group 2. 2個の奇奇核、 $^{138}\text{La}$ と $^{180}\text{Ta}$   
p過程?、ニュートリノ過程?、宇宙線元素合成過程?  
大質量星のs過程( $^{180}\text{Ta}$ のみ)?

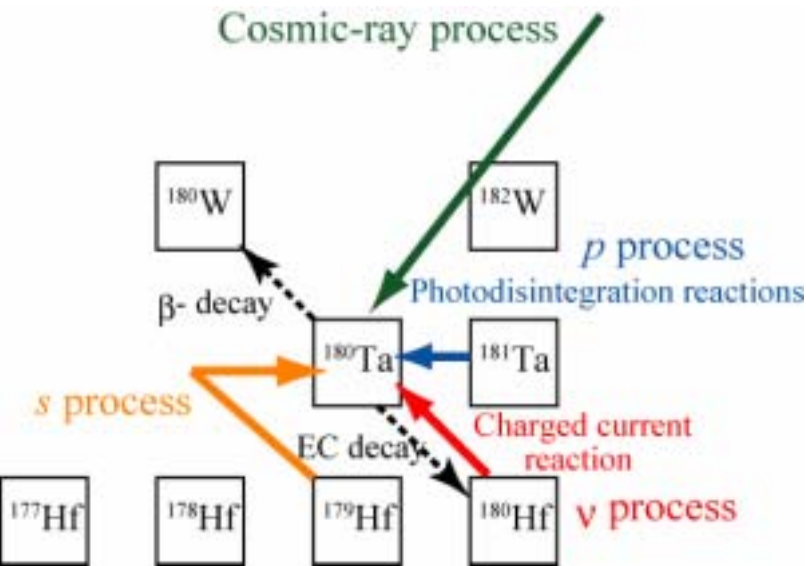
Group 3. 奇核:  $^{113}\text{In}$  and  $^{115}\text{Sn}$   
定量的に説明できる仮説なし。  
s過程の分岐?  $\longrightarrow$  原子炉実験

Group 4. Mo領域:  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Ru}$  and  $^{98}\text{Ru}$   
定量的に説明できる仮説なし。  
大質量星の特殊な進化?、 $\alpha$ 粒子の影響?、rp過程?  
新しいモデルが必要  $\longrightarrow$  Hypernovae

# 180Taの天体起源の探究

約300の元素中で合成過程が謎につつまれた元素  
(天然で唯一つの核異性体)

天体核物理学者への挑戦



R.A.Ward, Nature 291,308,(1981)

r過程生成説を提唱するが、実験で自ら反証。

K.Yokoi, Nature 305,198,(1983)

s過程: 高温下におけるs過程の分岐を提案。

S.E.Woosley, Astrophys. J. (1990).

超新星爆発のニュートリノ過程による生成を提案

D.Belick, Phys. Rev. Lett. 83, 5242,(1999)

s過程: 制動輻射  $\gamma$  線による消滅実験。

K.Wisshak, Phys. Rev. Lett. 87, 251102,(2001)

s過程: 核異性体の中性子捕獲断面積を測定。

H.Utsunomiya, Phys. Rev. C (2003)

超新星爆発の光核反応による生成の観点から実験。

A.Heger, Phys. Lett. B (2005)

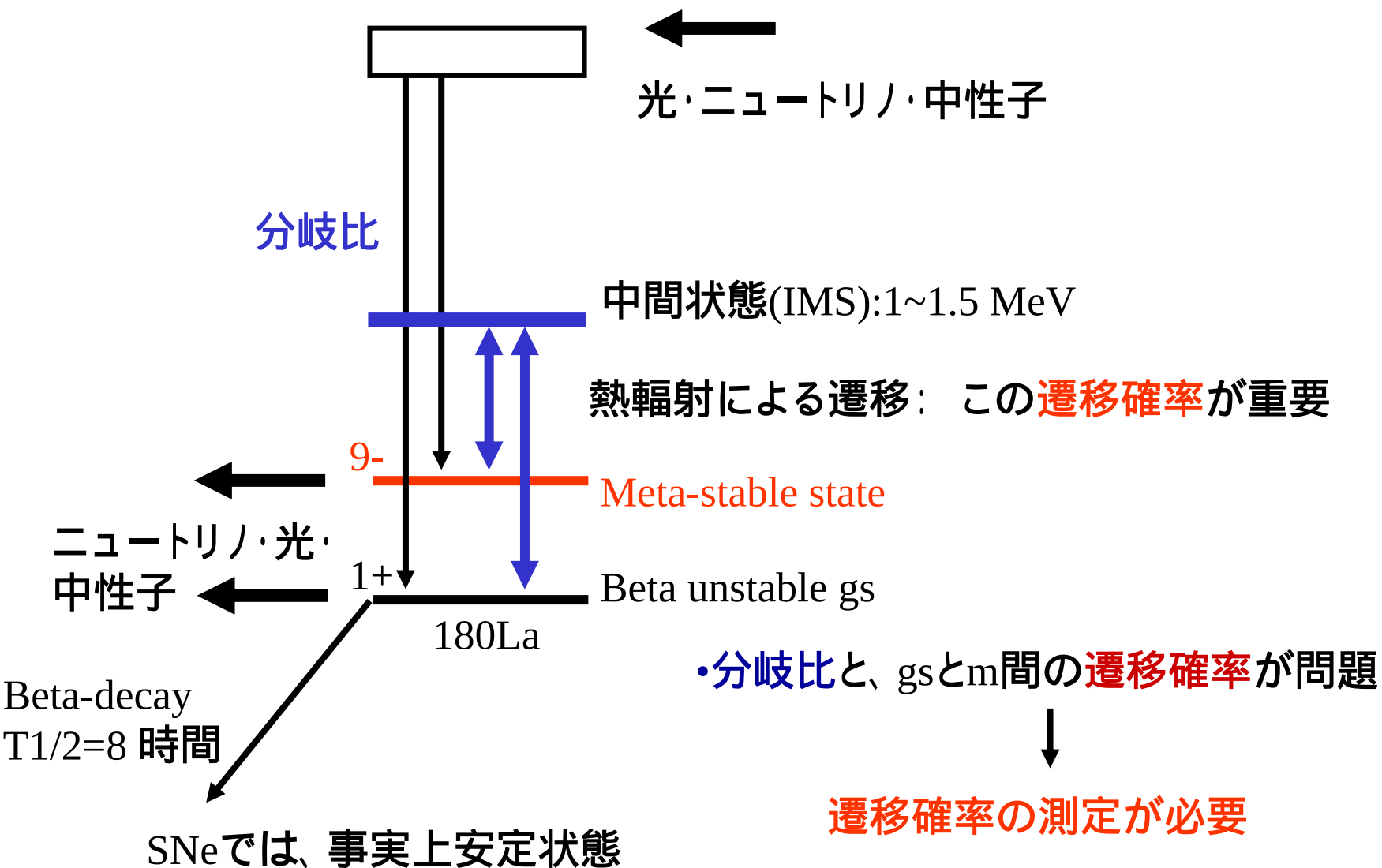
超新星爆発のニュートリノ入射反応による生成を理論計算

J. Audouze, A&A (1970)

宇宙線起源説を提唱。その後忘れられた。

M. Aaround, (1976): S.E.Woosley, (1978).

超新星爆発の光核反応起源説を提唱。



# 原子核宇宙温度計とは何か？

元素合成が進行する天体環境の温度に依存して、同位体比が変化する機構を利用して温度を推定する。

W. Aoki, *Astrophys. J.*, 592, L67 (2003).  
153Euの天体観測による温度の推定

G.K.Nicolussi, *Phys. Rev. Lett.*, 81, 3583 (1998).  
隕石中の前太陽系グレイン中のSrの同位体比測定による核反応と温度の推定

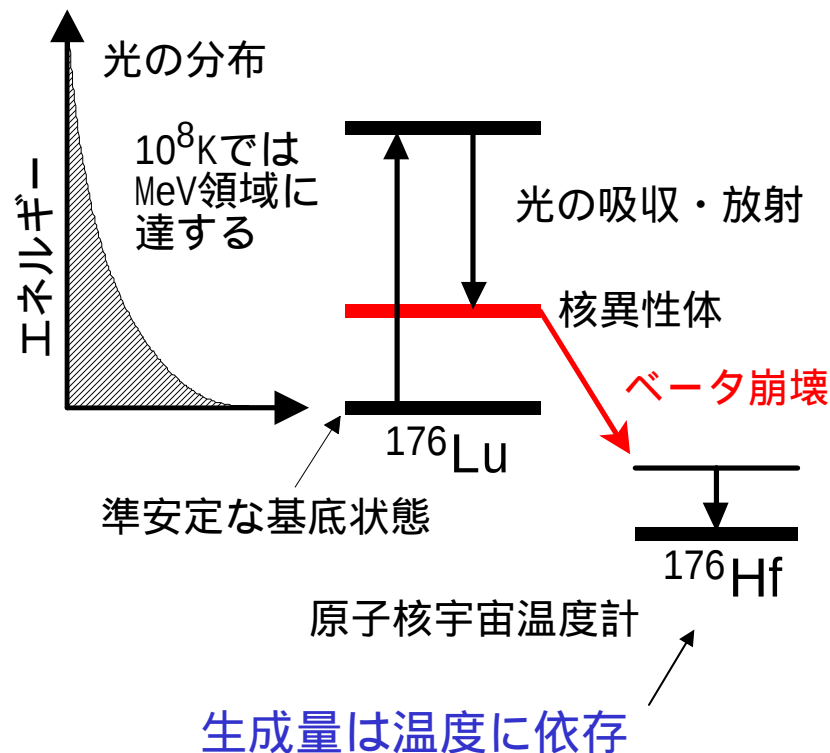


これらは、分岐点による元素合成の流れの依存性を用いたもの。温度だけでなく、中性子密度にも依存する。

H. Beer, *Phys. Rev.C*, 21, 534 (1980)

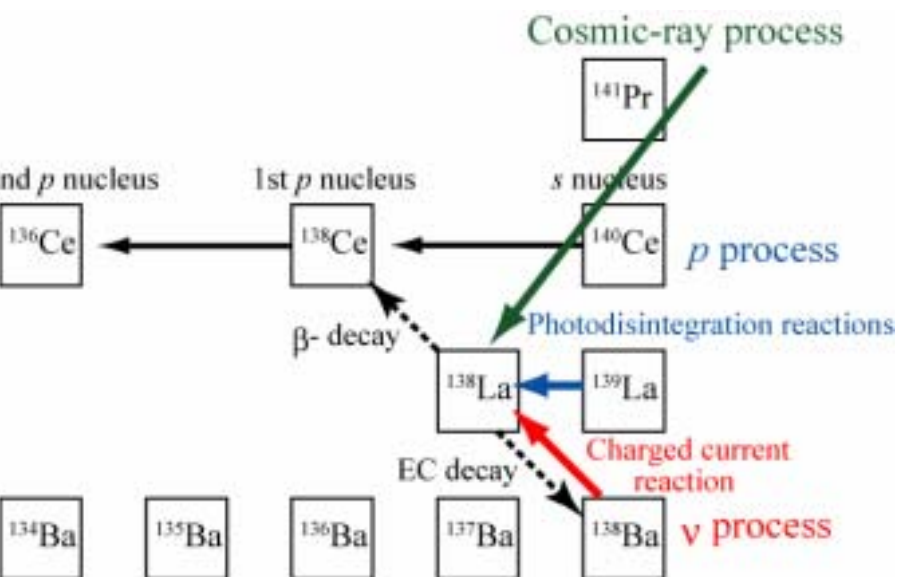
$^{176}\text{Lu}$ 原子核宇宙温度計の提案: アイソマー型

温度依存性が高い



基底状態と核異性体間のガンマ線による遷移確率が、実際の温度評価に必要

# 138La の研究



惑星学、地球科学でも重要

約300の元素中で、 $^{180}\text{Ta}$ に次ぎ合成過程が謎につつまれた元素

J. Audouze, A&A (1970)

宇宙線起源説を提唱。

M. Aounld, (1976): S.E.Woosley, (1978).

超新星爆発の光核反応起源説を提唱。

S.E.Woosley, Astrophys. J. (1990).

超新星爆発のニュートリノ過程生成を提案。

S.Goriely, A&A (2001)

ニュートリノ過程による生成計算

A.Heger, Phys. Lett. B (2005)

ニュートリノ過程による生成計算。太陽組成の約90%を説明。

S.Nakai, Nature (1986)

地球科学時計として利用。岩石の年代計測。

Tanimizu, Phy. Rev. C (2000)

古代岩石から半減期を測定。

J.Shen, Astophy. J. 596, L109 (2003).

隕石中の $^{138}\text{La}$ の同位体比測定に成功

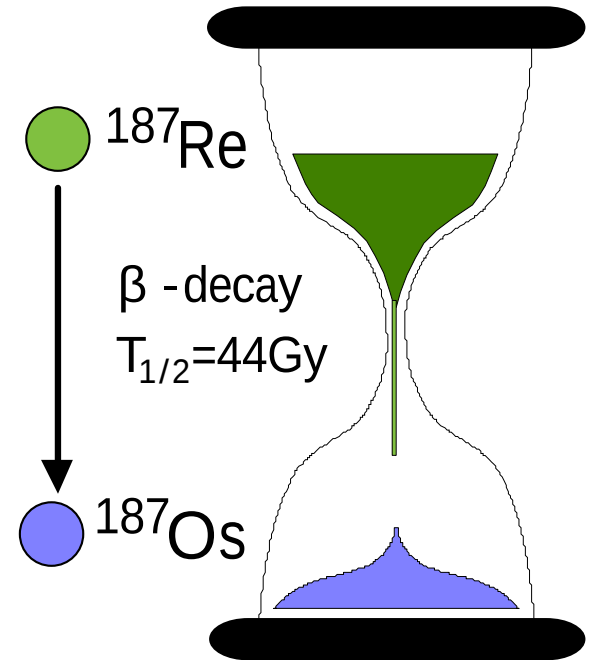
起源と原子核の特性の解明が必要

# 原子核時計とは何か

原子核時計とは $^{238}\text{U}$ 、 $^{187}\text{Re}$ など長寿命の半減期を持つ放射性同位元素



親核と娘核の量から、親核が生成された年代を評価



天文学、宇宙年代学、地球科学、惑星学など  
広い領域で応用されている。

# 原子核時計研究の3つのフェイズ

## 1. 原子核宇宙時計の理論的な提案

例、 $^{146}\text{Sm}$ 時計の提案、J.Audouze, Nature, 237, 448 (1972).

$^{176}\text{Lu}$ - $^{176}\text{Hf}$ - $^{174}\text{Hf}$ 時計の提案、T.Hayakawa, Phys.Rev.Lett. 93, 161102 (2004).

## 2. 核データの測定による原子核時計の精度の向上

例、 $^{138}\text{La}$ の半減期測定、T.Tanaka, Nature, 300, 515 (1982).

$^{176}\text{Lu}$ の半減期測定、G. F. Grinyer, Phys.Rev.C67, 014302 (2003).

$^{187}\text{Re}$ 原子核宇宙時計の高精度化、T.Hayakawa, Astrophys. J. (2005).

## 3. 原子核時計を使った応用研究

例、銀河系初期の星の年齢推定 R.Cayrel, Nature, 409, 691 (2001).

隕石の分析による元素の起源 M. Schönbachler, Science, 295, 1705 (2002).

隕石による太陽系初期形成 M.Bizzarro, Nature, 431, 275 (2004).

• 3つのフェイズ全てにおいて、現在でも研究が進行している。

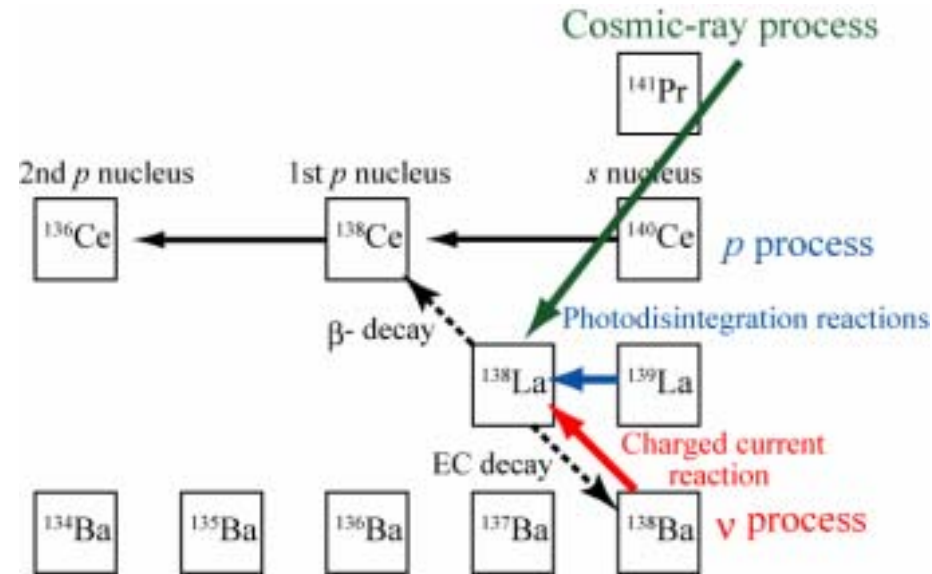
# ニュートリノ過程の原子核宇宙時計を提案

10～100億年の半減期の宇宙時計

遅い中性子捕獲反応過程  
40K、87Sr

早い中性子捕獲反応過程  
187Re、238U、242Th

超新星爆発の光核反応過程  
176Lu



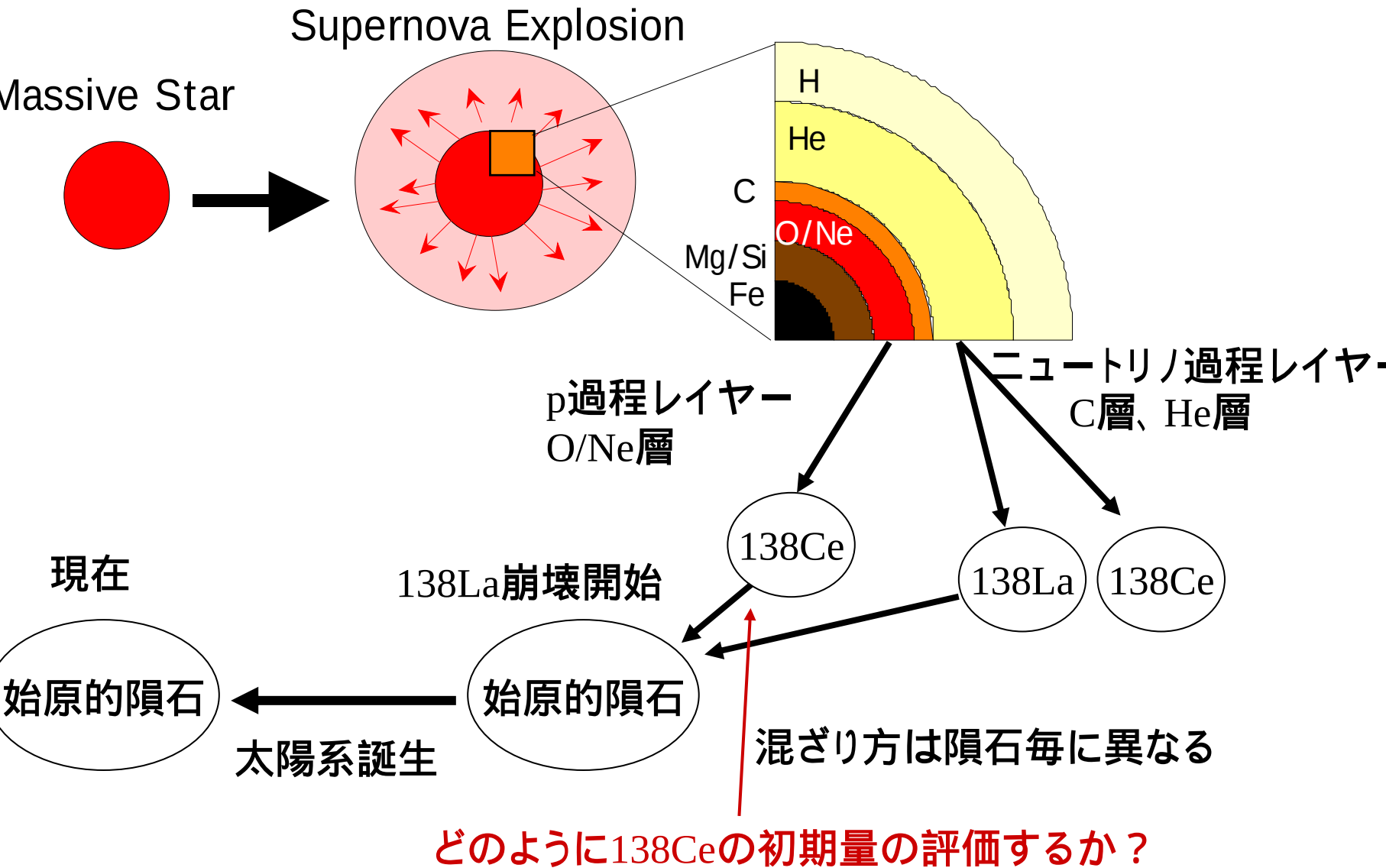
$$T = -\frac{T_{1/2}(^{138}\text{La})}{\ln 2} \times$$

$$\ln \left( \frac{N(^{138}\text{La})}{N(^{138}\text{La}) + \frac{1}{b} (N(^{138}\text{Ce}) - R_{pp}(\text{Ce}) \times N(^{136}\text{Ce}))} \right), \quad (1)$$

これまで、ニュートリノ過程の宇宙時計は知られていなかった。

$^{138}\text{La}$ - $^{138}\text{Ce}$ - $^{136}\text{Ce}$ をニュートリノ過程宇宙時計として提案  
(論文準備中)

# 宇宙時計が適用できる隕石の生成

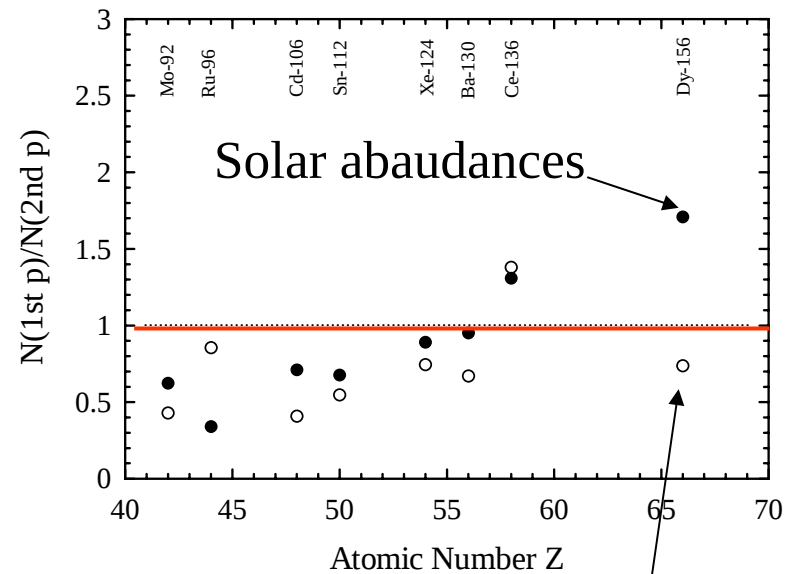
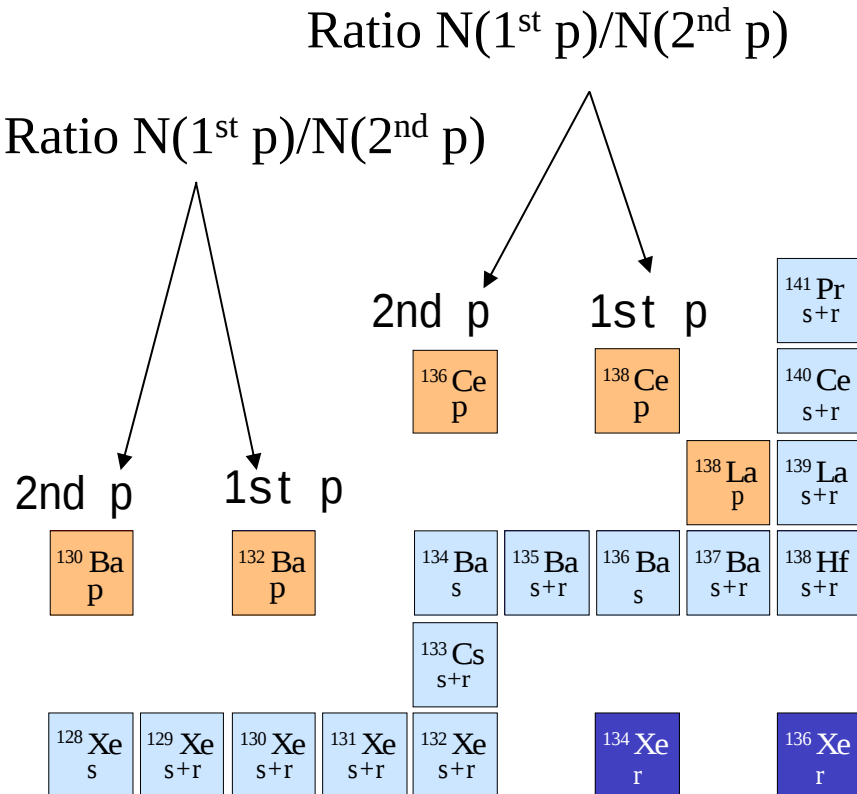


# どのように $^{138}\text{Ce}$ の初期量を評価するか？

T. Hayakawa, Phys. Rev. Lett. 93, 161102, (2004).

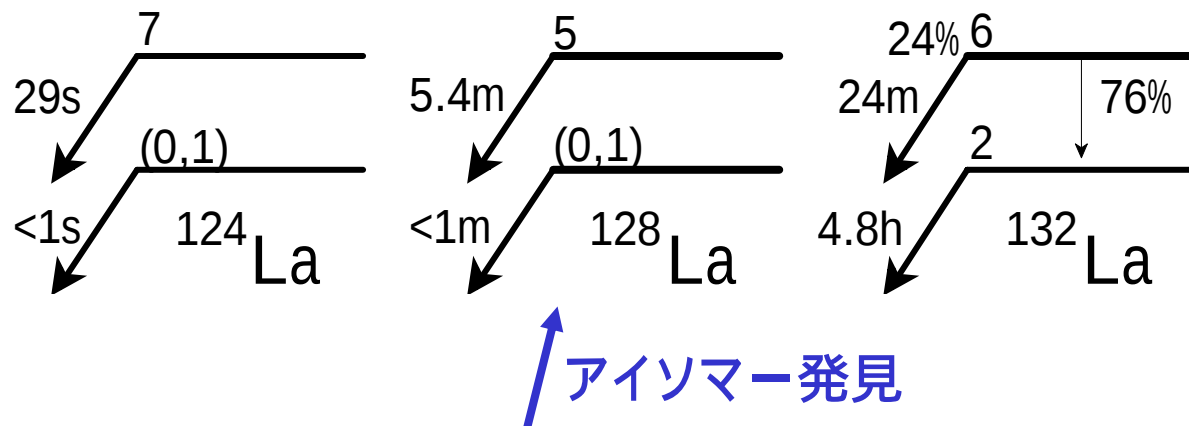
## •第2経験則

$N(1^{\text{st}} p)/N(2^{\text{nd}} p) \sim 1.0$   
in wide range of atomic number



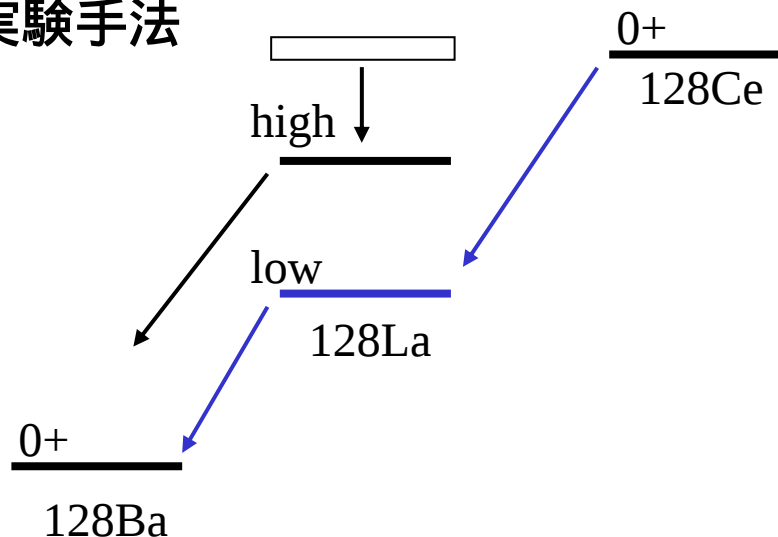
$^{136}\text{Ce}$ の量から、 $^{138}\text{Ce}$ の初期量を推定可能

Laの奇奇核には、ベータ崩壊するアイソマーが発見されている。



T. Hayakawa, Z. Phys. A358, 15 (1997)

### 実験手法



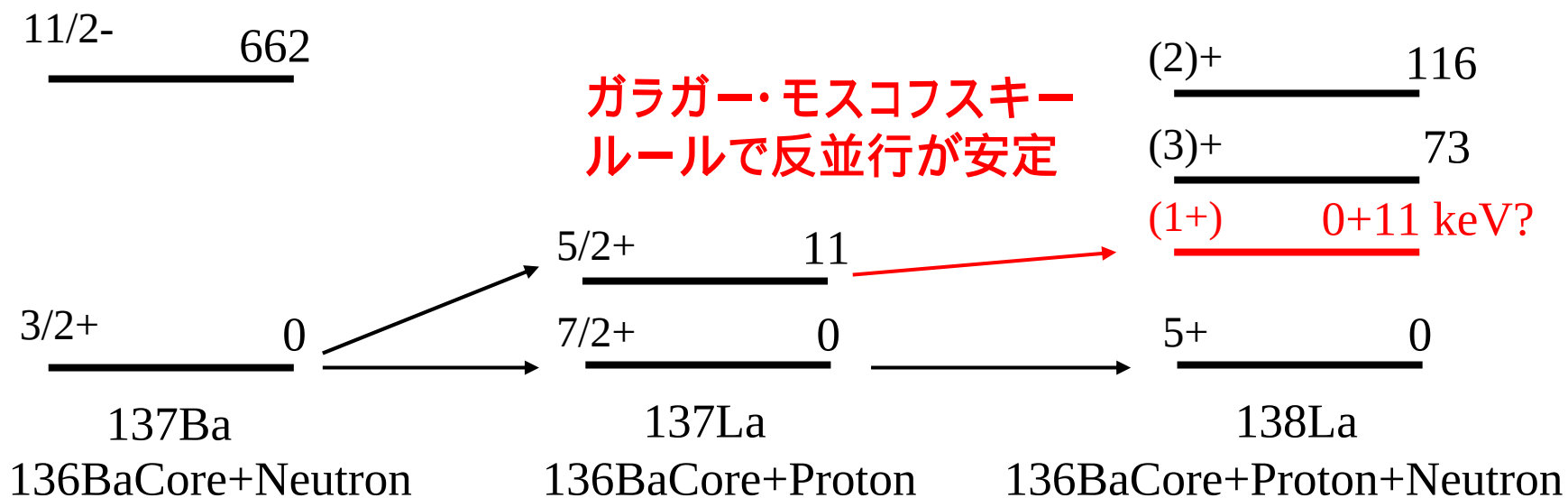
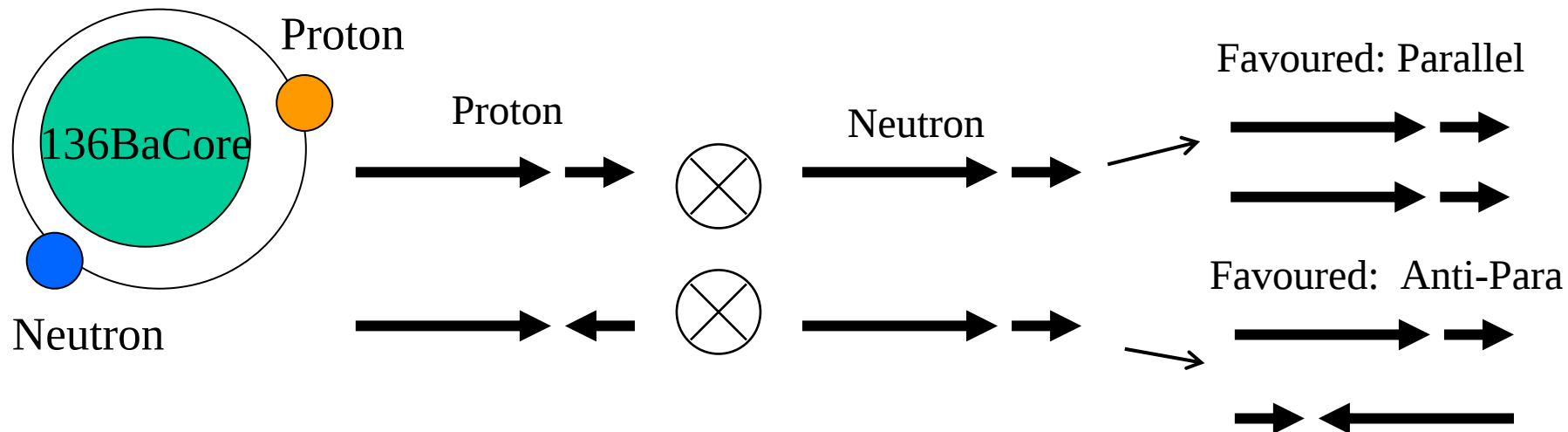
低スピンのアイソマーの発見には  
連続  $\beta$  崩壊実験法を有効。

↓

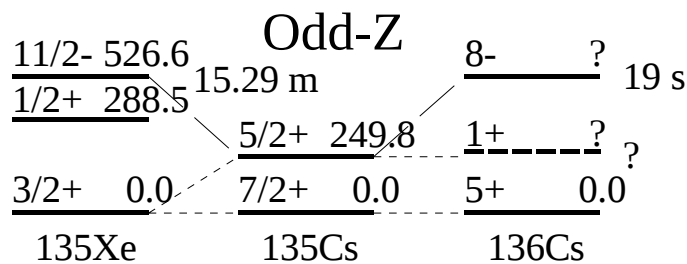
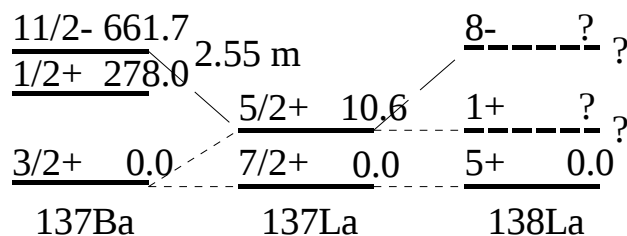
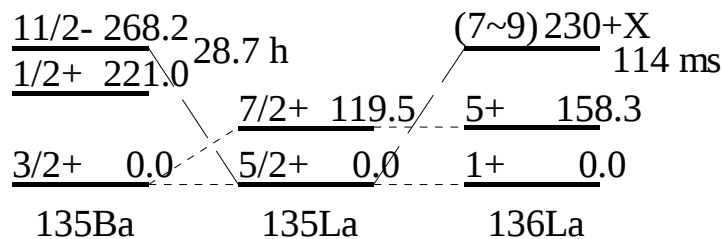
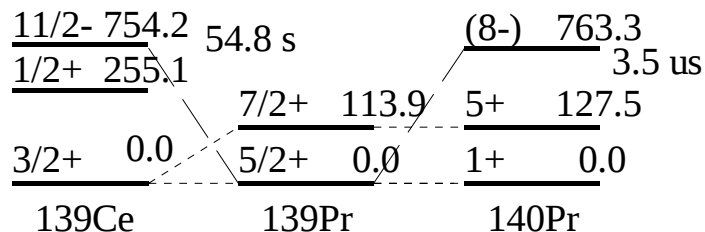
•しかし、 $^{138}\text{La}$ はシールドされているので  
この手法が使えない。

• $^{138}\text{La}$ は長寿命の崩壊核種なので、 $\beta$   
崩壊は、ナチュラルLaで行われていた。

# ガラガー・モスコスキー・ルール



# 138La近傍の原子核構造



Odd-N

Odd-Z

Odd-odd

ガラガーモスコフスキールールで、

1. 4組の基底状態
2. 140Prと、136Laの5+状態

が説明できる。

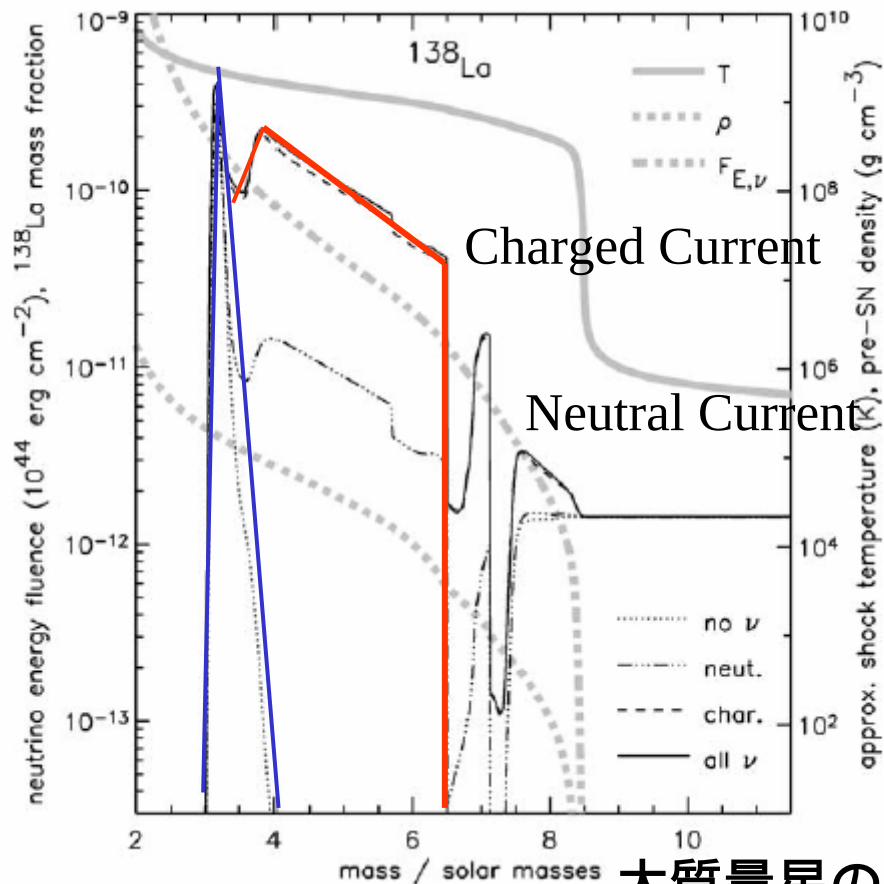


ガラガーモスコフスキールールは、  
この領域で良く成り立っている。

# $^{138}\text{La}$ の起源の問題と環境温度

A. Heger, Phys. Lett. B 606, 258 (2005)

$^{138}\text{La}$ の生成量



p-process  
 $\sim 10^9$  K

Neutrino-process  
 $10^9$  K以下

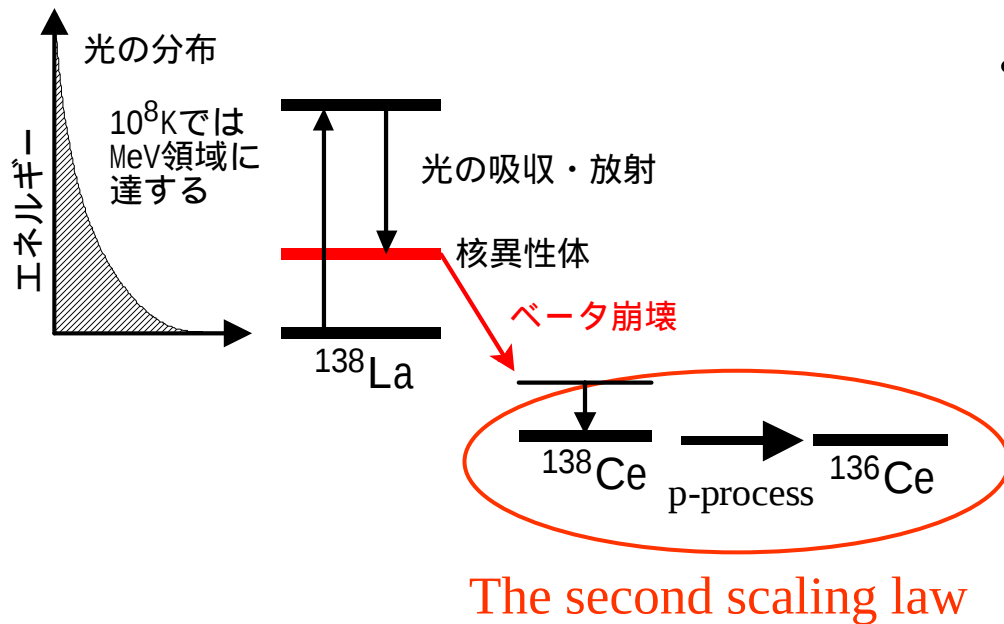
大質量星の半径

## $^{138}\text{La}$ の起源が問題

- Neutrino-process : 0.02~0.5
- p-process: 1~3
- 宇宙線: 極低温: 0 ( $T_9$ )



環境の温度が著しく異なる



•仮に<sup>138</sup>Laにアイソマーが存在



•娘核の<sup>138</sup>Ceの初期量が問題

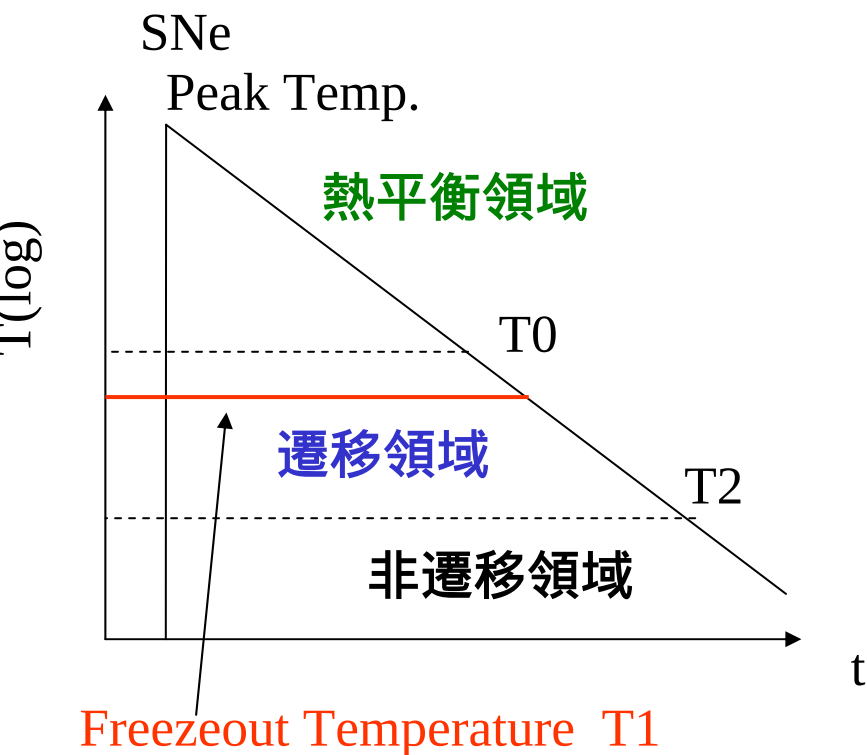


•第2経験則によると、<sup>136</sup>Ceから<sup>138</sup>Ceの量を評価

新たに提案する温度計の概念図

これまで確立したものが無かった、超新星爆発の重元素合成過程の原子核宇宙温度計を提案(アイソマーが存在すれば)。

## 超新星爆発の環境温度

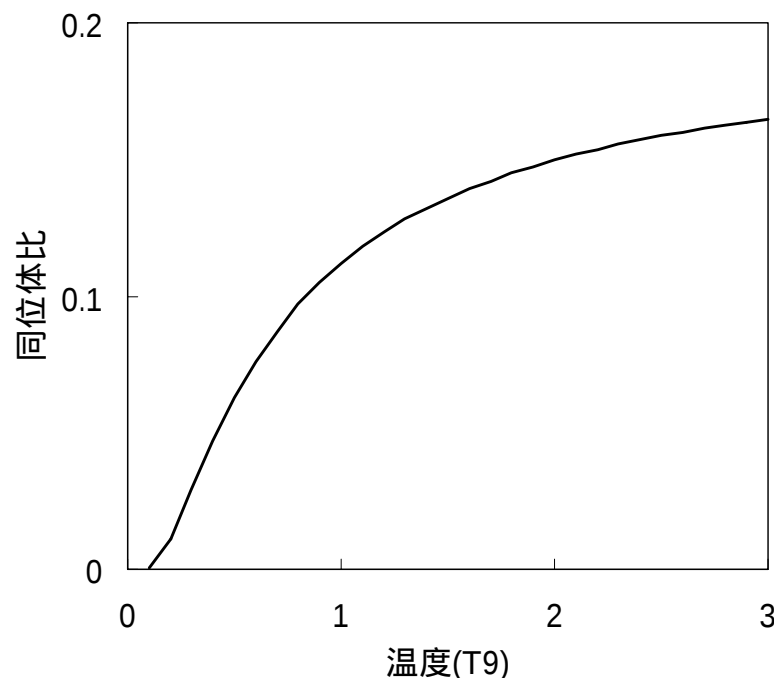


$T1 > T0$ : 熱平衡

$T1 < T0$ : 温度の時間変化を反映

## 熱平衡領域の場合の質量分布の計算結果の一例

A typical isotope ratio  
 $N(138\text{Ce})/N(138\text{La})$



0 ~ 16%の質量分布の変化

# ニュートリノ過程研究の現状

---

## Woosleyグループ: 理論計算

A.Herger, Phys. Lett. B (2005):  $^{138}\text{La}$ の太陽組成の90%を説明

## Aronldグループ: 理論計算

S.Goriely, A&A (2001) :  $^{138}\text{La}$ の起源の謎

## Langankeグループ: 理論計算に必要な、荷電反応率の測定 (RCNP)

2004 ~ 2005年に阪大で $^{138}\text{Ba}(^3\text{He}, t)$ 実験済み。現在評価中。

また理論計算: C. Frohlich, submitted to Phys. Rev. Lett.

## 梶野グループ: 理論計算

T.Yoshida, Phys. Rev. Lett. (2005).

T.Yoshida, Phys. Rev. Lett. (2006).



$^{138}\text{La}$ の原子核  
構造データ

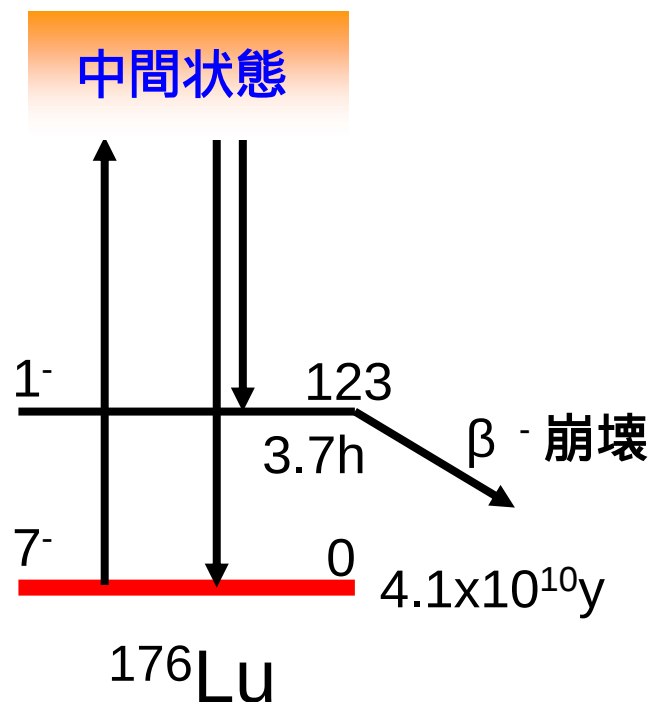
# T.Shizuma $^{176}\text{Lu}$ と $^{180}\text{Ta}$ 核異性体について

## $^{176}\text{Lu}$ s-process核

基底状態  $I^\pi=7^-$   $4.1 \times 10^{10}\text{y}$  準安定

$E_x=123\text{keV}$   $I^\pi=1^-$   $3.7\text{h}$

s-process 中の高温状態下で実効的半減期が変化 宇宙温度計



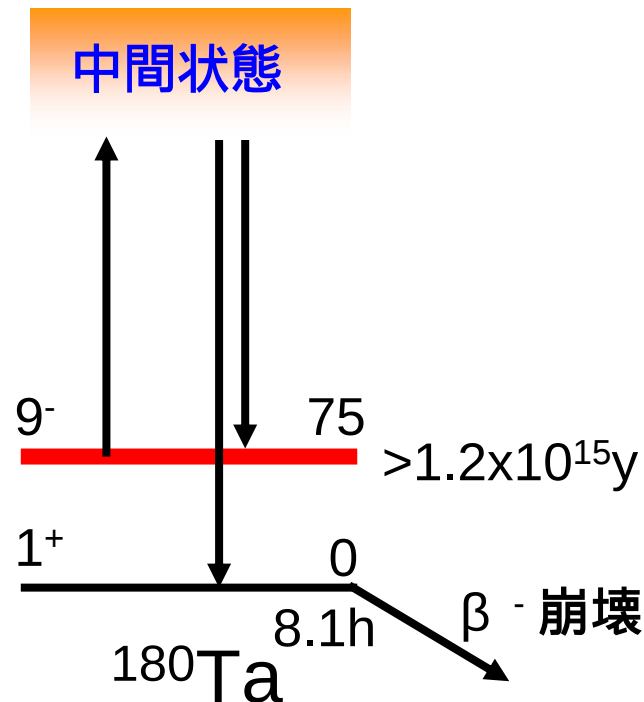
## $^{180}\text{Ta}$

基底状態  $I^\pi=1^+$   $8.1\text{h}$

$E_x=75\text{keV}$   $I^\pi=9^-$   $>1.2 \times 10^{15}\text{y}$

天然に存在する唯一の核異性体  
最も存在量が少ない元素

恒星内元素合成過程がわかっていない



# s-process中の $^{180}\text{Ta}$ 核異性体の光脱励起

## 光核反応率

$$\lambda(T) = \int_0^\infty \underbrace{cn_\gamma(E, T)}_{\text{光子数}} \underbrace{\sigma_\gamma(E)}_{\text{光核反応断面積}} dE$$

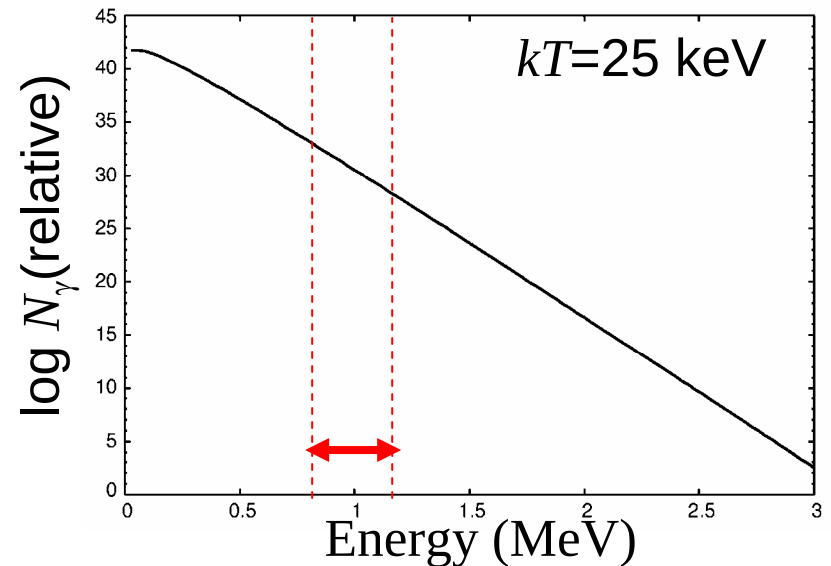
光子数 プランク分布

$$\left(\frac{1}{\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{\eta c}\right)^3 \frac{E^2}{\exp(E/kT) - 1}$$

$T = 1 \sim 3 \times 10^8 \text{K}$

光核反応  
断面積

## 光子エネルギースペクトル



s-process中では、1 MeV領域のガンマ線が重要

1 MeV以上

Stuttgart Dynamitron 電子加速器 制動放射光

1 MeV以下

適当な光源がなく、断面積測定データなし

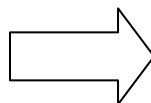
T. Shizuma

$$I_\gamma = 1 \times 10^{10} \text{ /keV/s (6T, 1mA)}$$

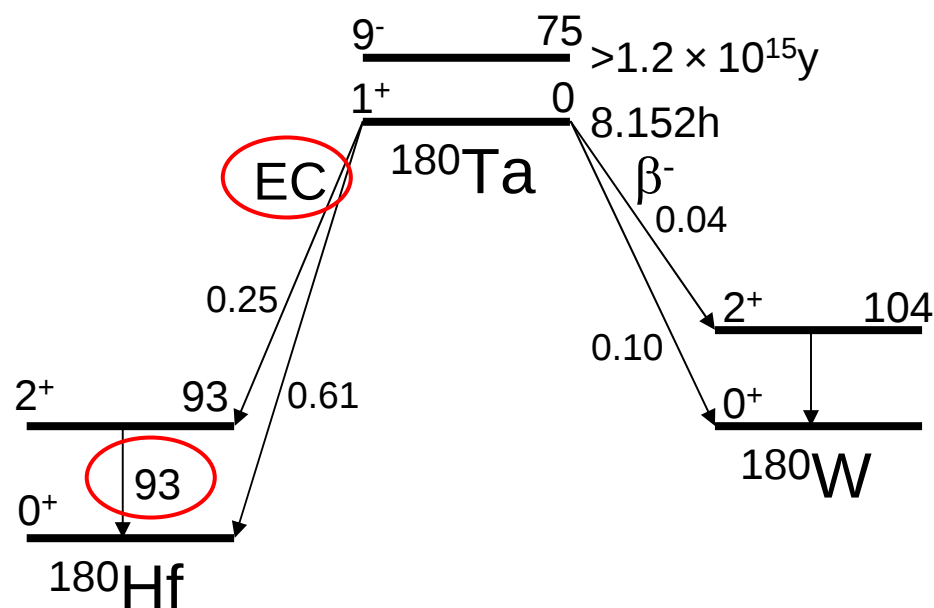
$$I_s = 0.057 \text{ eV b}$$

$$N_t = 1 \text{ g/cm}^2 \times 0.012\%$$

$$\text{反応率 } Y = 0.23 \text{ /s}$$



$$\text{8時間照射後の生成数 } N = 5 \times 10^3$$



$^{180}\text{Ta}$ の1崩壊当たり

93keV  $\gamma$ 線 4.1%

55.8keV  $K_{\alpha 1}$ X線 40.3%

54.6keV  $K_{\alpha 2}$ X線 23.4%

55.8 keV X線の測定

$\varepsilon = 10\%$ 、8時間測定

$N = 100$ カウント

# まとめ

---

1. 準安定な奇奇核( $A > 58$ )は、 $^{180}\text{Ta}$ 、 $^{176}\text{Lu}$ 、 $^{138}\text{La}$ のみである。
2.  $^{180}\text{Ta}$ と、 $^{176}\text{Lu}$ には、アイソマーが存在し、天体核物理の上で重要。  
特に、基底状態とアイソマーのガンマ線遷移断面積が重要
3.  $^{138}\text{La}$ は、近年ニュートリノ過程から急速に着目されている。
4.  $^{138}\text{La}$ にアイソマーの可能性を指摘した。その場合、ニュートリノ過程に大きな影響を与える。

## 研究課題

1.  $^{176}\text{Lu}$ と $^{180}\text{Ta}$ の基底状態-核異性体の遷移確率の測定      0.5 ~ 2MeV  
176Lu(2.5%→60%)濃縮試料、100mg購入予定
2.  $^{138}\text{La}$ のアイソマーの探索  
8MeV以上。連続光でOK。