

# 地球上で検出された短寿命r核Fe-60とPu-244

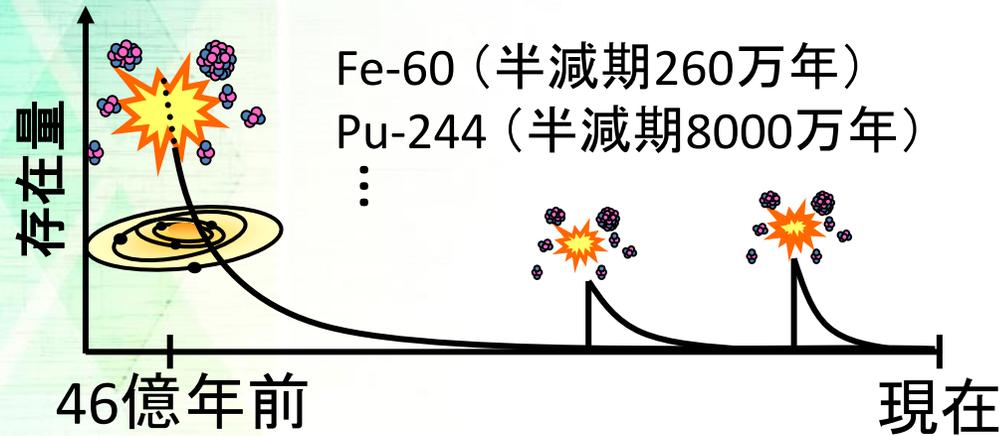
Short life r-nuclei Fe-60 and Pu-244 detected on the Earth

清水建設(株) 木下 哲一

# 話の内容

- 序論
- 試料・測定方法・結果
- 検出された $^{60}\text{Fe}$ と $^{244}\text{Pu}$ の起源
- 超新星爆発の地球への影響

# 実験室での天体核物理研究



- 分析技術の精鋭化  
加速器質量分析の開発  
 $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ 検出限界  $\sim 10^{-17}$   
 $^{244}\text{Pu}$ 検出限界  $\sim 100$ 個

## ○分析・解析

- 爆発的環境下での元素合成
- 超新星爆発による太陽系近傍の物質の分布
- 超新星爆発活動による地球環境への影響



# 加速器質量分析(AMS)

主な測定対象:

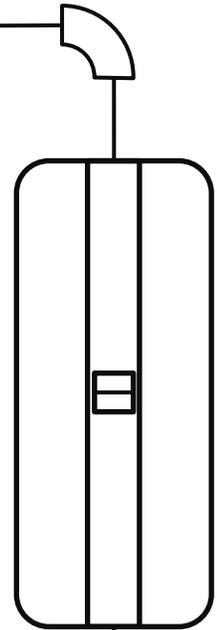
$^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{129}\text{I}$



Csスパッタ型  
負イオン源

ストリッパー  
Arガス+Cホイル

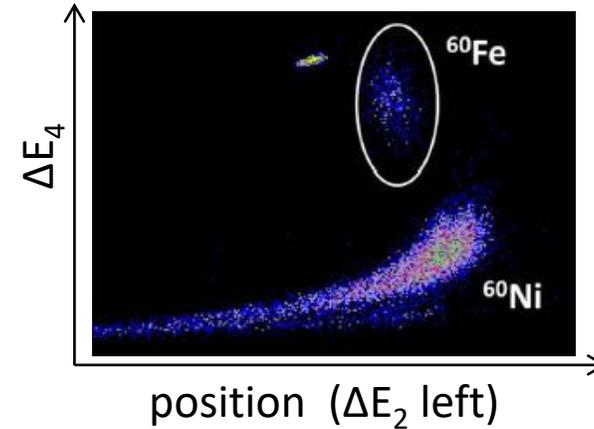
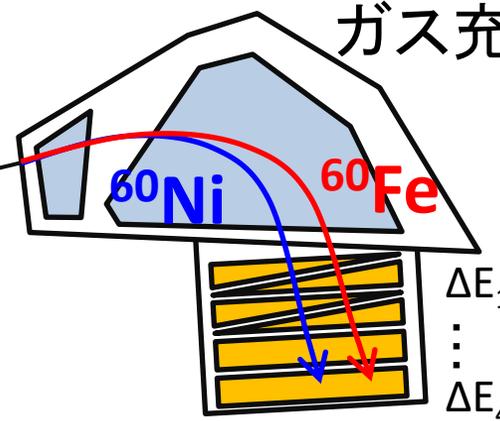
$^{60}\text{Fe}^{16}\text{O}^-$



14UD pelletron  
ターミナル電圧  
14MV

$^{60}\text{Fe}^{11+}$

Wien  
filter



オーストラリア国立大学

# 地球上に存在する放射性核種



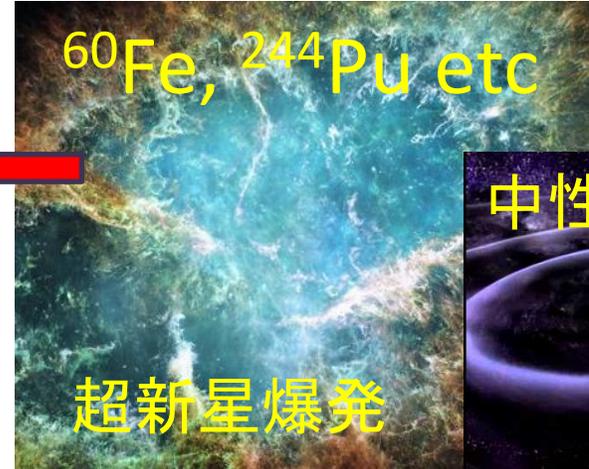
太陽・銀河宇宙線

空気と核反応

$^{10}\text{Be}$  ( $T_{1/2}=139$ 万年), etc

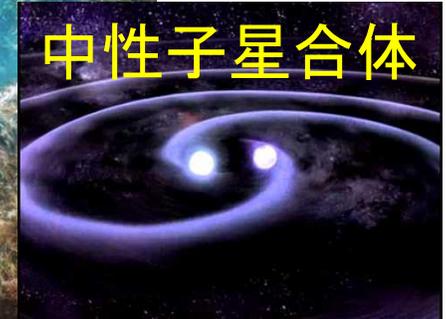
$^{60}\text{Fe}$  ( $T_{1/2}=260$ 万年)

$^{244}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}=8100$ 万年)



$^{60}\text{Fe}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  etc

超新星爆発

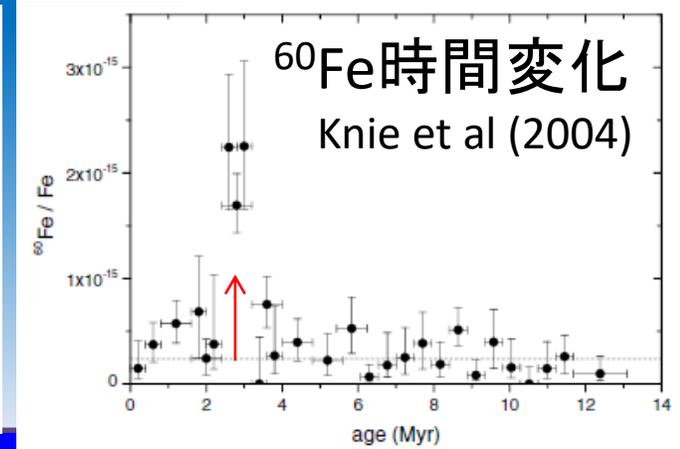
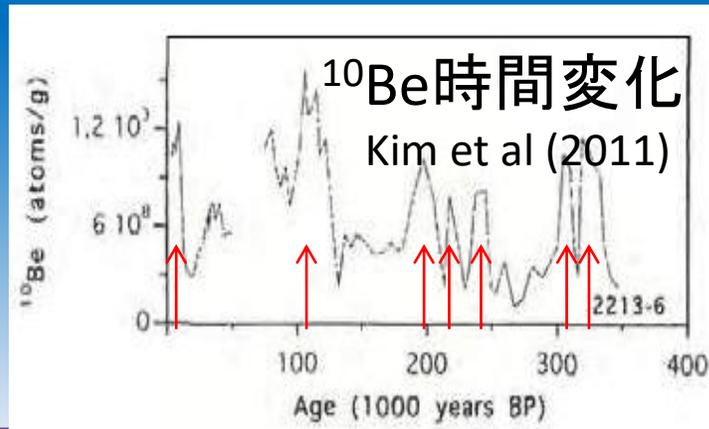


中性子星合体



$^{244}\text{Pu}$  etc

大気圏内核実験



マンガンジュール  
マンガンクラスト

# $^{60}\text{Fe}$ と $^{244}\text{Pu}$ 探索の歴史

1971年 Hoffman  
希土類鉱物から $^{244}\text{Pu}$ を検出

1973年 Sakamoto  
定常的な超新星爆発由来 $^{244}\text{Pu}$ の  
流入があれば説明可能

2001年 Paul  
海底堆積物より $^{244}\text{Pu}$ を検出  
核実験起源

2001年以降多数の $^{244}\text{Pu}$ の報告

2004年 Knie

2016年 Wallner, Kinoshita  
海底試料より $^{60}\text{Fe}$ を検出  
超新星爆発起源

2012年 Lachner  
希土類鉱物を再測定  
 $^{244}\text{Pu}$ は不検出

2021年 Wallner, Kinoshita  
マンガンクラストより $^{244}\text{Pu}$ を検出  
超新星爆発起源

表面電離型  
質量分析

加速器質量分析(AMS)

$^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{129}\text{I}$

対象核種を拡張

$^{60}\text{Fe}$ ,  $^{146}\text{Sm}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{239-244}\text{Pu}$

1970年

1980年

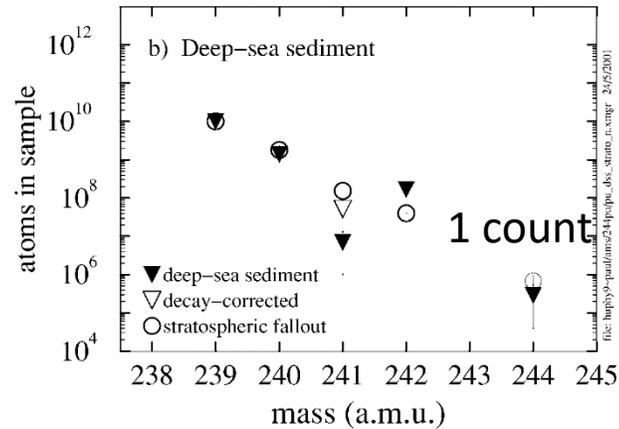
2000年

2020年 <sup>6</sup>

# $^{244}\text{Pu}$ に関するこれまでの研究

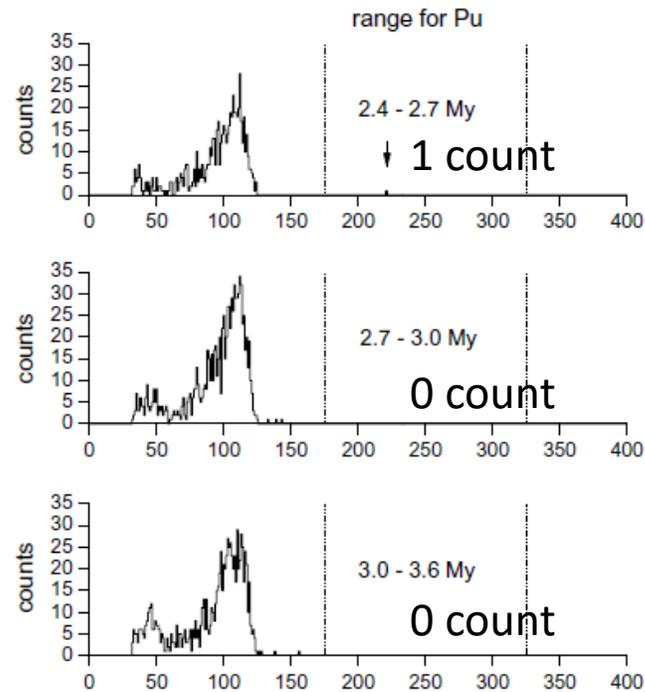
## 海底堆積物表層

Paul et al., APJ 2001



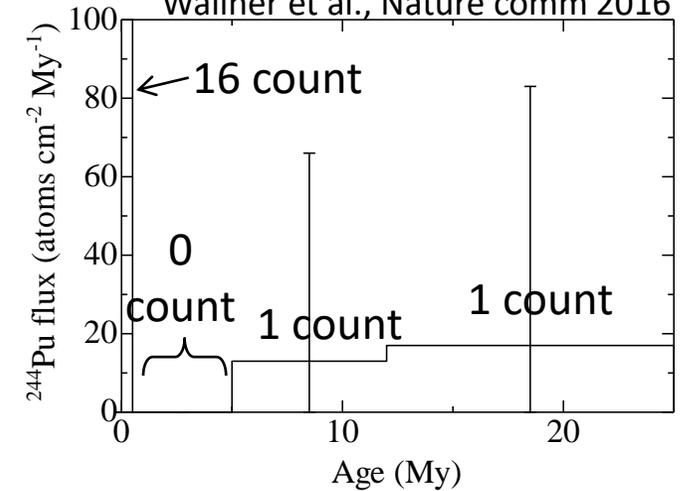
## 海底堆積物

Raisbeck et al., NIM B 2007



## マンガンクラスト

Wallner et al., Nature comm 2016



# 用いた海底試料



マンガンクラスト



マンガン  
ノジュール



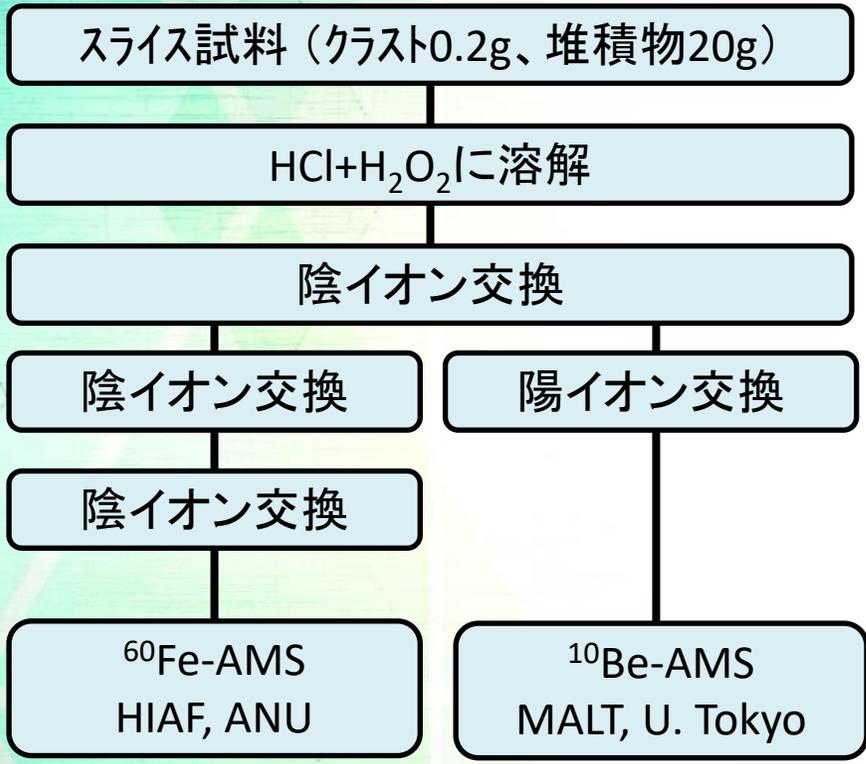
堆積物コア



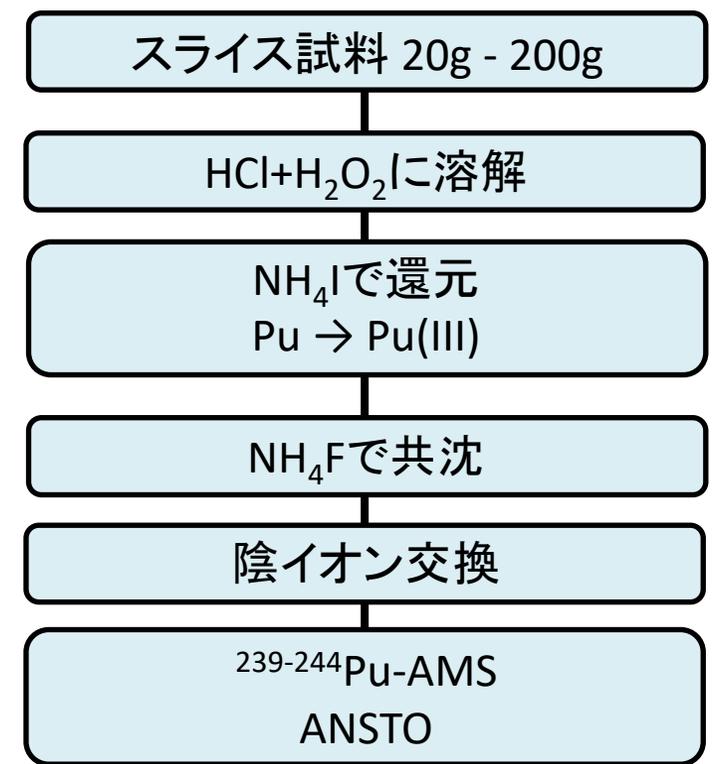
海底のノジュールとクラスト  
(JAMSTECより)

# 試料処理

$^{10}\text{Be}$ ,  $^{60}\text{Fe}$



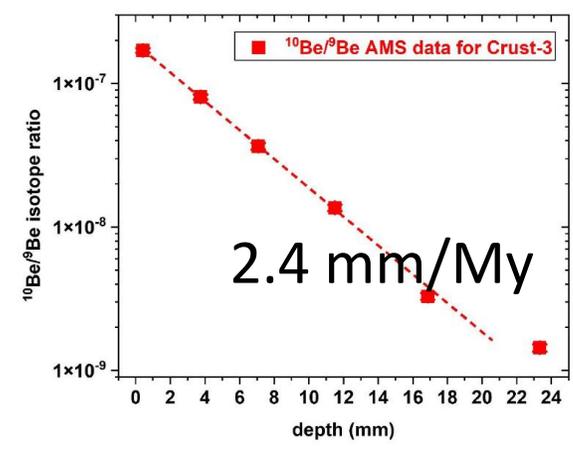
$^{244}\text{Pu}$



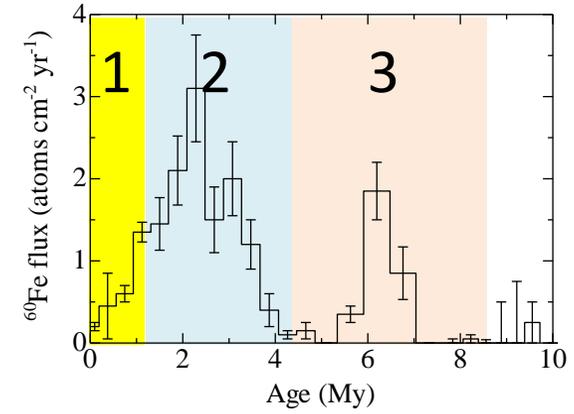
感度  
100倍



## $^{10}\text{Be}$ 年代測定

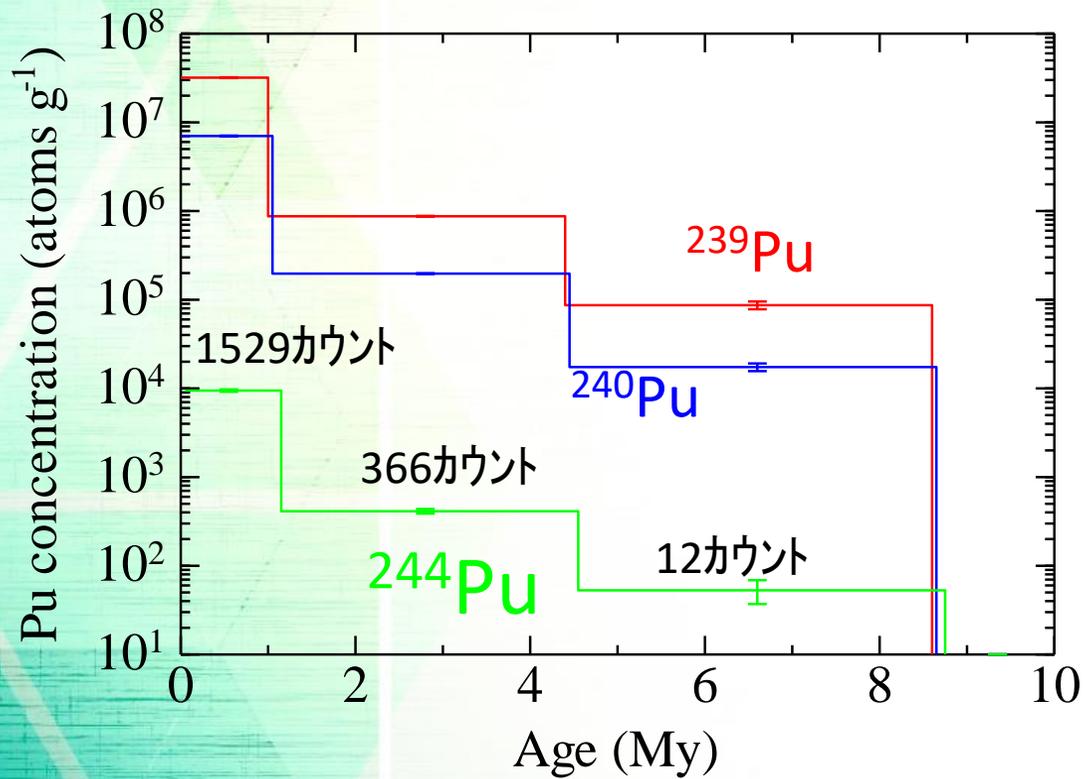


## $^{60}\text{Fe}$ 流入量時間変化

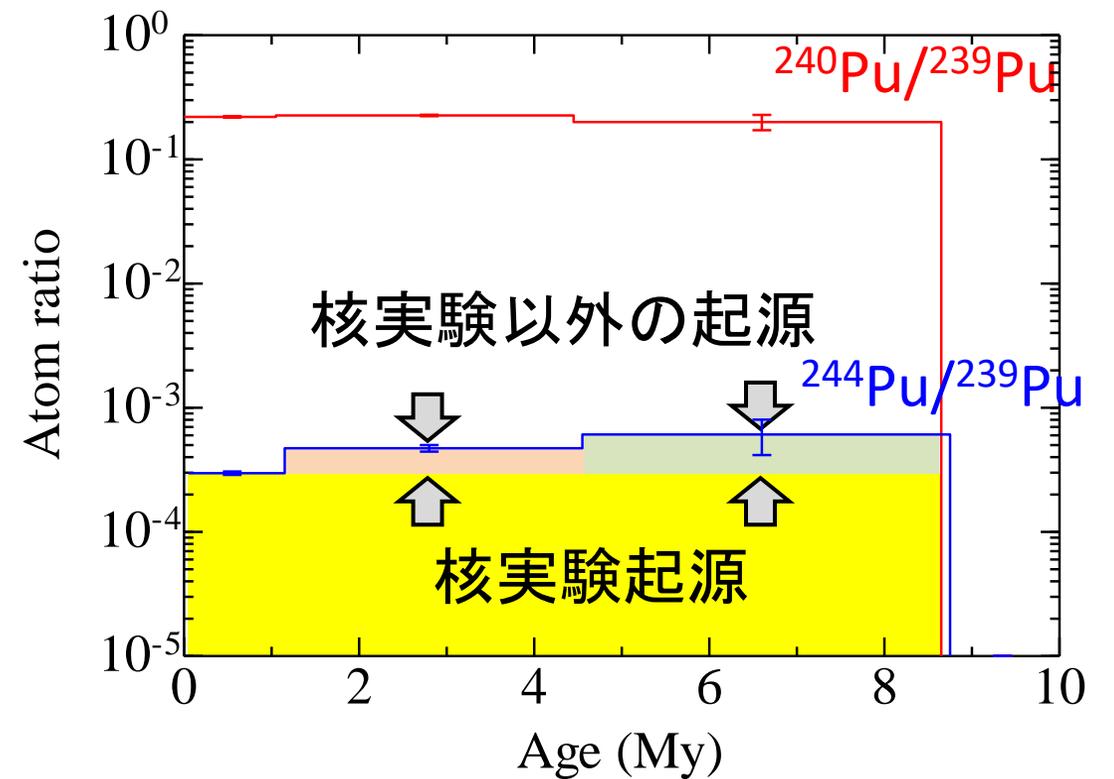


# $^{244}\text{Pu}$ の解析

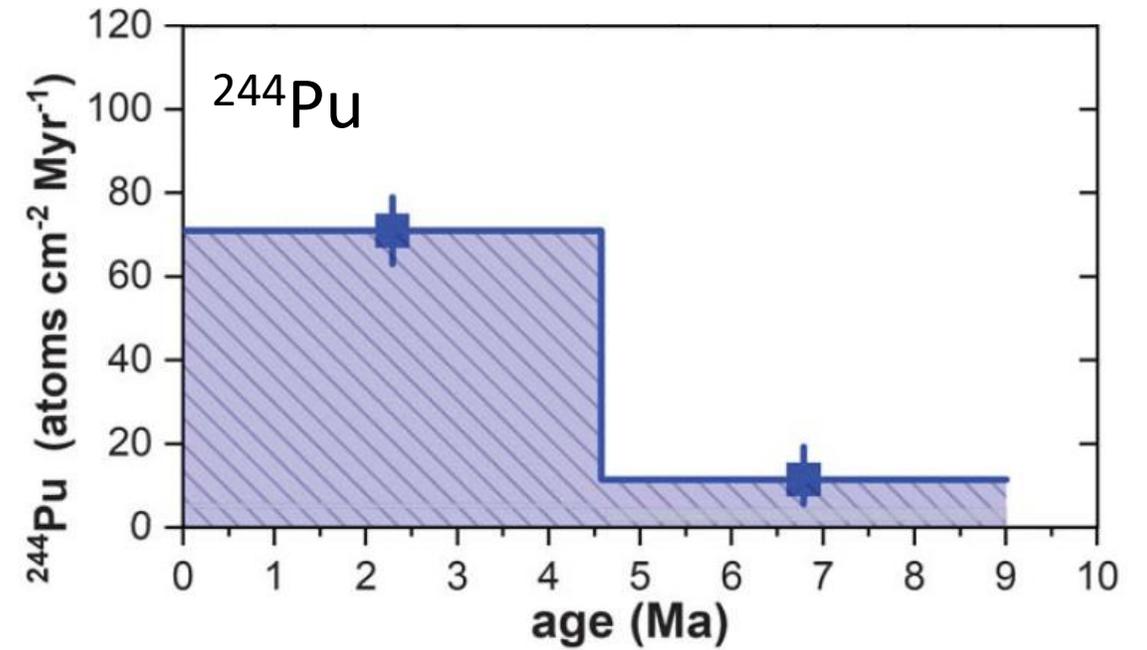
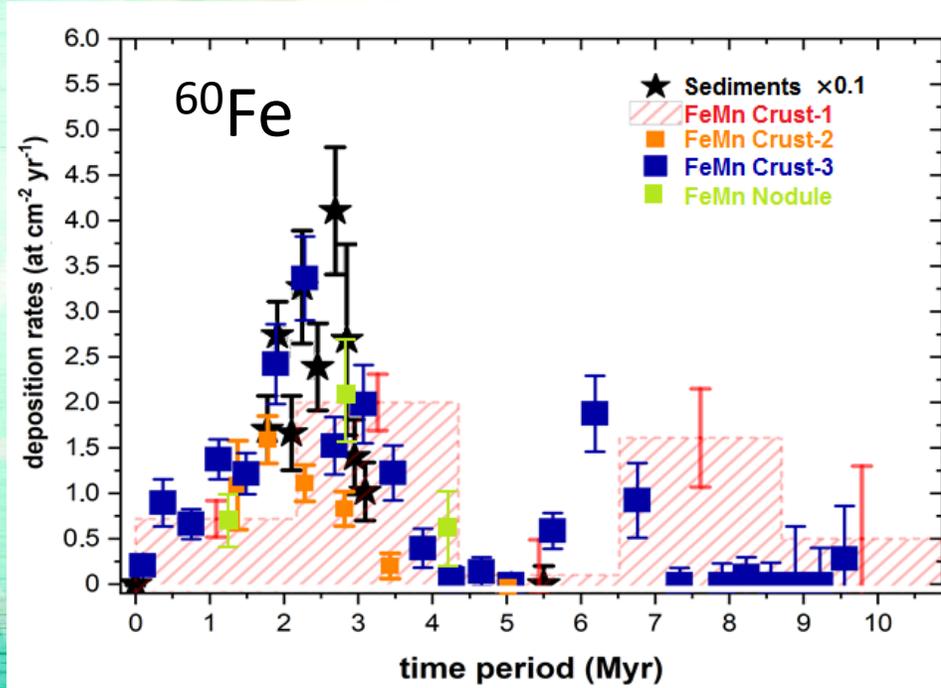
## Pu同位体の深度分布



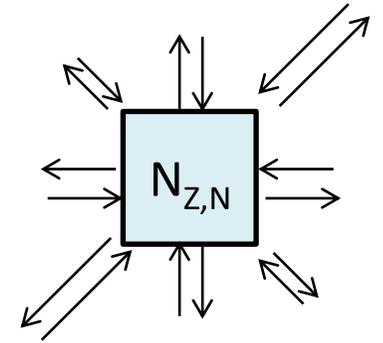
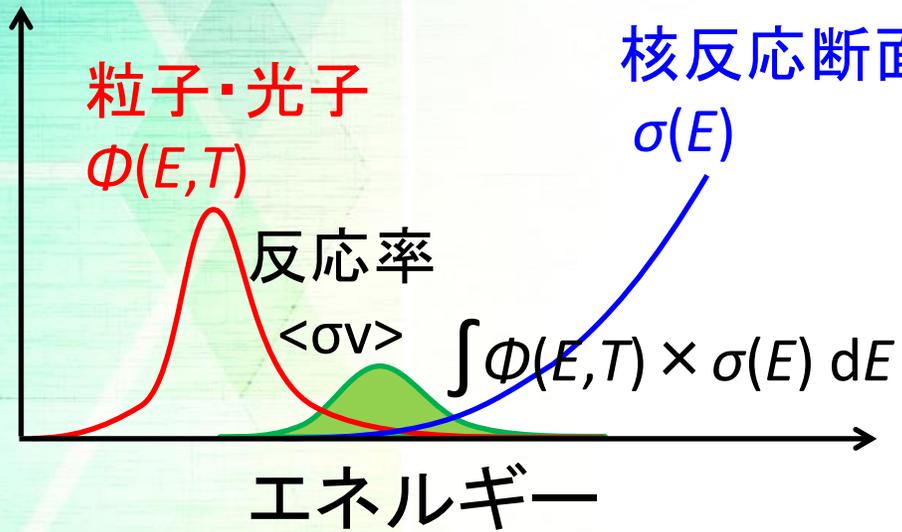
## 同位体比の分布



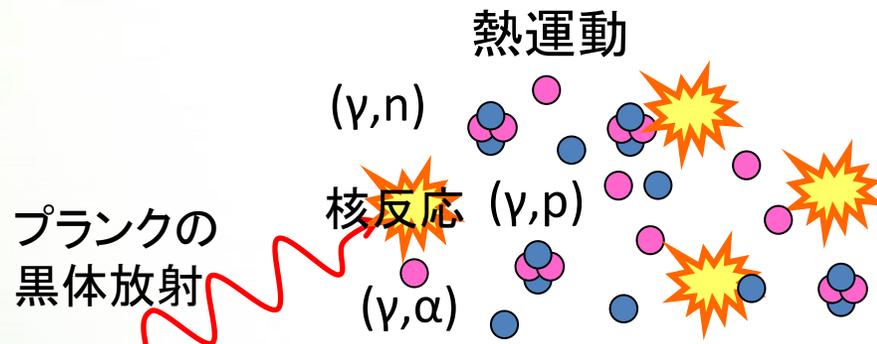
# $^{60}\text{Fe}$ と $^{244}\text{Pu}$ 蓄積量時間変化



# 超新星爆発の中での $^{60}\text{Fe}$ と $^{244}\text{Pu}$ の生成



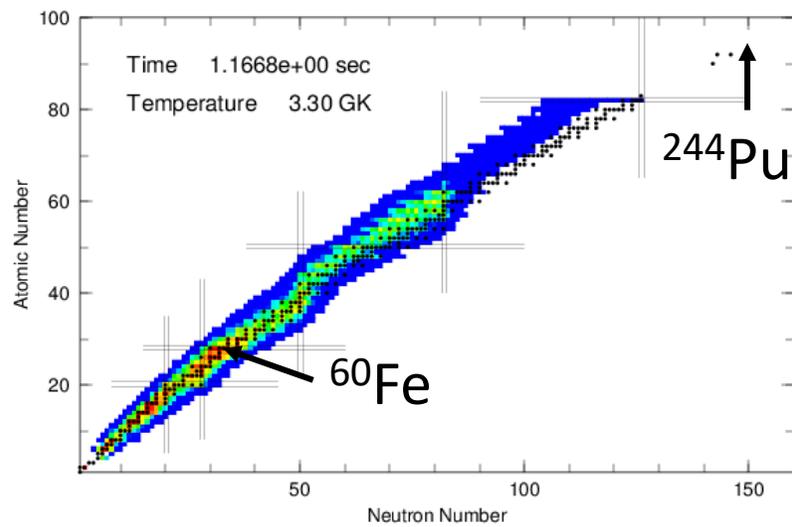
$$\frac{dN_{Z,N}(t)}{dt} = \langle \sigma v \rangle_{p,\gamma} N_{Z-1,N}(t) N_p(t) - \langle \sigma v \rangle_{p,\gamma} N_{Z,N}(t) N_p(t) + \dots - \dots$$



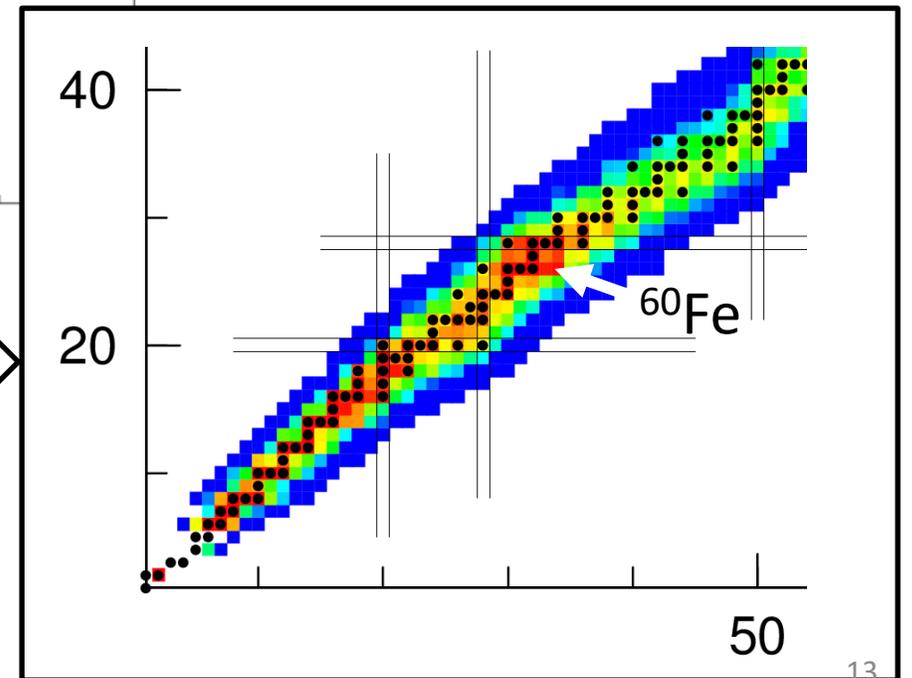
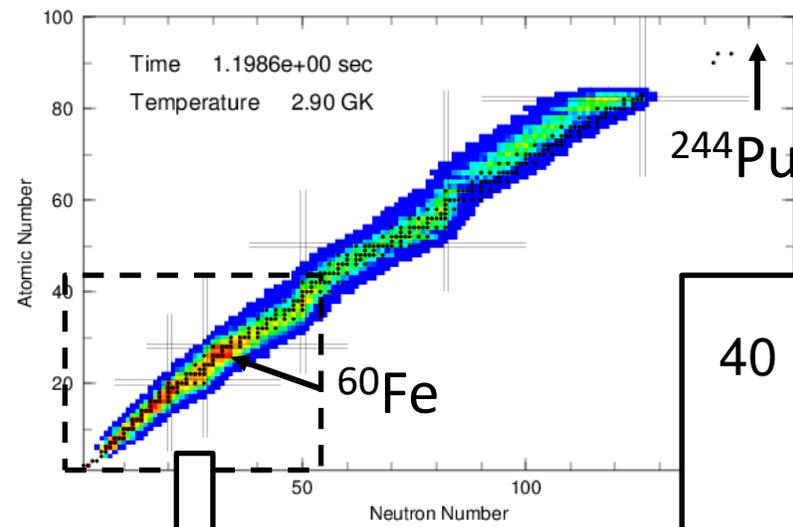
- $(\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, \alpha), (\gamma, f)$
- $(n, g), (n, p), (n, \alpha), (n, f)$
- $(p, g), (p, n), (p, \alpha), (p, f)$
- 放射壊変
- $(\alpha, g), (\alpha, n), (\alpha, p)$

# 超新星爆発の中での $^{60}\text{Fe}$ と $^{244}\text{Pu}$ の生成

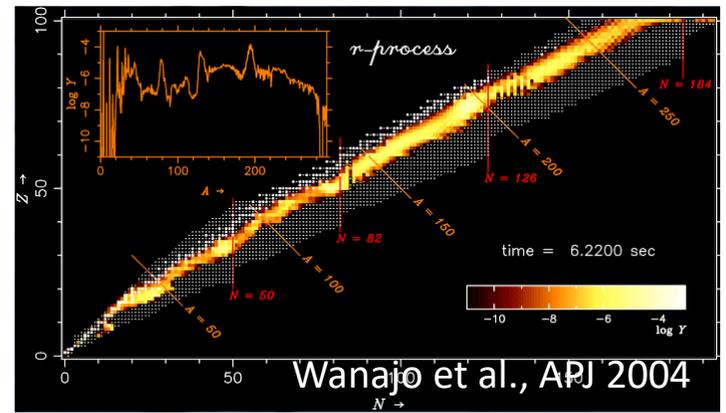
$$T_{\text{MAX}} = 3.3 \times 10^9 \text{ K}$$



$$T_{\text{MAX}} = 2.9 \times 10^9 \text{ K}$$

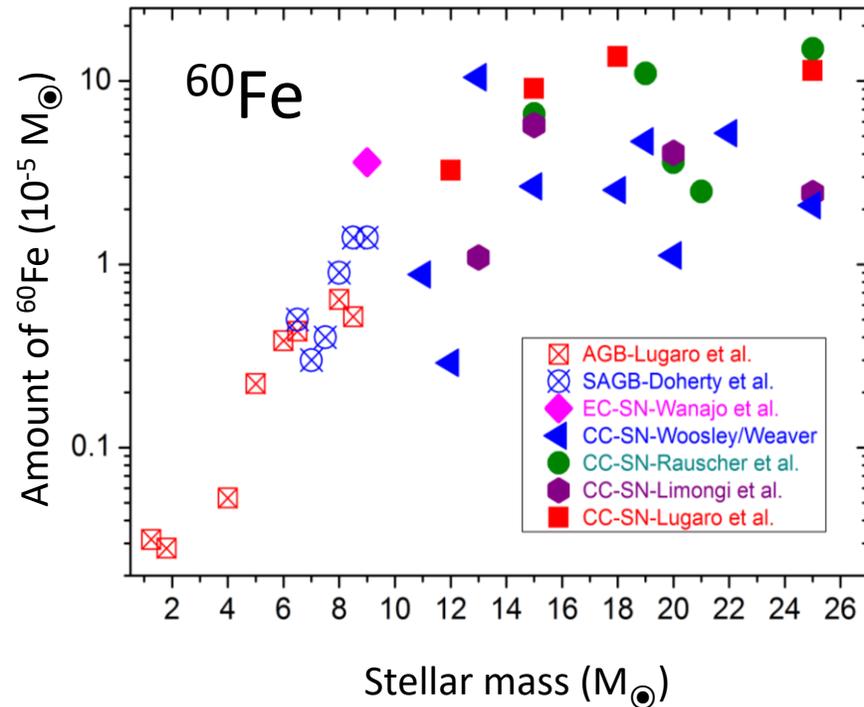


# $^{60}\text{Fe}$ と $^{244}\text{Pu}$ との生成量



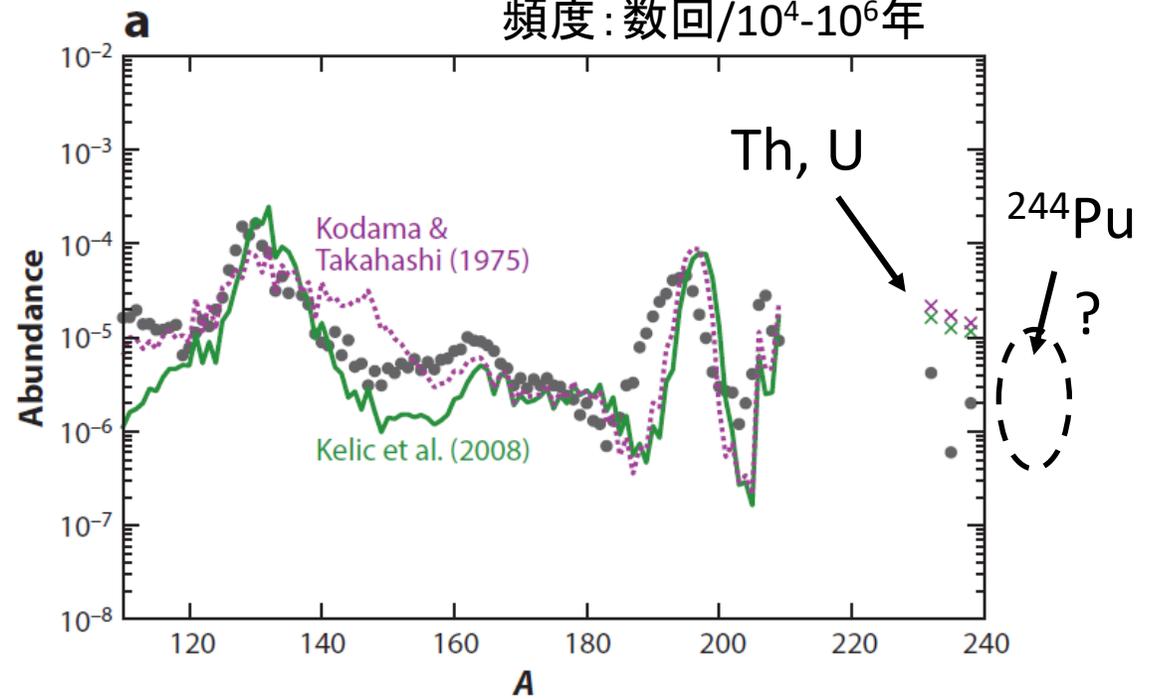
## 重力崩壊型超新星爆発 の中での $^{60}\text{Fe}$ 生成量

頻度: 数回/100年

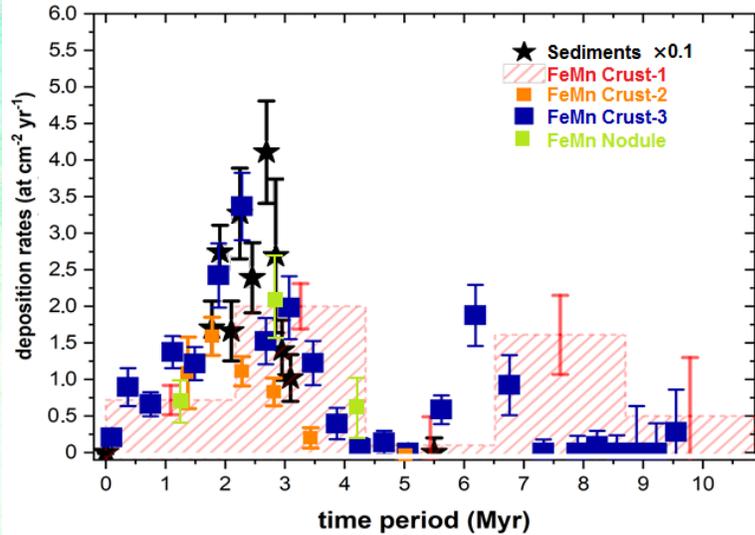


## 中性子星合体の中での生成量

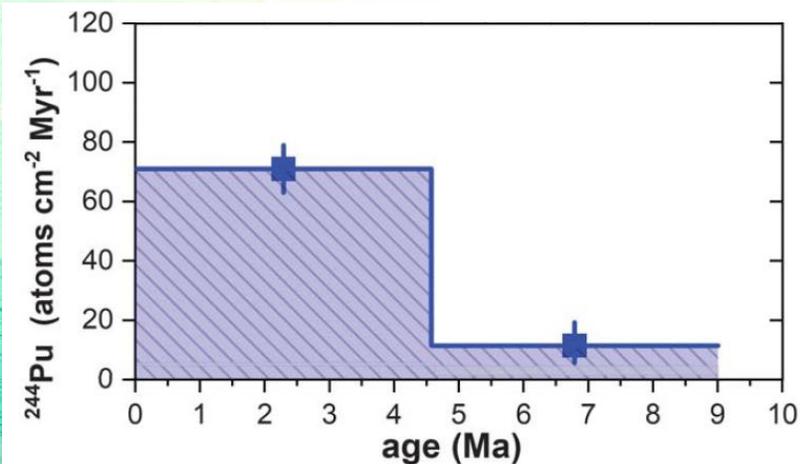
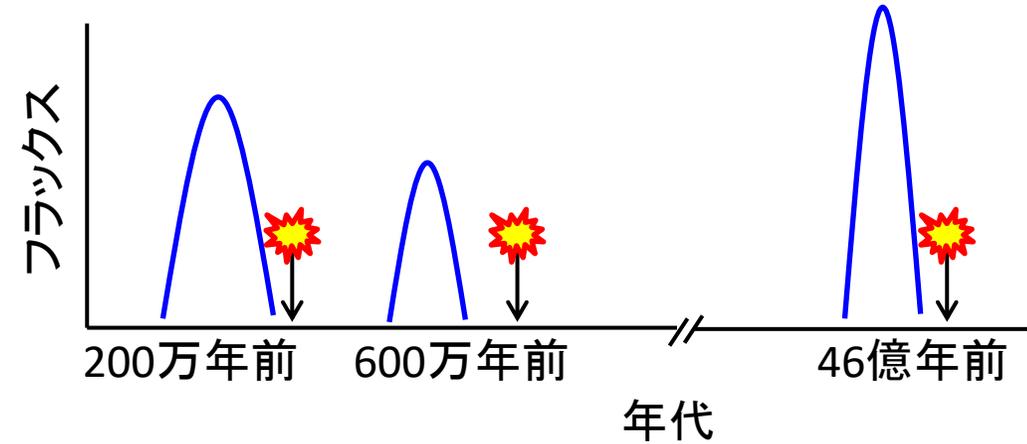
頻度: 数回/ $10^4$ - $10^6$ 年



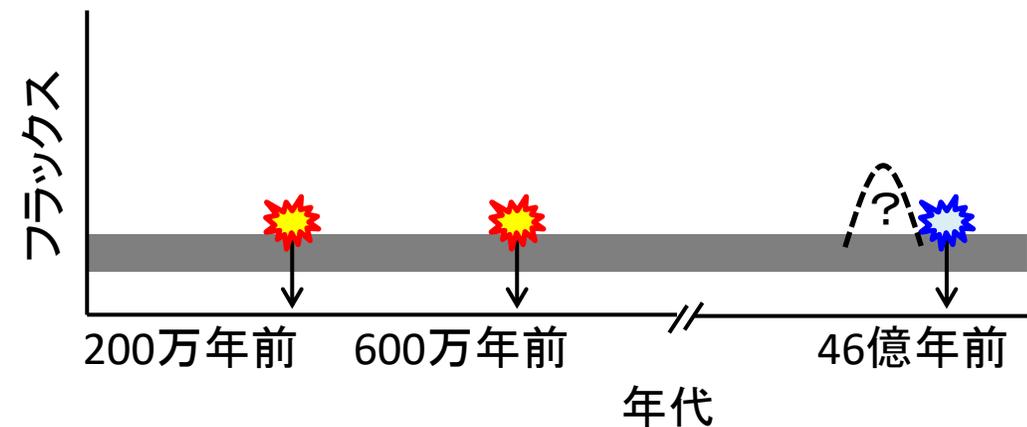
# $^{60}\text{Fe}$ と $^{244}\text{Pu}$ 蓄積量時間変化



$^{60}\text{Fe}$  (重力崩壊型超新星爆発起源 頻度: 数回/100年)

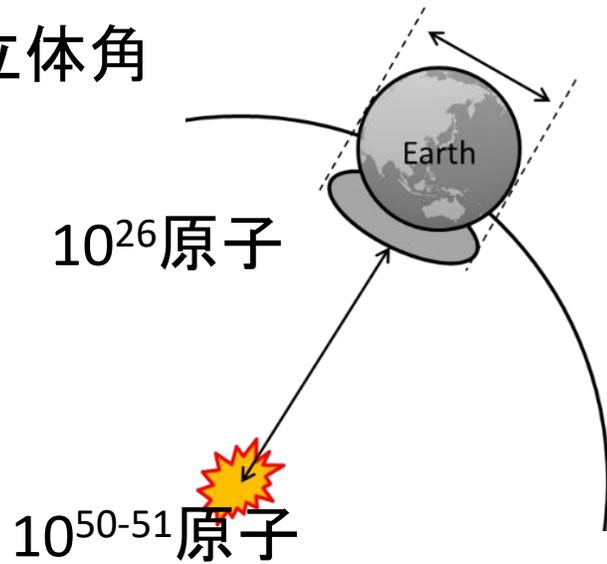


$^{244}\text{Pu}$  (中性子星合体etc起源 頻度: 数回/ $10^4$ - $10^6$ 年)

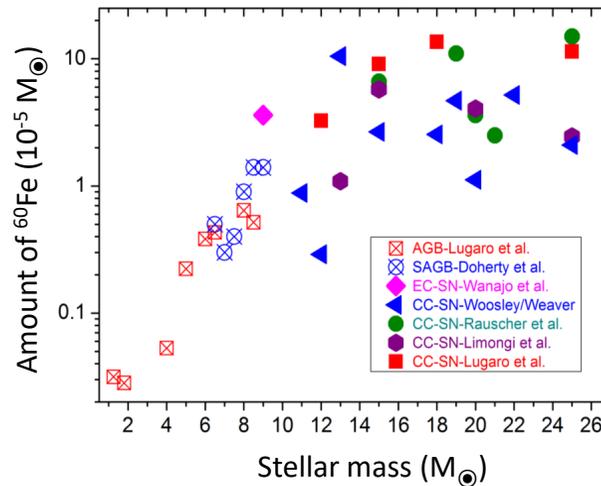


# 超新星爆発の距離の推定 ( $^{60}\text{Fe}$ )

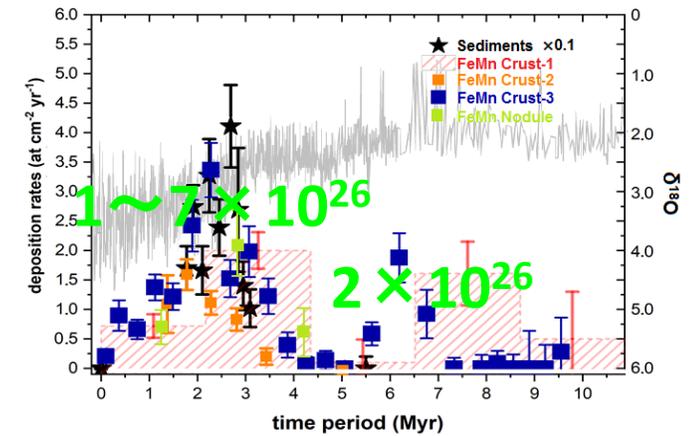
立体角



質量と $^{60}\text{Fe}$ 生成量



地球全体への $^{60}\text{Fe}$ 流入量



超新星爆発の地球からの距離の推定

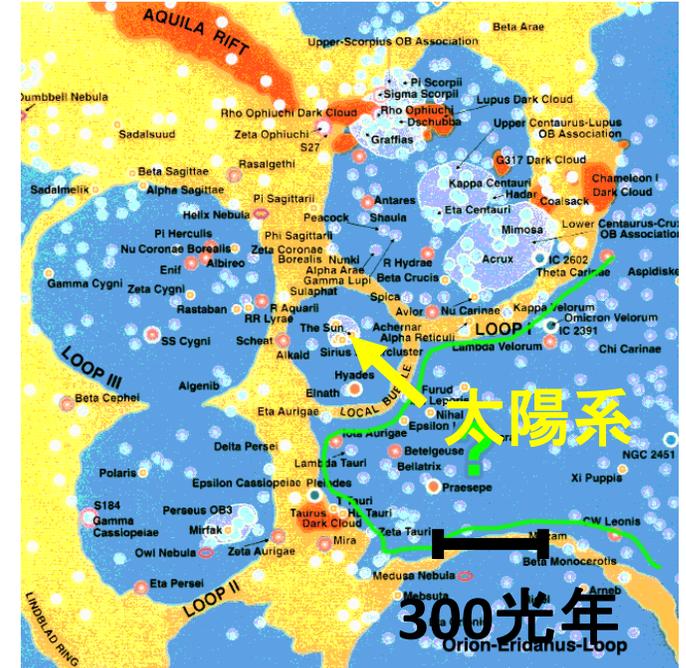
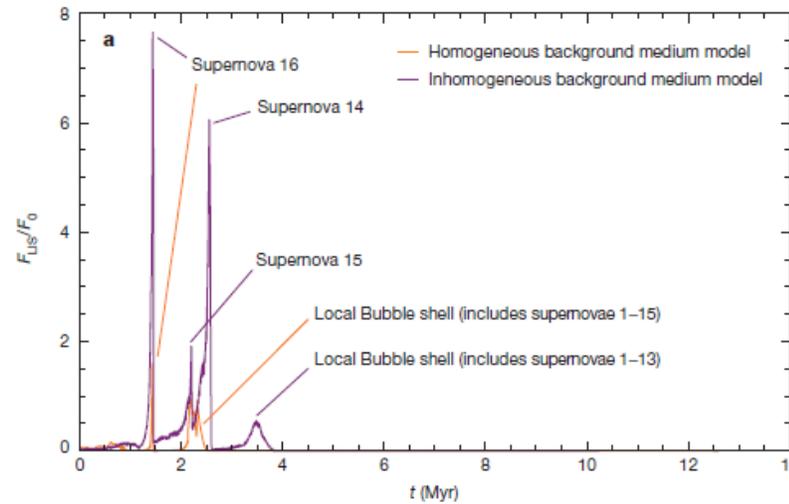
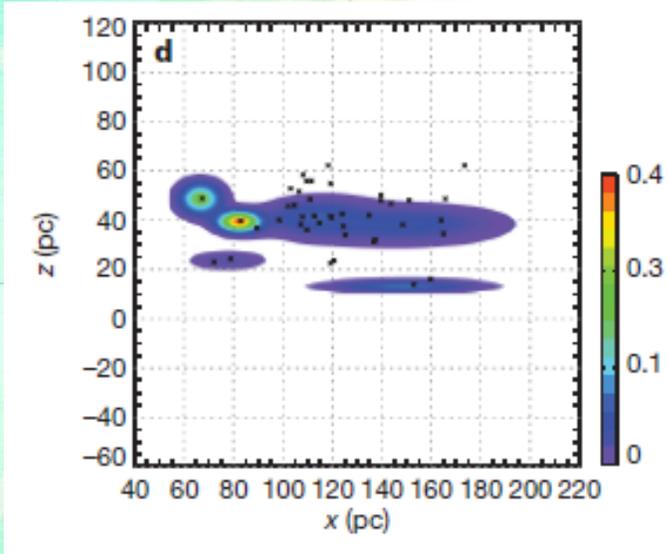
○200-300万年前の超新星爆発  
60-310 pc (200-1000光年)

○600-700万年前の超新星爆発  
50-100 pc (160-330光年)

# 超新星爆発の位置情報

○200-300万年前の超新星爆発残骸の軌道計算

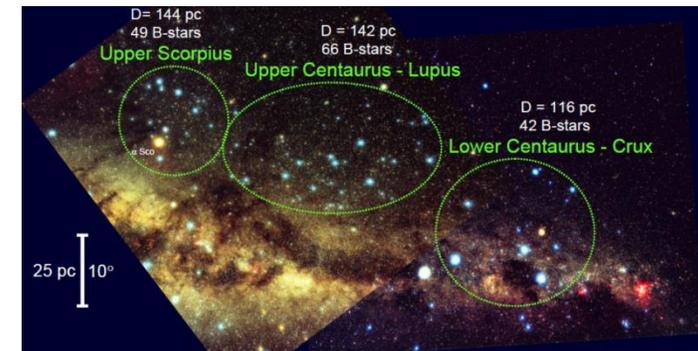
Breitschwerdt, Nature 2016



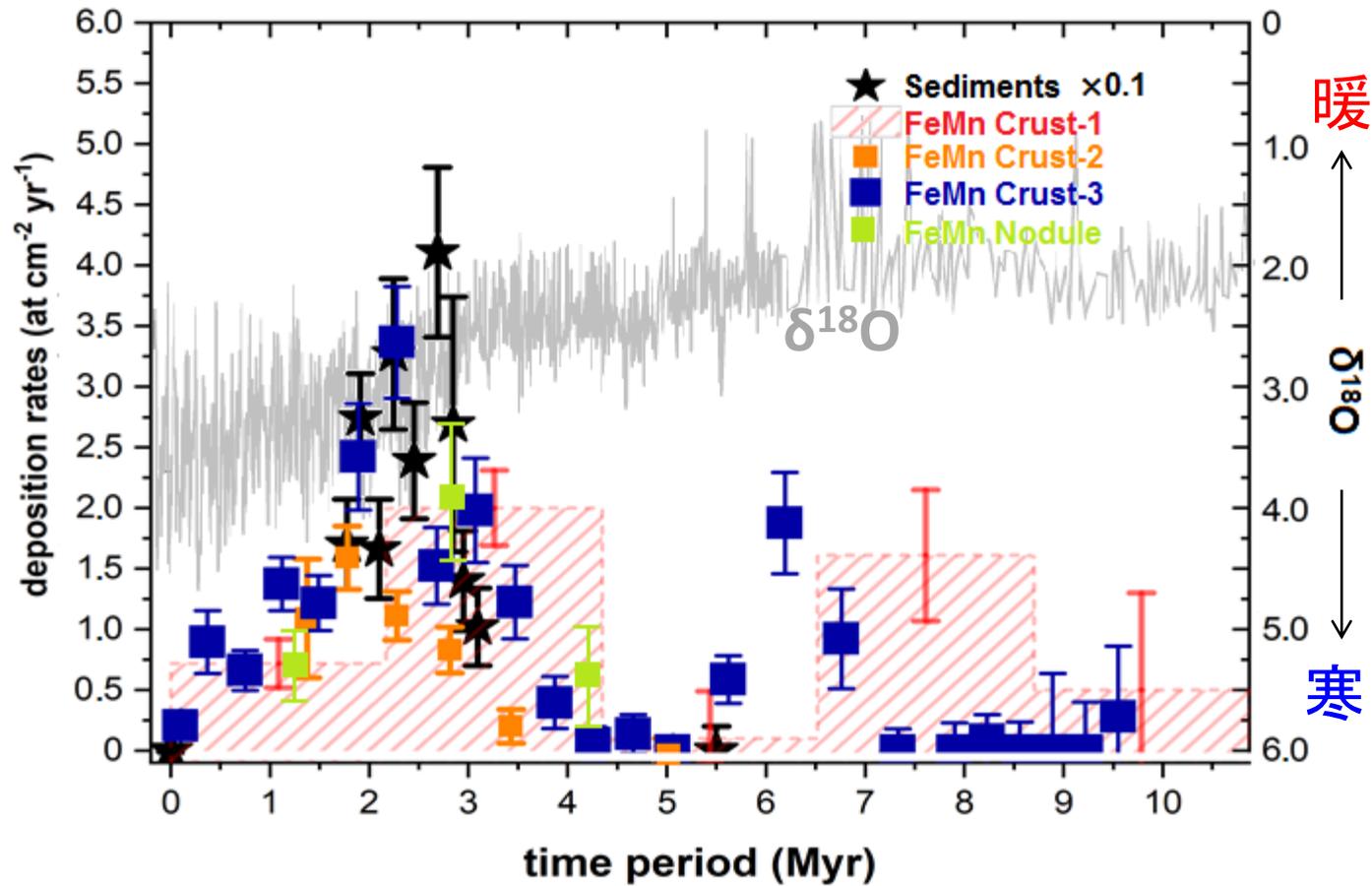
Henbest/Couper, Ohio state U

いずれの超新星爆発もローカルバブル内部

さそり-ケンタウルス運動星団の中での超新星



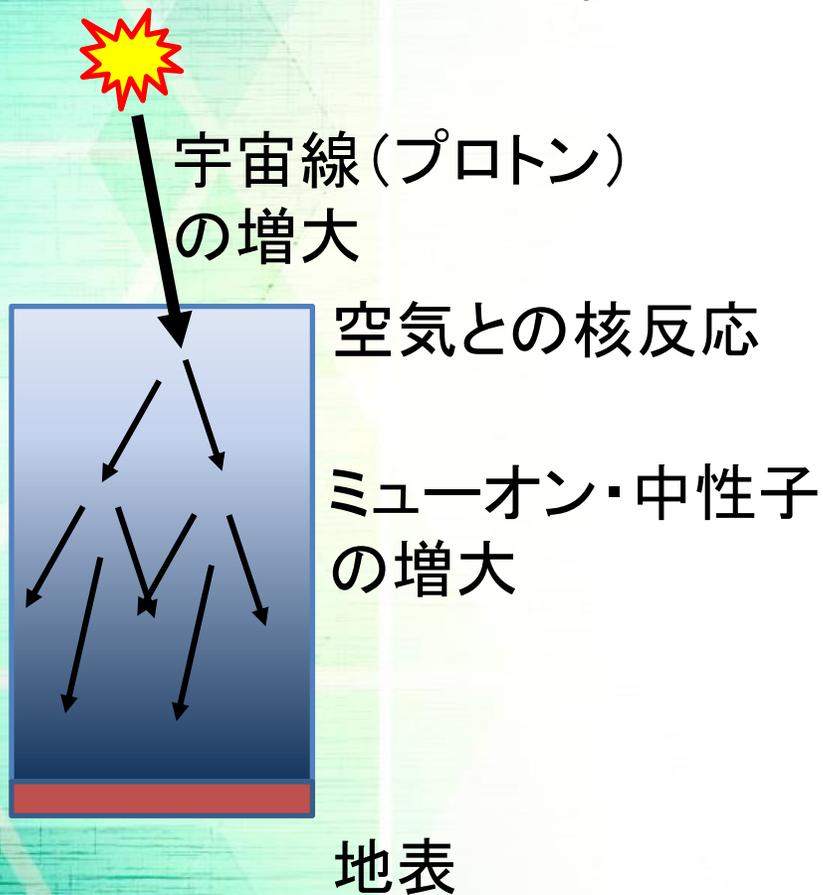
# 超新星爆発活動と地球環境への影響 1



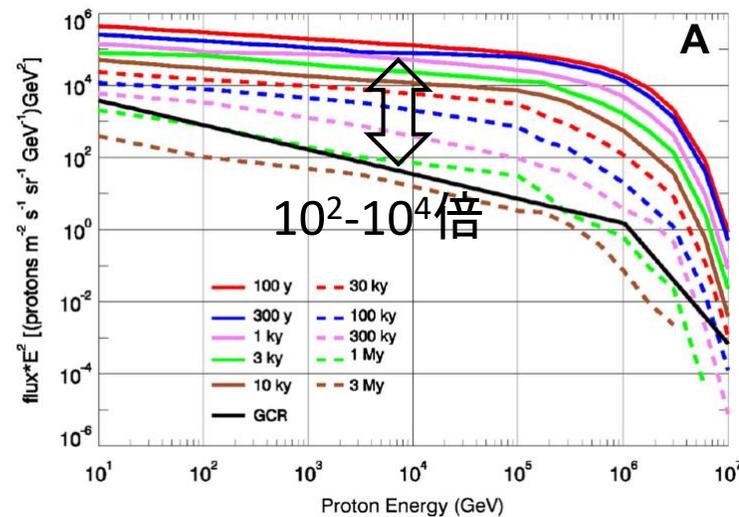
# 超新星爆発活動と地球環境への影響 2

50pc(160光年)での超新星爆発からの地球への影響

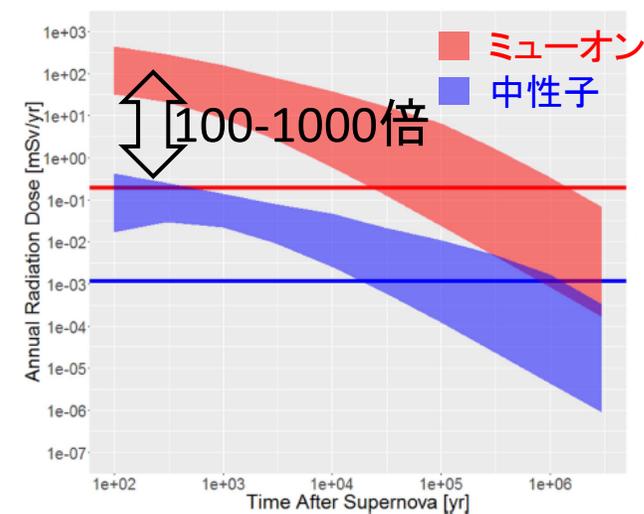
Melott et al., APJ 2017



### 地球へのプロトンフラックス



### 地表の線量



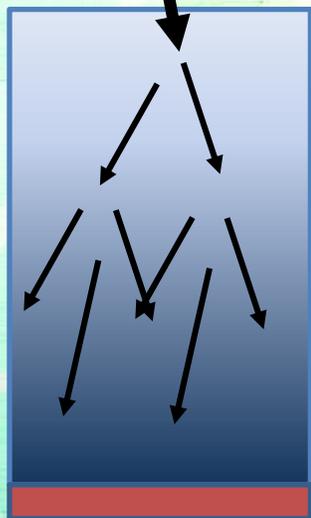
# 超新星爆発活動と地球環境への影響 2

50pc(160光年)での超新星爆発からの地球への影響

Melott et al., APJ 2017



宇宙線(プロトン)の増大



空気との核反応

ミュオン・中性子の増大

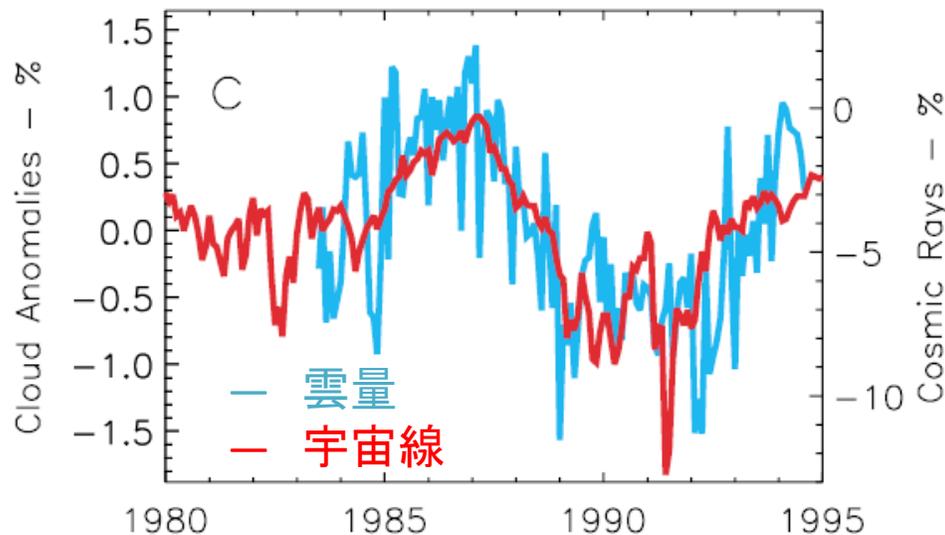
地表

雲量の増加

地球はどうかなる？

高度3km以下の雲量と宇宙線量

Marsh, Svensmark, PRL 2000



- ・温暖化
- ・寒冷化
- ・変化なし

$\delta^{18}\text{O}$ の時間分解能が $10^3$ - $10^4$ 年のため、気温の変化は見られなかった

# 共同研究者

Australian National University

A. Wallner, L. K. Fifield, M. B. Froehlich, S. Pavetich, S. G. Tims

University of Vienna

J. Feige, R. Golser, P. Steier, S. R. Winkler

Australian Nuclear Science and Technology Organisation (ANSTO)

M.A.C. Hotchkis

Hebrew University

M. Paul

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)

S. Merchel, G. Rugel

GeoPlasmaLab

U. Linnemann

Paul Scherrer Institute (PSI)

D. Schumann

JAEA

M. Honda

University of Tokyo

H. Matsuzaki, T. Yamagata

ご清聴  
ありがとうございました

