



# 宇宙線中性子による $^{176}\text{Lu}$ の 加速された崩壊

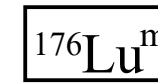
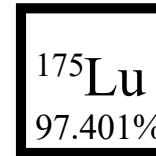
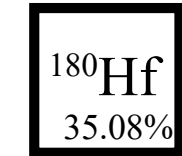
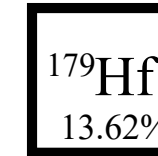
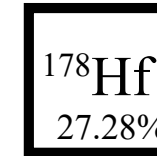
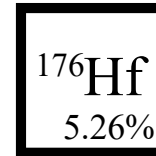
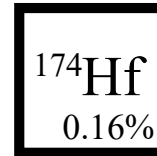
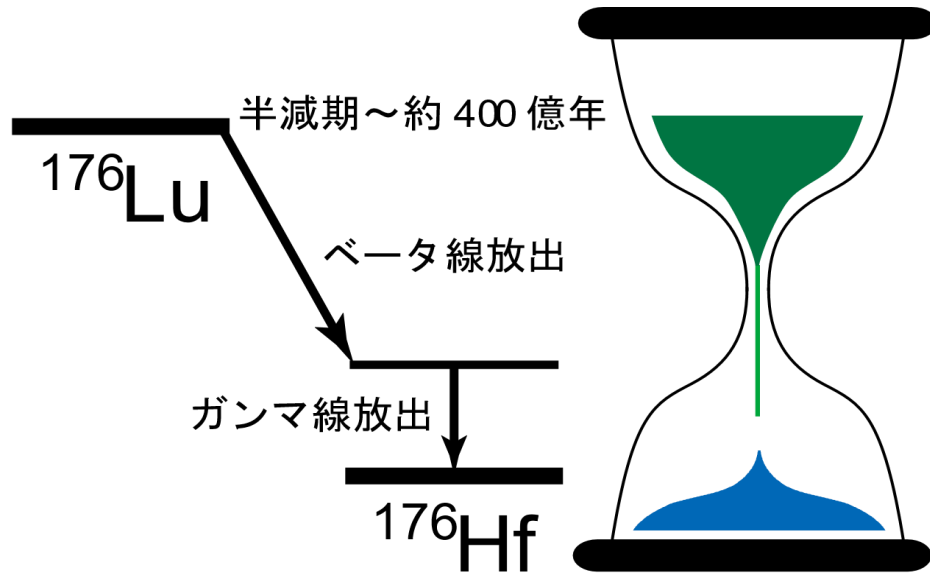
QST 早川岳人

共同研究者

東大 飯塚毅、吉原慧

東京科学大 千葉敏

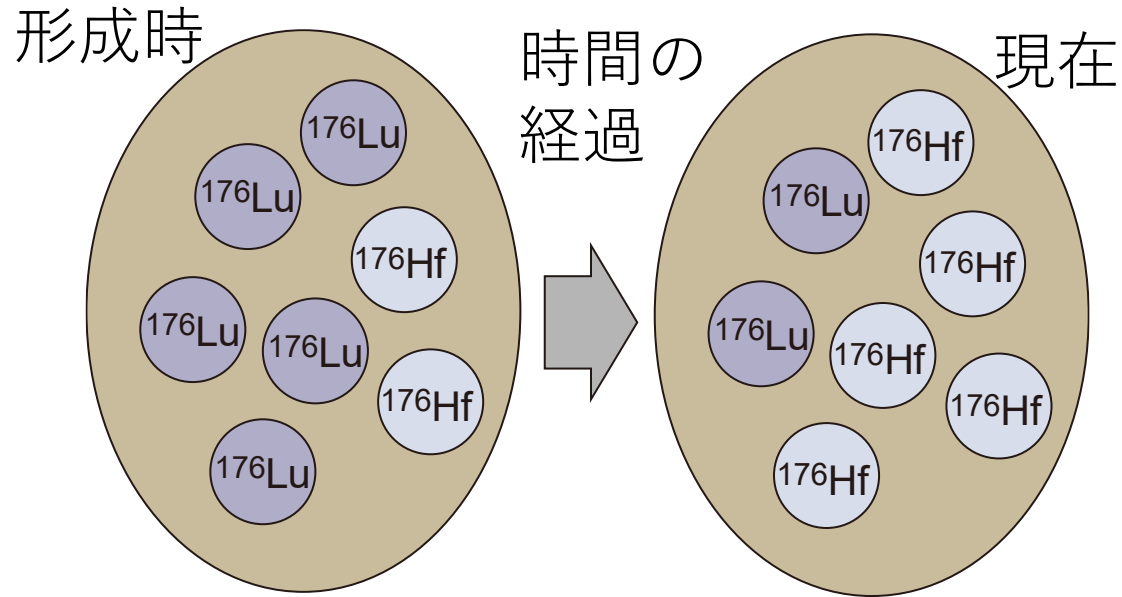
Beihang University 梶野敏貴



太陽系形成前の恒星の元素合成イベントの年代を計測する（理論的提案のみ）

Hfには6核種の安定同位体が存在する。  
Luには2核種の安定同位体が存在する。

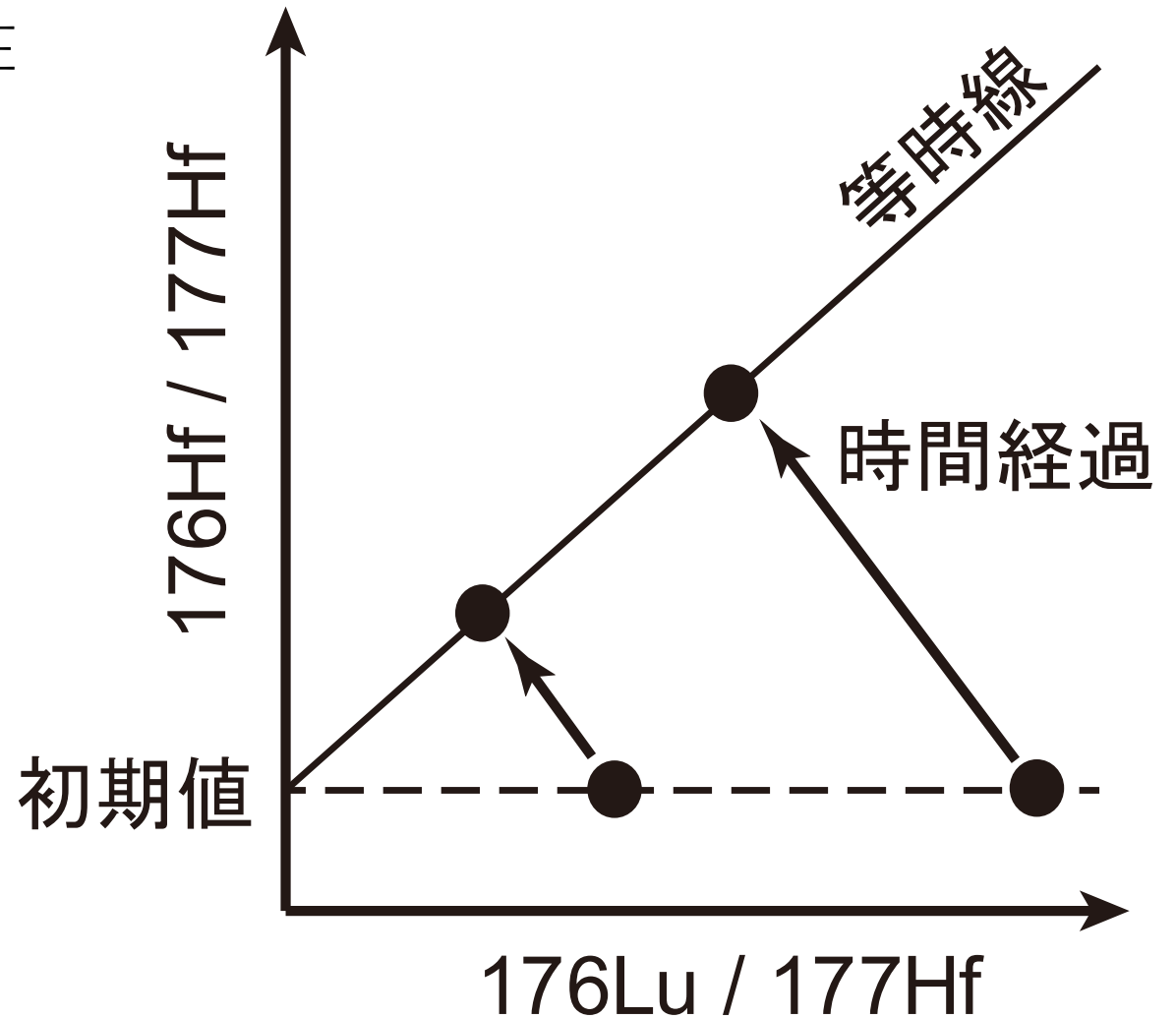
アイソクロン法による地球や他の天体の地殻・マントル形成の年代や、隕石の母天体の形成年代の計測



$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ の初期値と経過時間の2つが未知の物理量

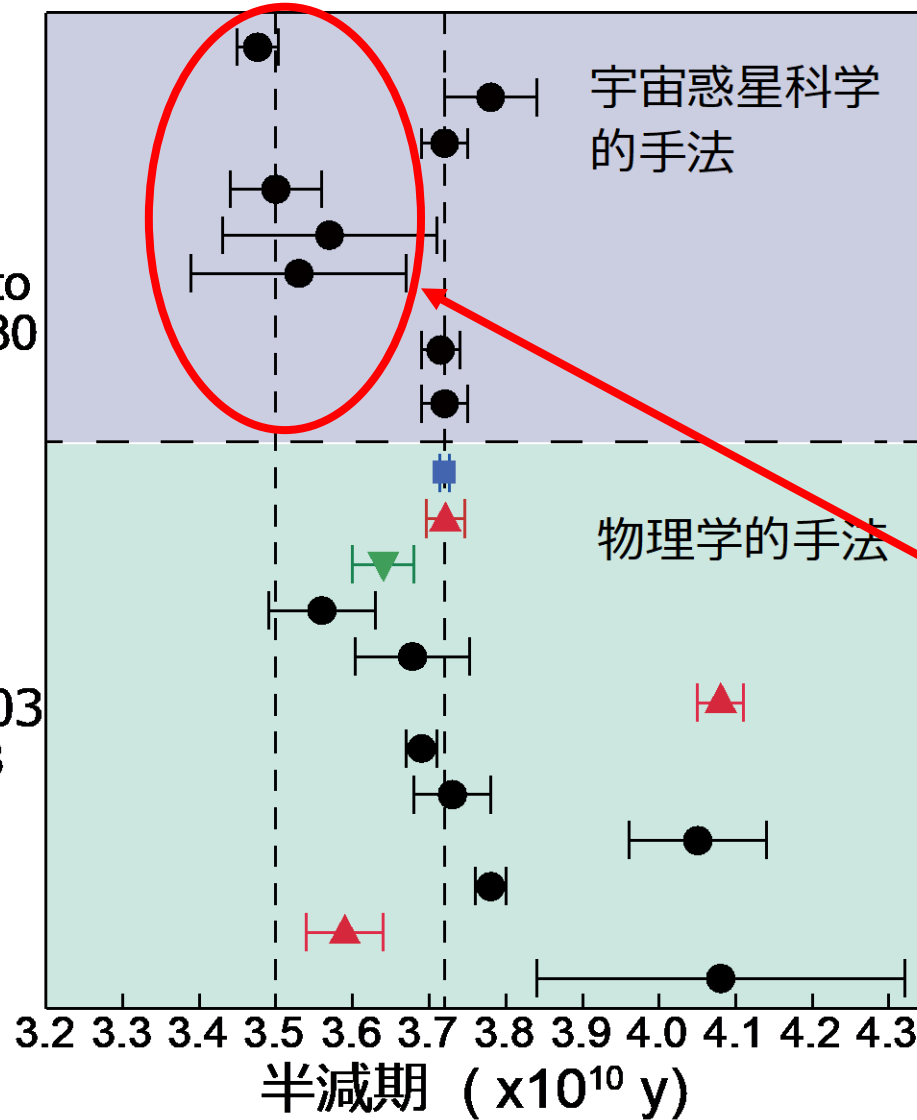


LuとHfの元素比が異なる2つの試料があれば2つの物理量を求められる。



# 1980年以降に計測された<sup>176</sup>Luの半減期の値

- Bizzarro 2012
- Amelin 2005
- Amelin 2005
- Bizzarro 2003
- Tatsumoto 1981
- Patchett & Tatsumoto 1980
- Soderlund 2004
- Scherer 2001
- Hayakawa 2023
- Hult 2014
- Kossert 2013
- Luo and Kong 2006
- Nir-El and Haquin 2003
- Grinyer 2003
- Nir-El and Lavi 1998
- Dalmaso 1992
- Gehrke 1990
- Sato 1983
- Sguigna 1982
- Norman 1980

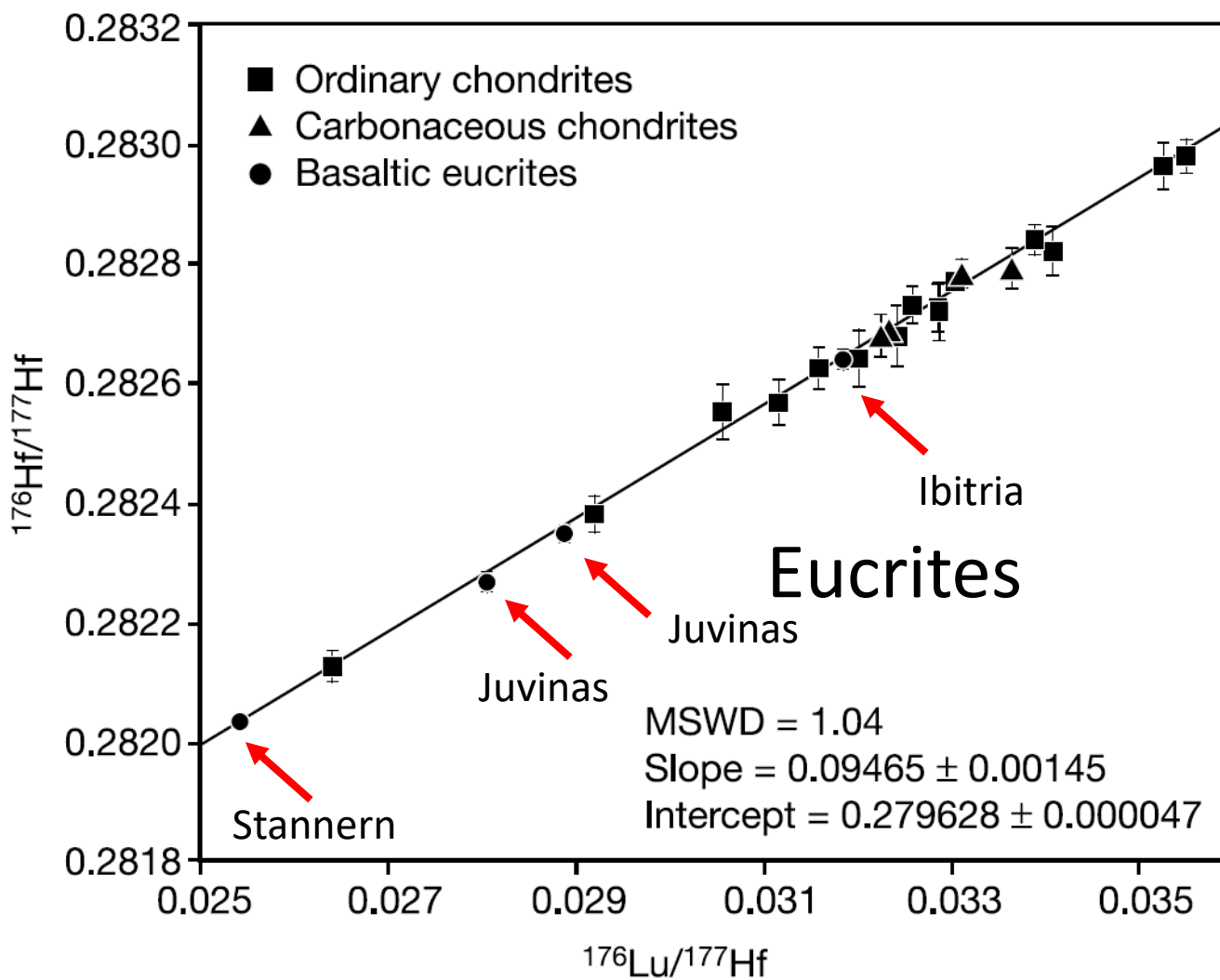


- アングライト
- アカプルコ
- リチャードソン
- ユークライト他
- ユークライト
- ユークライト
- 地球岩石
- 地球岩石
- 全エネルギー測定
- γ サムピーク法
- 液体シンチレーター
- γ 計測
- γ 計測
- Y-Y 同時計測
- Y 計測
- Y 計測
- Y 計測
- Y 計測
- Y 計測
- Y-Y 同時計測
- Y 計測

アイソクロン法  
による測定

ユークライトやアング  
ライト等の隕石から得  
た半減期の値が短い！

# Excess of $^{176}\text{Hf}$ in Eucrite and chondrites



Lu-Hf isotopic data for analysed meteorites\*

	Lu (ppm)	Hf (ppm)	$^{176}\text{Lu}/^{176}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2se
<i>Ordinary Chondrites</i>					
Alfianello (L6)	0.04225	0.1689	0.03551	0.282982	0.000013
Barrata (L3.8)	0.03661	0.1595	0.03259	0.282732	0.000016
Belle Plaine (L6)	0.03289	0.1600	0.02919	0.282382	0.000016
	0.03686	0.1484	0.03527	0.282964	0.000021
Edmonson (H4)	0.03219	0.1348	0.03389	0.282841	0.000013
	0.03229	0.1413	0.03244	0.282678	0.000027
Ella Island (L6)	0.03747	0.1707	0.03116	0.282569	0.000021
Julesbourg (L3.6)	0.03601	0.1597	0.03202	0.282641	0.000025
	0.03714	0.1596	0.03304	0.282772	0.000009
Hedjaz (L3.7)	0.03262	0.1410	0.03285	0.282726	0.000021
Herredia (H5)	0.03428	0.1428	0.03409	0.282821	0.000022
M'Bale (L6)	0.03016	0.1621	0.02641	0.282127	0.000011
	0.03678	0.1708	0.03057	0.282552	0.000025
Tennesalim (L4)	0.03377	0.1458	0.03288	0.282720	0.000025
Waltman (L4)	0.03701	0.1663	0.03160	0.282626	0.000018
<i>Carbonaceous Chondrites</i>					
Allende (CV3)	0.04331	0.1857	0.03312	0.282783	0.000012
Allende CAI	0.09681	0.4248	0.03235	0.282684	0.000006
Allende matrix	0.03703	0.1562	0.03365	0.282792	0.000018
Murchison (CM2)	0.03399	0.1496	0.03225	0.282679	0.000019
<i>Eucrites</i>					
Stannern	0.4223	2.359	0.02541	0.282037	0.000004
Ibitria	0.2740	1.221	0.03185	0.282640	0.000008
Juvinas	0.2708	1.370	0.02805	0.282267	0.000007
	0.2625	1.290	0.02888	0.282348	0.000006

J. Blichert-Toft et al. 2002

Isochron line of eucrites

The slope of  $0.09294 \pm 0.00080$  corresponds to an age of  $4604 \pm 39$  Ma (using  $V_{^{176}\text{Lu}} = 1.93 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ )

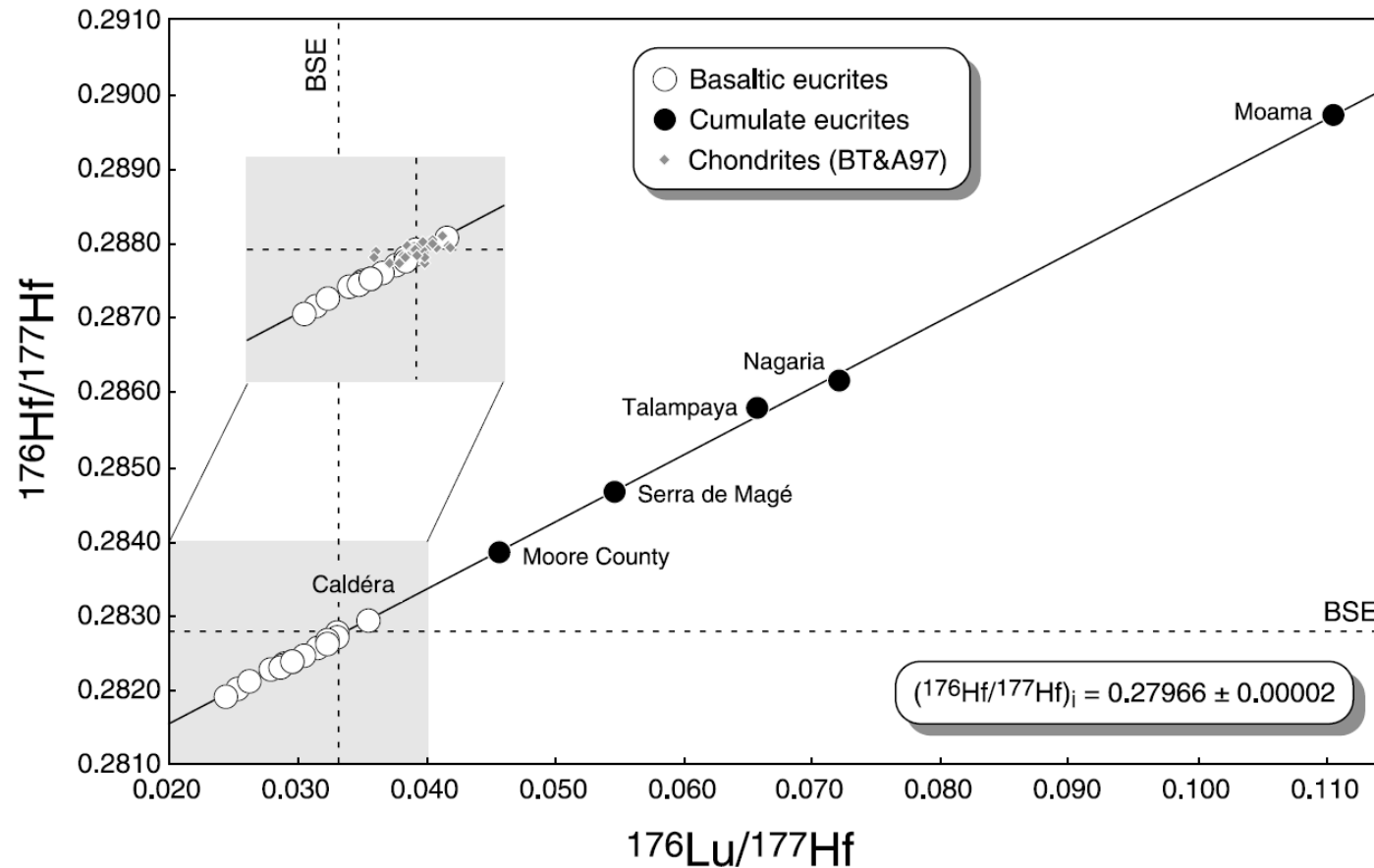
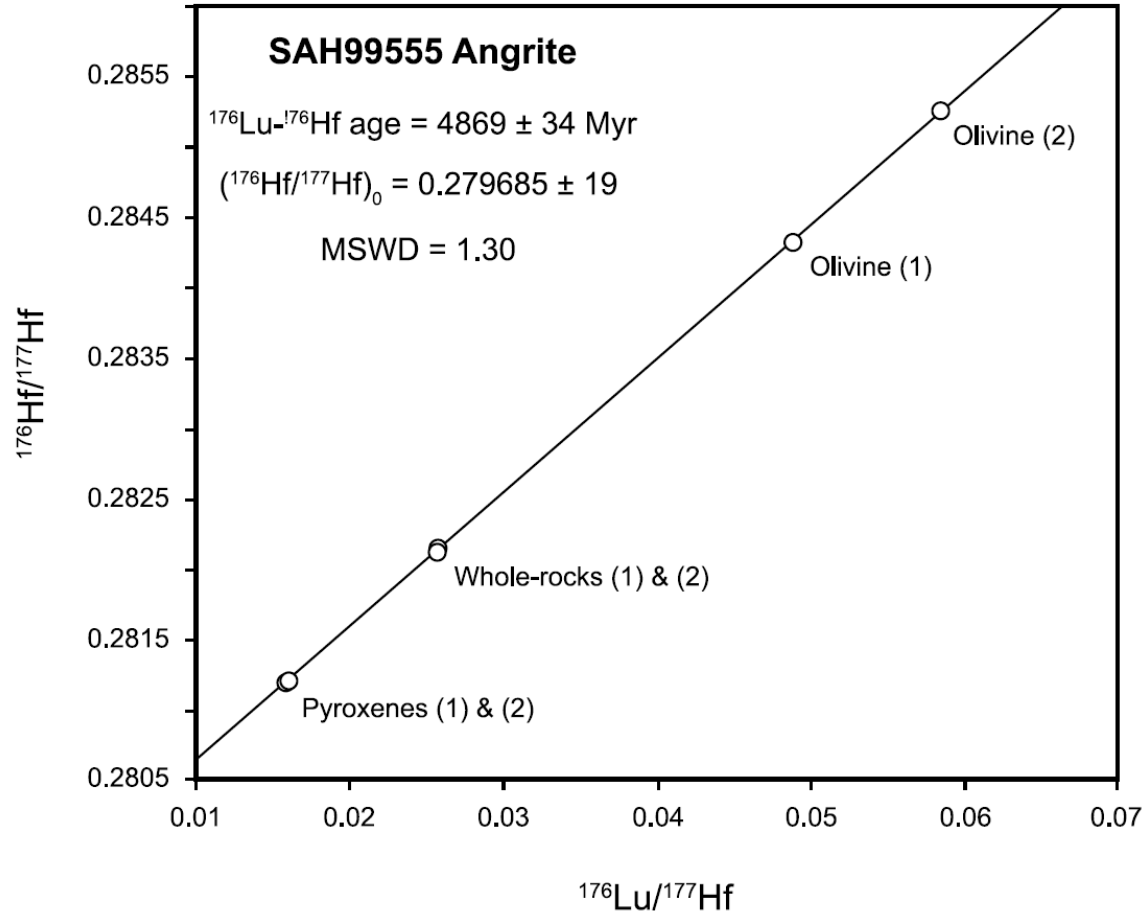
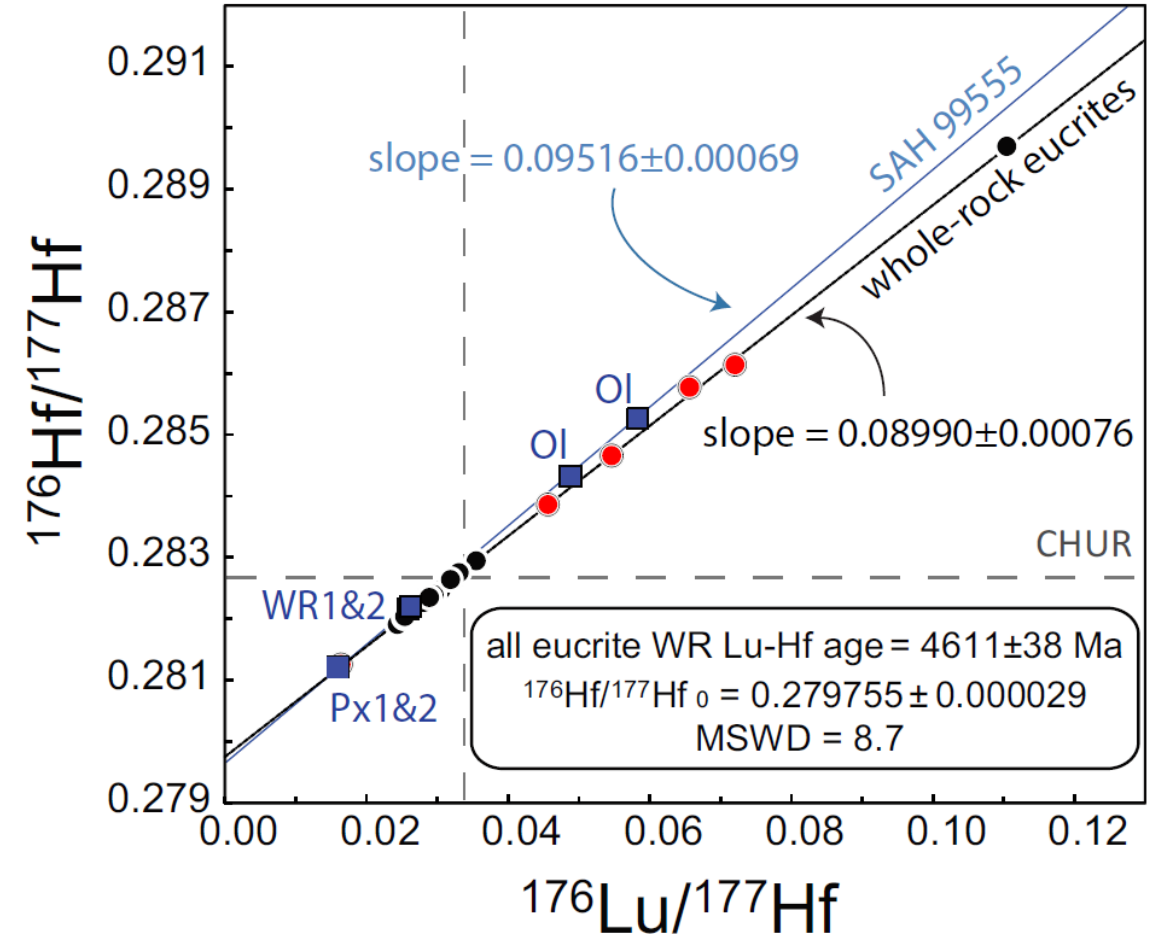


Fig. 2. Lu–Hf isochron diagram for basaltic and cumulate eucrites. Both  $x$ - and  $y$ -axis error bars are smaller than the symbols. Note the relatively large spread in parent/daughter ratios among even the basaltic eucrites for the Lu–Hf system compared with the Sm–Nd system (Fig. 1). Note also that the Lu–Hf reference for BSE as measured on 25 chondrites of different classes by [32] (BT & A97; shown in shaded inset) plots within errors on the eucrite isochron and divides cumulate (Lu/Hf ratios higher-than-chondritic) from basaltic (Lu/Hf ratios lower-than-chondritic) eucrites. Caldéra is a highly recrystallized impact melt [19], which could explain why this basaltic eucrite has slightly higher-than-chondritic Lu/Hf compared to the other basaltic eucrites: it may have assimilated some local (cumulative?) and/or impactor material.



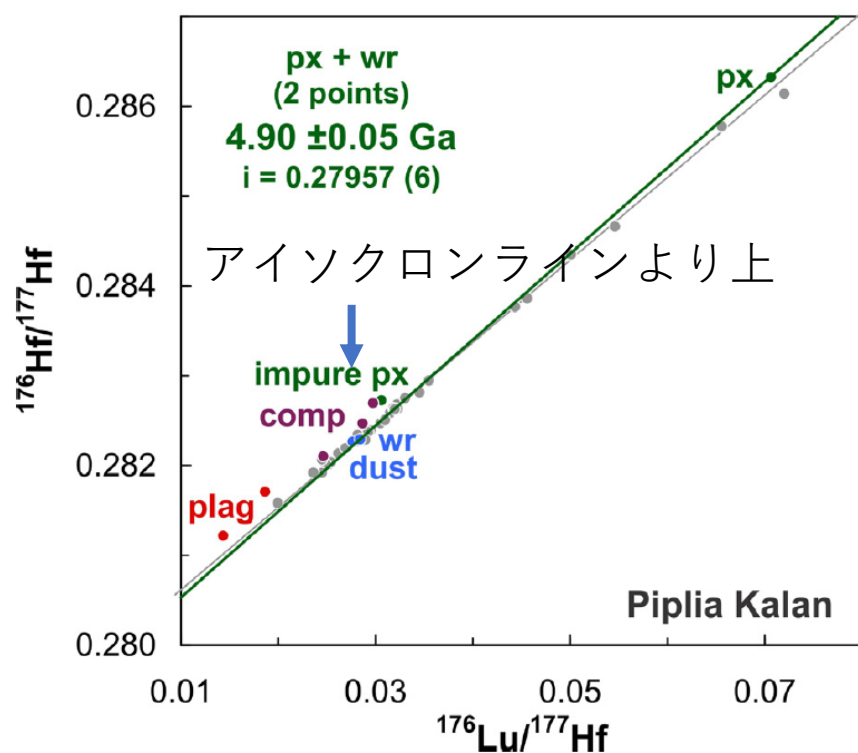
Bizzarro, 2012



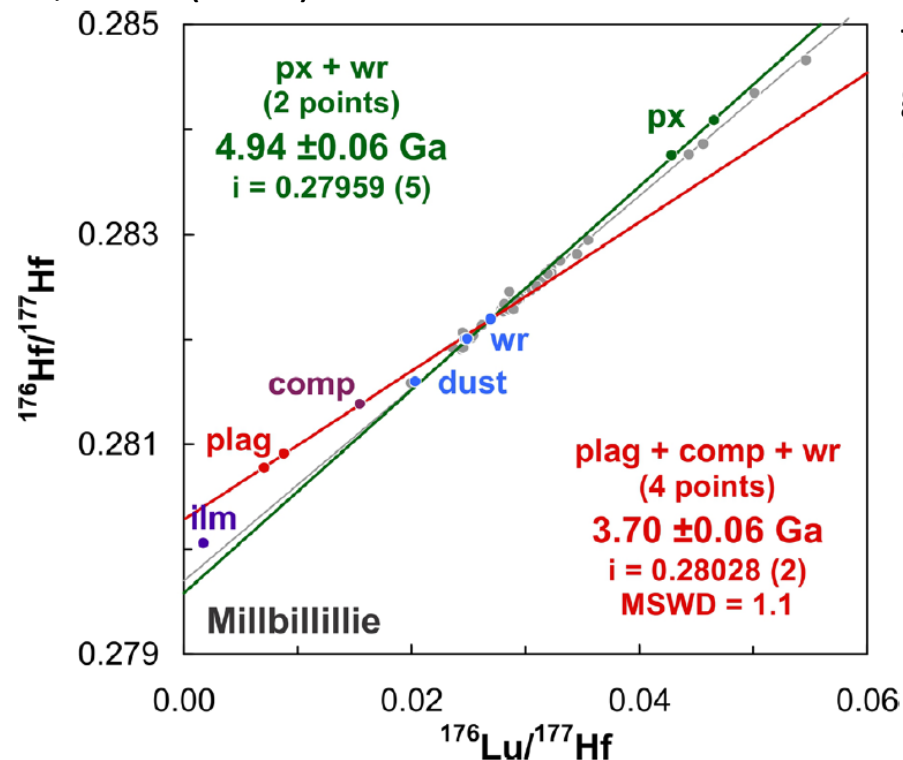
BOUVIER, MPS, 50, 1896 (2015).

An internal isochron of angrite SAH99555 shows the logner age of 4869 Myr.

R. Bast, 43rd Lunar and Planetary Science Conference, 2542 (2012)



**Fig. 1:** Lu-Hf isotope data for different fractions of Piplia Kalan, plotted on the eucrite whole-rock (wr) trend (grey) defined by the data of [4], [5], and [6]. Note that most mineral fractions plot above the eucrite wr isochron, whereas PK's wr and dust fractions plot on this trend.

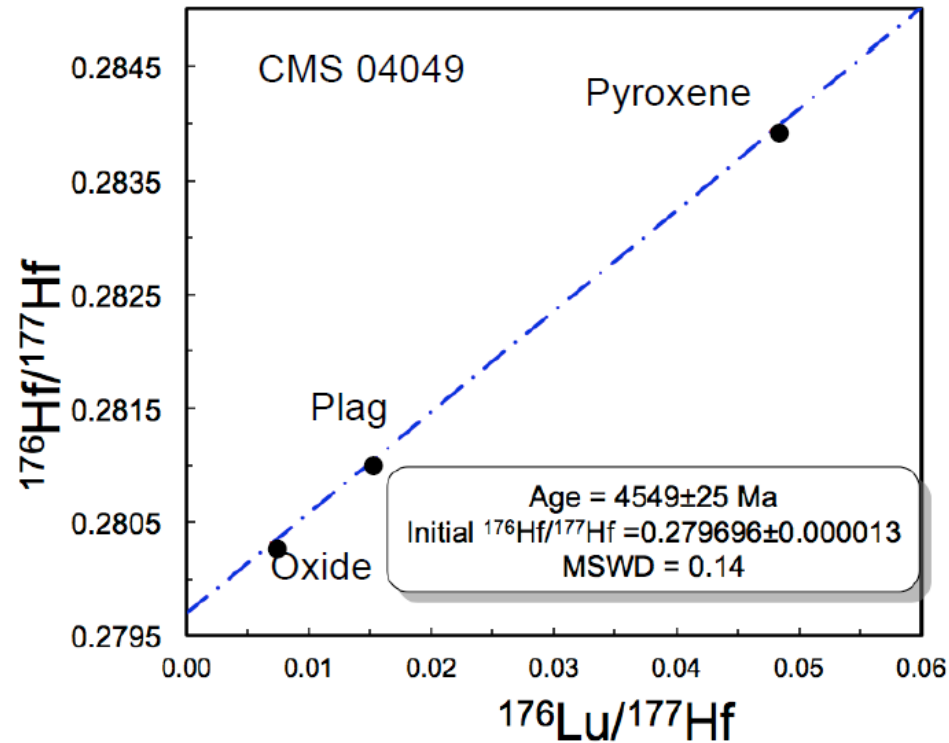


**Fig. 2:** The internal Lu-Hf isotope data for Millbillillie appear to define two different trends rather than a single isochron.

the monomict basaltic main-group eucrites Millbillillie (MB) and Piplia Kalan (PK).

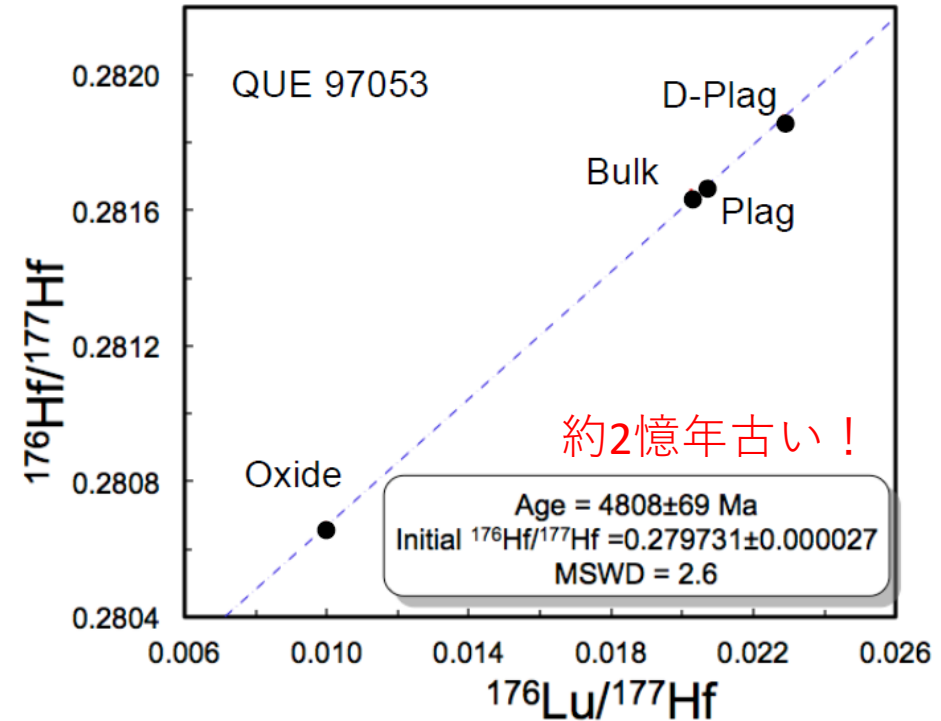
They conclude that with the current data set, no meaningful isochron slopes can be determined and cannot yet exclude the possibility of accelerated  $^{176}\text{Lu}$  decay via irradiation in these samples.

## EVIDENCE FOR EXCESS HAFNIUM-176 IN EUCRITE QUE 97053



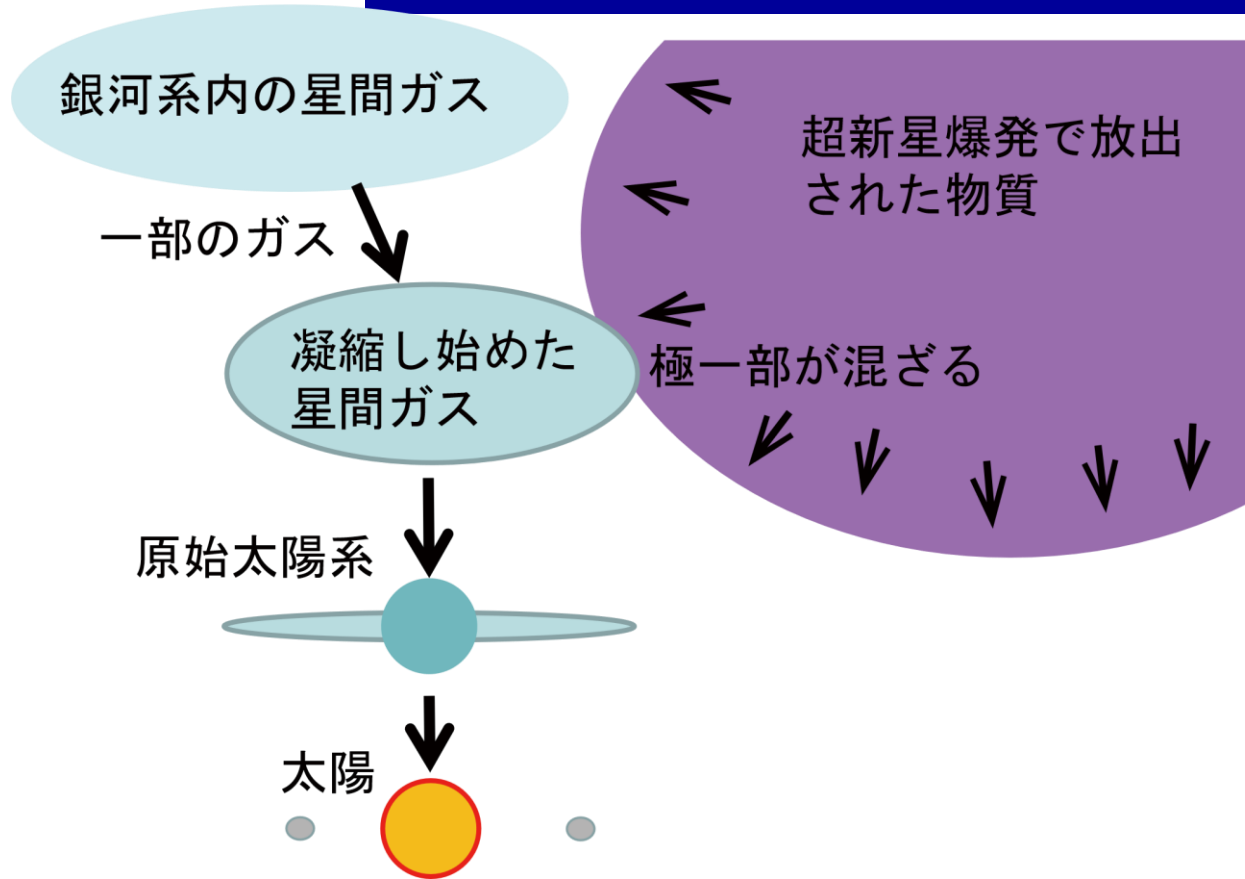
**Figure 1.** Lu-Hf isochron diagram of unbrecciated eucrite CMS 04049. Data points represent the average of two duplicate analyses of the same mineral aliquots. Oxide = a bulk oxide mineral fraction; Plag = hand-picked plagioclase fraction; Pyroxene = hand-picked pyroxene fraction.

M. Righter, LPSC (2013).



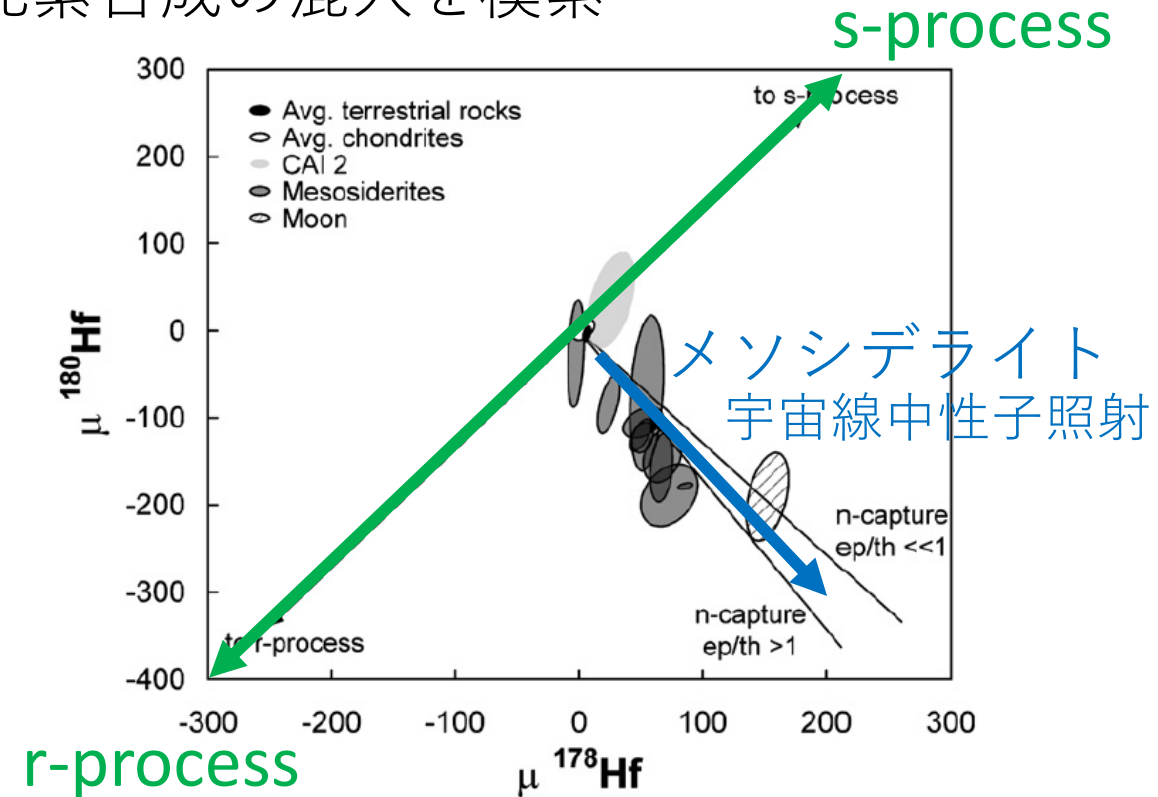
**Figure 2.** Lu-Hf isochron diagram of unbrecciated eucrite QUE 97053. Data points represent the average of two duplicate analyses of the same mineral aliquots. Oxide = a bulk oxide mineral fraction; Plag = hand-picked plagioclase fraction; D-Plag = 2.96 <math>\rho</math> <math>< 4.0</math> fraction; Bulk = bulk rock. All data are presented with 2 uncertainties.

# 仮説1: 太陽系形成時に他の元素合成生成物の混入



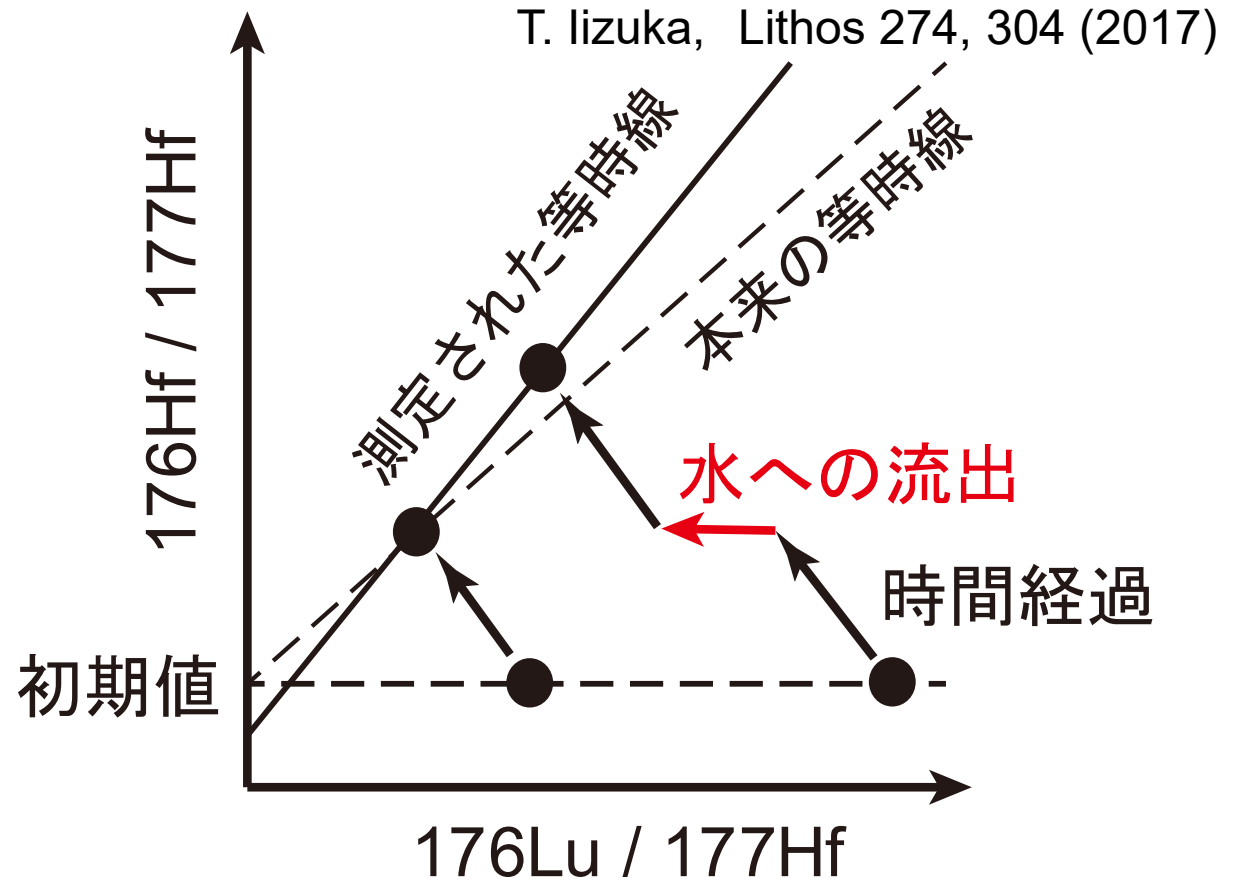
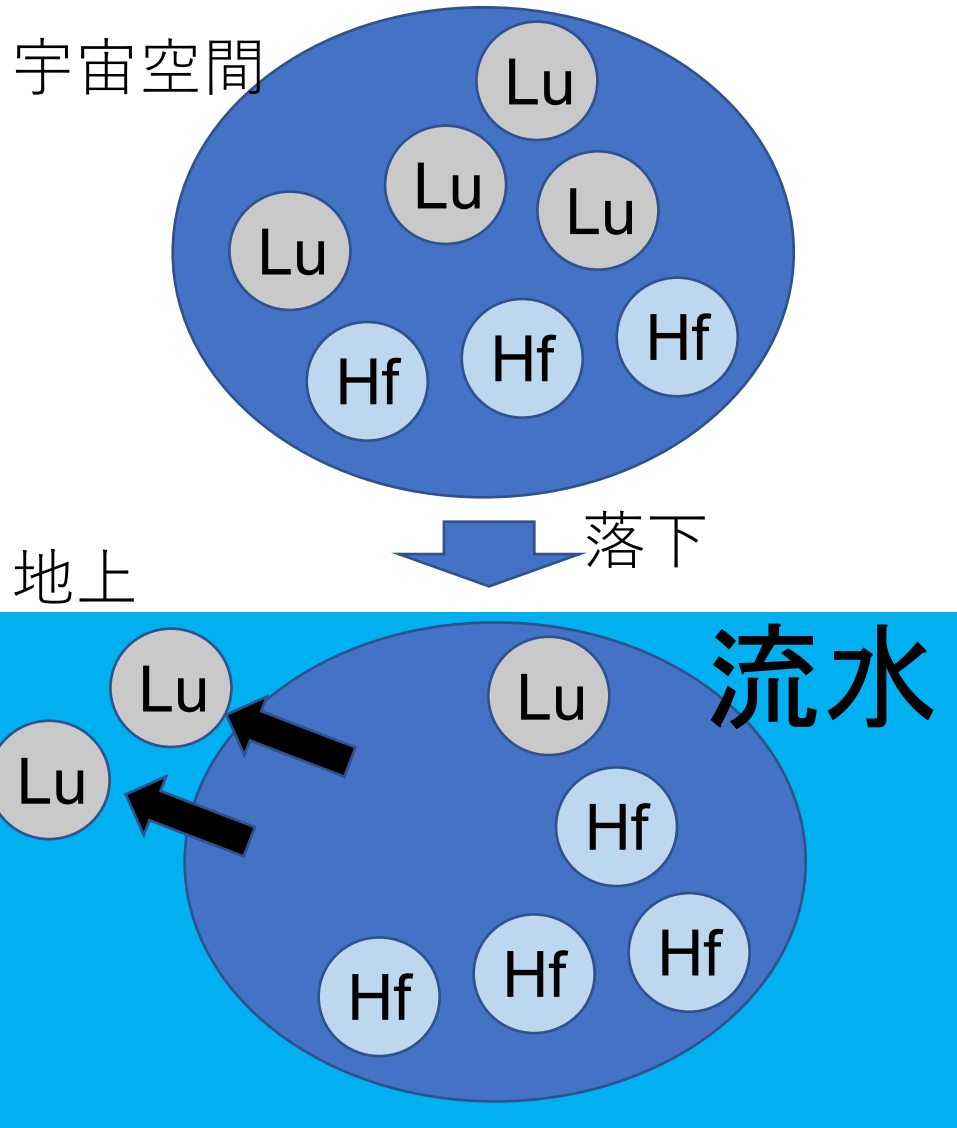
一部の物質に元素合成生成物（例、超新星爆発）が混ざって、 $^{176}\text{Hf}$ の初期同位体組成が最初から多かった可能性

Hfの他の同位体組成を精密に計測して、元素合成の混入を模索



元素合成の影響はなかった  
P. Sprung, Earth Planet. Sci. Lett. 295, 1, (2010)

# 仮説 2 : 隕石からの水によるLuの流出



隕石が落下後に水(雨や川)によってLu元素が溶け出した場合、測定された等時線から経過時間が過大に見える。

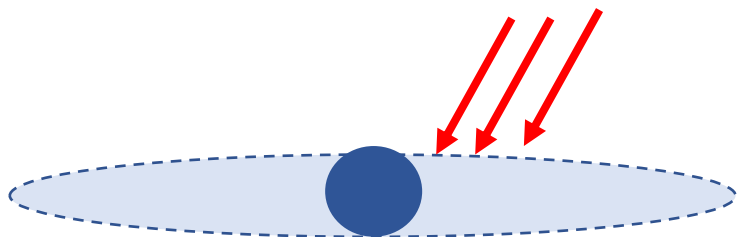
証明が難しい

# 仮説 3 : 宇宙線ガンマ線による加速された崩壊

$^{176}\text{Lu}$ のベータ崩壊がMeV領域のガンマ線放射で崩壊加速したという仮説

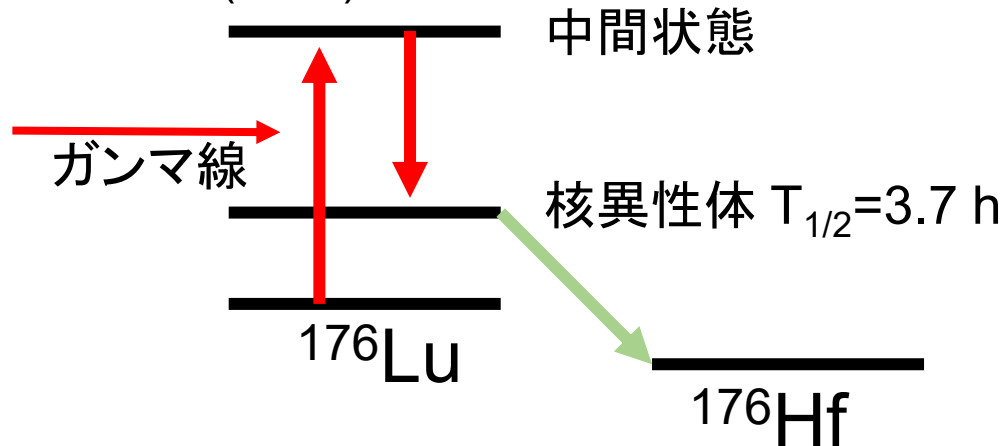
Albarede, *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 70, 1261 (2006)

MeVエネルギーのガンマ線



ガンマ線源の可能性

- i) 原始太陽
- ii)  $^{60}\text{Co}$ 等の放射性同位体
- iii) ガンマ線バースト
- iv) 超新星クラスター



Thrane, *ApJ*, 717, 861 (2010)

- i) 超新星爆発ニュートリノ
- ii) 高エネルギー銀河宇宙線(陽子から鉄イオン)

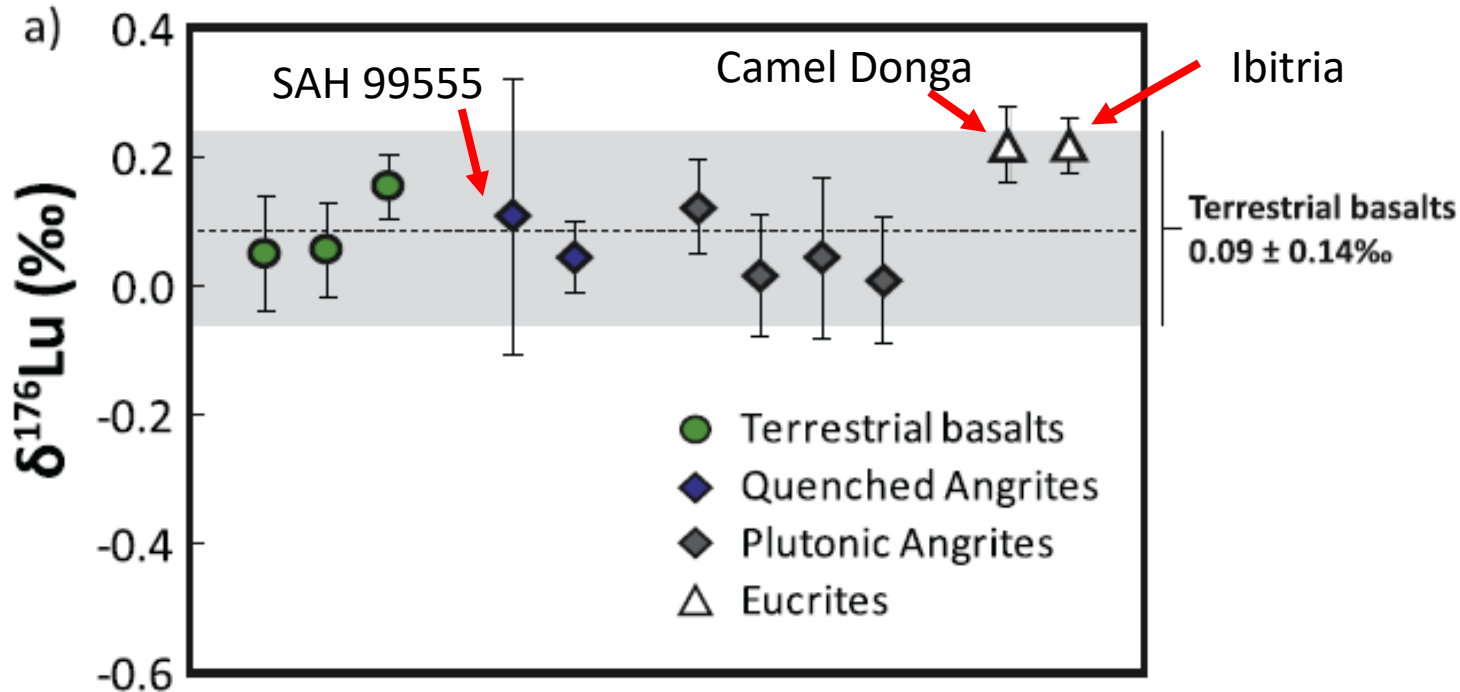
“The Lu isotopic composition of achondrites: closing the case for accelerated decay of  $^{176}\text{Lu}$ ”. Wimpenny, J., et al. *Astrophys. J.* 812, L3 (2015).

加速崩壊があれば、 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}$ 比が数%減るはず。



加速崩壊が見つかった隕石で  $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}$ 比は変わっていなかった。

Wimpenny, J., Amelin, Y. & Yin, Q. The Lu isotopic composition of achondrites: closing the case for accelerated decay of  $^{176}\text{Lu}$ . *Astrophys. J.* 812, L3 (2015).



$\gamma$ 線による加速崩壊ならば、 $^{176}\text{Lu}$ は加速崩壊で減るが、 $^{175}\text{Lu}$ は影響を受けないので同位体の量は変わらない。 $^{176}\text{Lu}$ の同位体組成は減少するはず。

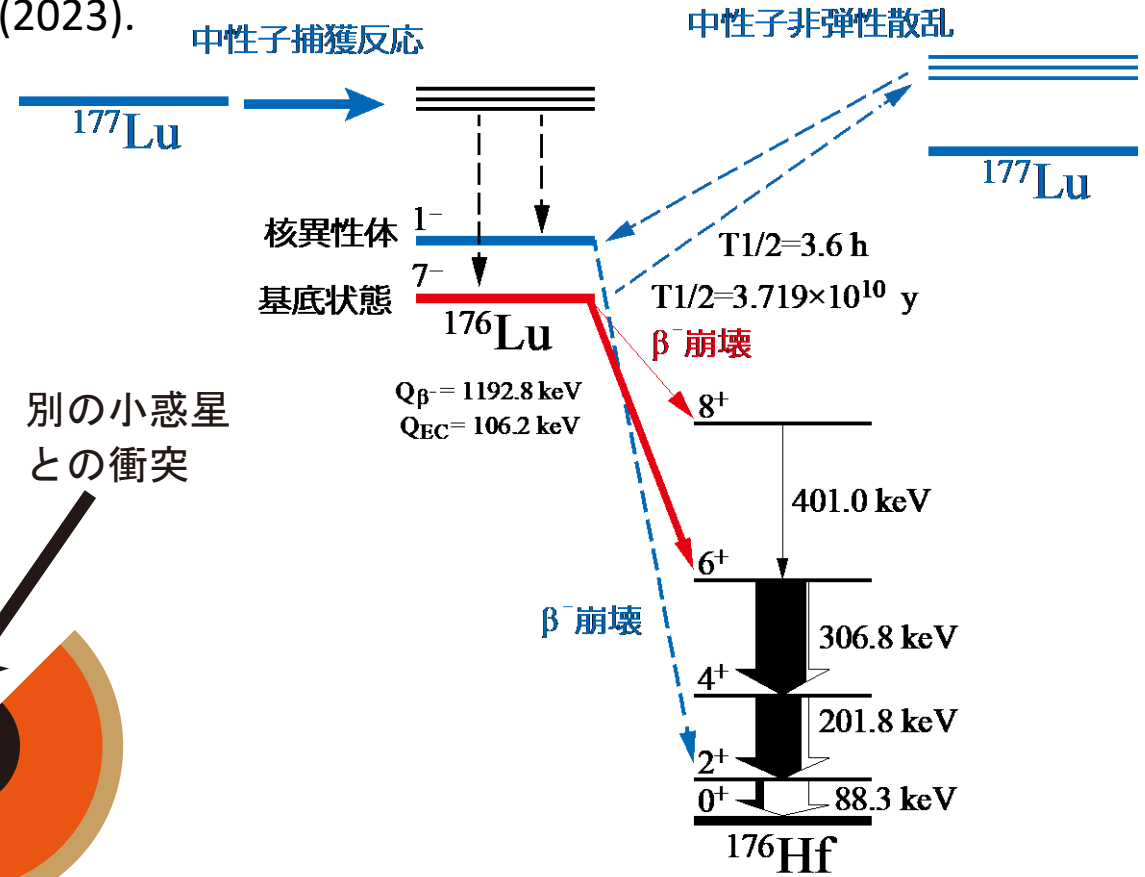
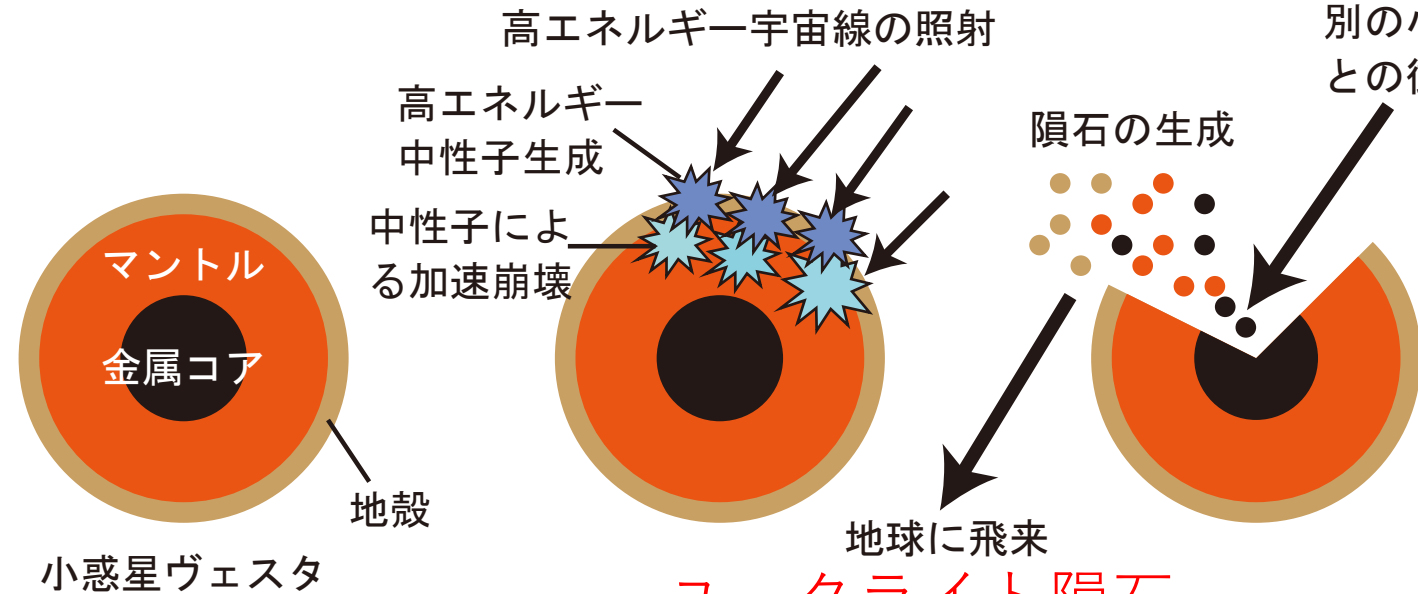
結果は減少していなかった。

# 仮説4: 宇宙線中性子による加速された崩壊

T. Hayakawa, T. Shizuma, T. Iizuka, Communications Physics 6, 299 (2023).

1. 高エネルギー宇宙線が小惑星に注ぎ、核反応で中性子を生成する

2. 中性子によって $^{176}\text{Lu}$ の核異性体が生成されて続けて $\beta$ 崩壊する



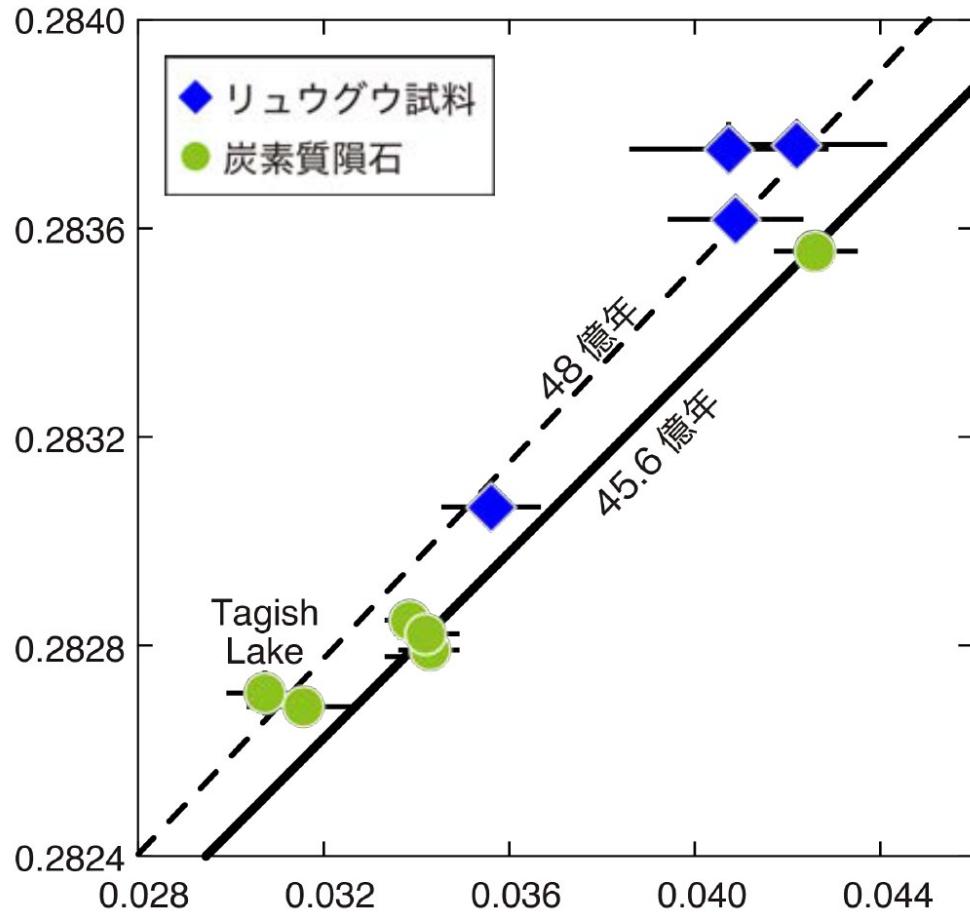
この過程では、 $^{175}\text{Lu}$ から $^{176}\text{Lu}$ が生成されるので $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}$ が減少しない。

$^{176}\text{Hf}$ の過剰が見えている

ユークライト隕石  
メソシデライト隕石

宇宙線中性子が照射されている

$^{176}\text{Lu}$ の半減期には、Hayakawa 2023の値を採用




リュウグウのデータからアイソクロン法でリュウグウの形成年代を評価すると、約48億年前との結果が出た。



太陽系が星間ガスから形成されるより昔！

比較のために計測した炭素質隕石（炭素質小惑星から飛来）では、Tagish Lake隕石を除いて、45.6億年の太陽系形成より少し後の年代を示す。

仮説1： 元素合成生成物の混入

検証実験： Hf同位体の精密測定  s過程やr過程の影響は小さい

仮説3： 宇宙線 $\gamma$ 線による加速崩壊

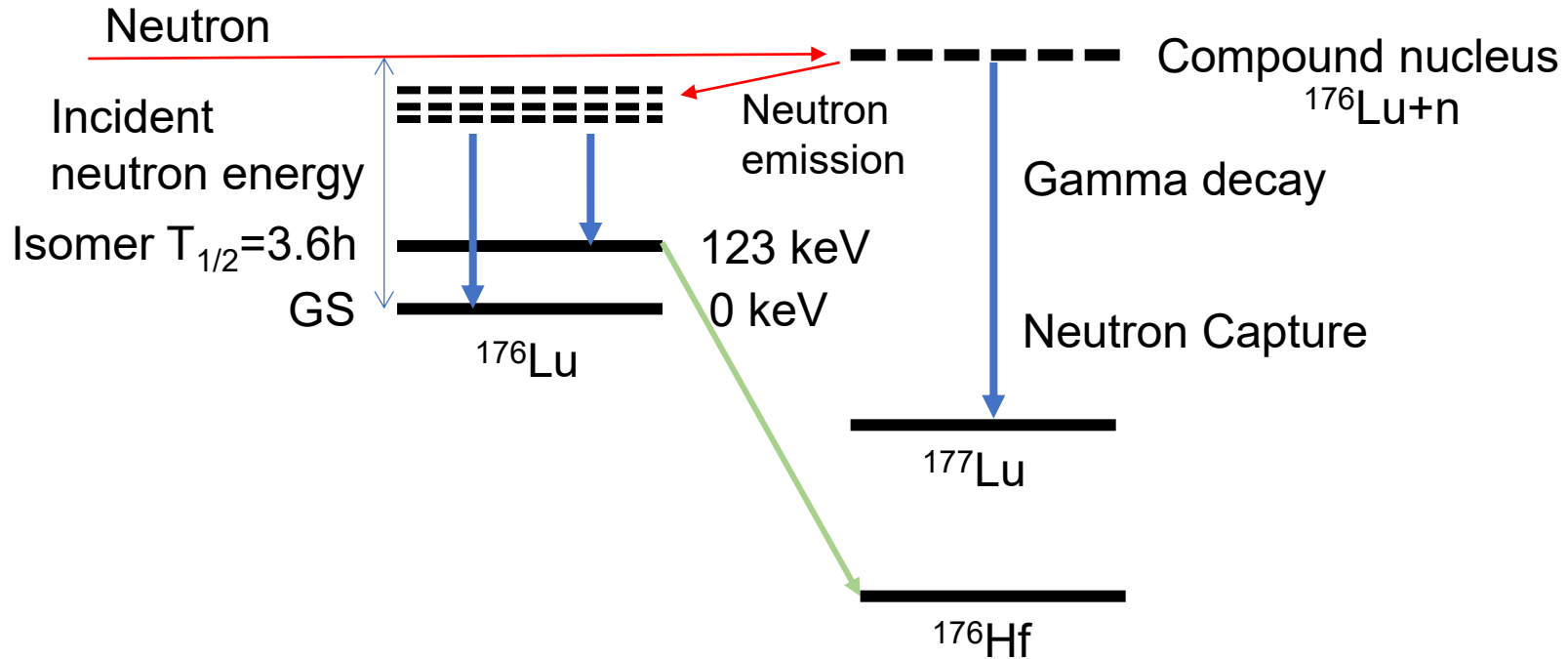
検証実験：  $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}$ 同位体比の測定  ガンマ線による加速崩壊はなし

仮説4： 宇宙線中性子による加速崩壊

理論計算： 既存データから理論計算  10%以下で無視できる



したがって、「仮説2+：リュウグウ母天体における流水によるLuの流失」が  
された唯一つの可能性



The threshold energy of  $^{176}\text{Lu}(n, n')^{176}\text{Lu}^m$  reaction corresponding to the excitation energy of the isomer of 123 keV.

The  $^{176}\text{Lu}(n, n')^{176}\text{Lu}^m$  reaction may occur in the energy range from 123 keV to a few MeV.

For example,  $^{115}\text{In}(n, n')^{115}\text{In}^m$  reactions are well known, but the nuclear data for  $^{176}\text{Lu}$  is poor.

一般的な式

$$dN_i = \sum N_{i-1}(\sigma_{i-1}^{\text{th}} \Phi + I_{i-1} \Theta) - N_i(\sigma_i^{\text{th}} \Phi + I_i \Theta), \quad (6)$$

この式をそれぞれの同位体について適用する。

$^{176}\text{Hf}$ に適用した例

$$\begin{aligned} dN_{^{176}\text{Hf}} = & N_{^{175}\text{Lu}} \left( \sigma_{^{175}\text{Lu}}^{\text{th}} f_{^{176}\text{mLu}}^{\text{th}} \Phi + I_{^{175}\text{Lu}} f_{^{176}\text{mLu}}^{\text{ep}} \Theta \right) \\ & + N_{^{176}\text{Lu}} \sigma_{^{176}\text{Lu}}^{\text{in}} \Theta - N_{^{176}\text{Hf}} (\sigma_{^{176}\text{Hf}}^{\text{th}} \Phi + I_{^{176}\text{Hf}} \Theta), \end{aligned} \quad (7)$$

$f_{^{176}\text{mLu}}^{\text{th}}$  and  $f_{^{176}\text{mLu}}^{\text{ep}}$  は熱中性子と熱外中性子の $^{175}\text{Lu}$ に対する中性子捕獲反応で核異性体が生成される割合

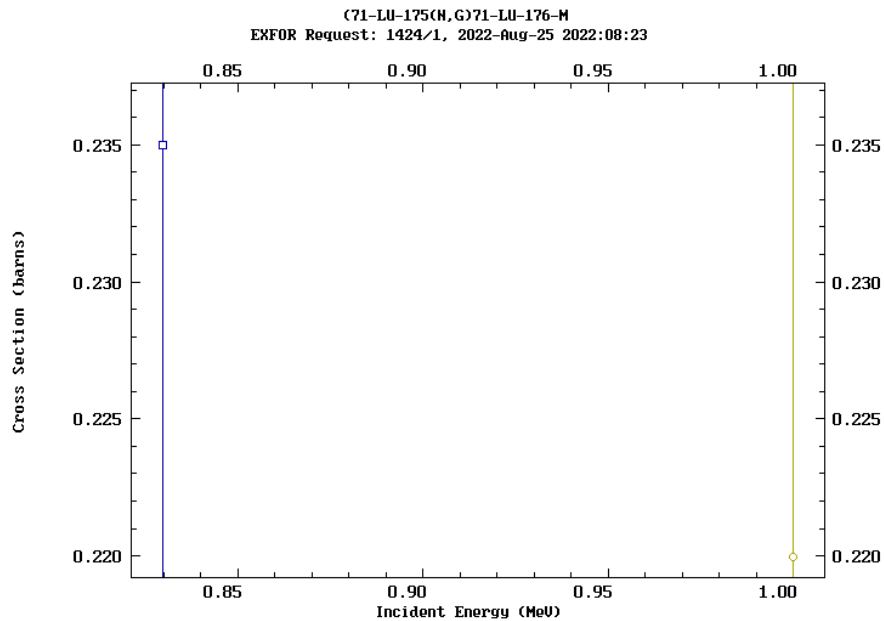
$\sigma_{^{176}\text{Lu}}^{\text{in}}$  は $^{176}\text{Lu}$ の基底状態から非弾性散乱で核異性体が生成される反応断面積

NNDC原子核データライブラリーに登録されている実験データは2点のみ！

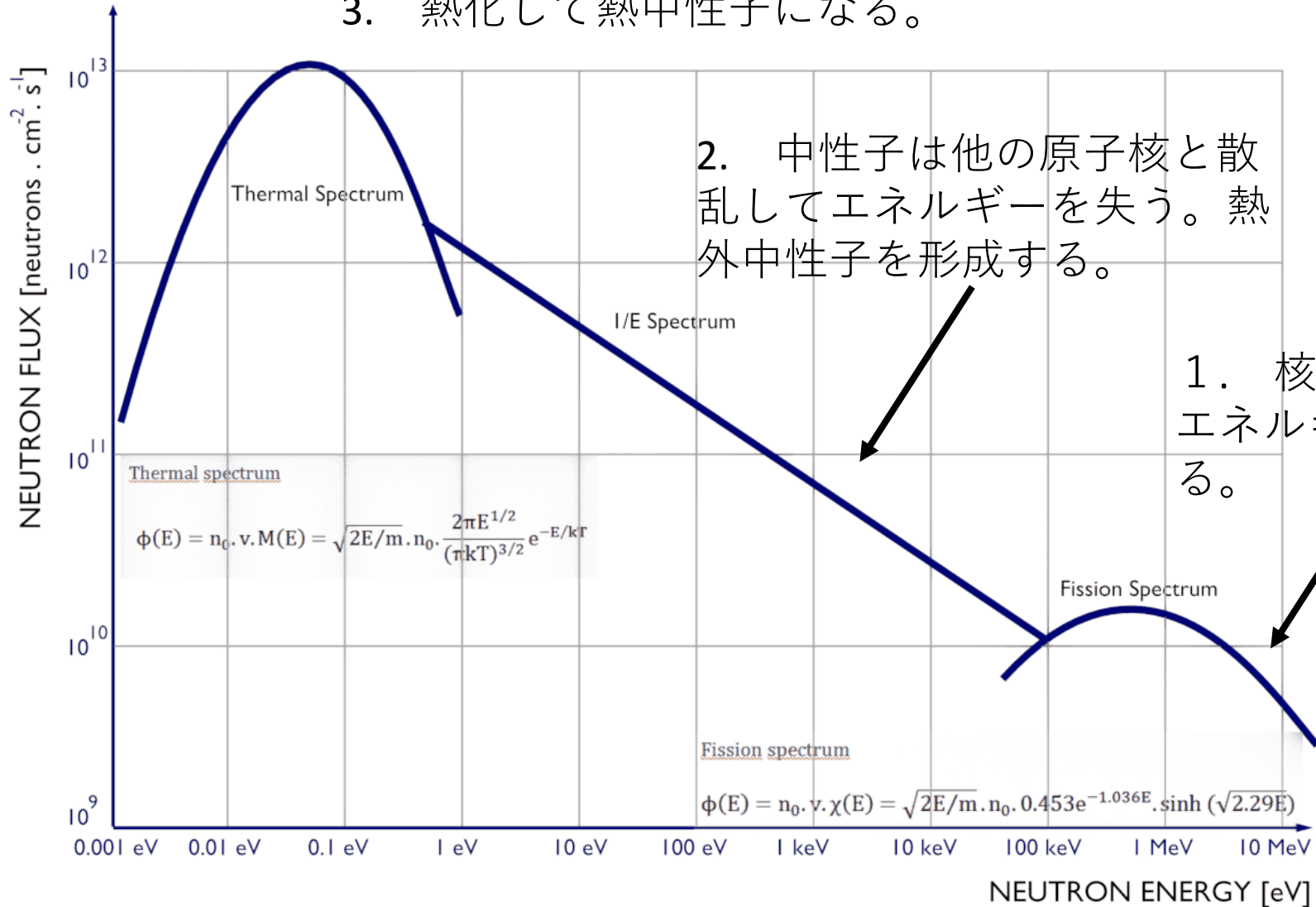
1. 840keVで、 $^{175}\text{Lu}(n,\gamma)^{176}\text{Lu}_m + ^{176}\text{Lu}_m(n,n')^{176}\text{Lu}_m$ の合計の反応断面積が約 $235 \pm 80\text{mb}$
2. 1MeVで非弾性散乱のみの断面積が、 $220 \pm 50\text{mb}$

東京科学大学 千葉敏名誉教授

ハウザー・フェッシュバッハ (Hauser-Feshbach) モデルによる計算



## 3. 熱化して熱中性子になる。



2. 中性子は他の原子核と散乱してエネルギーを失う。熱外中性子を形成する。

1. 核破砕反応などにより高エネルギー中性子が生成される。

Hidaka, Meteo. Planet. Science 35, 581-589 (2000)

TABLE 2. Comparison of the estimated neutron fluences

Sample	Effective thermal neutron-capture cross section* (cm <sup>2</sup> [×10 <sup>-20</sup> ])			Neutron fluence (n/cm <sup>2</sup> [×10 <sup>16</sup> ])				Russ <i>et al.</i> (1972)
	$\sigma_{149}$	$\sigma_{155}$	$\sigma_{157}$	$\Psi_1$	$\Psi_2$	$\Psi_3$	$\Psi_4$	
Λ-15								
15001.375	5.5	2.1	8.7	5.25	5.16	4.17	3.02	3.72
15002.747	5.3	2.0	8.0	6.21	5.89	5.25	3.52	4.30
15003.734	5.6	2.2	9.0	6.71	6.86	5.60	4.20	5.06
15004.129	5.6	2.2	9.0	7.52	7.49	6.17	4.68	5.57
15005.14	5.6	2.2	9.0	7.02	7.07	5.80	4.36	5.24
15005.79	5.6	2.2	9.0	6.63	6.64	5.33	4.04	4.69
15006.310	5.6	2.2	8.9	5.45	5.47	4.43	3.30	3.94

\*  $\sigma_{149}$ ,  $\sigma_{155}$ , and  $\sigma_{157}$  were calculated from the method by Lingenfelter *et al.* (1972).

$\Psi_1$ : Sm-isotopic data and the equation  $\Psi = -1 \times 10^{-4} \epsilon_{149Sm} / \sigma_{149}$  were used for the calculation.

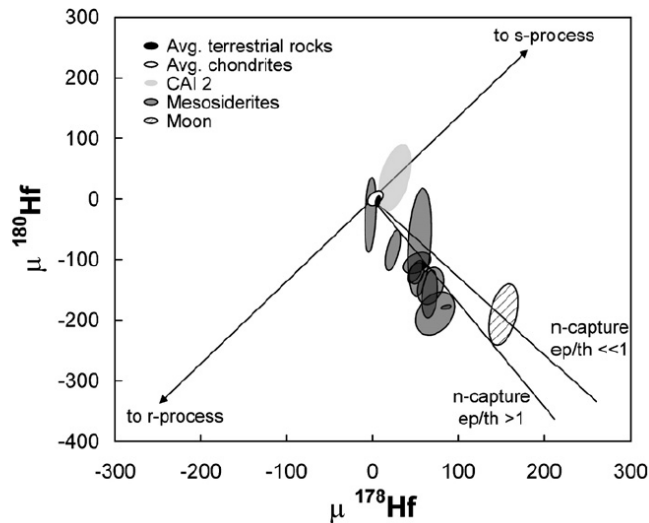
$\Psi_2$ : The values were calculated from the comparison of the Sm-isotopic shifts between each sample and experimentally neutron-irradiated chemical reagent.

$\Psi_3$ : Gd-isotopic data normalized to  $^{156}Gd/^{160}Gd = 0.9361$  and the formalism of Eugster *et al.* (1970a) were used for the  $\Psi$  calculation.

$\Psi_4$ : The values were calculated from the comparison of the Gd-isotopic shifts normalized to  $^{155+156}Gd/^{160}Gd = 1.61290$  between each sample and experimentally neutron-irradiated reagent.

“Neutron capture effects on samarium, europium, and gadolinium in Apollo 15 deep drill-core samples”

Thermal neutron fluence:  
(4-7) $\times 10^{16}$  neutrons/cm<sup>2</sup>



P. Sprung, Earth Planet. Sci. Lett. 295, 1, (2010)

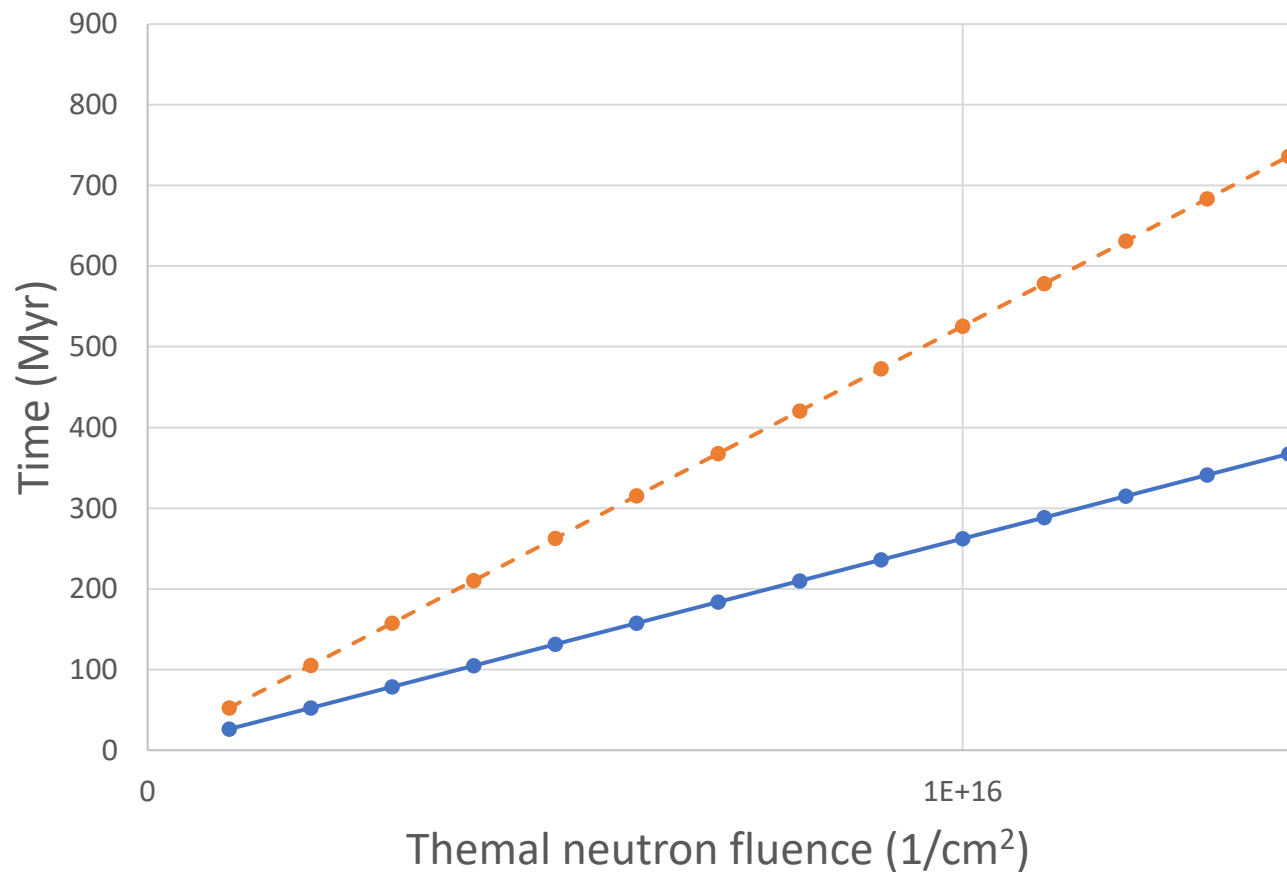
Meosideritesにおける中性子照射

Thermal neutron fluence:  
 $2.8 \times 10^{15}$  neutrons/cm<sup>2</sup>

熱中性子のフルエンスは、  
 $2 \times 10^{15} - 7 \times 10^{16}$  neutrons/cm<sup>2</sup>  
程度。

# 中性子フルエンスと見かけの経過時間

照射された中性子総量に対して、 $T=0$ 時点での見かけ上の経過年代との関係



アイソクロン上の見かけ上の経過時間は、中性子フルエンスにほぼ比例する

この仮定されたパラメーター領域では、1億年から7億年に相当する。



宇宙線中性子による加速崩壊で、 $^{176}\text{Lu}$ - $^{176}\text{Hf}$ による長い半減期は説明可能

**Eucrite**はインターナルアイソクロンや全体アイソクロンで太陽系形成より古い年代を示すLu-Hf系を持つものがある。

**Angrite**では、SHA 99555のみが上記と同様の異常を示す。

宇宙線中性子照射によるHfの同位体シフトと、 $^{176}\text{Lu}$ の崩壊加速を計算すると、増加部分は数億年に相当する。

アイソクロンに乗るという事実は、 $\beta$ 崩壊と宇宙線照射が独立に行われたことを意味する。最初に母天体で中性子照射があり、その後に $\beta$ 崩壊すればアイソクロンにのる。

最初の母天体で中性子照射を受けた場合を考える。**Eucrite**は多数の異なる隕石がアイソクロンを示す。これは、これらの複数の隕石は**Eucrite**の母天体の地表にあったものが飛来したと考えられる。通常の中性子照射のない**Eucrite**隕石は、より深い位置から飛来したと考えられる。