

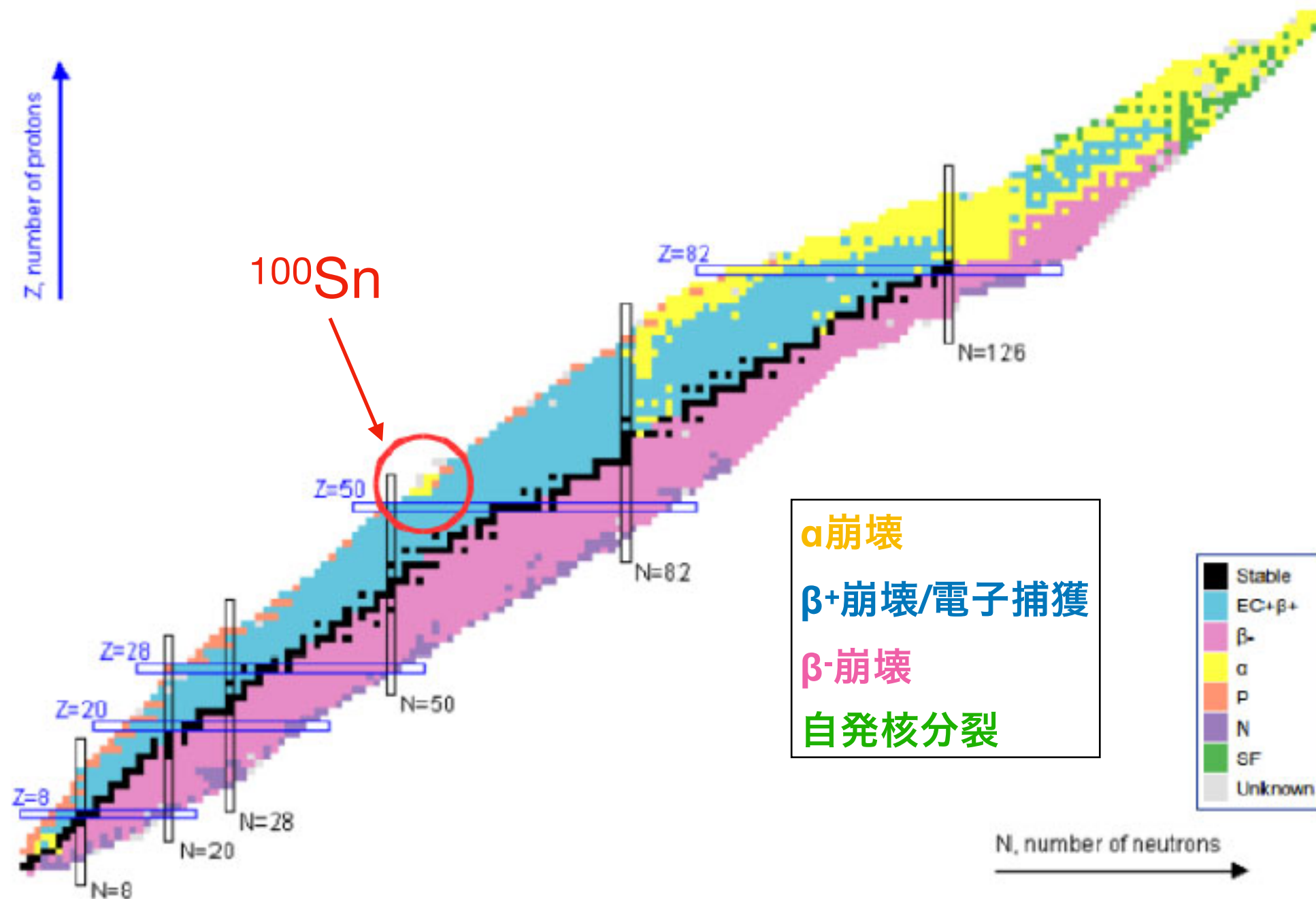
# 無機シンチレータ検出器を用いた 超許容アルファ崩壊の探索

Y. Xiao et al.,  
Phys. Rev. C 100, 034315 (2019)

郷 慎太郎

University of Tennessee / 九州大学

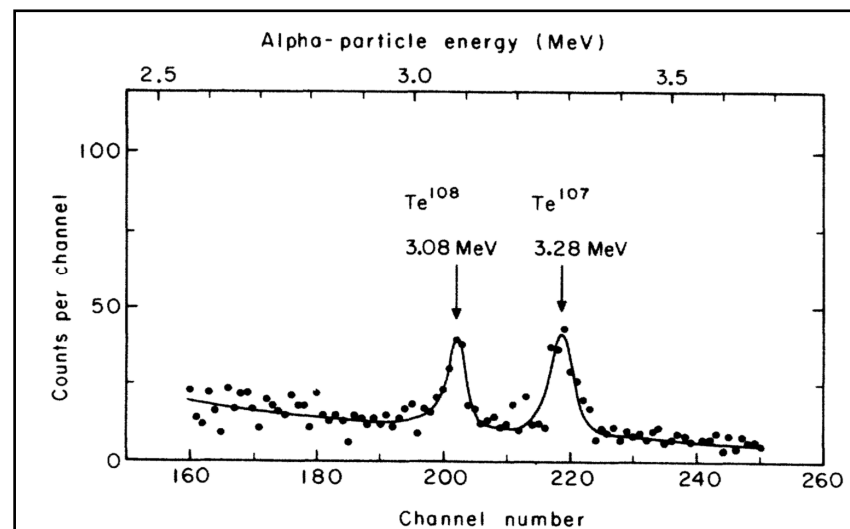
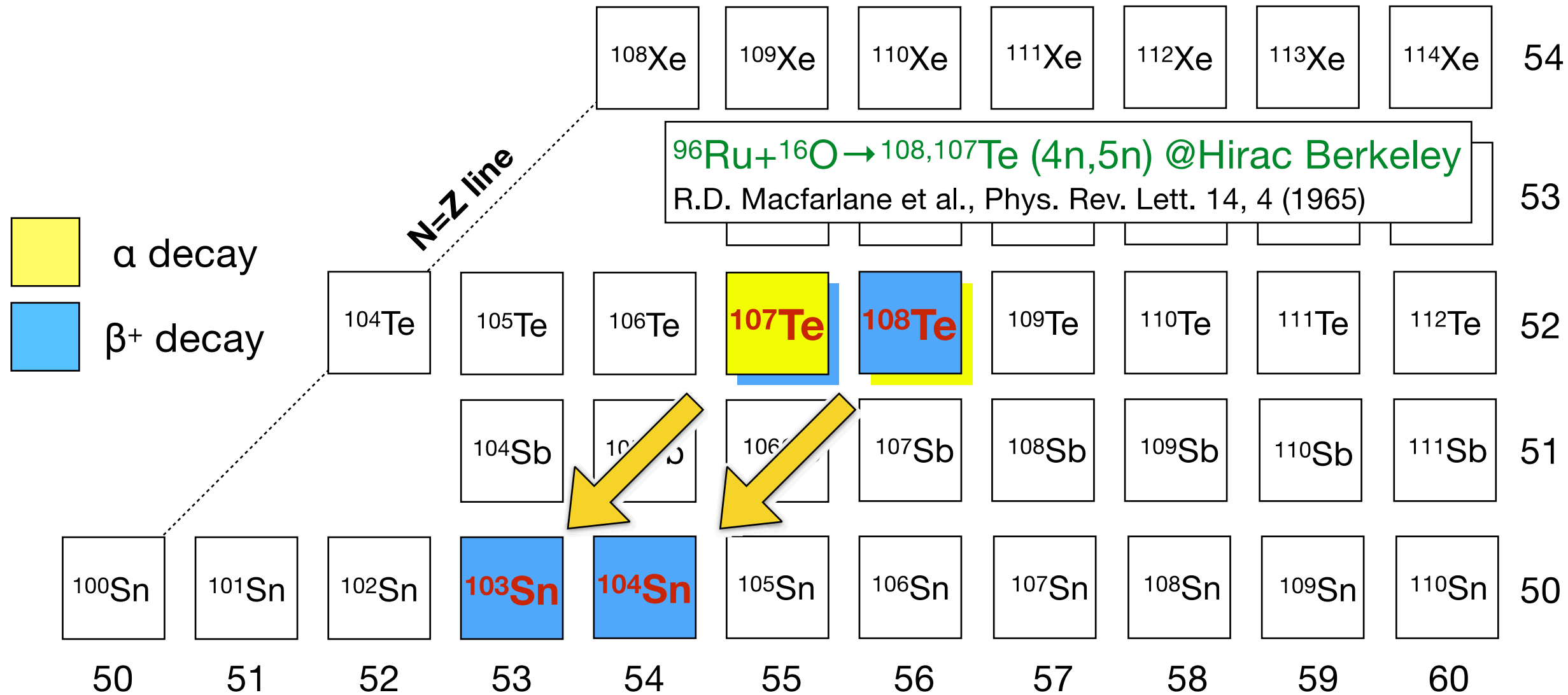
# 核図表におけるアルファ崩壊



$^{100}\text{Sn}$ 近傍の原子核にはアルファ崩壊が系統的に発見されている

# First report of alpha radioactivity around $^{100}\text{Sn}$ in 1965

「アルファ粒子の予備形成」が報告される



**$^{107}\text{Te}$**   
 $E_\alpha = 3.28(3)$  MeV  
 $T_{1/2} = 2.2(2)$  sec

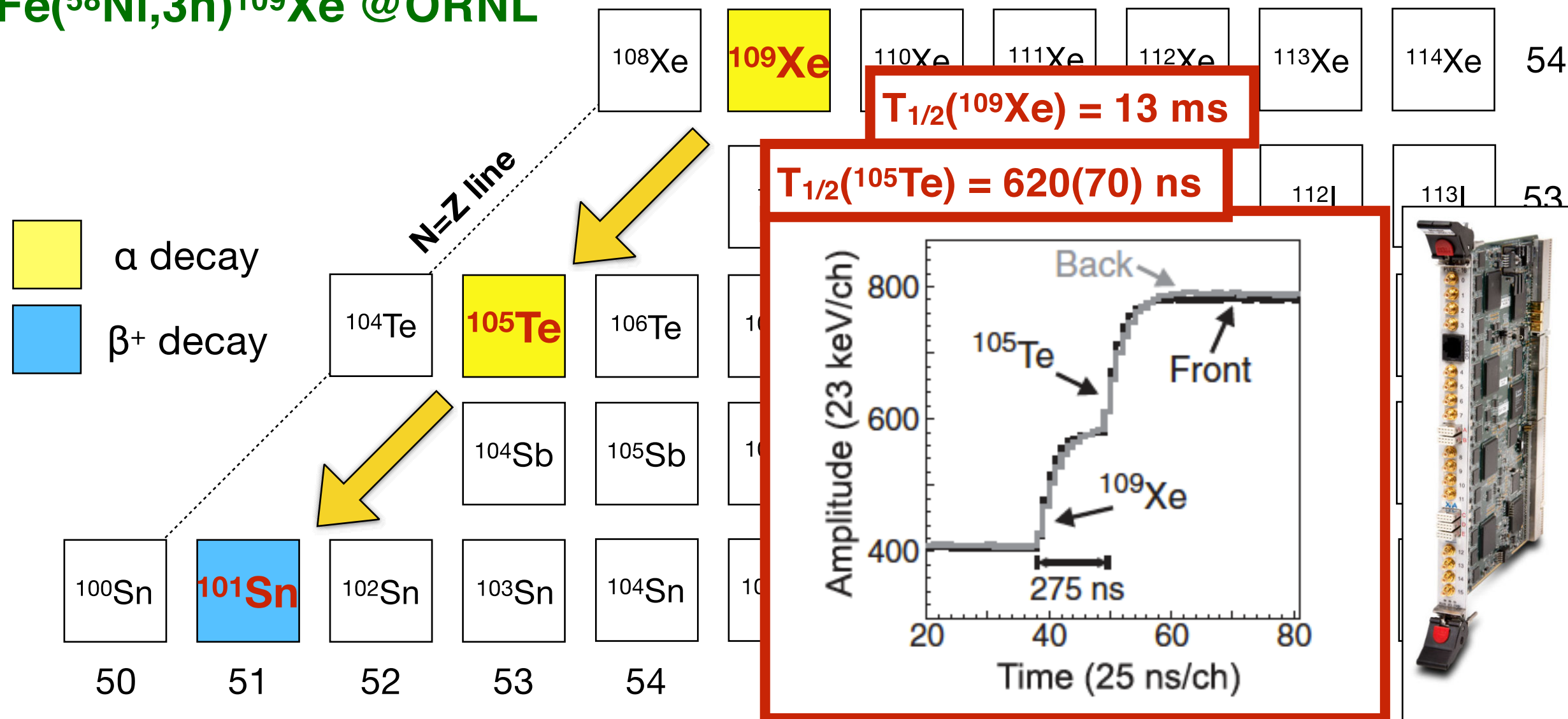
**$^{108}\text{Te}$**   
 $E_\alpha = 3.08(3)$  MeV  
 $T_{1/2} = 5.3(4)$  sec

# Alpha decay chain from $^{109}\text{Xe} \rightarrow ^{105}\text{Te} \rightarrow ^{101}\text{Sn}$

比較的長寿命のアルファ崩壊の親核を生成して合成が行われる

FlashADCを用いた波形データ取得を行い、早い $\alpha$ 崩壊を測定

$^{54}\text{Fe}(^{58}\text{Ni}, 3n)^{109}\text{Xe}$  @ ORNL



S.N. Liddick et al., PRL 97 082501 (2006)  
I.G. Darby et al., PRL 105 162502 (2010)

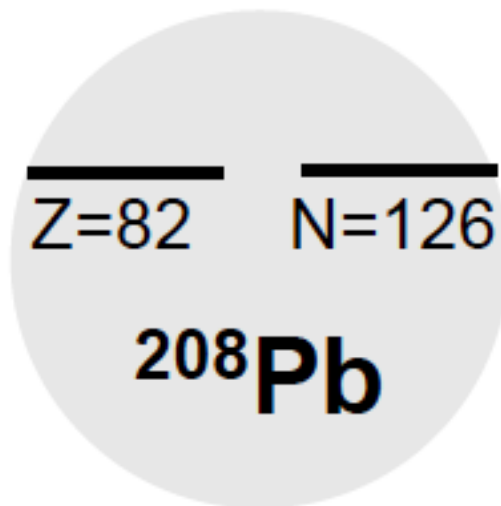
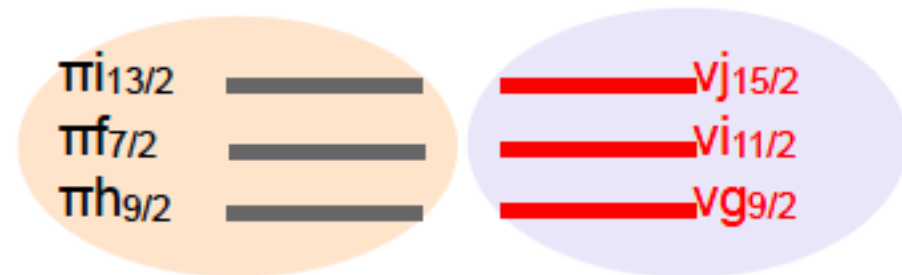
# 二重魔法数核近傍のアルファ崩壊

## アルファ崩壊確率

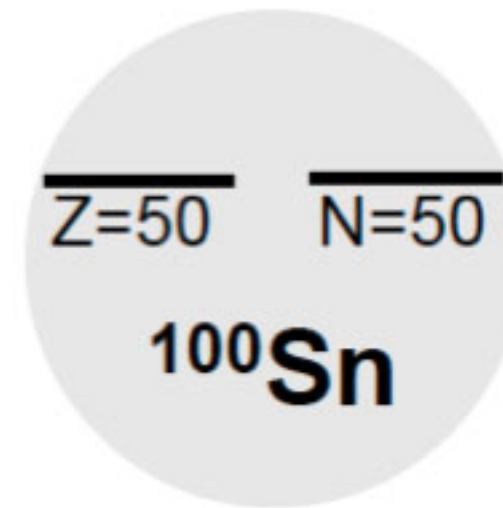
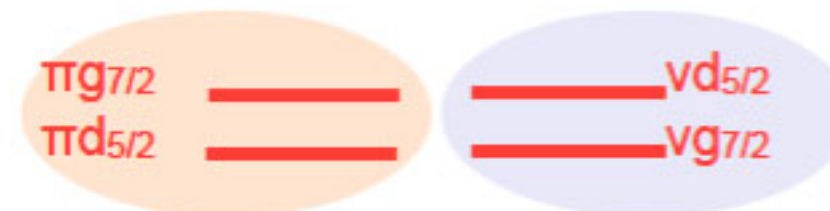
- ・ 分離エネルギーとクーロン障壁の大きさ・形
- ・ 崩壊の始状態の波動関数と終状態の波動関数の重なり



$\alpha$  made of  $\pi$  and  $\nu$   
in opposite parity orbitals

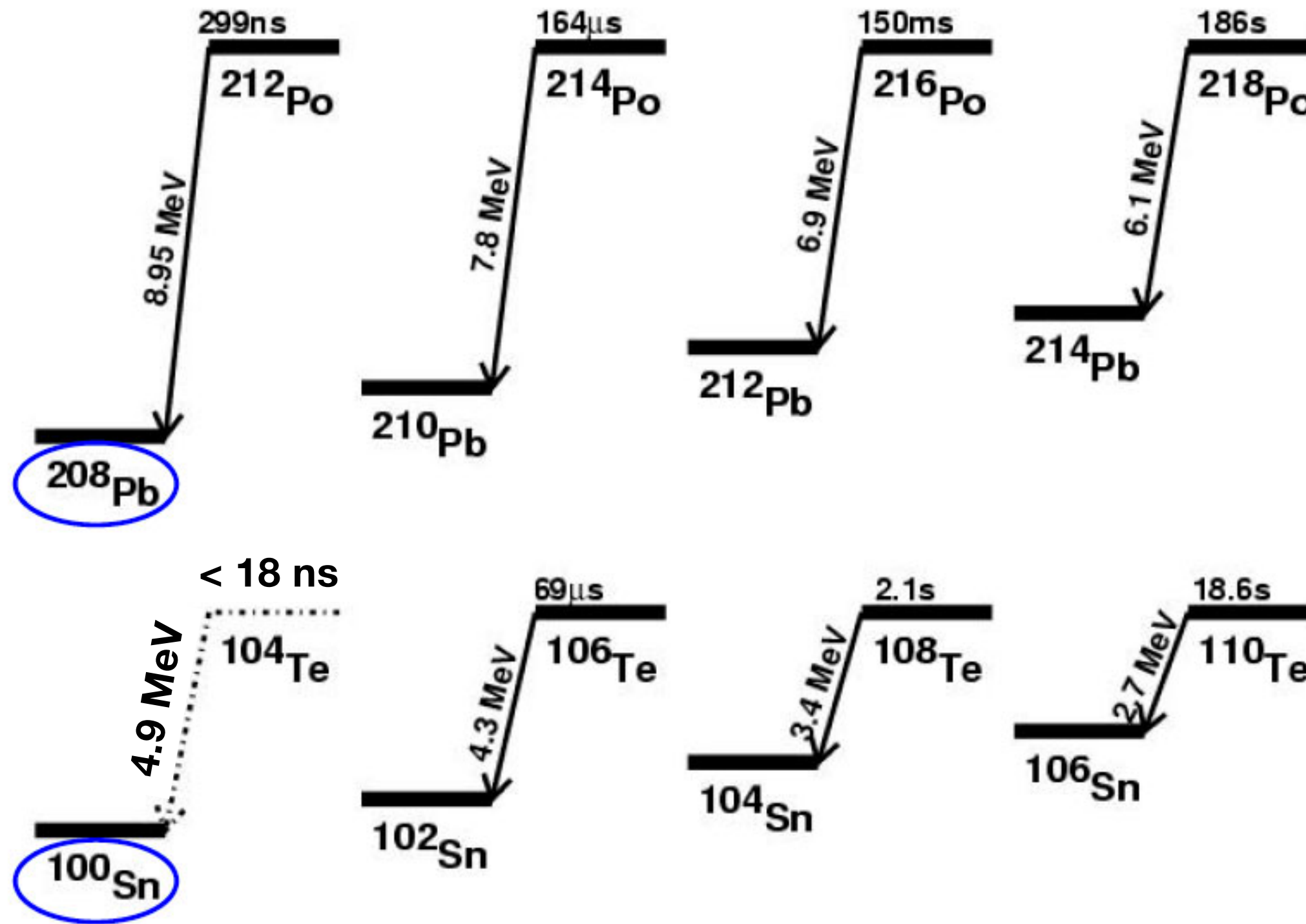


$\alpha$  made of  $\pi$  and  $\nu$   
in the same parity orbitals



アルファ崩壊のベンチマーク ( ${}^{212}\text{Po} \rightarrow {}^{208}\text{Pb}$ ):  $W_\alpha$ :  ${}^{212}\text{Po}$ に対する崩壊幅の比

# $^{100}\text{Sn}$ 近傍のアルファ崩壊



$^{104}\text{Te} \rightarrow ^{100}\text{Sn} : E_\alpha = 4.9(2) \text{ MeV}, T_{1/2} < 18 \text{ ns}$

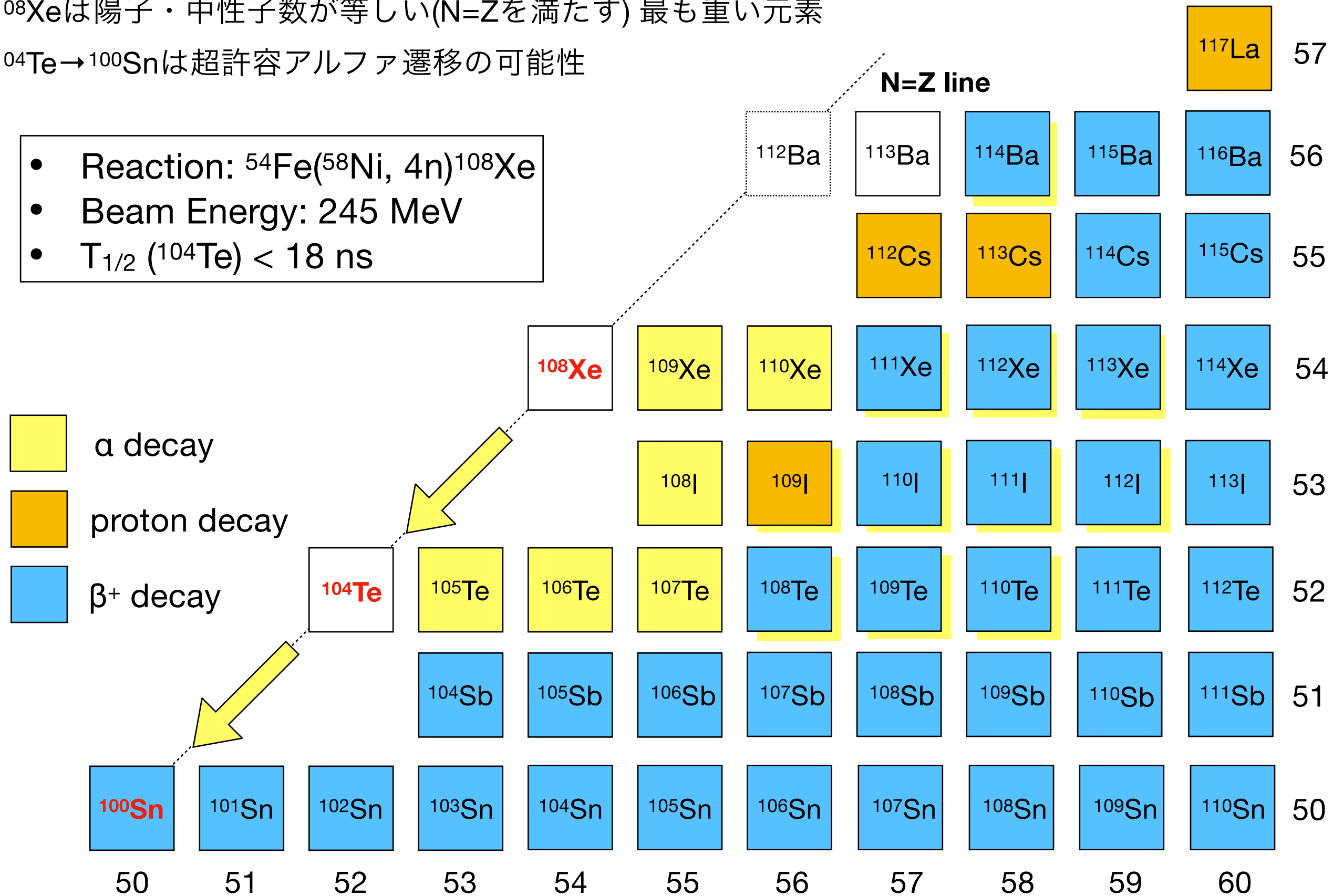
K. Auranen et al., PRL 121 (2018)

# 100Snに至るアルファ崩壊鎖の測定

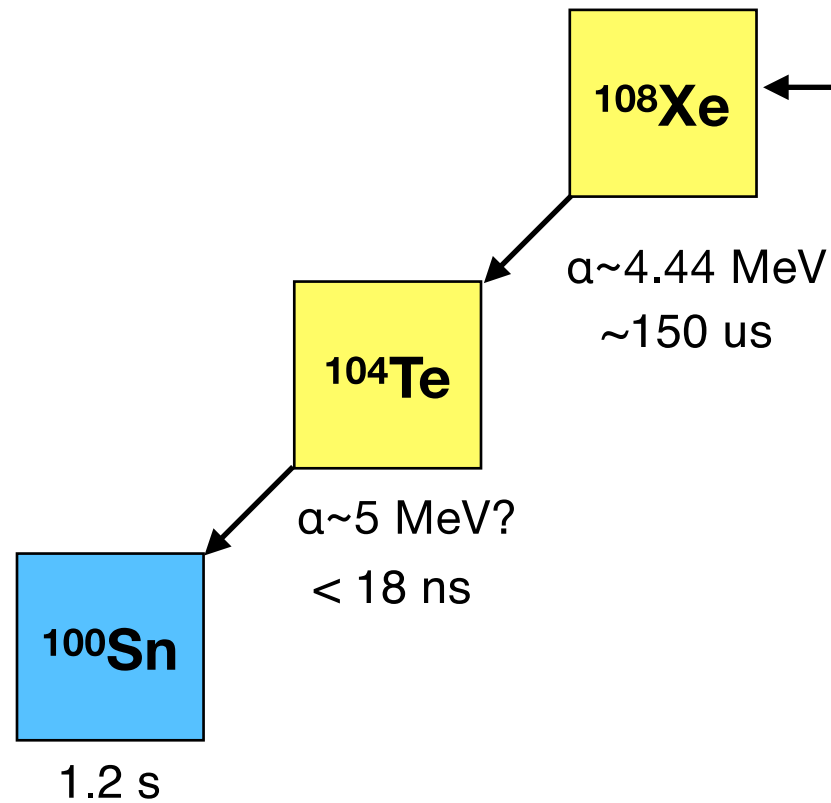
108Xeは陽子・中性子数が等しい(N=Zを満たす) 最も重い元素

104Te → 100Snは超許容アルファ遷移の可能性

- Reaction:  $^{54}\text{Fe}(^{58}\text{Ni}, 4n)^{108}\text{Xe}$
- Beam Energy: 245 MeV
- $T_{1/2} (^{104}\text{Te}) < 18 \text{ ns}$



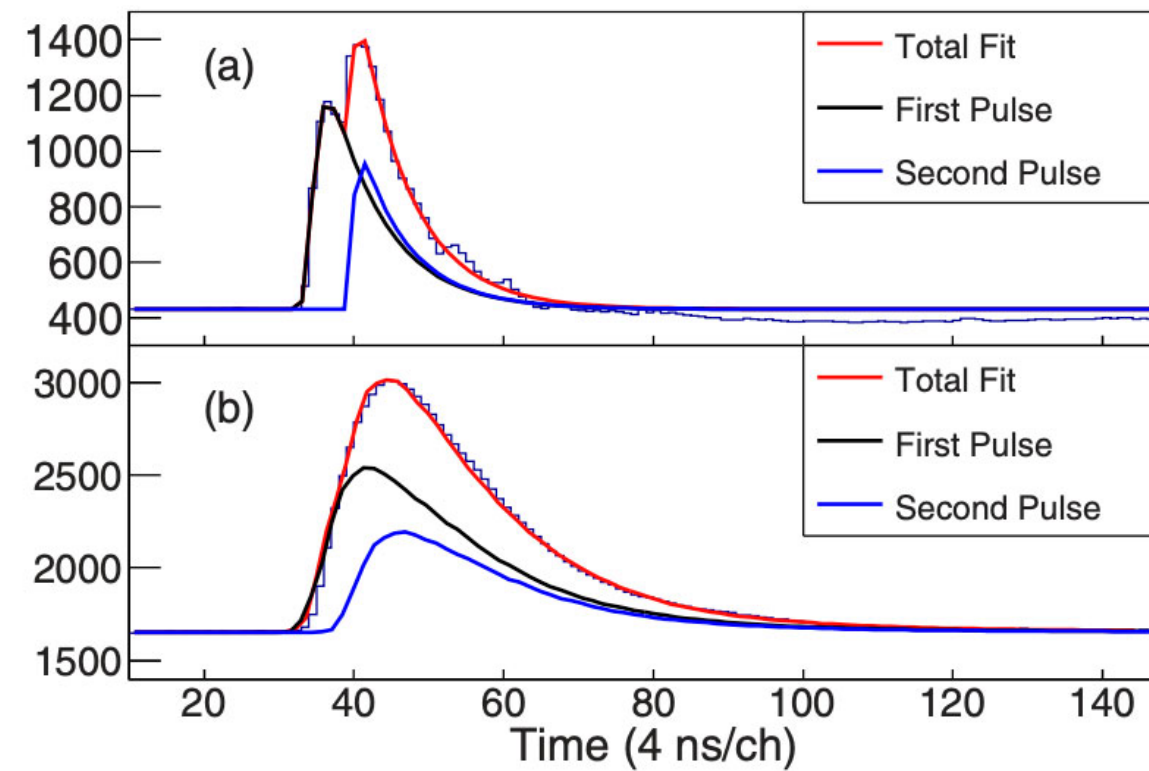
# $^{100}\text{Sn}$ に至るアルファ崩壊鎖の測定



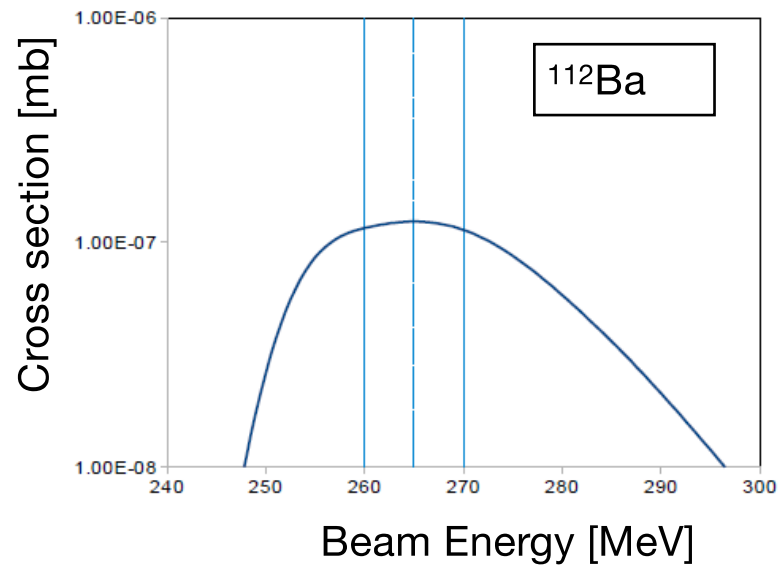
核融合蒸発反応

→ 早い時間応答をもつ検出器開発の必要性

Dynode signal with 17 ns separation



小さな生成断面積での実験



→ 高検出効率

~100 pb at 265 MeV  
(RMSのトランスミッション5%)  
→ 1~2 イベント/日

→ 無機シンチレータを採用したインプランテーション検出器の開発



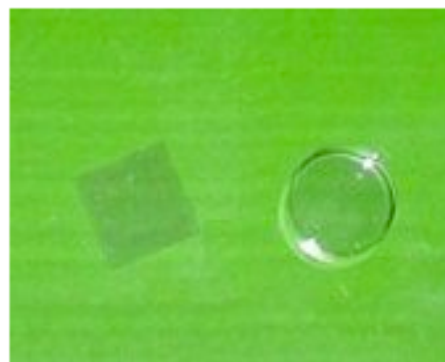
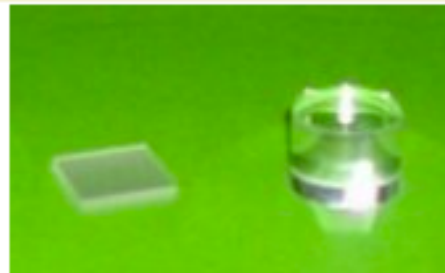
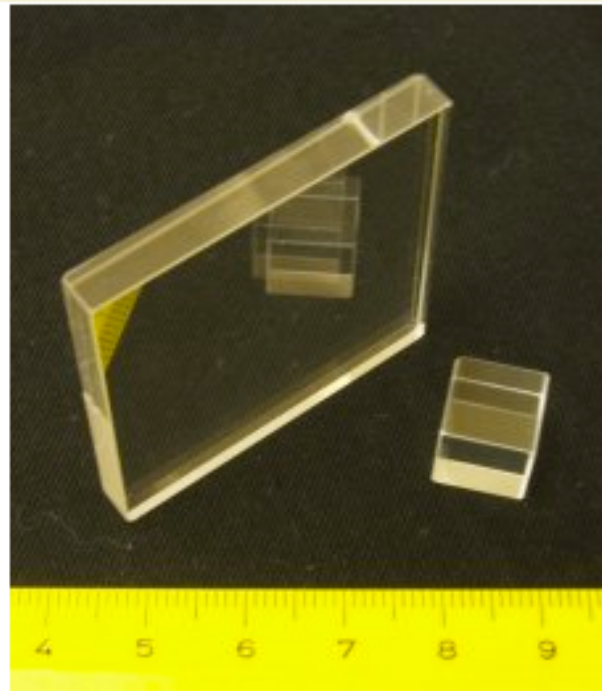
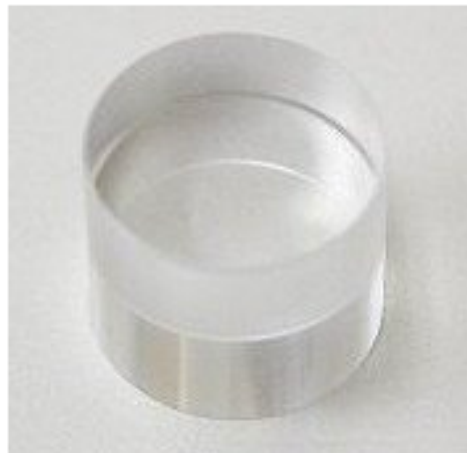
# 無機シンチレータ(YAP)を活かした検出器開発

## 入射イオン及び崩壊粒子測定に適したシンチレータ

### YAP:Ce ( Yttrium Aluminum Perovskit, Ce<sup>+</sup> doped ) crystals

#### YAP:Ce crystal examples

below: 12mm (dia) x 10mm (high) cylindrical YAP:Ce crystal.  
right: show various shape YAP crystals.

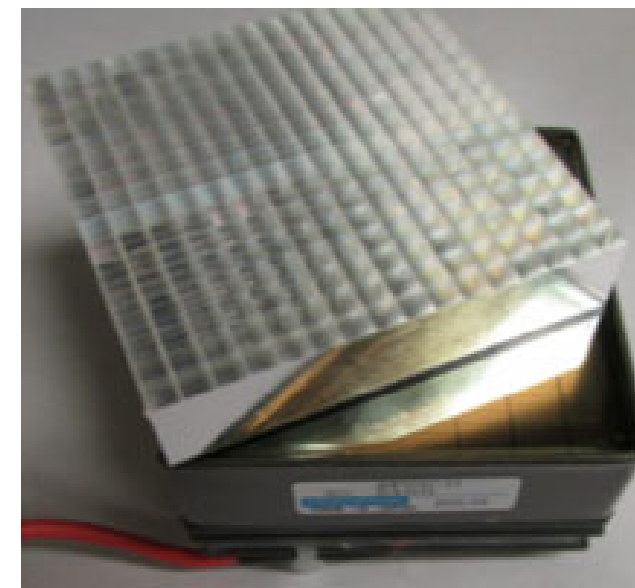


#### physical and scintillation properties of YAP:Ce

photons/MeV @300°K	~ 18,000	cleavage plane	none
effective Z#	31.4	density	5.37g / cm <sup>3</sup>
melting point	1,875 °C	hardness [Moh]	8.6
hygroscopicity	none	peak wavelength	370 nm
decay constant	27 nSec	reflective index [ @370nm ]	1.95
afterglow @ 6mSec	< 0.005 %	Light output [ NaI(Tl)=100% ]	~ 40%
crystal structure	Rhombic	chemical formula	YAlO <sub>3</sub> :Ce <sup>+</sup>

- 早い時間応答
- 阻止能高 ( $Z_{\text{eff}}=31.4$ )
- 放射線耐性
- 潮解性なし
- 化学的に安定
- 加工が容易
- (比較的) 安価

浜松フォトニクス (H8500)



ライトガイド(石英)

# 検出器の特性

## 無機シンチレータ(YAP, YSOなど) + 位置検知型光電子増倍管(PSPMT)

### 早い時間応答性

- ・ 非常に早いアルファ崩壊鎖の識別
- ・ ベータ遅発中性子飛行時間測定におけるスタート信号

### 高い阻止能

- ・ ベータ線(アルファ線)に対する高検出効率
- 入射粒子+崩壊粒子の相関

### コンパクトなサイズ

- ・ セットアップ周りにおける物質量の最小化
- 中性子やガンマ線の測定を妨げにくい

### シンチレータの厚さが可変

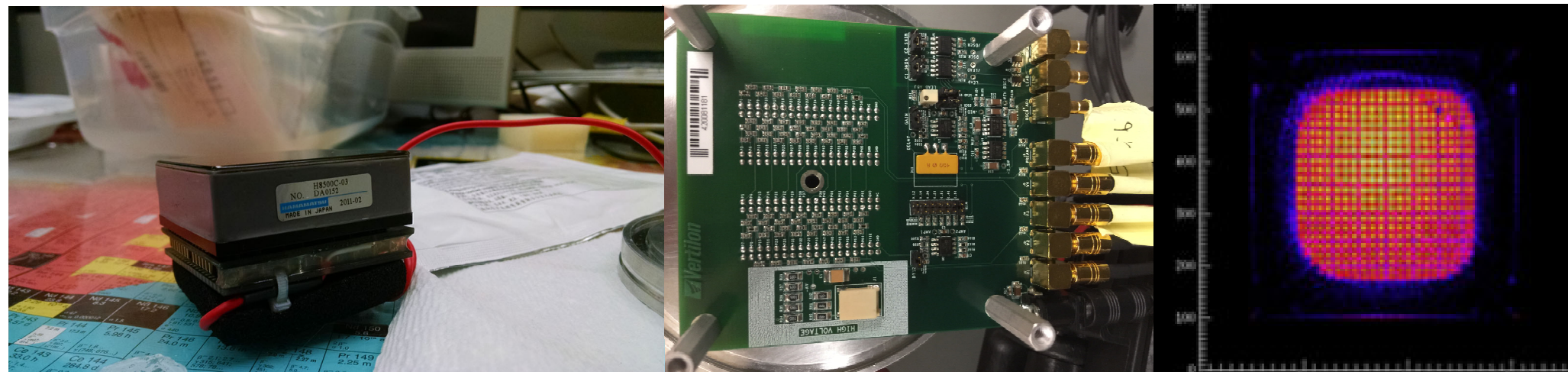
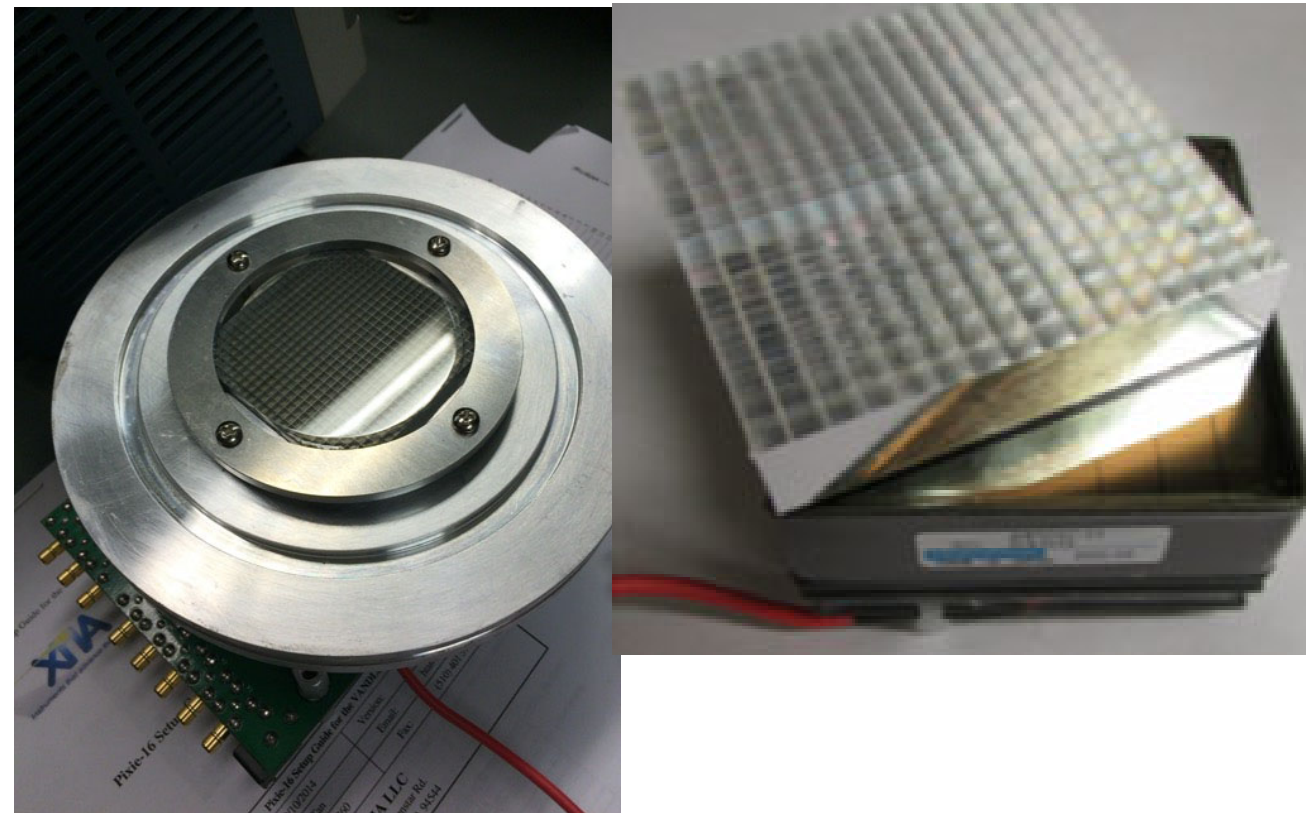
- ・ 入射ビームエネルギーに応じた厚み

### 放射線ダメージに対して強い

- ・ 高い入射レートでの実験に応用可

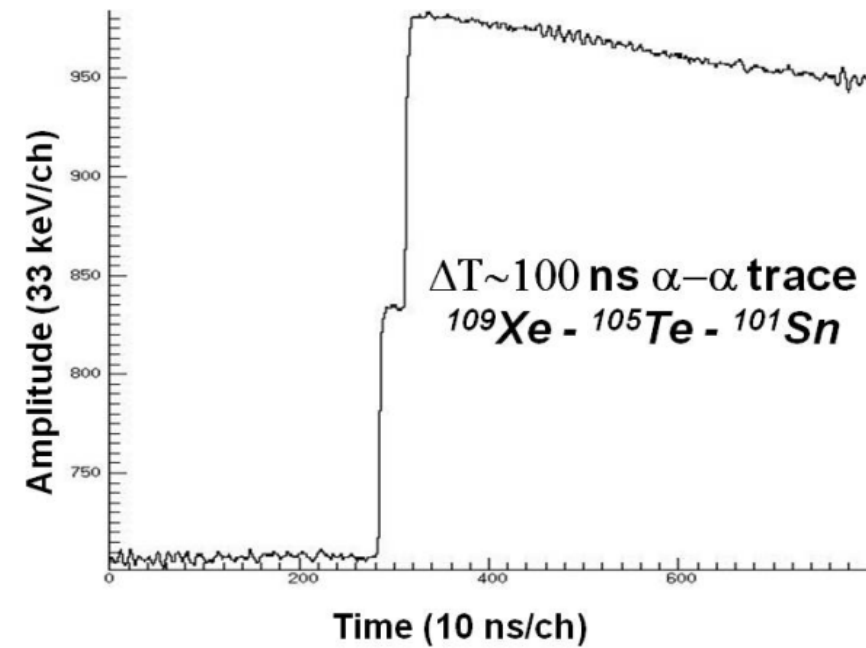
### 抵抗分割を利用した読み出しチャンネル数の低減

- ・ DAQの読み出しチャンネル数の低減



# 検出器の応用について

## 早いアルファ崩壊鎖の同定



## 遅発中性子飛行時間測定スタート信号



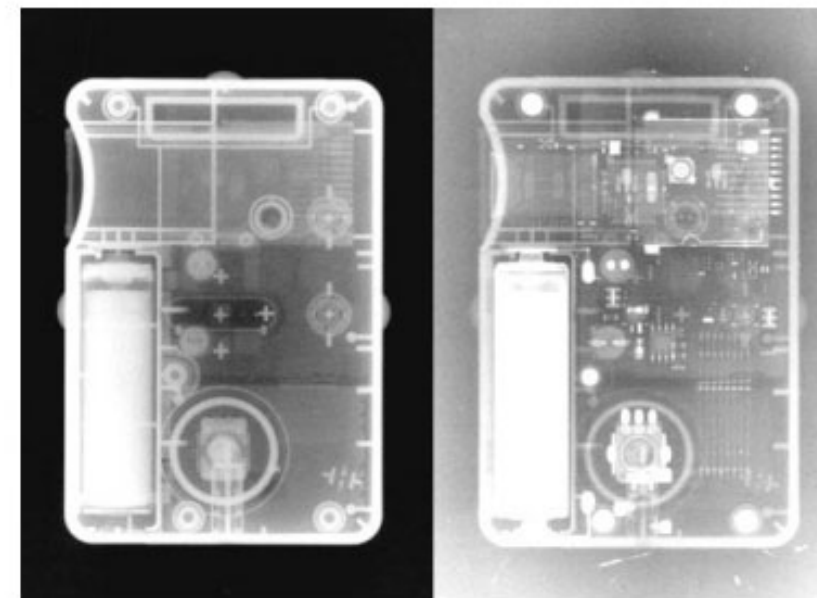
Data taken in Nov 2018 at RIBF, 2016 at MSU

## RIBFなどのベータ崩壊測定のための インプランテーション検出器



R. Yokoyama et al., NIM A 937 (2019)

## イメージングへの応用



(a) 中性子による透視像 (b)  $\gamma$ 線による透視像

写真2 ICプレーヤーの放射線透視像

中性子イメージング技術の原理 玉置昌義より引用

# 実験セットアップ

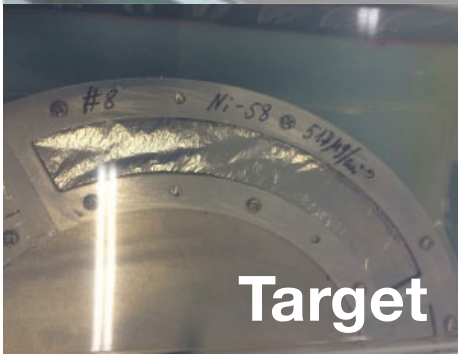
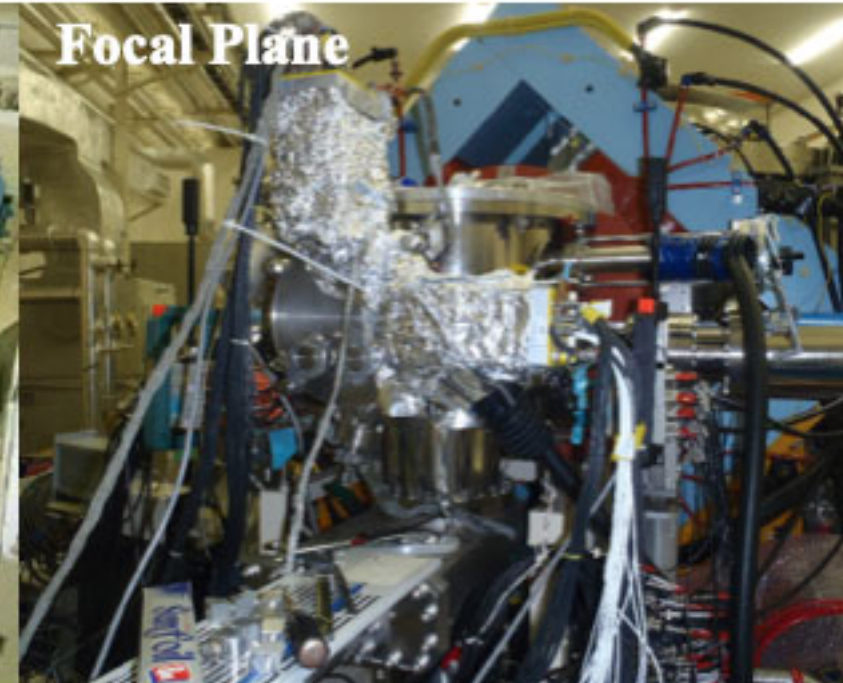
JAEA, Tokai, Japan



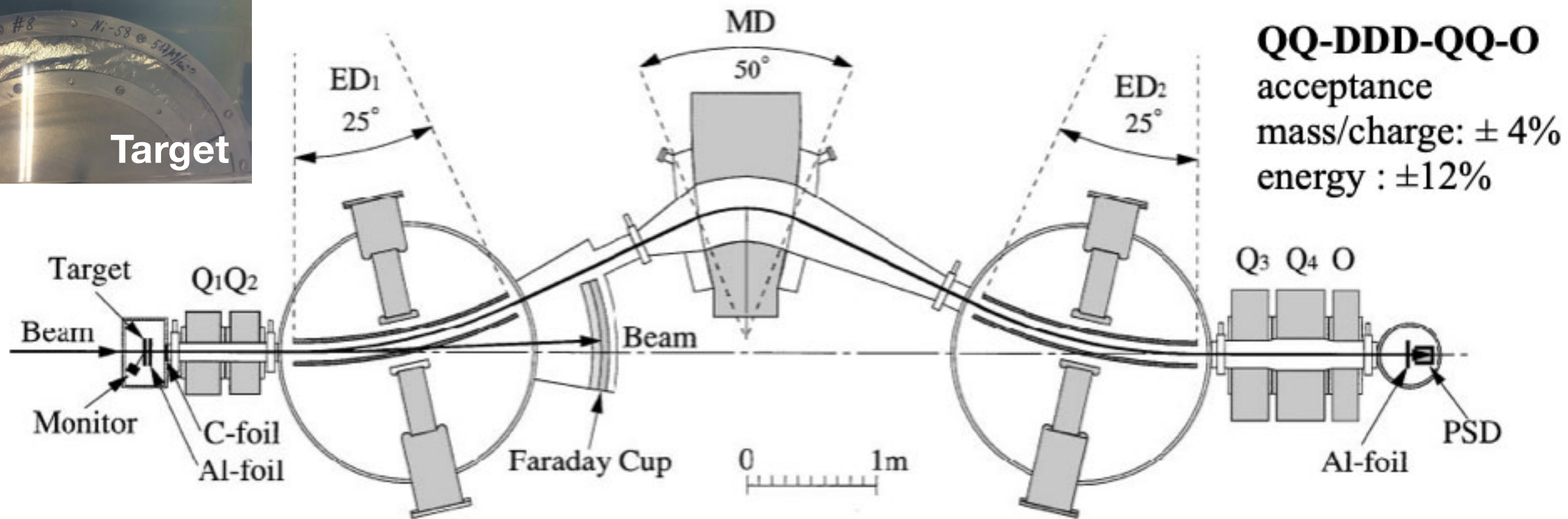
Recoil Mass Spectrometer



Focal Plane



Target



T. Kuzumaki et al., NIM A 437 (1999) 107

Reaction:  $^{54}\text{Fe}(^{58}\text{Ni}, 4n)^{108}\text{Xe}$

# Experimental setup

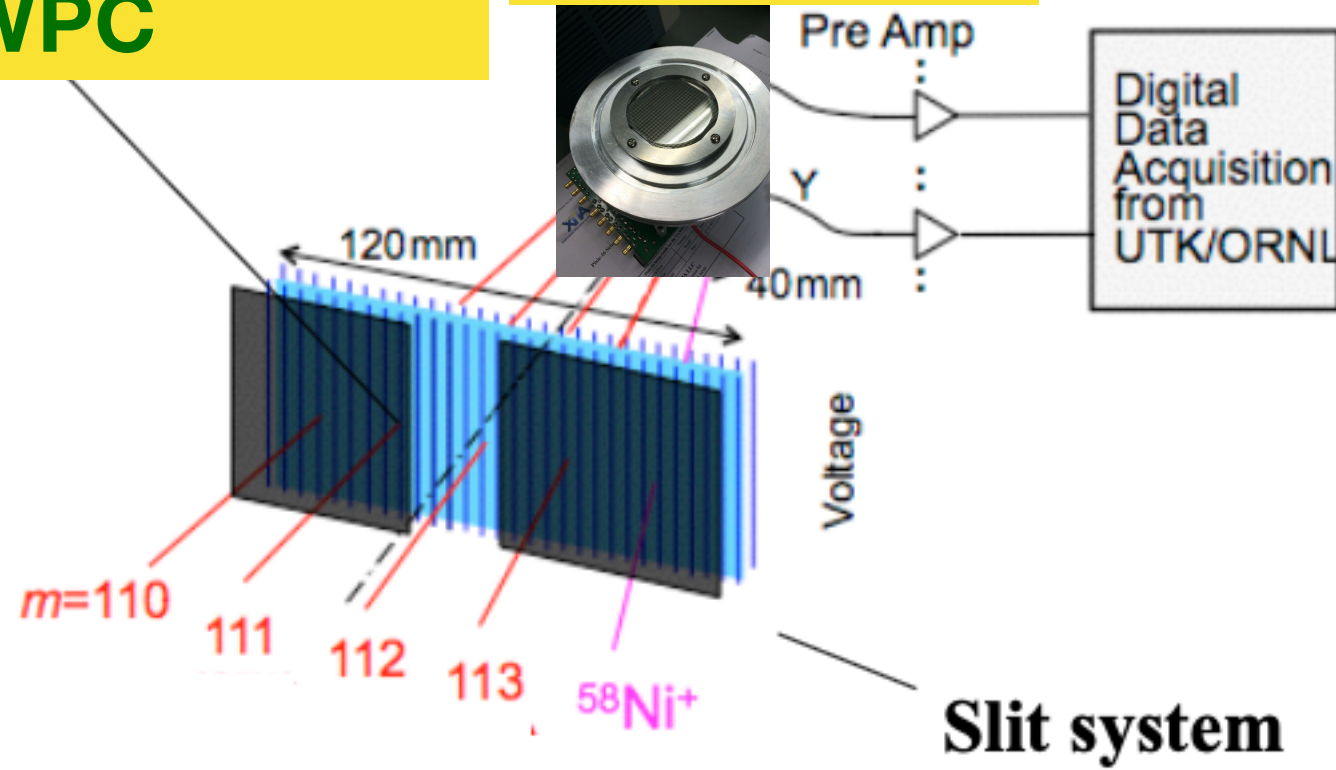
**Position sensitive MWPC**

**YAP:Ce  
Implantation  
detector**

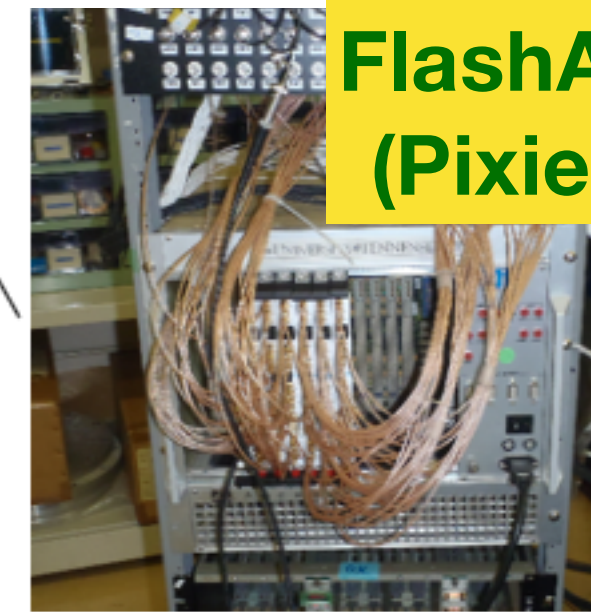
**NaI**

Annular NaI(Tl)  
- Thickness : 2 in  
- Length : 14.5 in

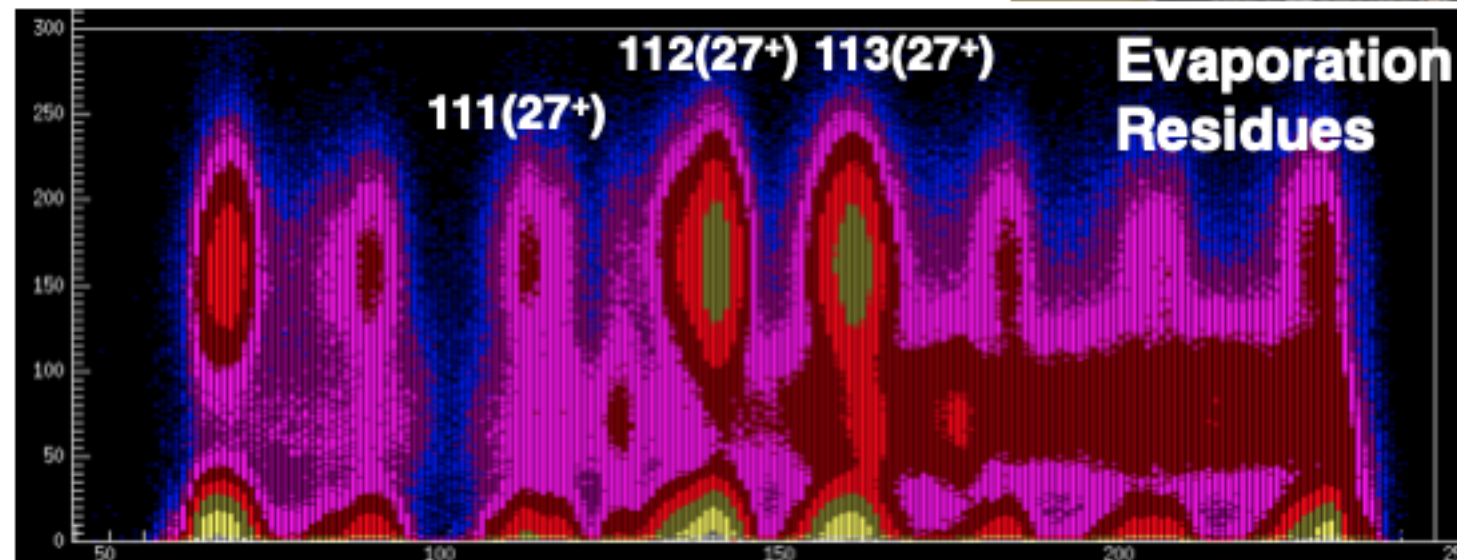
Main NaI(Tl)  
- Diameter : 9 in  
- Length : 8 in



**FlashADC  
(Pixie16)**

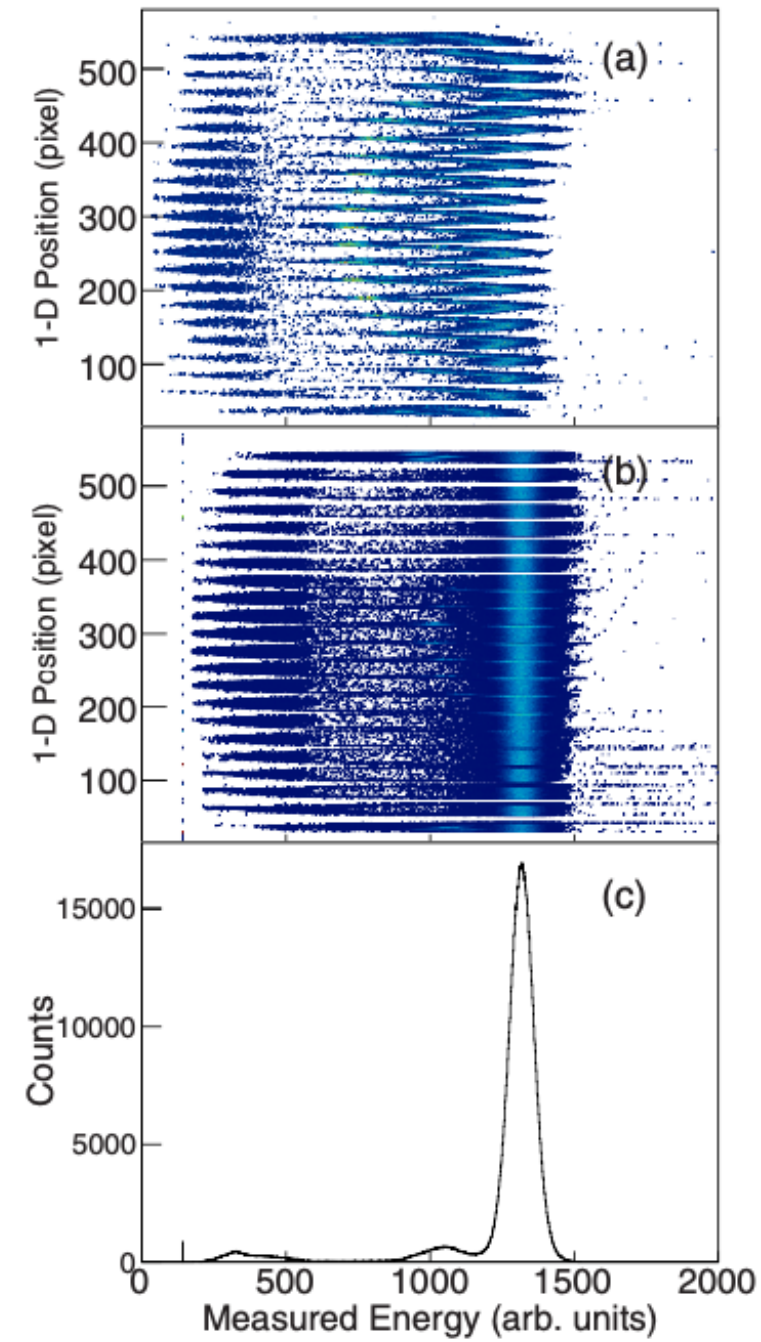
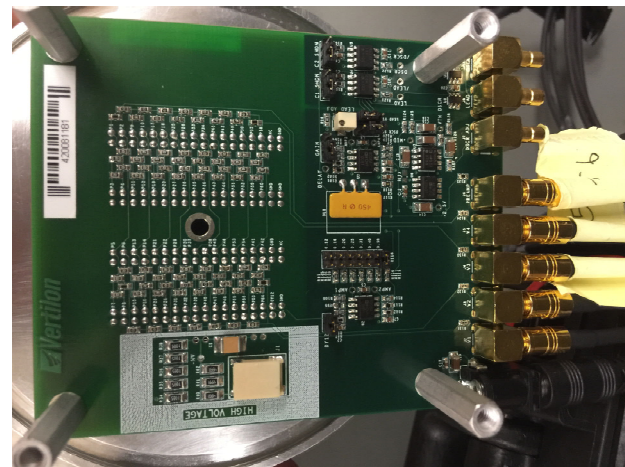
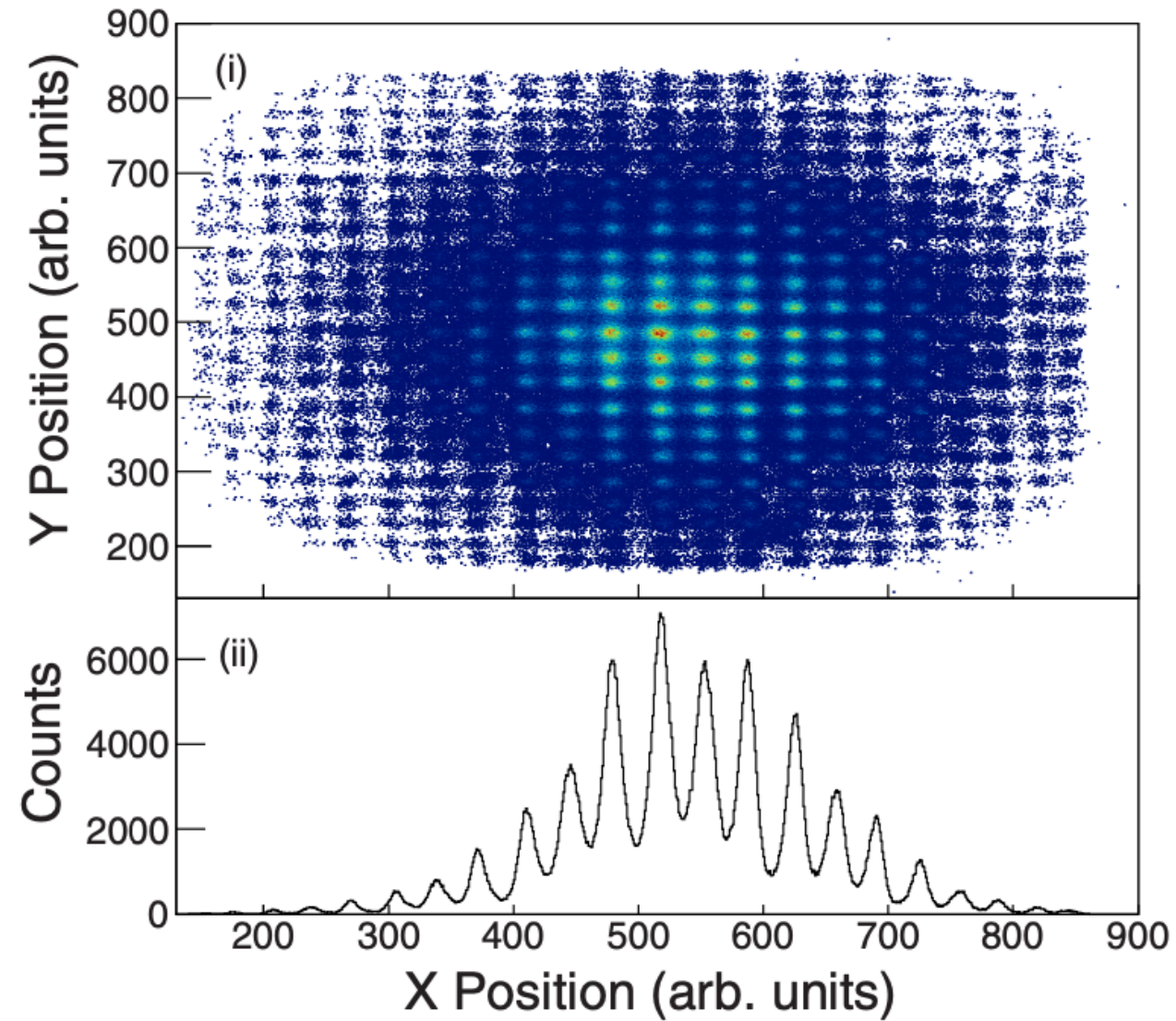


**Fusion products**



# エネルギー較正と分解能について

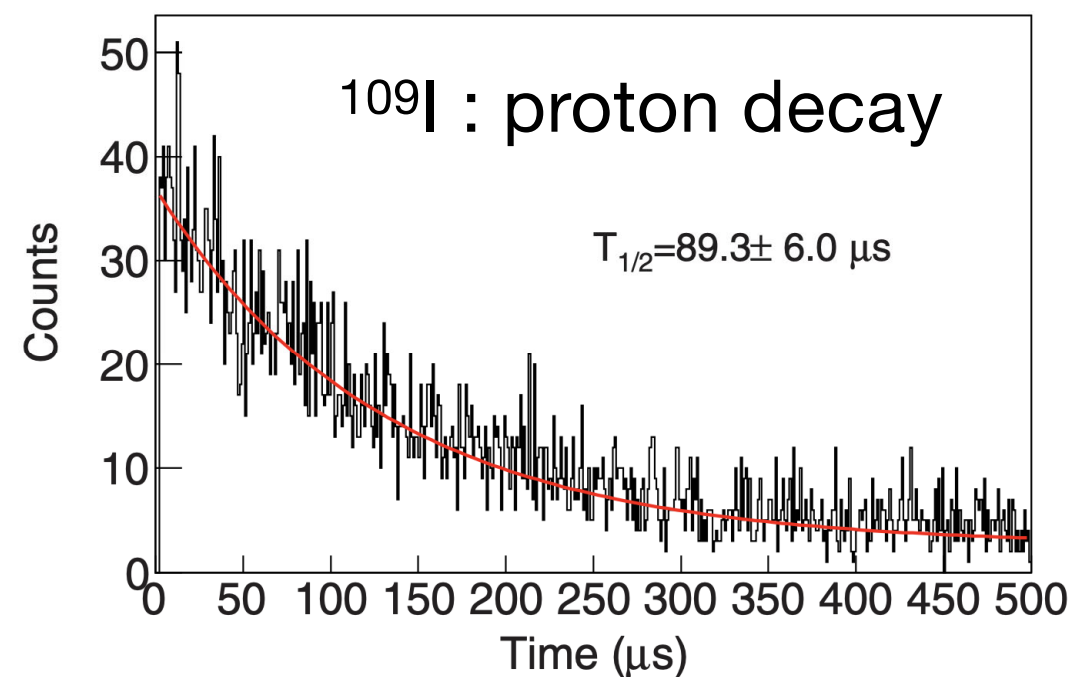
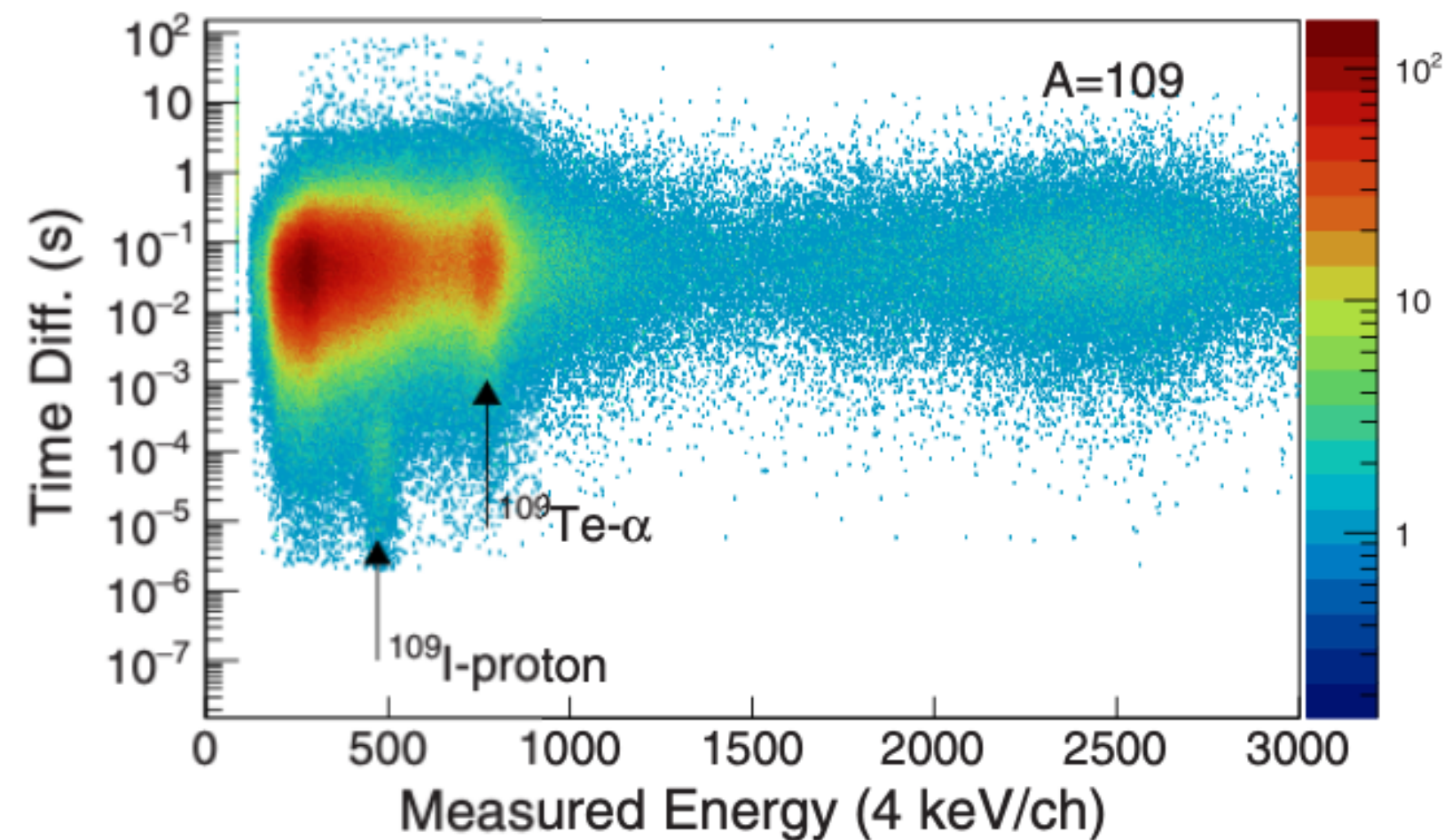
24×24 ピクセルの位置分布を再構成 → ピクセルごとのエネルギー較正



エネルギー分解能 ~8%

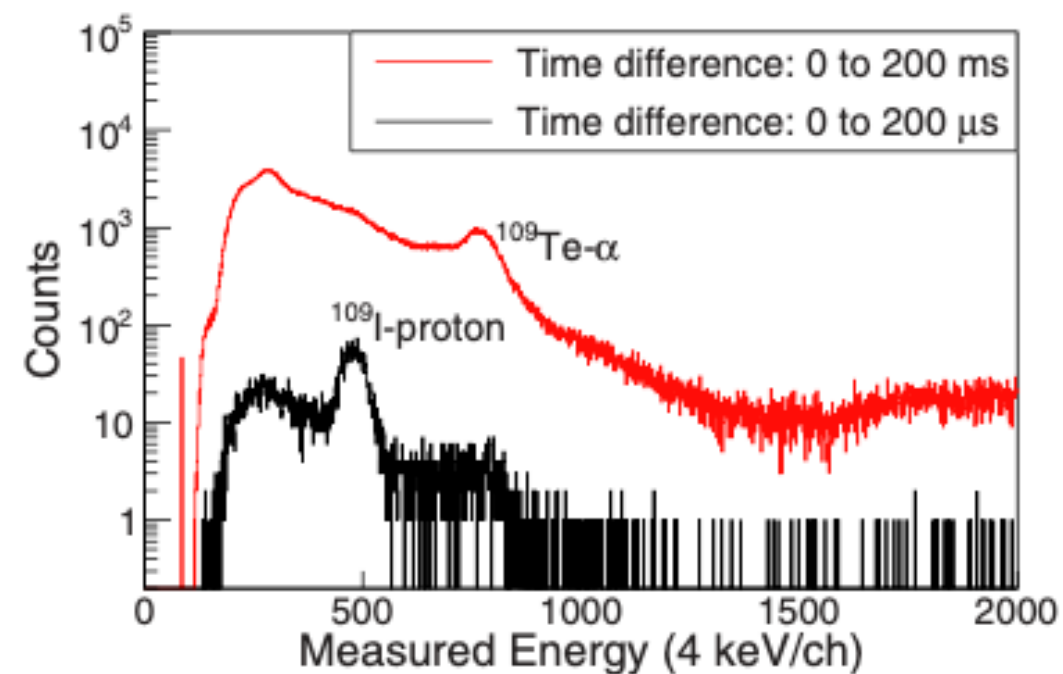
# Ion-decay correlation in YAP implantation detector

既知の陽子、アルファ崩壊のエネルギー、半減期を再現



$T_{\text{ref}} = 93.5(3) \mu\text{s}$

H. Ikezoe et al., NIM B 126 (1997)



# Experimental results

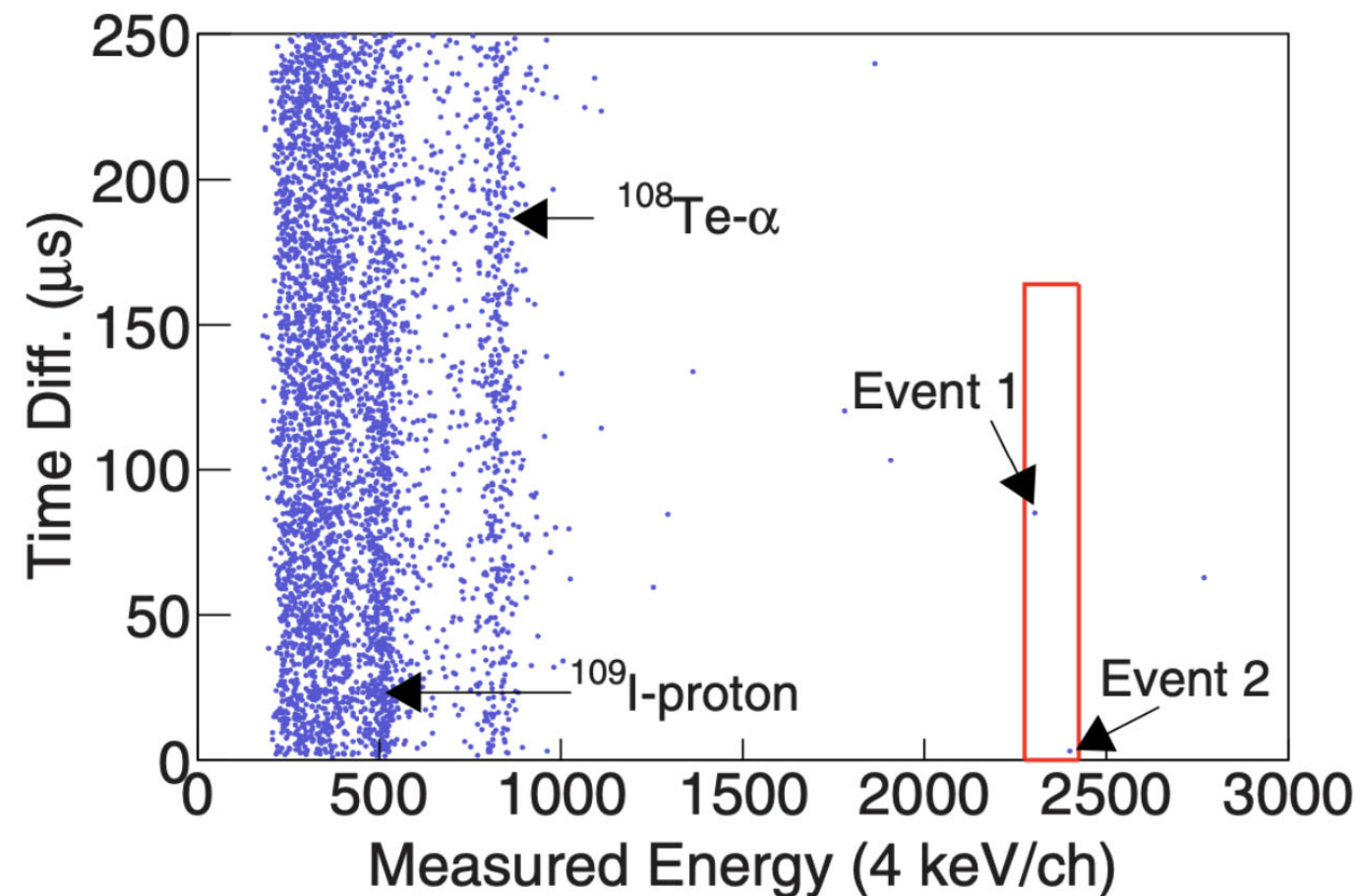
$^{104}\text{Te} \rightarrow ^{100}\text{Sn}$ と思われる領域にイベントが測定された

- パイルアップ信号としては記録されなかった
- $T_{1/2} < 4 \text{ ns} ? \rightarrow W_{\alpha} > 59$
- $\beta$ -delayed proton の可能性が排除できない
- 生成断面積の上限値 130 pb
- HIVAPで予言される 1 nb より約1桁ほど小さい

☑ 早い崩壊を測定する検出器

☑ データ取得システム

ブースターを活用した実験





# Summary

- $^{100}\text{Sn}$ 近傍核には系統的にアルファ崩壊が発見されている
- $^{104}\text{Te} \rightarrow ^{100}\text{Sn}$ は超許容アルファ遷移の可能性
  - **無機シンチレータを採用した時間応答の速い検出器を開発**
- **$^{54}\text{Fe}(^{58}\text{Ni}, 4n)^{108}\text{Xe}$  @ JAEA タンデム加速器施設 (3~4 day)**
- **先行研究に合致するイベントが測定された**
  - 2つのシグナルの分離は4 ns以下。有力な結果とはいえない。
  - 生成断面積の上限値は130 pb
    - HIVAPコードの予言より約1桁程度小さい
  - $^{104}\text{Te}$ の $\alpha$ 崩壊を決定づける実験が必要

# Collaborators



K. Nishio  
R. Orlandi  
H. Makii  
K. Hirose  
I. Nishinaka  
J. Smallcombe  
H. Ikezoe  
R. Léguillon

## **Kyoto University**

T. Otsuki

## **Lund University**

L. G. Sarmiento

## **Slovak Academy of Science**

M. Veselsky



K.P. Rykaczewski  
N. Brewer  
C.J. Gross  
N. Brewer

## **Warsaw University**

C. Mazzocchi

## **GSI**

F.P. Hessberger

## **Tokyo Institute of Technology**

S. Chiba



R. K. Grzywacz  
K. Kolos  
Y. Xiao

## **University of York**

A. Andreev  
D.G. Jenkins  
R. Wadsworth  
M.A. Bentley

## **INFN**

G. de Angelis  
CSNSM  
C. Petrache

## **IMP**

Z. Zhang  
Z.G. Gan