



# 自己紹介 & 研究紹介

桂川美穂

Apl. 24, 2024

# 研究紹介

- X線ガンマ線検出器の開発  
Development of X-ray/Gamma-ray detectors
- 検出器応用 Application study
  - 負ミュオンビームを使った非破壊元素分析  
non-destructive elemental analysis using muonic X-ray
  - 分子イメージング  
Molecular imaging (cancer research and drug discovery)
  - 硬X線宇宙観測 Hard X-ray space observation

# 宇宙観測から地上実験、そして宇宙へ

## 宇宙X線観測

- ▶ 超新星残骸の研究 (D論)
  - データ解析 (スペクトル・イメージ)
  - 数値流体計算
- ▶ ASTRO-H (ひとみ衛星)
- ▶ 気球プロジェクト

## 次世代検出器

## 加速器実験

- ▶ 負ミュオンX線を用いた非破壊元素分析
  - 高カウントレートでの検出器応答
  - ミュオンX線2D (修論)・3Dイメージング

Si/CdTe検出器  
検出器の応答

## 核医学

(分子イメージング)

- ▶ がん研究のための小動物用撮像装置の開発
  - 多核種同時撮像
  - アルファ線放出核種の可視化
  - 薬物動態の可視化

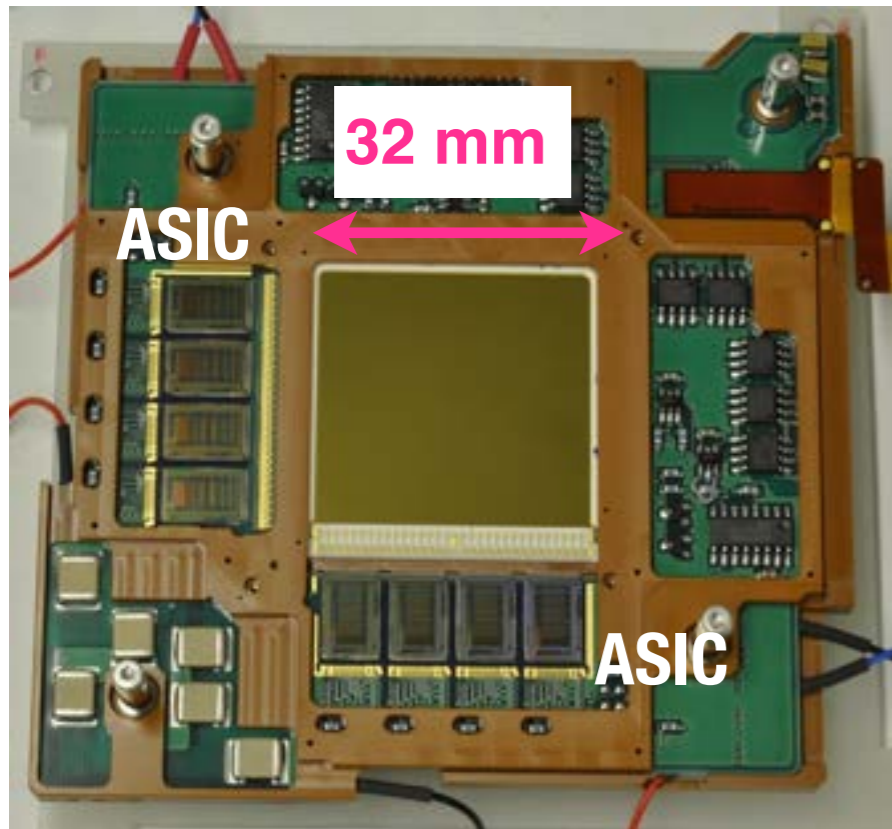
近距離撮  
像手法

コリメータ  
3D撮像

検出器  
解析手法

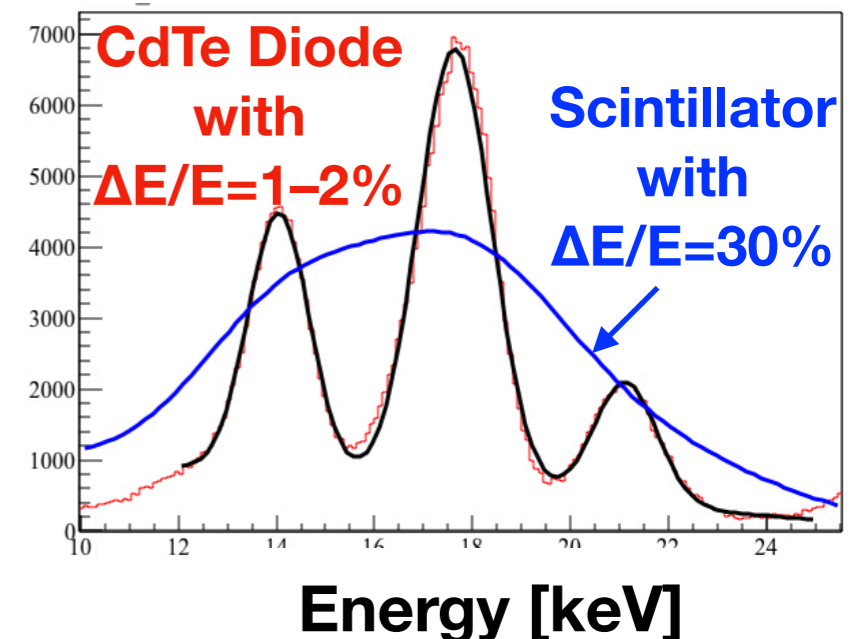
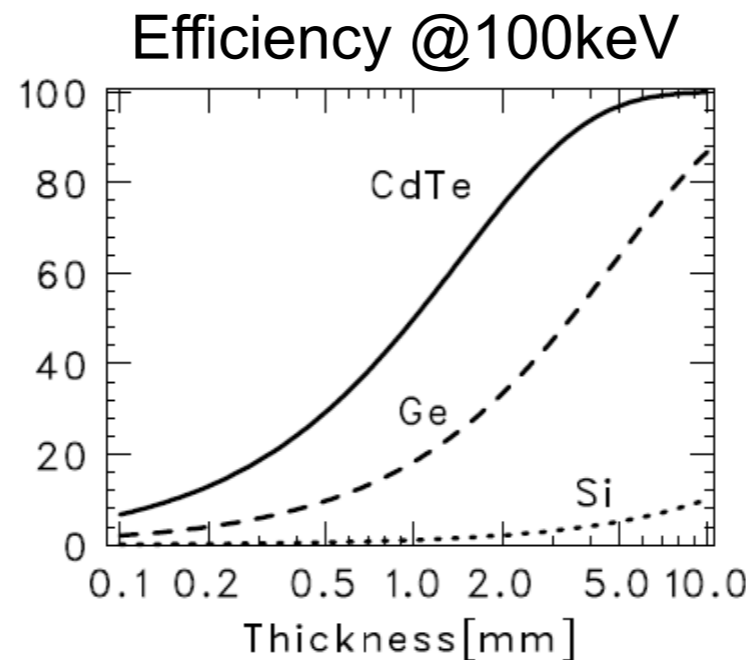
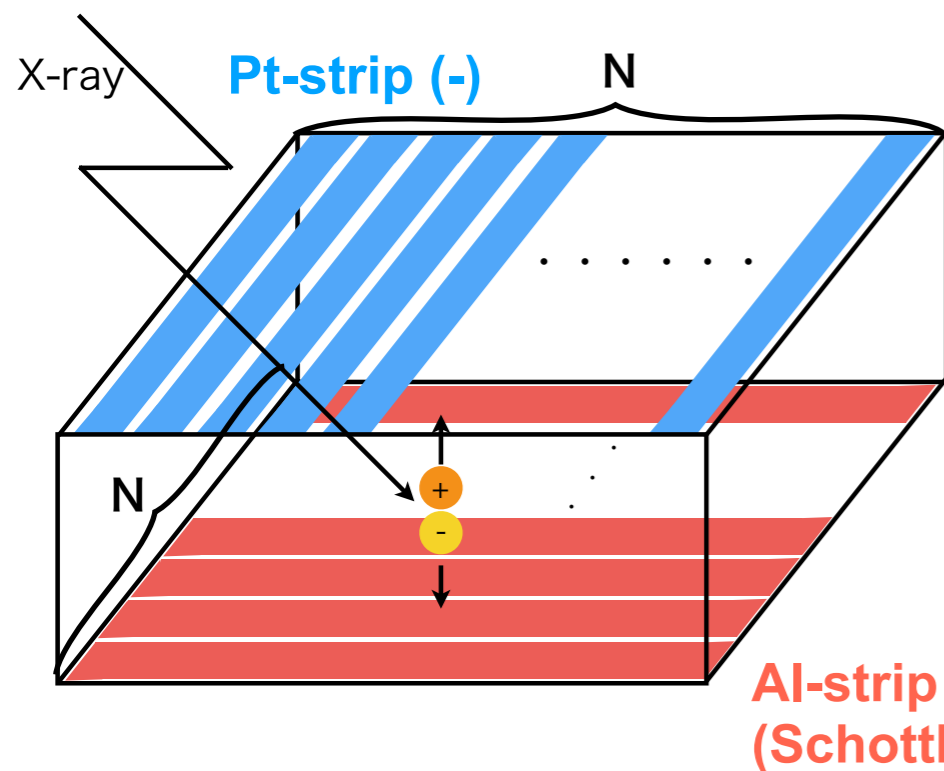
次世代検出器

# Key technology: CdTe半導体検出器



## CdTe double-sided strip detector (CdTe-DSD)

- ▶ Fine Pitch < 250  $\mu\text{m}$  + Large Area (32 x 32  $\text{mm}^2$ )
- ▶ Pt/CdTe/Al structure — CdTe diode
  - 高いエネルギー分解能
- ▶ 両面ストリップ型検出器
  - 2x128=256 channels (<< 128x128=16384)
- ▶ High efficiency < 100 keV
- ▶ モジュール化され積層が可能に。



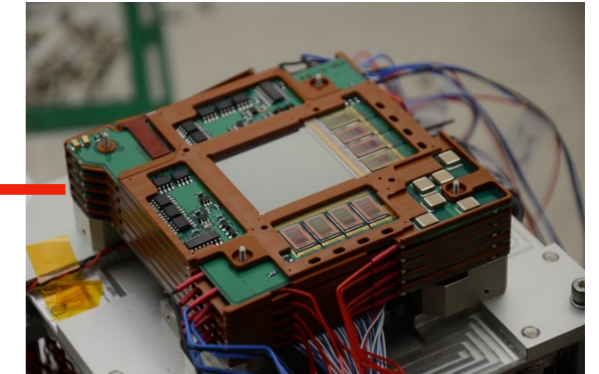
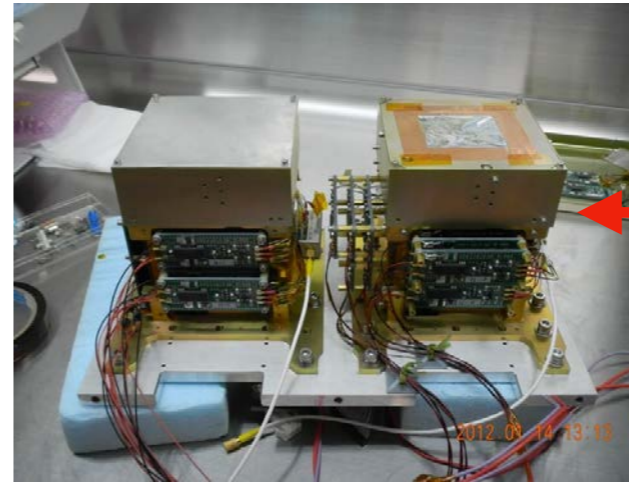
# 鍵技術を使った様々な宇宙観測装置

ASTRO-H

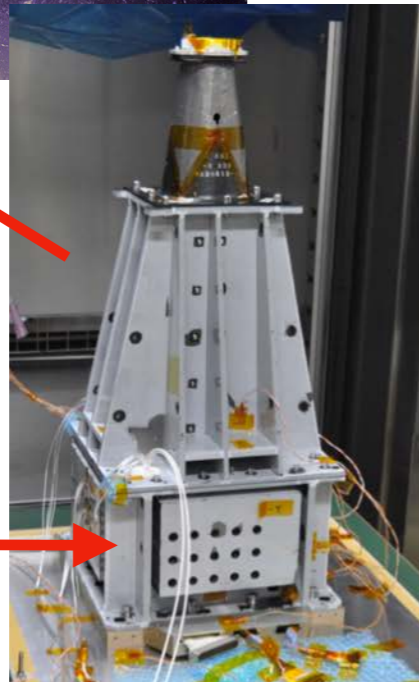


JAXA

Compton camera



Si/CdTe DSD



FOXSI

Detectors

Sun

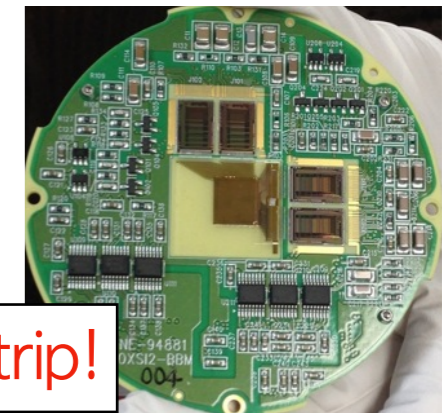


Hard X-ray optics

2 m

60  $\mu\text{m}$  strip!

CdTe-DSD



## 宇宙観測技術への要求

- エネルギー分解能
- 位置分解能
- 検出効率
- 小型化

この要求は地上の研究においても同じでは？

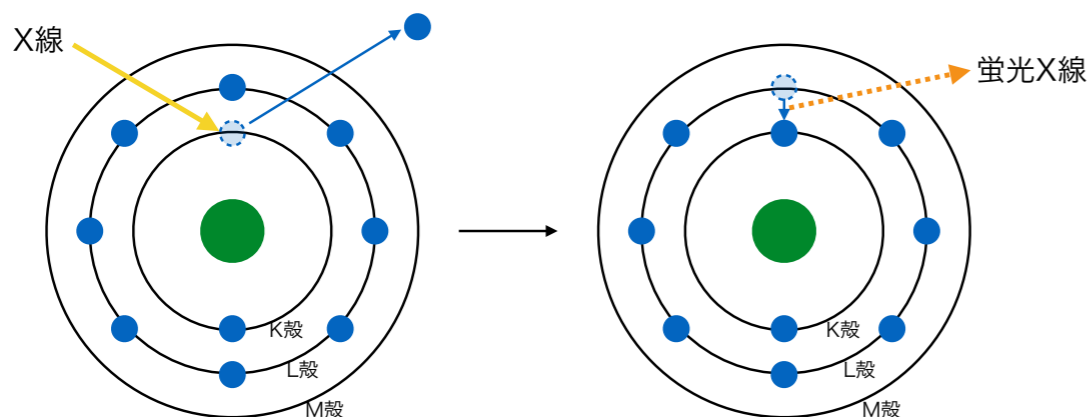
→ 異分野融合研究へ



# 負ミューオン非破壊元素イメージング分析

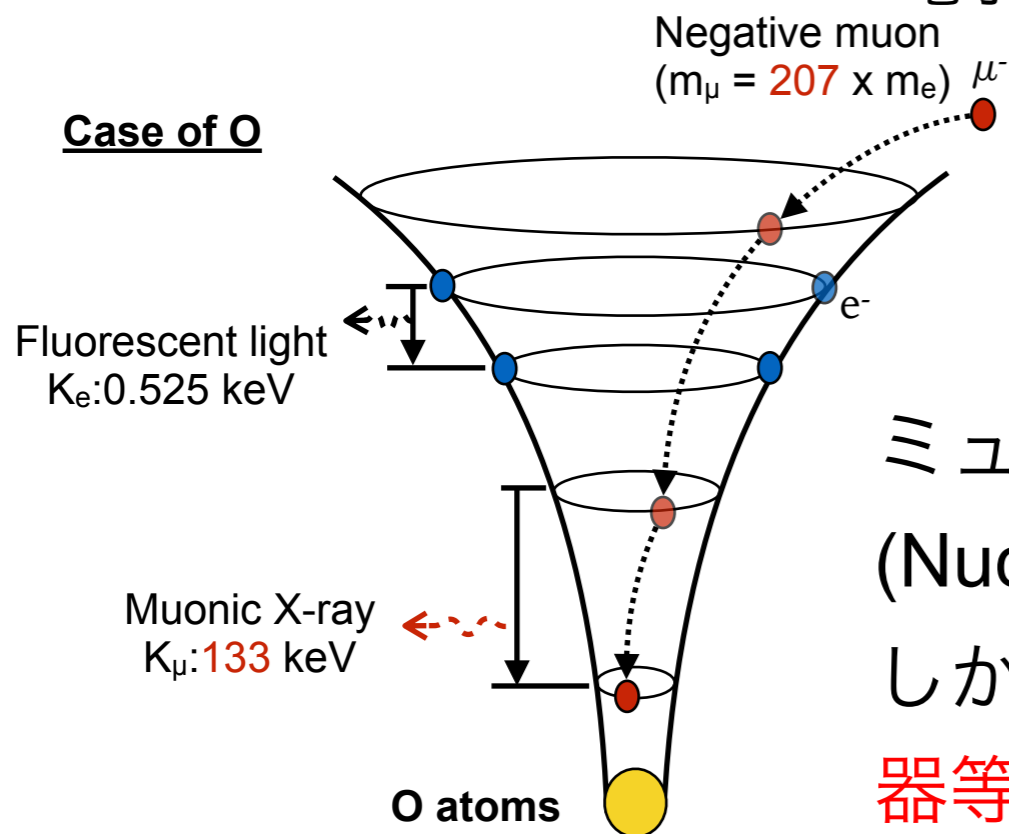
# 負ミュオンで見る元素分析の世界

## ❖ 通常のX線分析



- 表面の分析
- Naより原子番号の大きい元素の分析 (> 1 keV)

## ❖ ミュオンX線分析



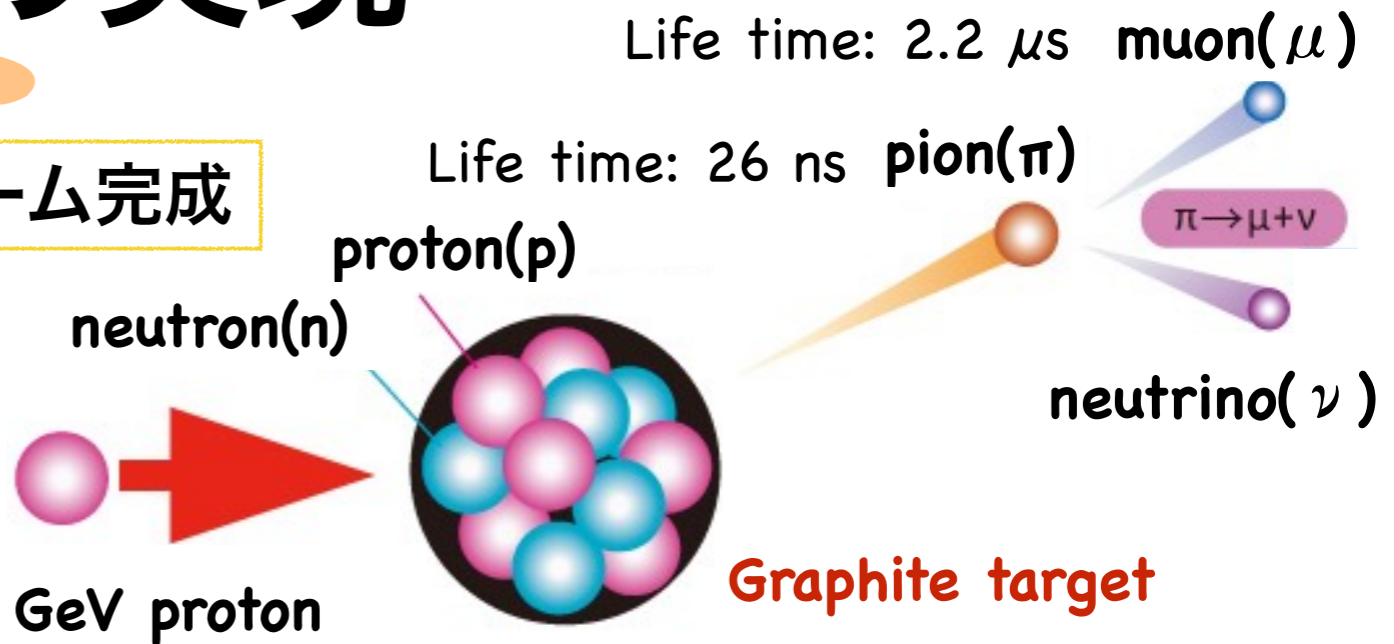
- 深い部分の分析
- Naより軽い元素の分析
- 入射エネルギー選択によって停止深さを選べる

ミュオンによる元素分析のアイデア自体は古い (Nuclear-Medizin, No. 4, 1969)。

しかし、それを実現するための基礎研究や、加速器等の設備の整備が行われていなかった。

# 大強度ミュオンの実現

2008@J-PARC 大強度のミュオンビーム完成



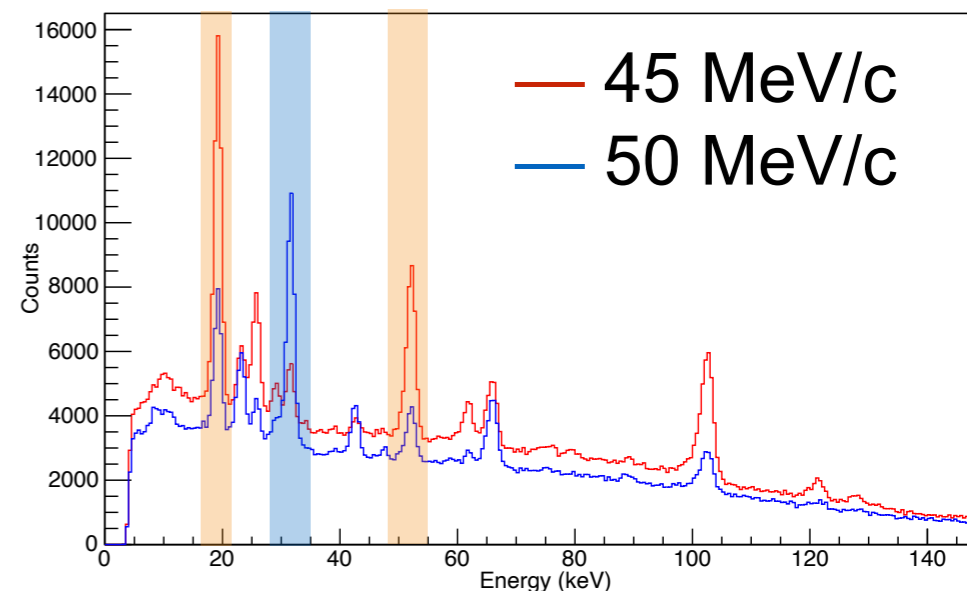
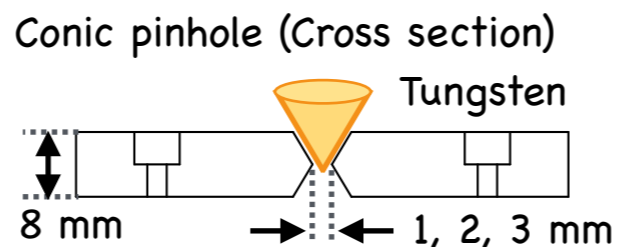
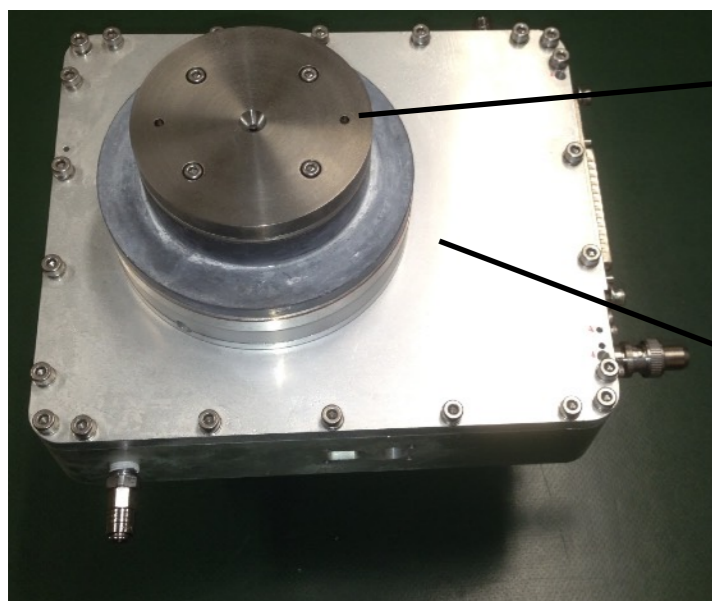
● ミュオンX線元素分析の実証実験 (Terada et al. 2014, Ninomiya et al. 2015)

2014-2015年 ● 世界初ミュオンX線イメージング (Katsuragawa et al. 2018)

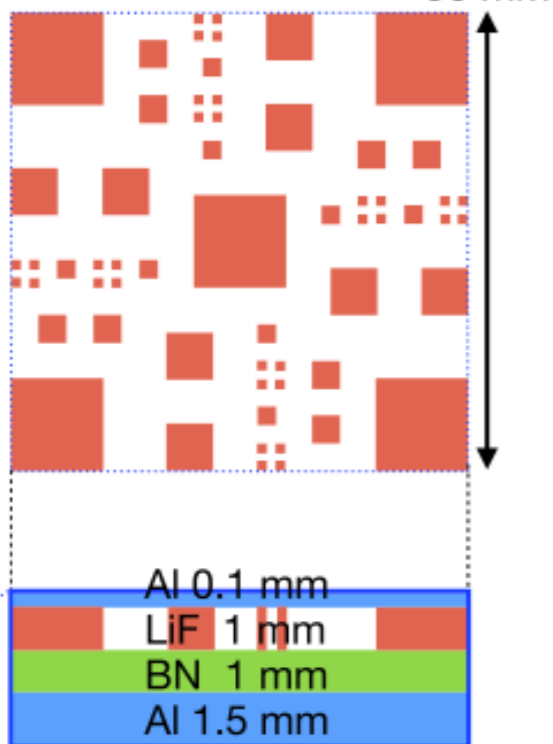
2018年



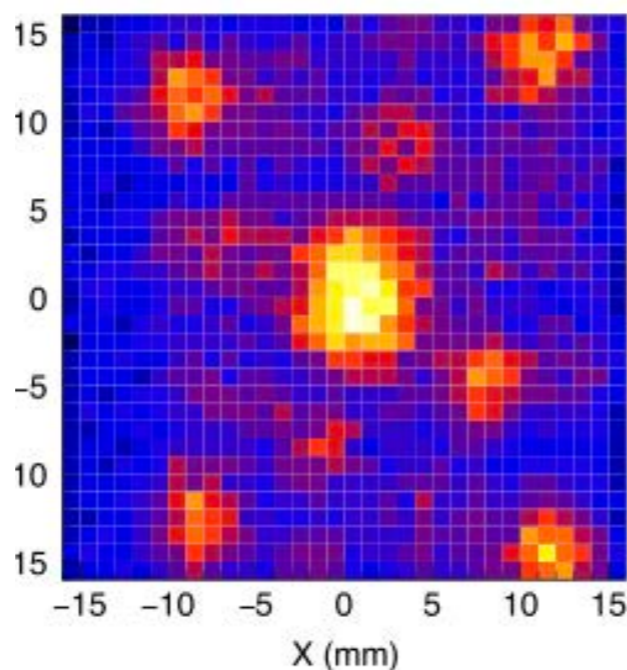
# ミュオンX線イメージング



SAMPLE B 50 mm

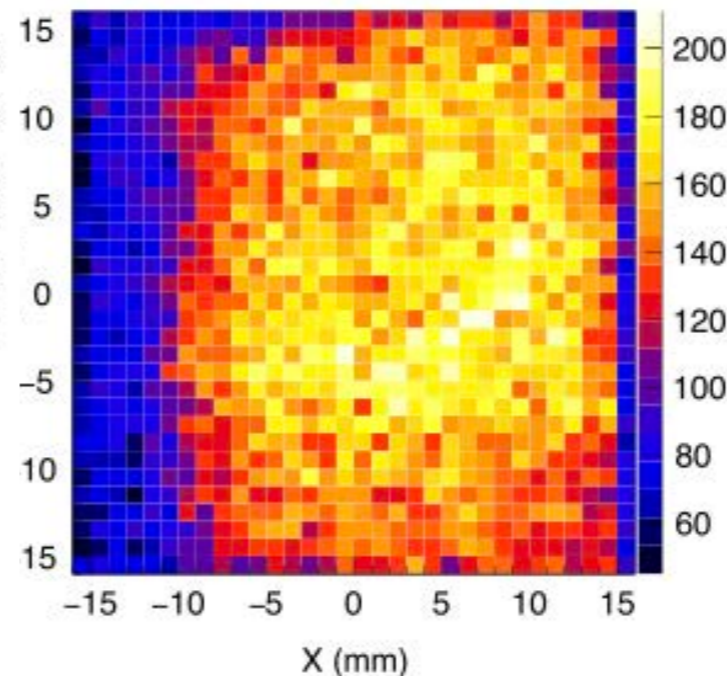


フッ素の  
X線イメージ



$\mu\text{F-L}\alpha$ : 31.5keV

窒化硼板の  
X線イメージ

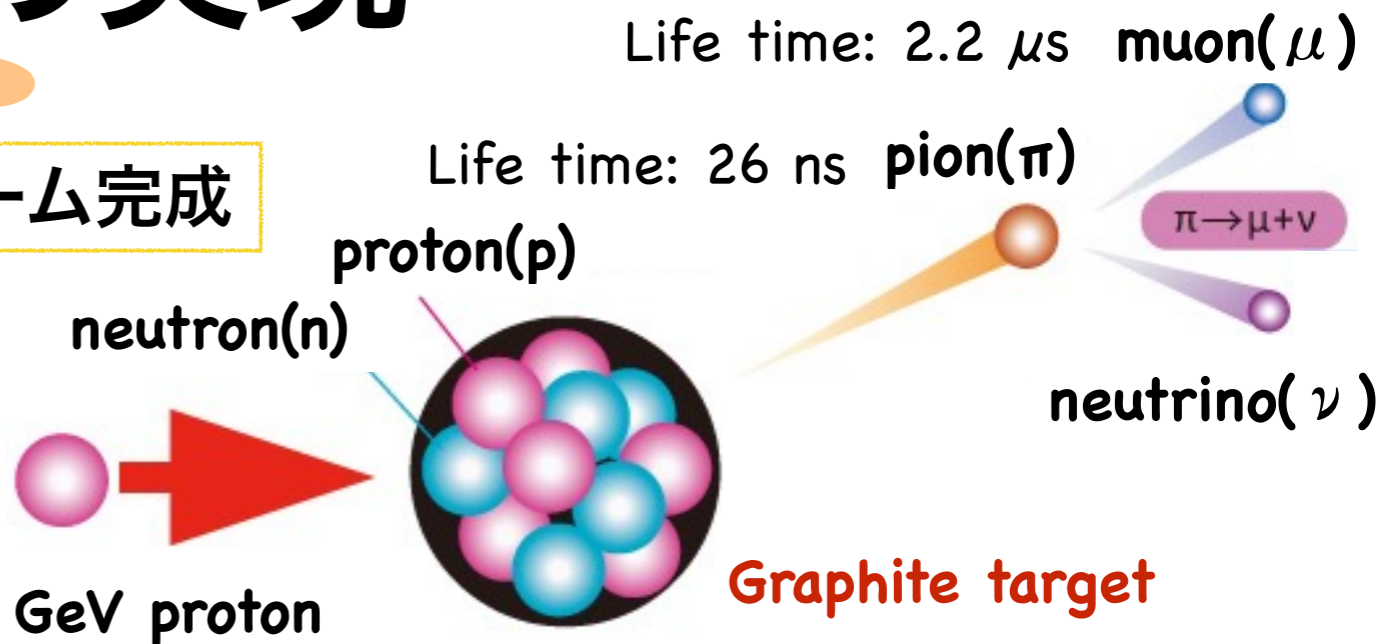


$\mu\text{N-L}\alpha$ : 19.0keV  
 $\mu\text{B-L}\alpha$ : 52.3keV

世界初の  
ミュオンX線  
イメージング  
に成功！

# 大強度ミュオンの実現

2008@J-PARC 大強度のミュオンビーム完成



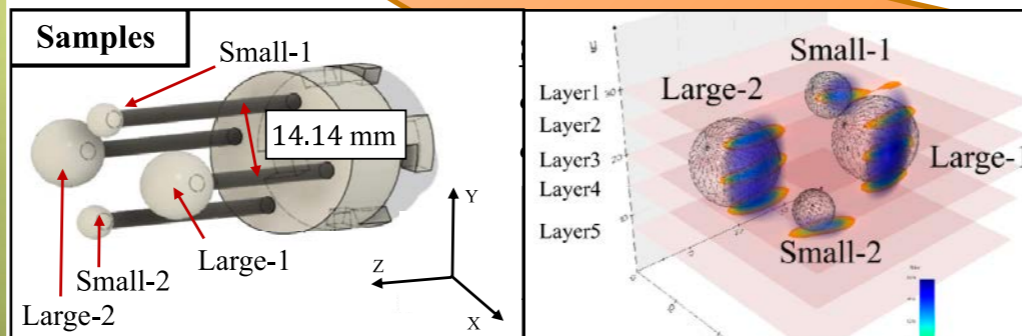
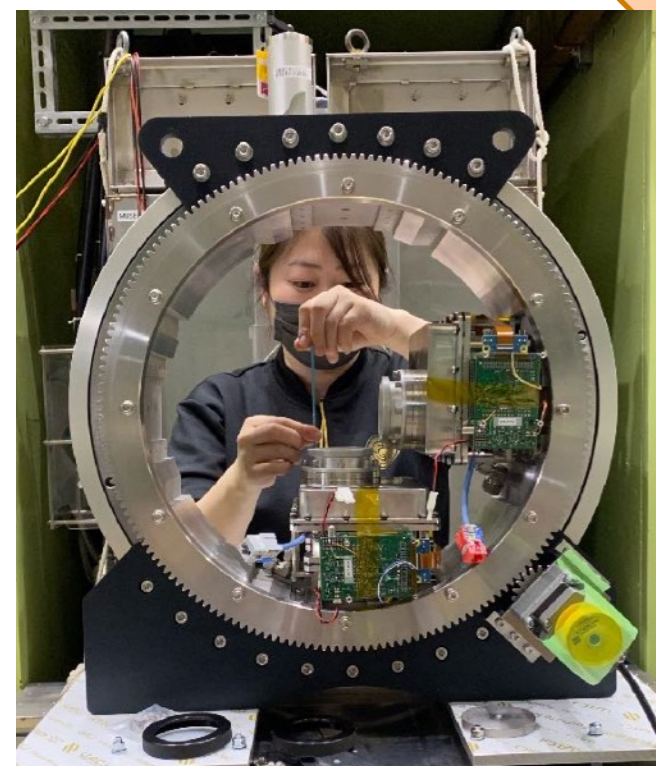
● ミュオンX線元素分析の実証実験 (Terada et al. 2014, Ninomiya et al. 2015)

2014-2015年 ● 世界初ミュオンX線イメージング (Katsuragawa et al. 2018)

2018年 ● 世界初ミュオンX線の3Dイメージング (Chiu et al. 2022)

2022年 ● はやぶさ隕石の非破壊分析 (Ninomiya et al. 2023, Osawa et al. 2023)

2023年 ● リチウム電池の非破壊分析  
現在

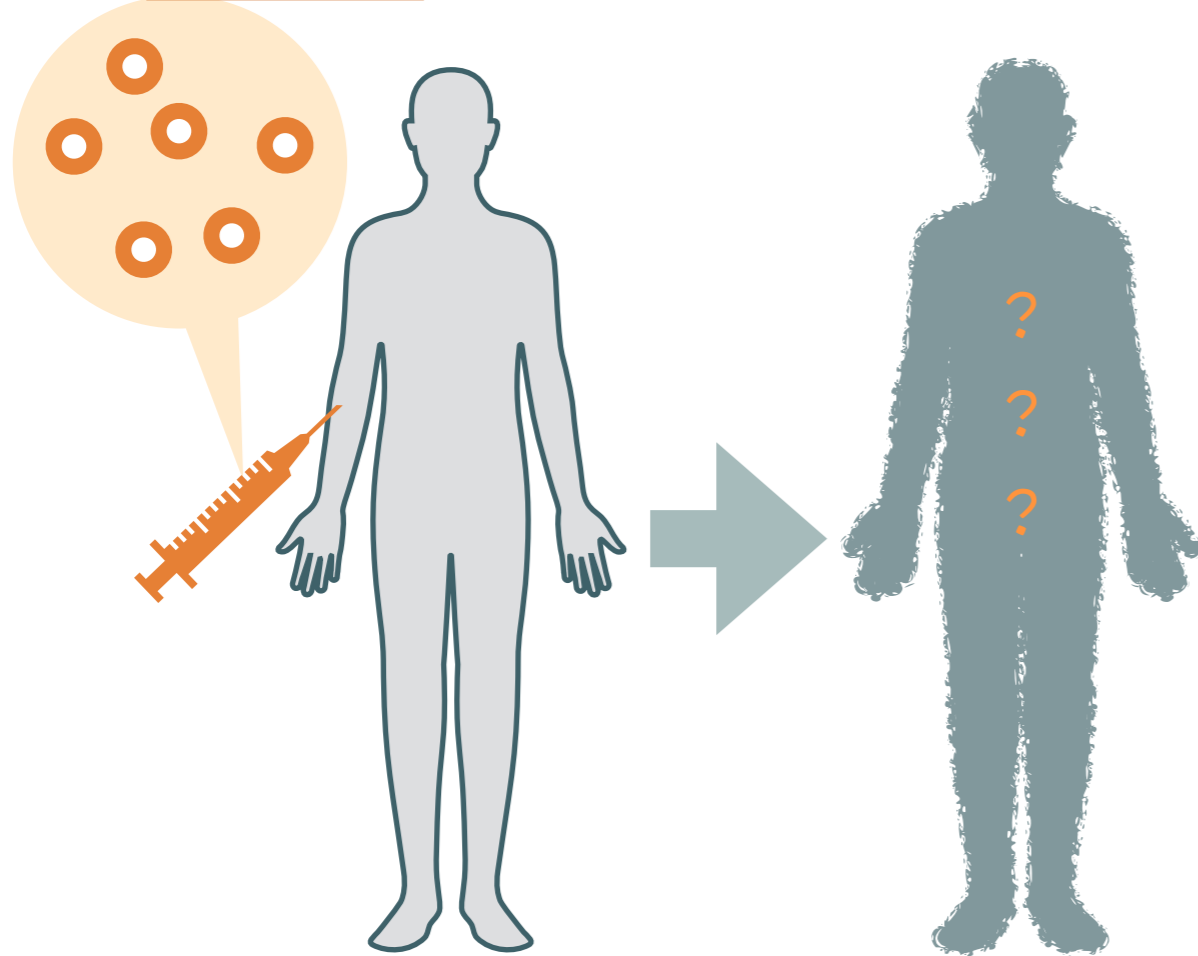


3Dサンプルと再構成画像 (Chiu et al. 2022)

# 分子イメージング

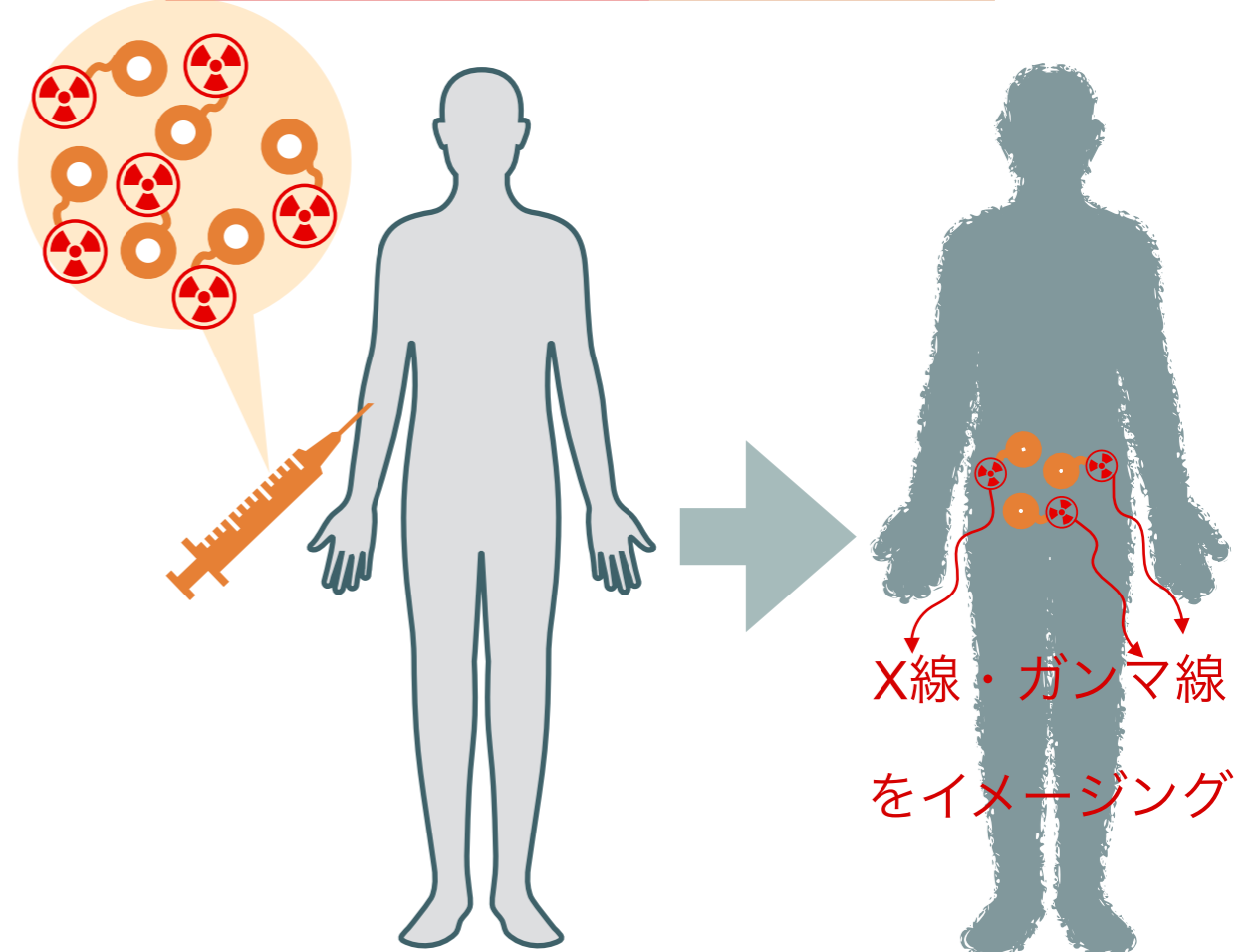
# 薬は体のどこに行っているのか

通常の薬



薬がどこにいるのか、  
「見る」ことができない。

放射性同位元素をつけた薬



薬がどこにいるのか  
「見る」ことができる。

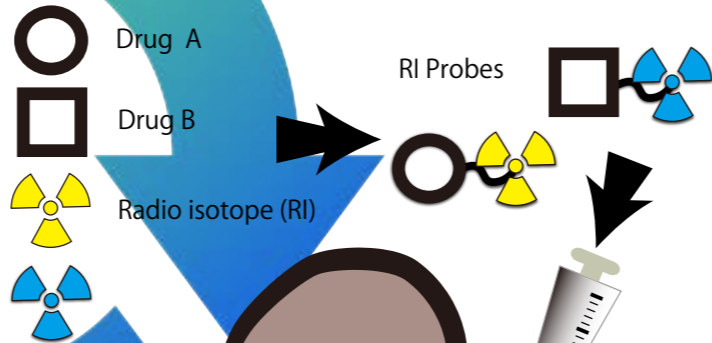
日本の死因第1位「悪性新生物」の研究が大きく発展する！

がんの性質は患者ごとに極めて多様！薬の効果もそれぞれ違う。

患者に合わせて診断・治療するには、「薬の動き」を見れる装置が必要！

# 理学+医学で挑むがん研究

Medical doctor  
Cancer research  
Drug discovery



RI Probes

Gamma-ray

Imaging of the medicine  
which is administered to a  
tumor-bearing mouse.

Tumor

©Kavli IPMU

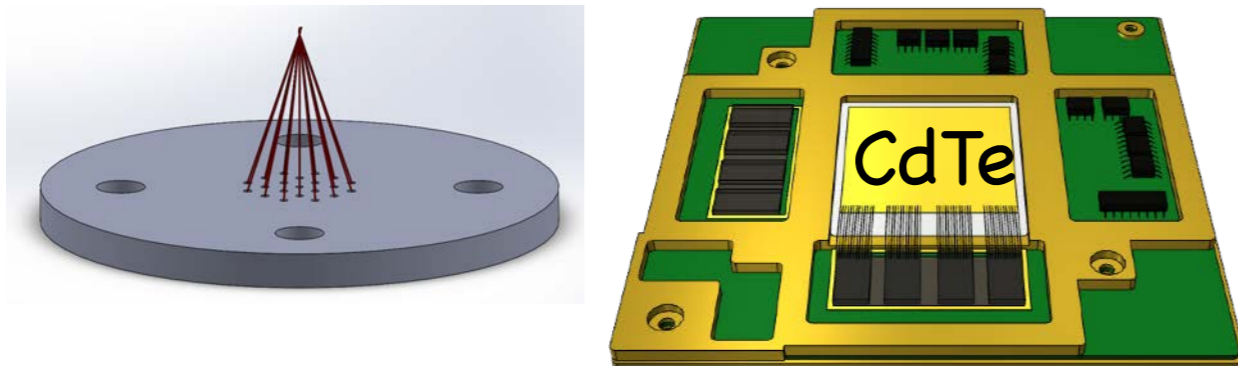
Detector

Physicist  
Detector development

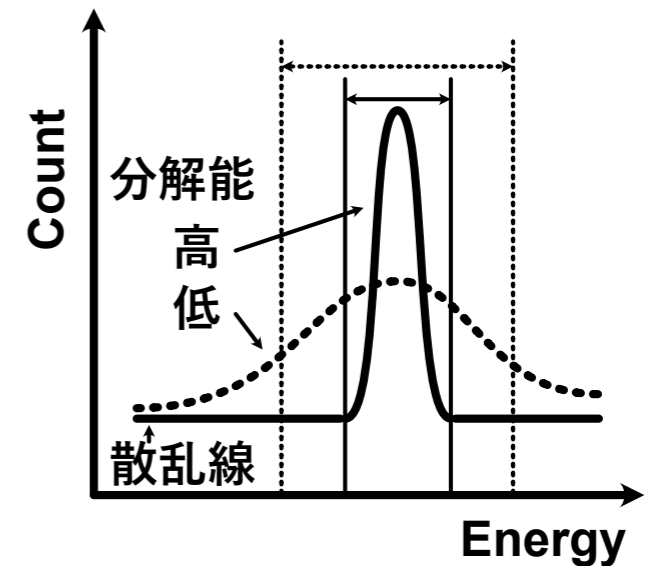
医学研究者と一緒に、検出器開発と薬剤開発を同時進行

# 高精細なカラー画像を目指して

## ❖ 高精細化

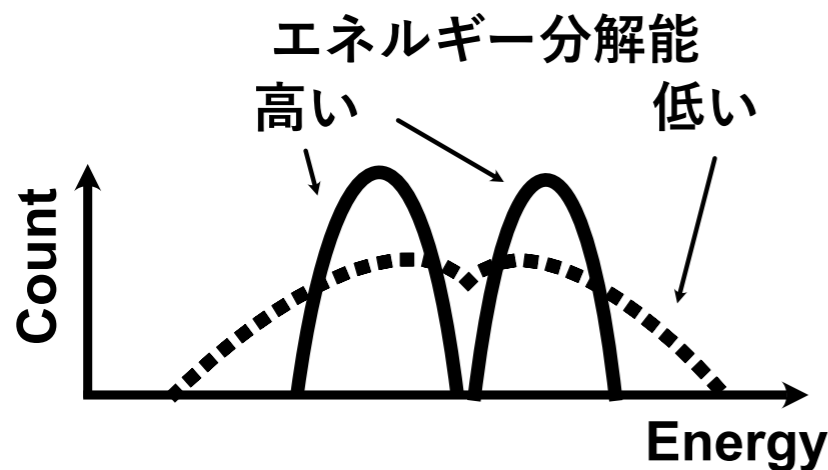


200 $\mu\text{m}$ マルチピンホールと250 $\mu\text{m}$ ピッチ  
CdTe-DSDで空間分解能を改善。



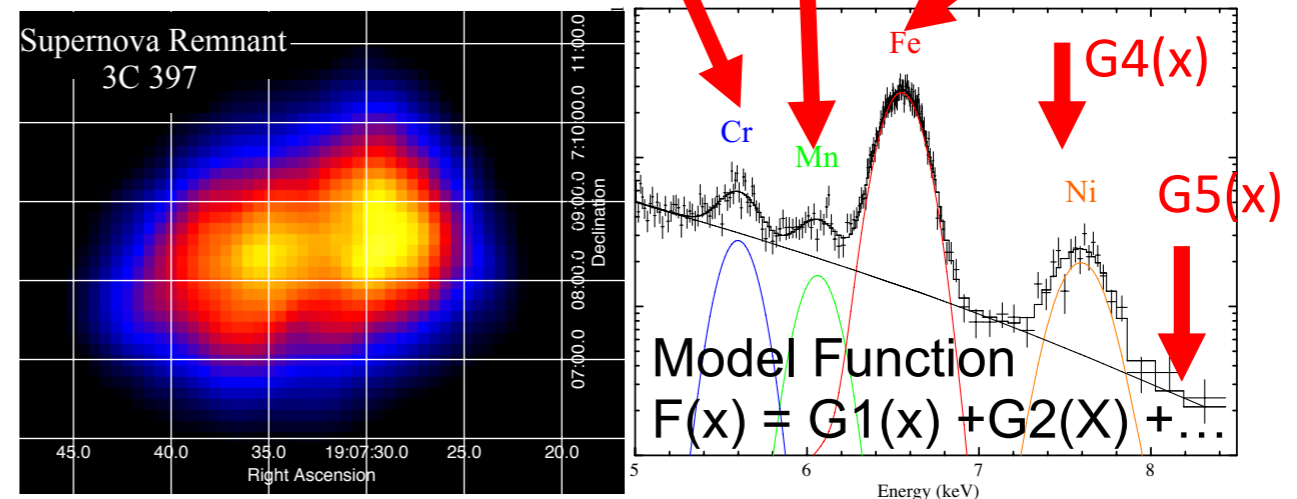
高いエネルギー分解能によっ  
て画像のS/N比を向上。

## ❖ カラー化



高エネルギー分解能な検出器  
で複数の輝線を分離。

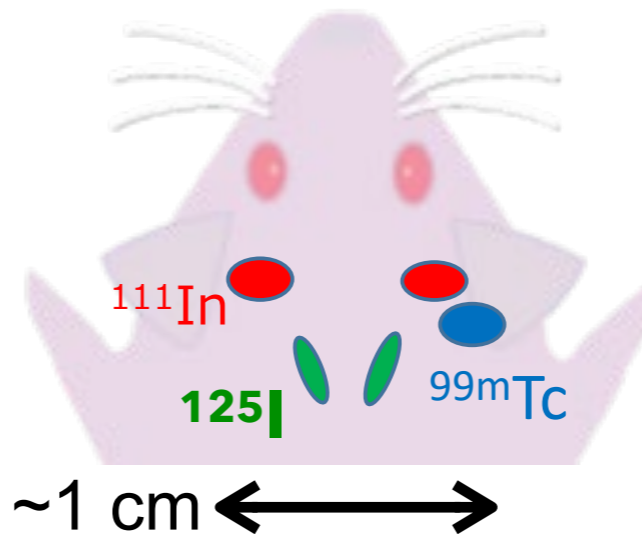
## Supernova Remnant



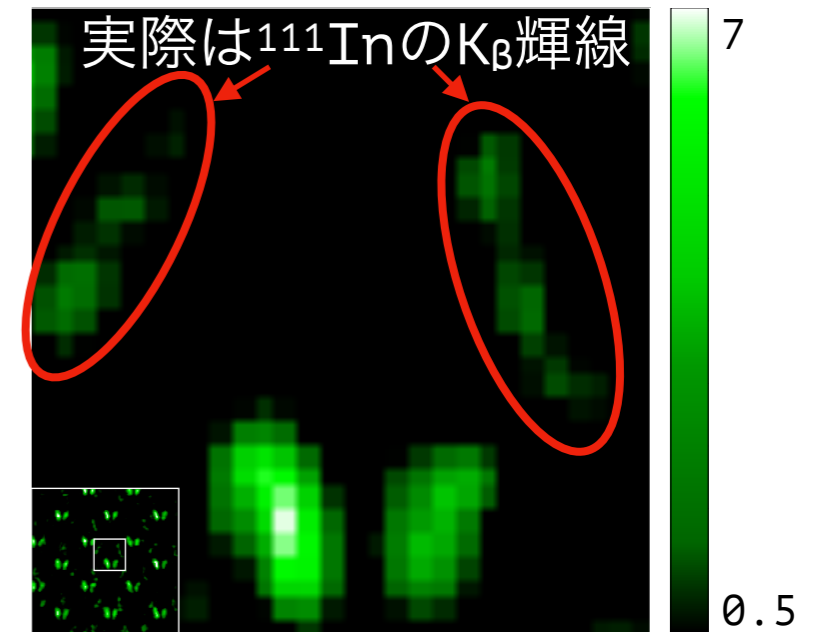
スペクトルモデルのフィットによって核種を  
定量<sup>1)</sup> (X線天体観測の解析技術を応用)

# マルチプローブイメージング

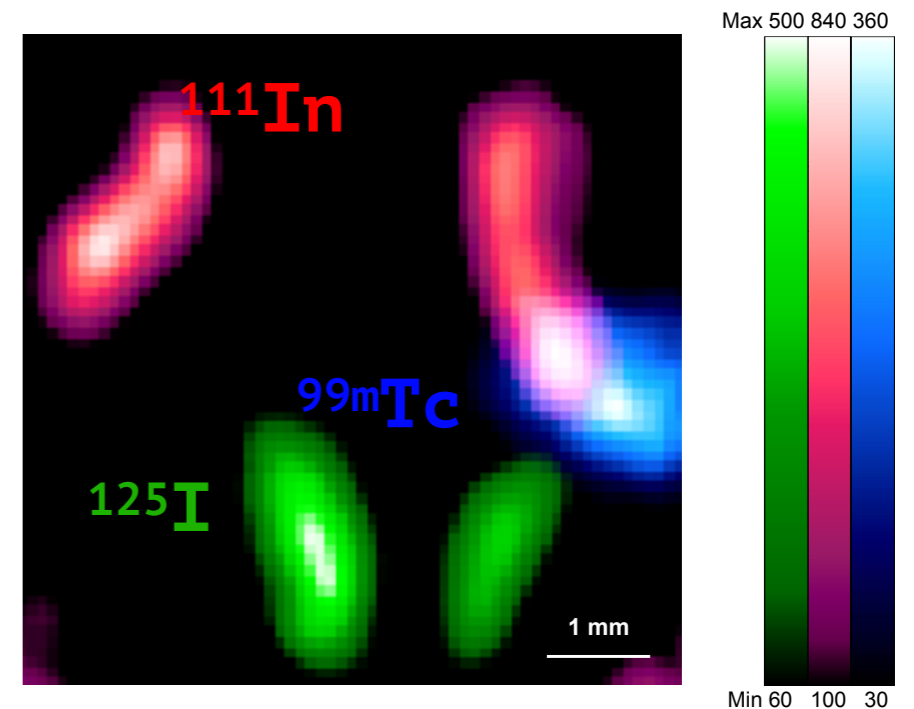
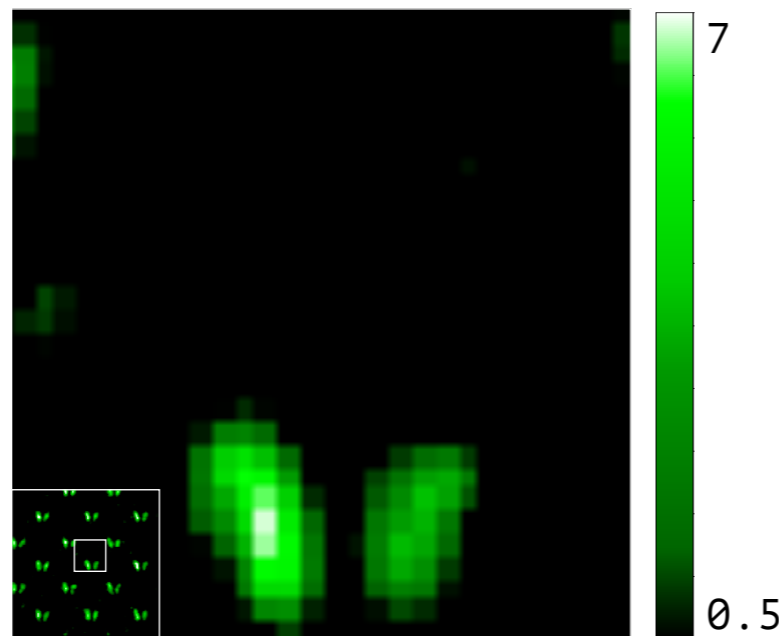
CdTe検出器を用いた高エネルギー  
分解能、高空間分解能な撮像  
+  
SNRのスペクトル・イメージ  
解析を応用



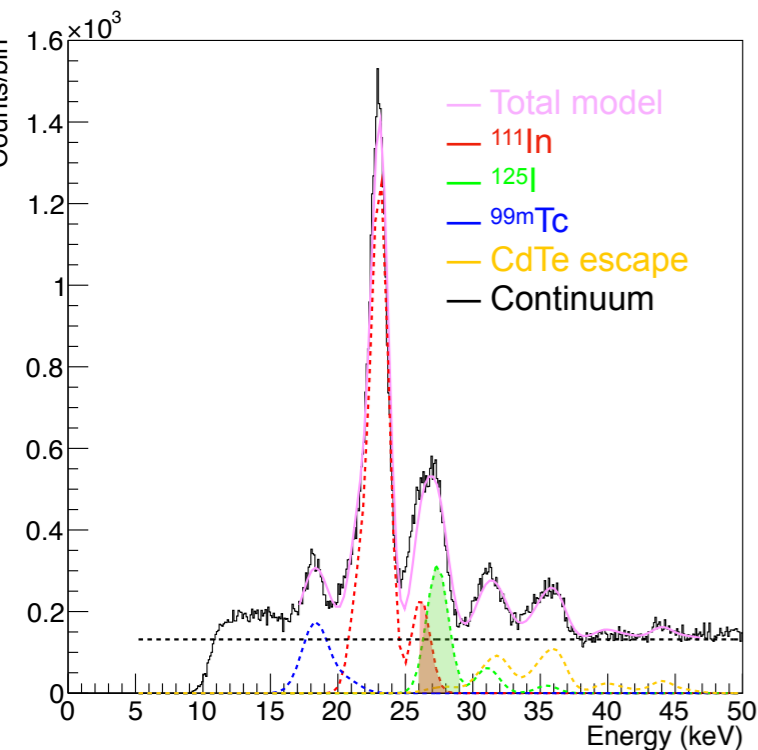
検出器イメージ (26—29keV)



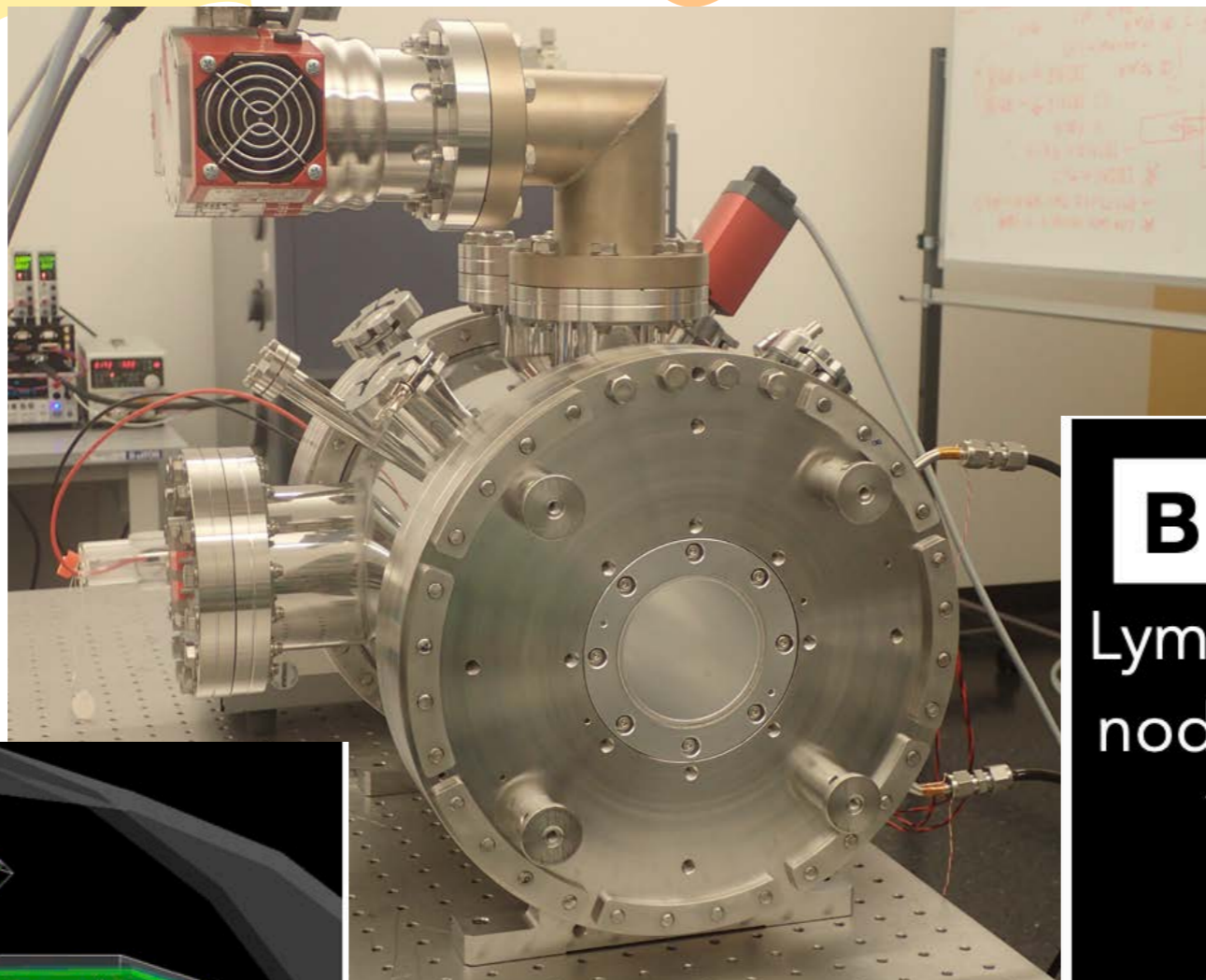
検出器イメージ (26—29keV)



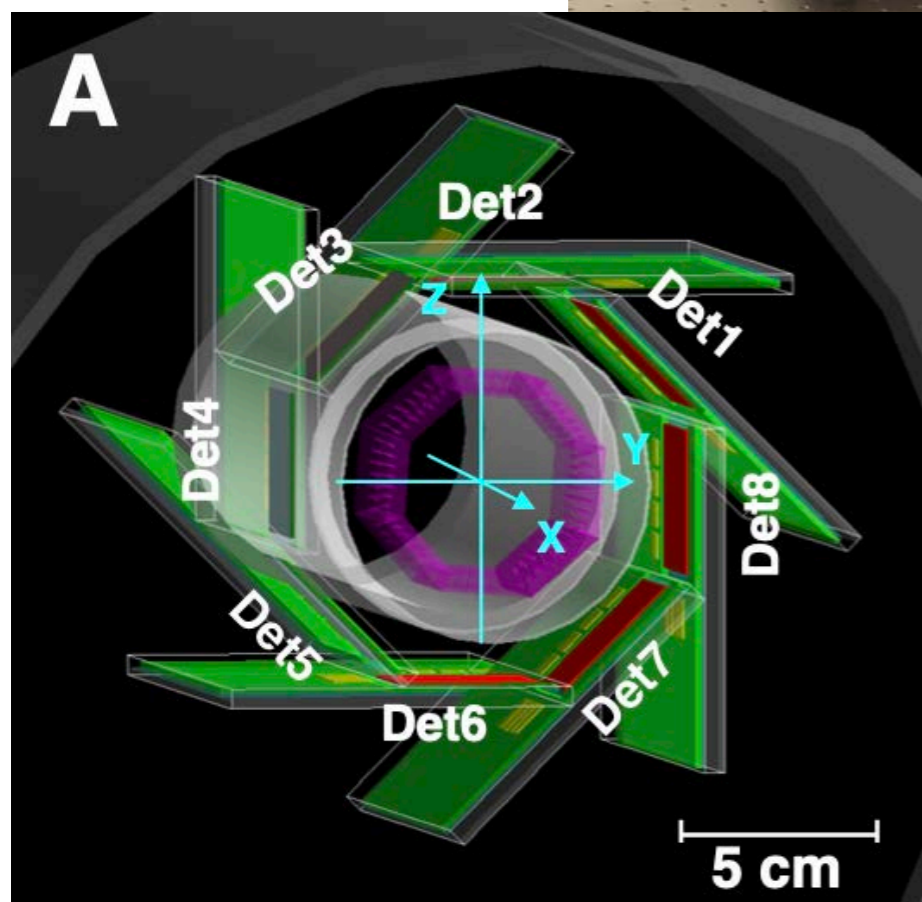
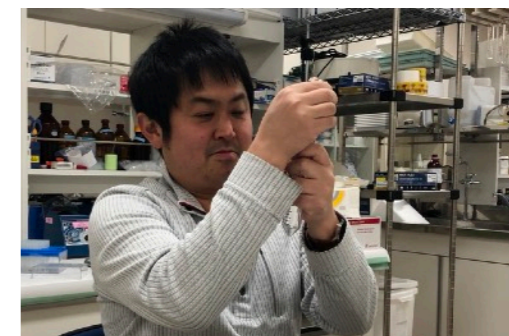
**3核種の同時撮像に成功!**



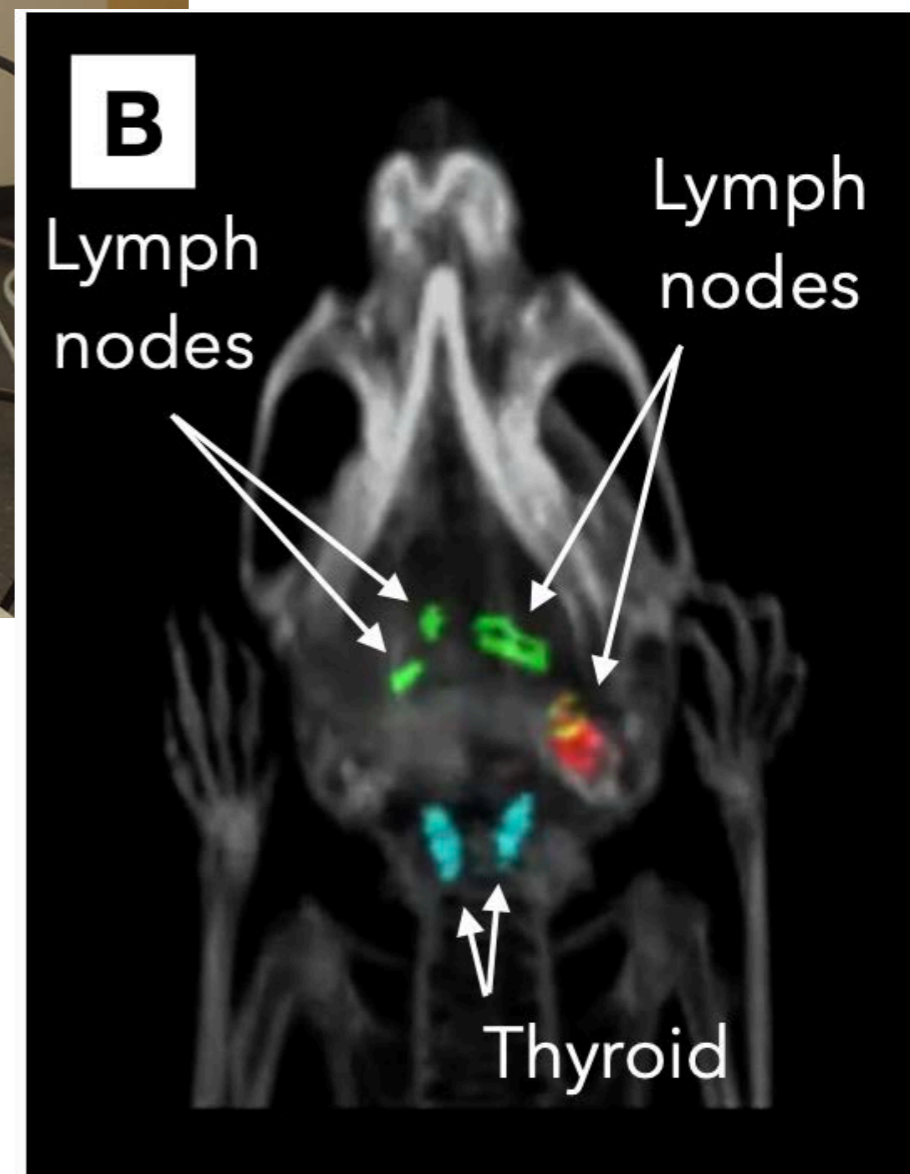
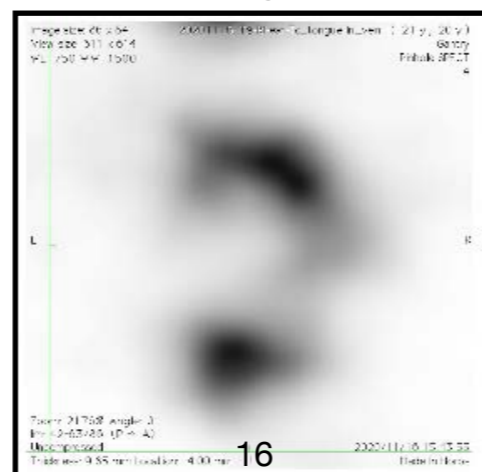
# 超高分解能3D撮像



Designed by Takeda



従来装置 (Thyroid band)

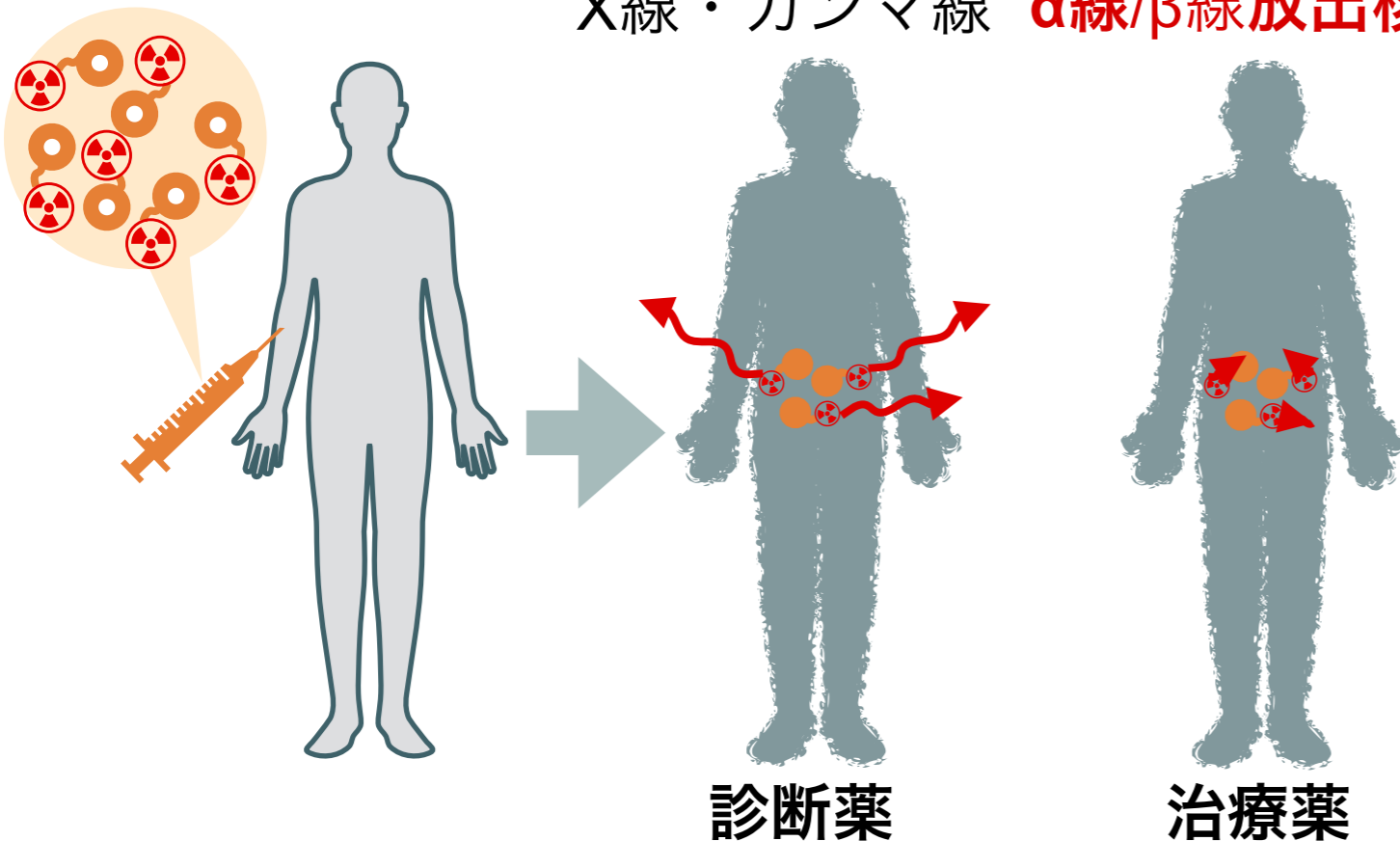


Takeda et al. 2023

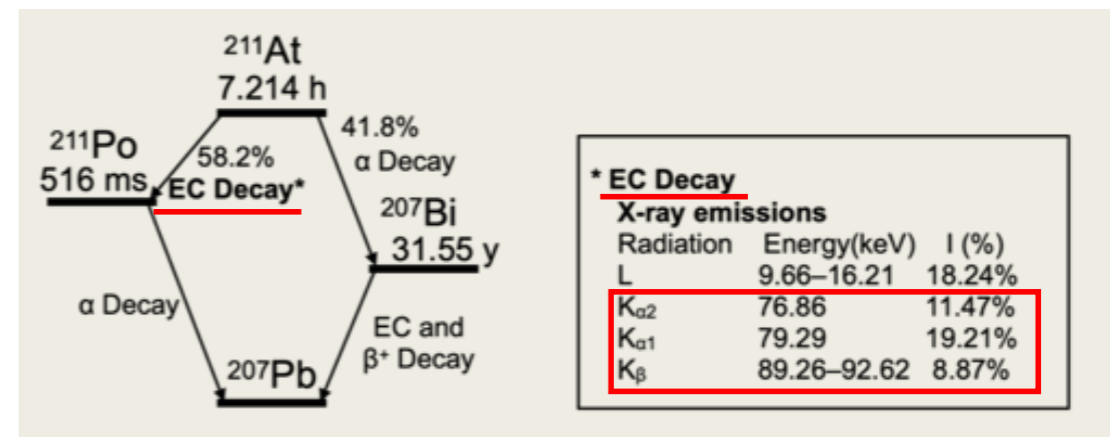


# 新しいがん治療法：アルファ線標的治療

X線・ガンマ線 **α線/β線放出核種**



治療効果や副作用の正確な予測には“**薬物動態の可視化**”が必須！  
アルファ線は体外に出てこない。  
体のどこにいるのかわからない！



## アルファ線放出核種：アスタチン ( $^{211}\text{At}$ )

- ◆ 治療 (アルファ線) + 画像化 (硬 X 線)
- ◆ 投与量が診断用放射性核種より少ない。
- ◆ X線放出率も診断用放射性核種より少ない。

→ 高感度が重要！

従来の装置(SPECT)

マルチピンホール

+ NaIシンチレータ

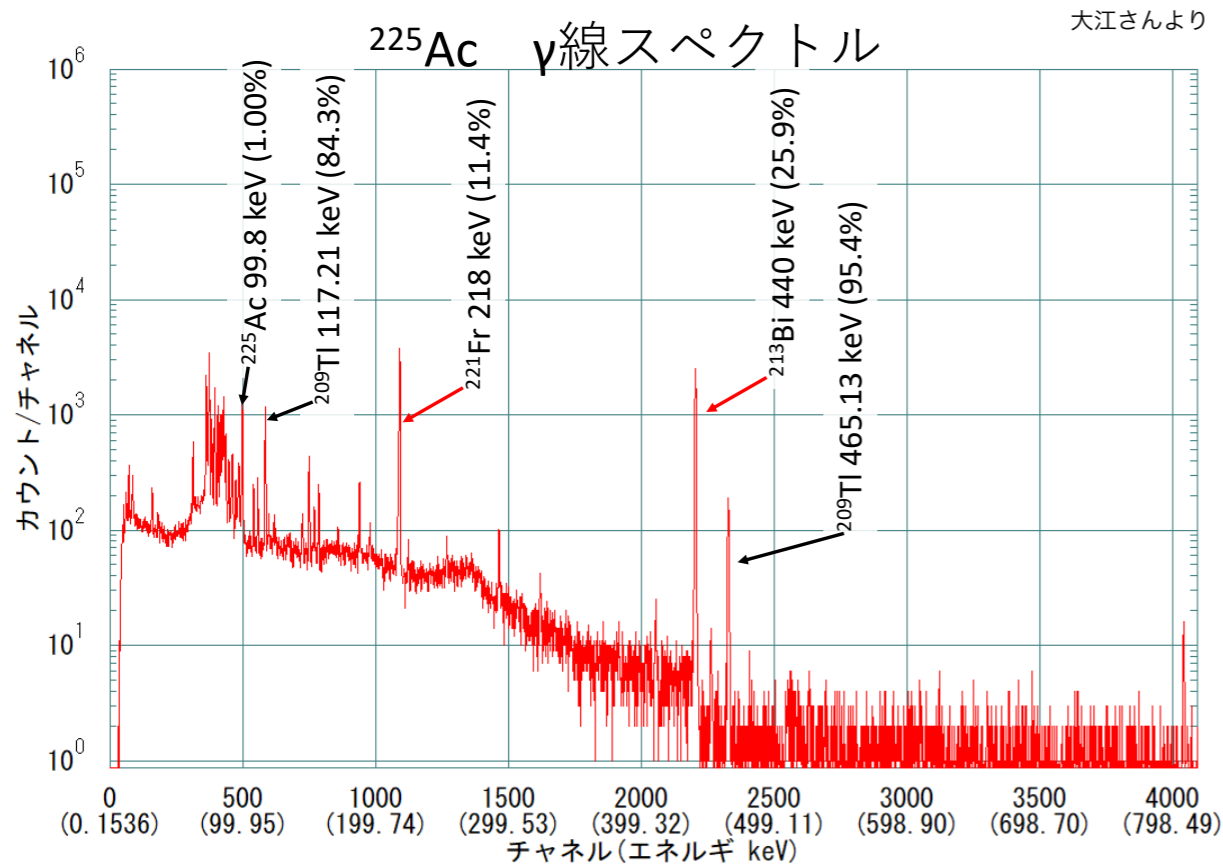
視野が狭く、薬物動態を可視化するには不向き。

# 注目のα線治療用核種<sup>225</sup>Ac

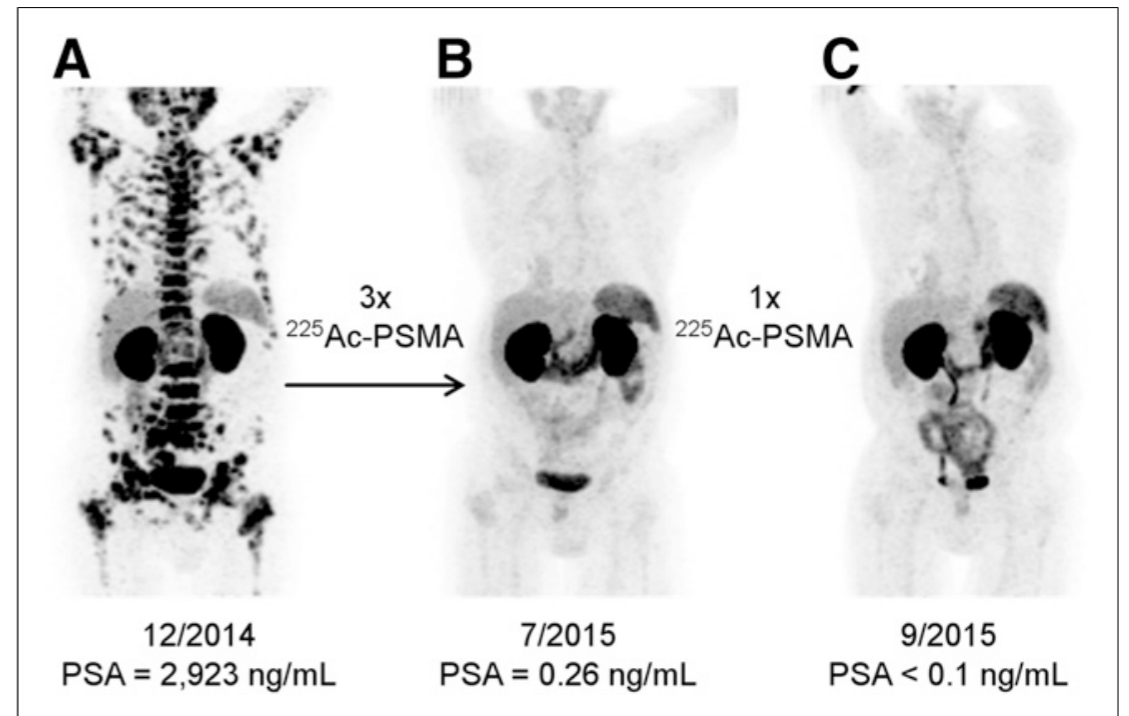
末期がんの完全寛解が報告されている  
唯一のアルファ線放出核種 <sup>225</sup>Ac

## <sup>225</sup>Acの特徴

- 治療（アルファ線） + 画像化（X線・ガンマ線）
- 半減期:10日（移動距離の長い海外で注目度高い）



Ac治療の前後に撮像されたPETイメージ



**FIGURE 1.** <sup>68</sup>Ga-PSMA-11 PET/CT scans of patient A. Pretherapeutic tumor spread (A), restaging 2 mo after third cycle of <sup>225</sup>Ac-PSMA-617 (B), and restaging 2 mo after one additional consolidation therapy (C).  
PET/CT-scans (Kratochwil et al. 2016)

放出されるX線・ガンマ線の輝線が多く  
イメージングへの期待が高い。  
211Atの動態イメージングで培った技術  
で<sup>225</sup>Acも可視化に挑戦！

# 注目のα線治療用核種<sup>225</sup>Ac

## イメージングの課題

- ガンマ線はそもそもイメージングが難しい帯域

コンプトンカメラ？

- X線放出率は<sup>211</sup>Atの1/7！

平行コリメータより高感度光学系？コーデッドマスク？

- 娘核種<sup>213</sup>Biが薬から外れて正常臓器に蓄積？  
機能障害を引き起こすことが懸念されている。

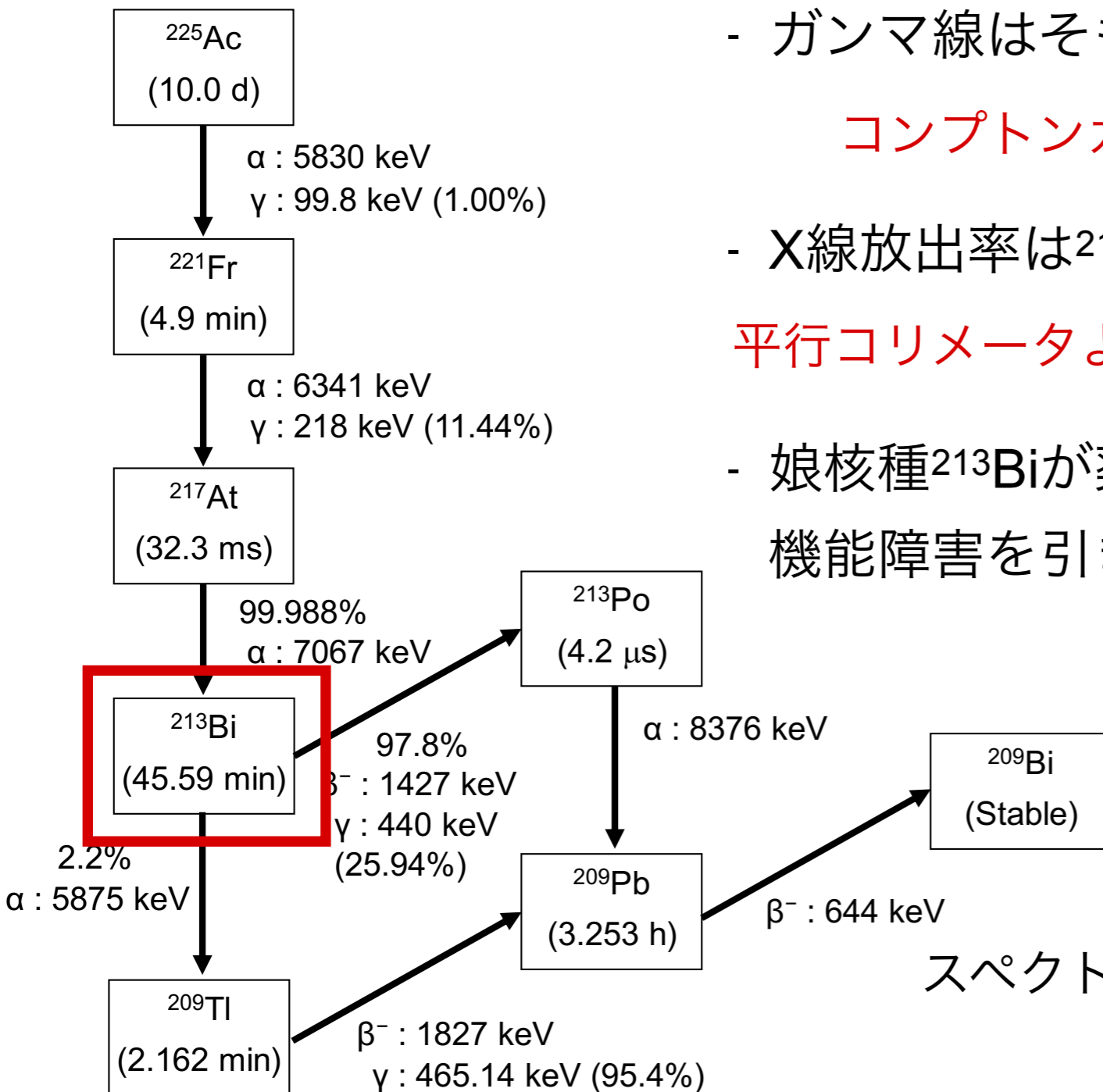
親核種・娘核種の多核種イメージング？

高感度検出器の開発

+

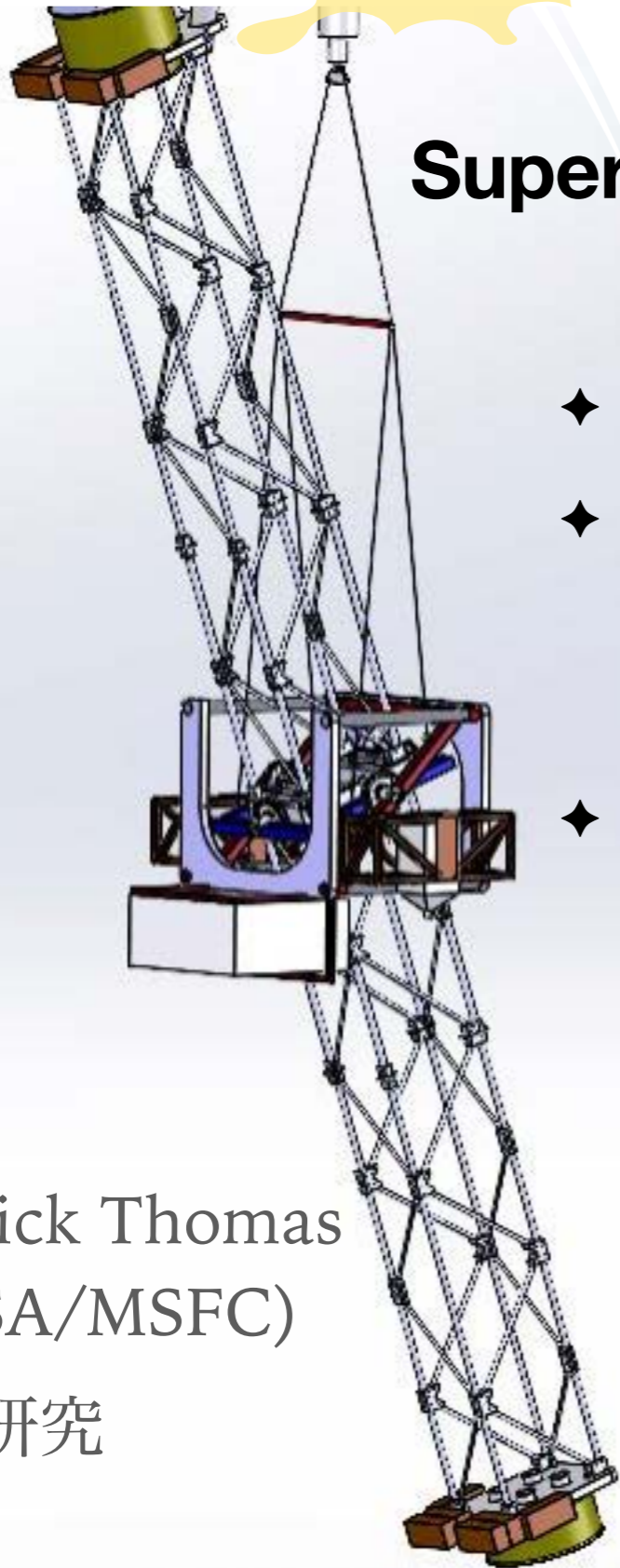
スペクトルフィットによる親核種・娘核種の分離  
に取り組む。

いずれは臨床器への発展を検討。



# 硬X線宇宙觀測

# 超高分解能で挑む硬X線天文学の世界



## SuperHERO:

Next Generation Hard X-Ray Focusing Telescope

- ◆ 硬X線観測 (20—70 keV)
- ◆ <10 arcsecond  
(硬X線宇宙観測衛星NuSTAR(2012年打ち上げ)の  
角度分解能1分角)
- ◆ 高エネルギー天体からの非熱的放射を伴う物理過程
  - パルサーを動力源とするシンクロトロン星雲
  - 超新星残骸の衝撃波による粒子加速
  - 活動銀河核の超大質量BHによるジェット放射

PI: Nick Thomas  
(NASA/MSFC)

共同研究

*NASA LDB flight  
(Long Duration Balloon)  
2024 Proposal submission  
2028 flight*

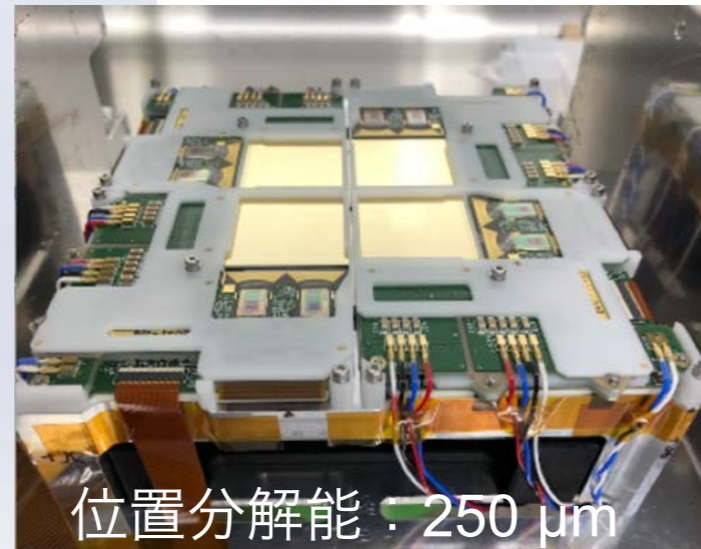
# 超高分解能で挑む硬X線天文学の世界



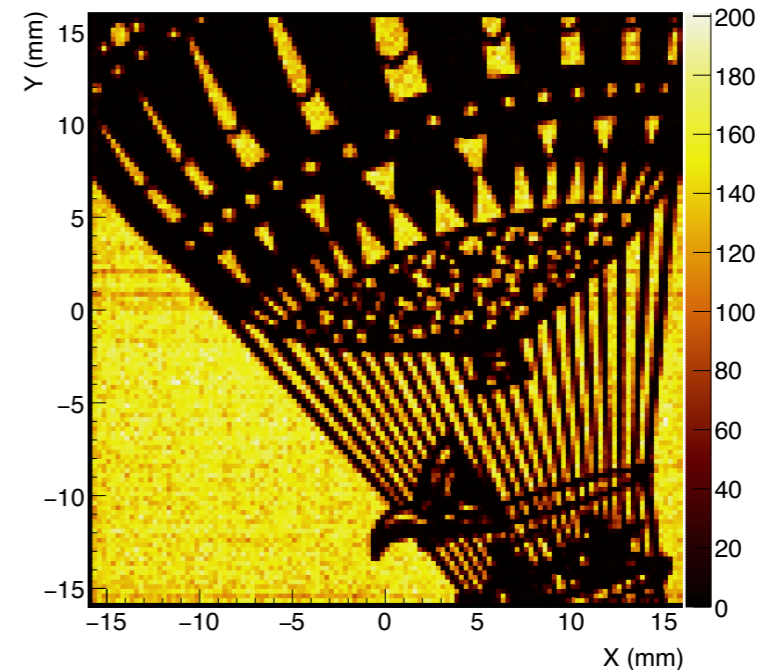
- SuperHERO: Next Generation Hard X-Ray Focusing Telescope

高角度分解能を活かせる高位置分解能の検出器開発

## CdTe-DSD



位置分解能 : 250  $\mu\text{m}$



今後、さらに細かい空間分解能を目指した装置開発

- 電荷共有イベントの詳細解析
- sub-strip位置分解能の解析手法の確立
- Wide gap CdTe-DSD等

PI: Nick Thomas  
(NASA/MSFC)

共同研究

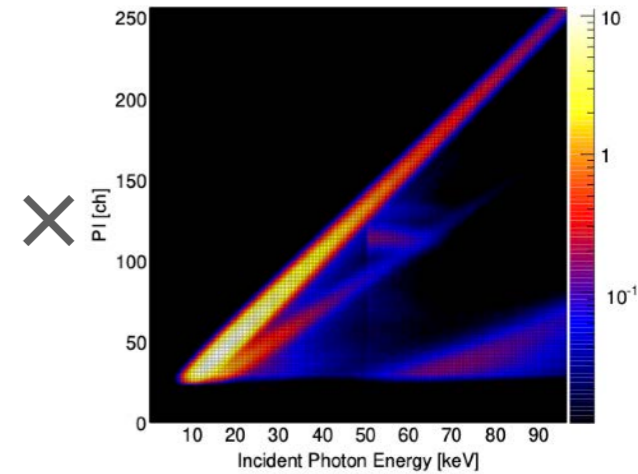
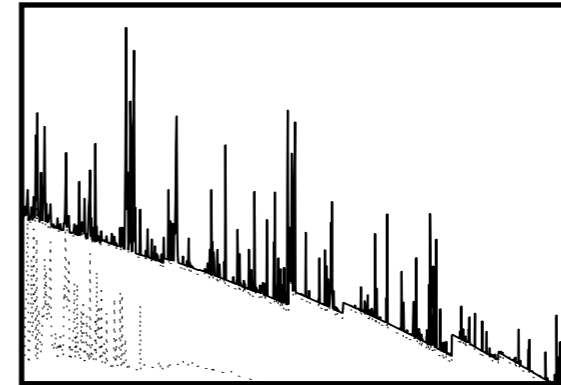
# 検出器のレスポンス

天体からの放射

スペクトルモデル

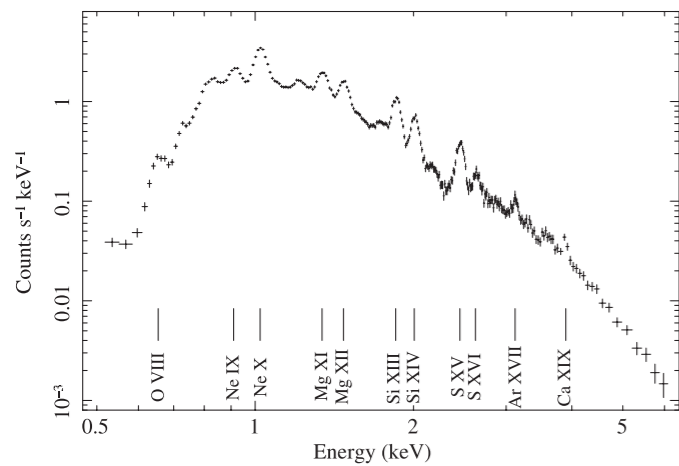
想定される  
応答関数  
(レスポンス)

実際の検出器の応答関数



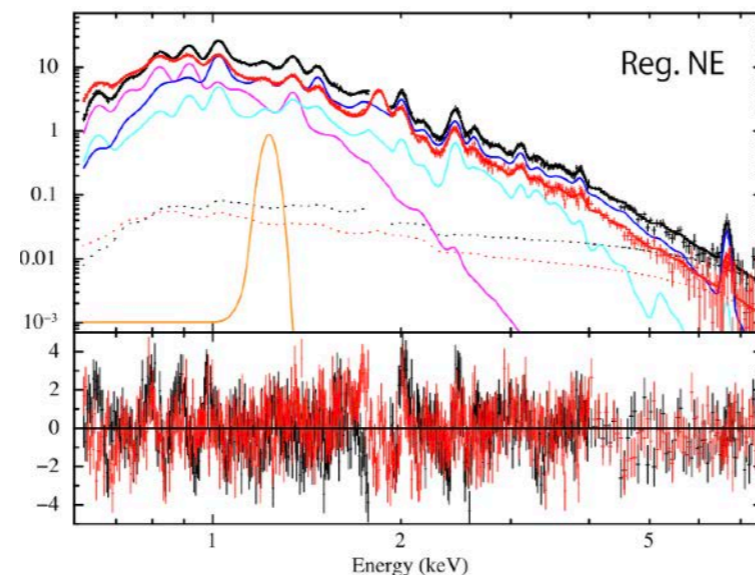
検出されるスペクトル

応答を含んだスペクトルモデル

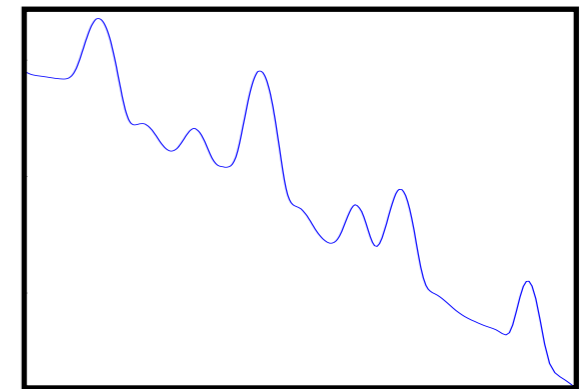


Yamaguchi et al. 2012

比較 (フィット)



Matsumura et al. 2017



→モデルのパラメータの最適値を決定。

応答関数の精度が  
フィッティング結果を左右する。

# まとめ

- ❖ 宇宙観測用検出器を発展させ、CdTe半導体検出器の技術をベースに様々な異分野融合研究が進行中。
- ❖ 分野は違えど共通している検出器の課題は多い。技術の流動性が高く、様々な分野が加速的に発展する。
- ❖ 自分達で新しいコラボを生み出すので、常に誰も見たことのない最先端のデータを触ることができる。
- ❖ ハードの設計からデータ解析手法の開発まで装置開発の一連に全て携わることができる。
- ❖ superHEROプロジェクトが進行すれば新しい硬X線宇宙物理に触れられるかも。