

超低温・超電導を利用した光・粒子検出器の基礎と、 マイクロカロリメータの応用・開発の状況

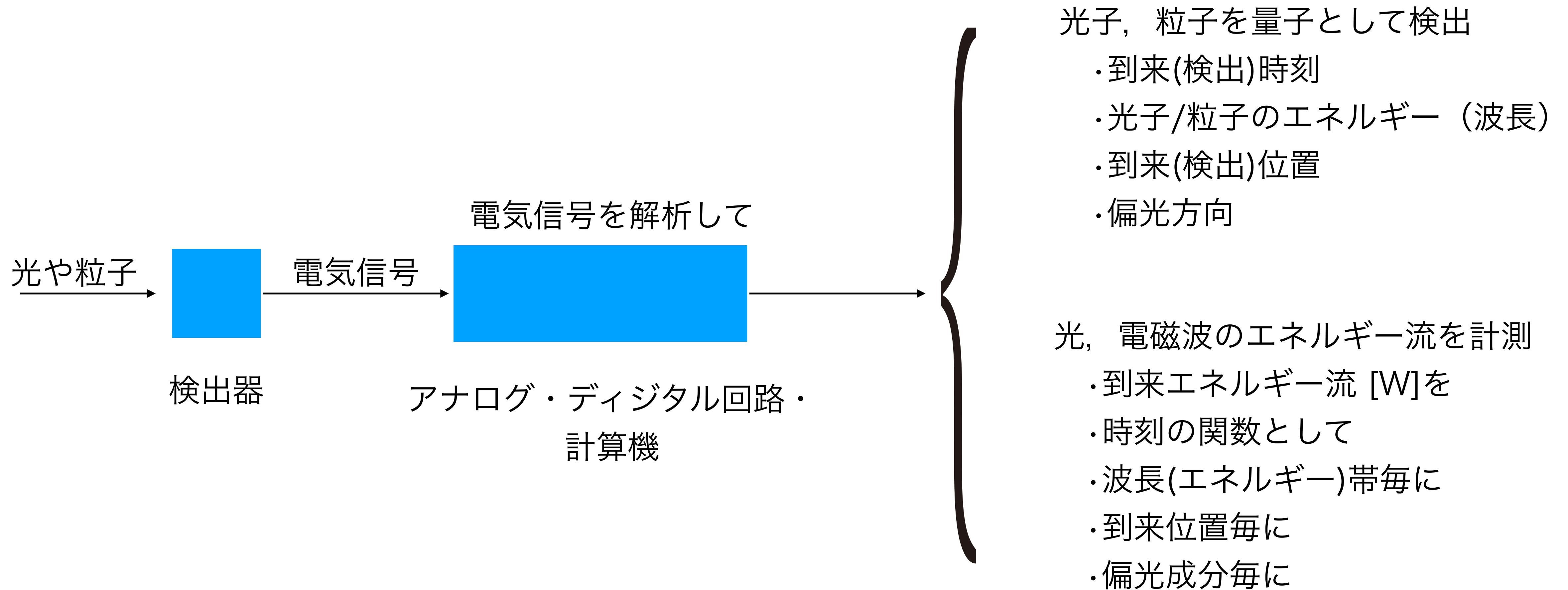
満田和久

自然科学研究機構 国立天文台 先端技術センター

2021年3月1日

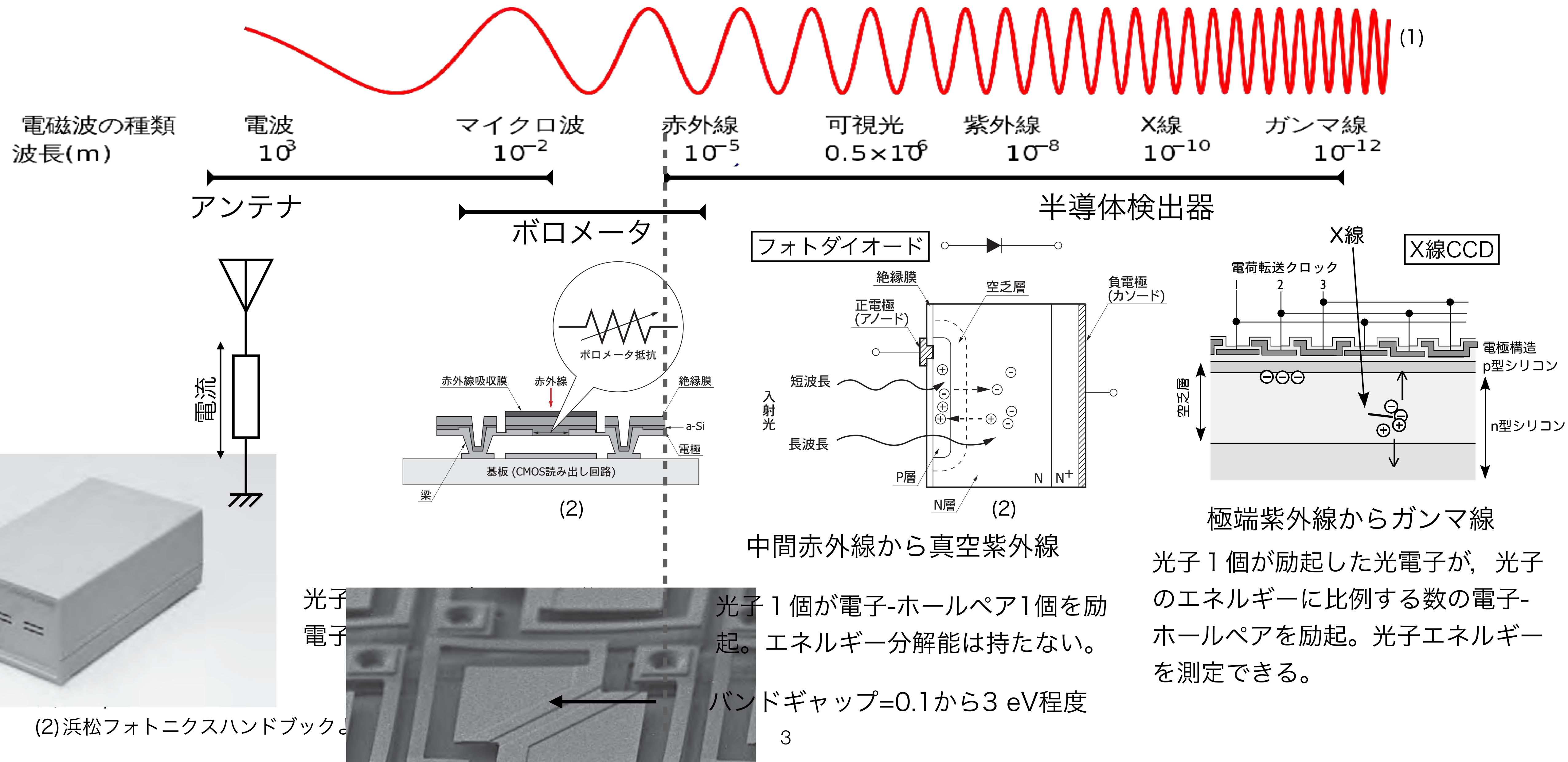
第2回超電導応用研究会シンポジウム 超電導デバイスの最新技術と将来展望（1）

光・粒子検出器とは何か

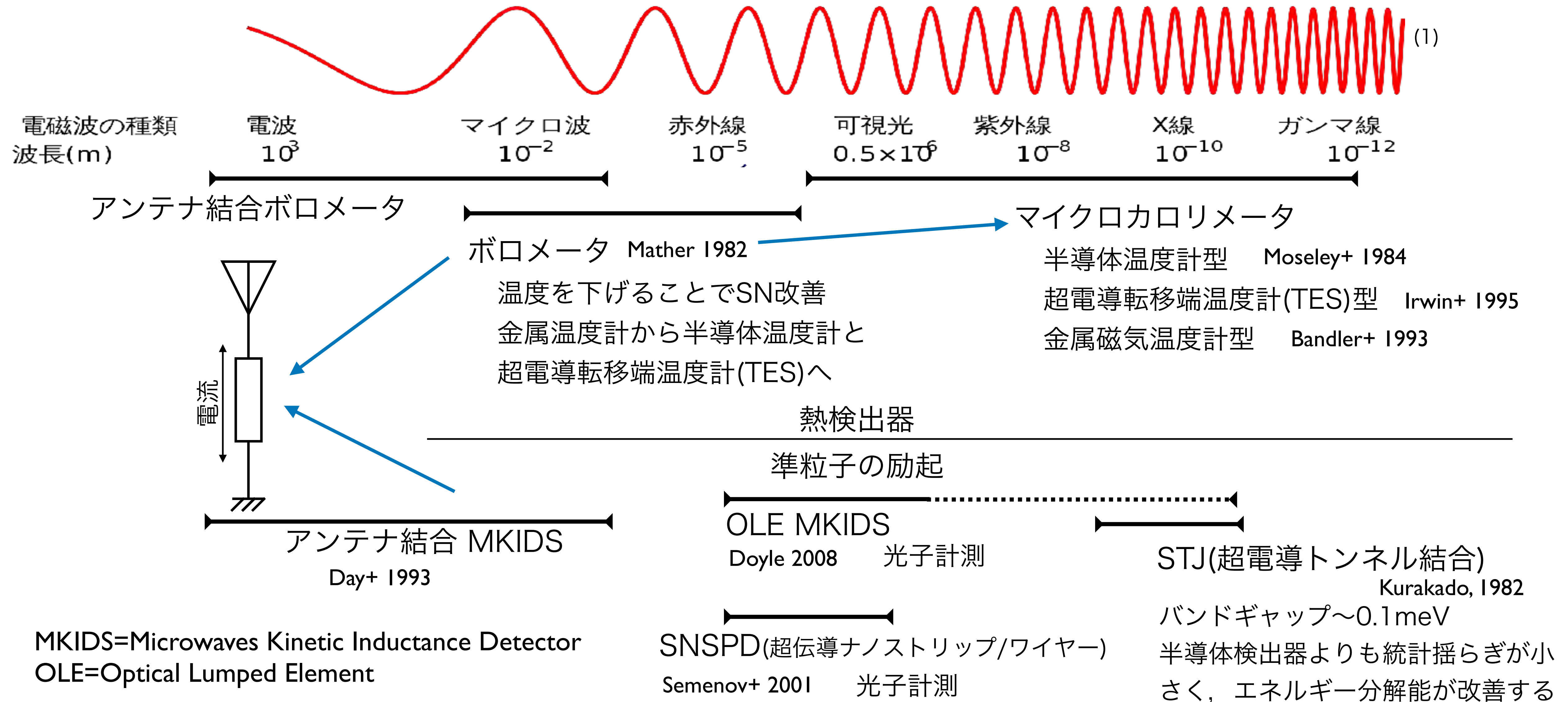


(一つの検出器で全ての情報が得られるわけではない。)

代表的な光検出器(室温から液体窒素温度)

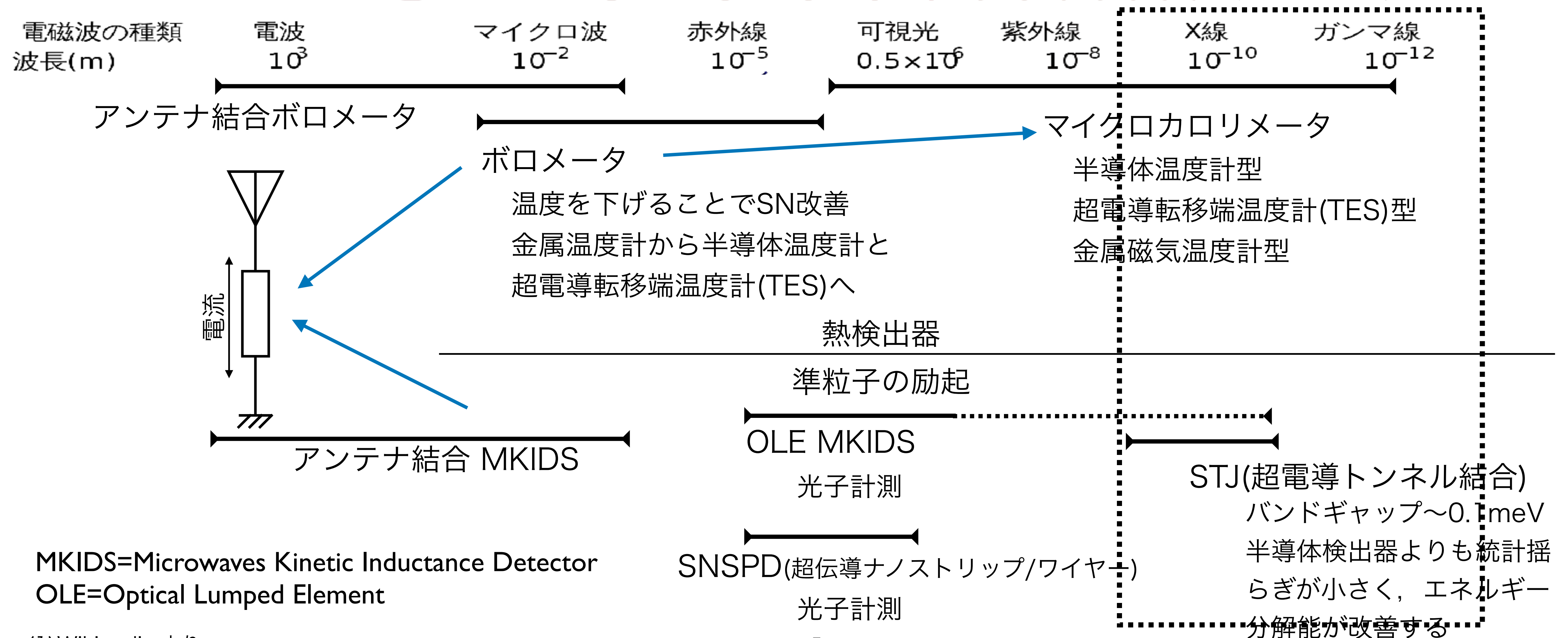


極低温($\lesssim 4\text{K}$)光検出器



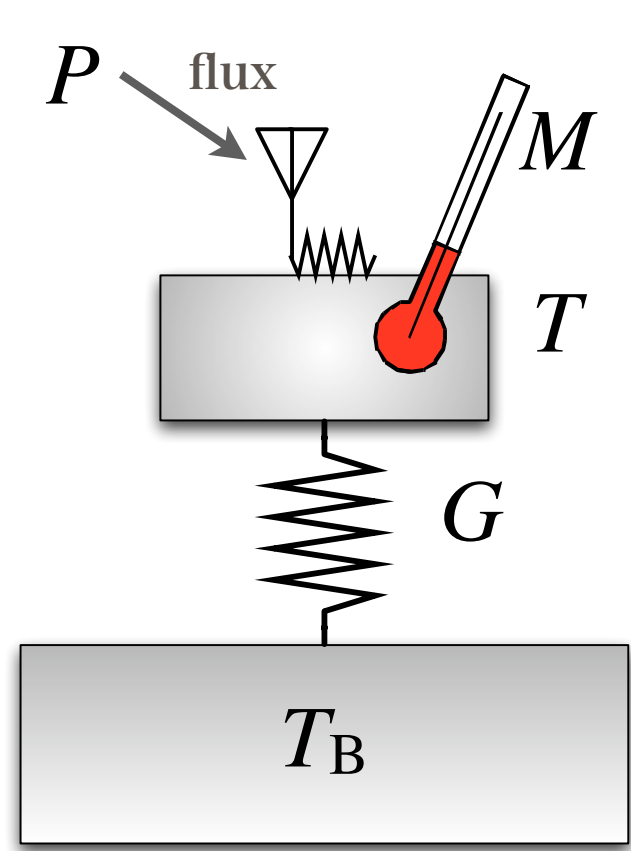
極低温($\lesssim 4\text{K}$)光検出器

X線, ガンマ線検出器は粒子検出器として, 粒子が検出器に落としたエネルギーを測定できる。



MKIDS=Microwaves Kinetic Inductance Detector
OLE=Optical Lumped Element

ボロメータとマイクロカロリメータ



熱flux $P(t) \rightarrow T(t) \rightarrow$ 温度計出力 $M(t)$
 M から時時刻刻の P を推定
 最も重要な性能パラメータ
 = 雑音と等価な信号の大きさ
 = Noise Equivalent Power

検出器の反応時定数よりも遅く, $1/f$ 雑音が無視できる周波数帯域では

$$NEP = \sqrt{4k_B T_B G \gamma} \quad \gamma \sim 1$$

典型的に $G \propto T^3 \rightarrow NEP \propto T^2$

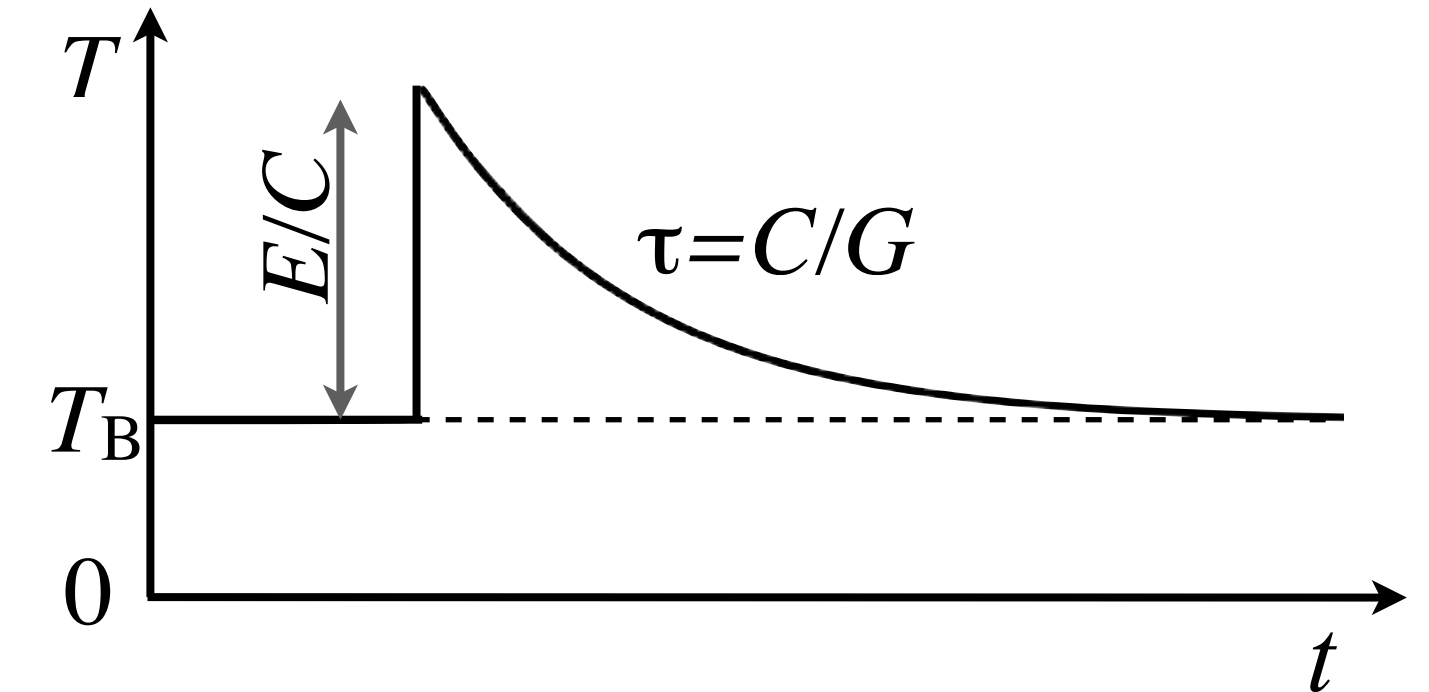
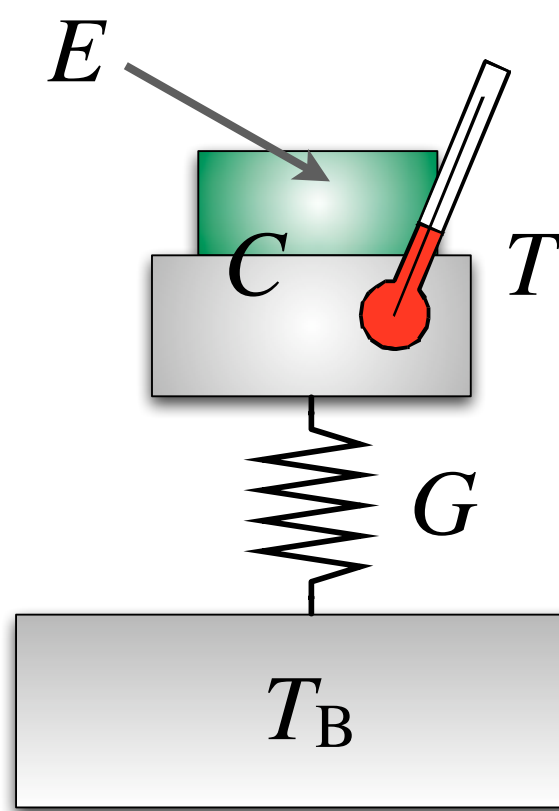
室温のボロメータ⁽¹⁾ $NEP \sim 2 \times 10^{-10} \text{ W Hz}^{-1/2}$

300 mK $NEP \sim 1 \times 10^{-17} \text{ W Hz}^{-1/2}$

50 mK $NEP \sim 1 \times 10^{-19} \text{ W Hz}^{-1/2}$

(1) 小田(2008)

エネルギー量子 (quantum)



$T(t)$ を反映した $M(t)$ のパルス波形から E を推定

最も重要な性能パラメータ = E の決定精度 = エネルギー分解能 ΔE

$$\Delta E = \frac{2.35}{\sqrt{\int_0^\infty \frac{4}{NEP^2(\omega)} \frac{d\omega}{2\pi}}} = 2.35 \sqrt{k_B T_B^2 C \xi} \quad C \propto T^k, k = 1 - 3$$

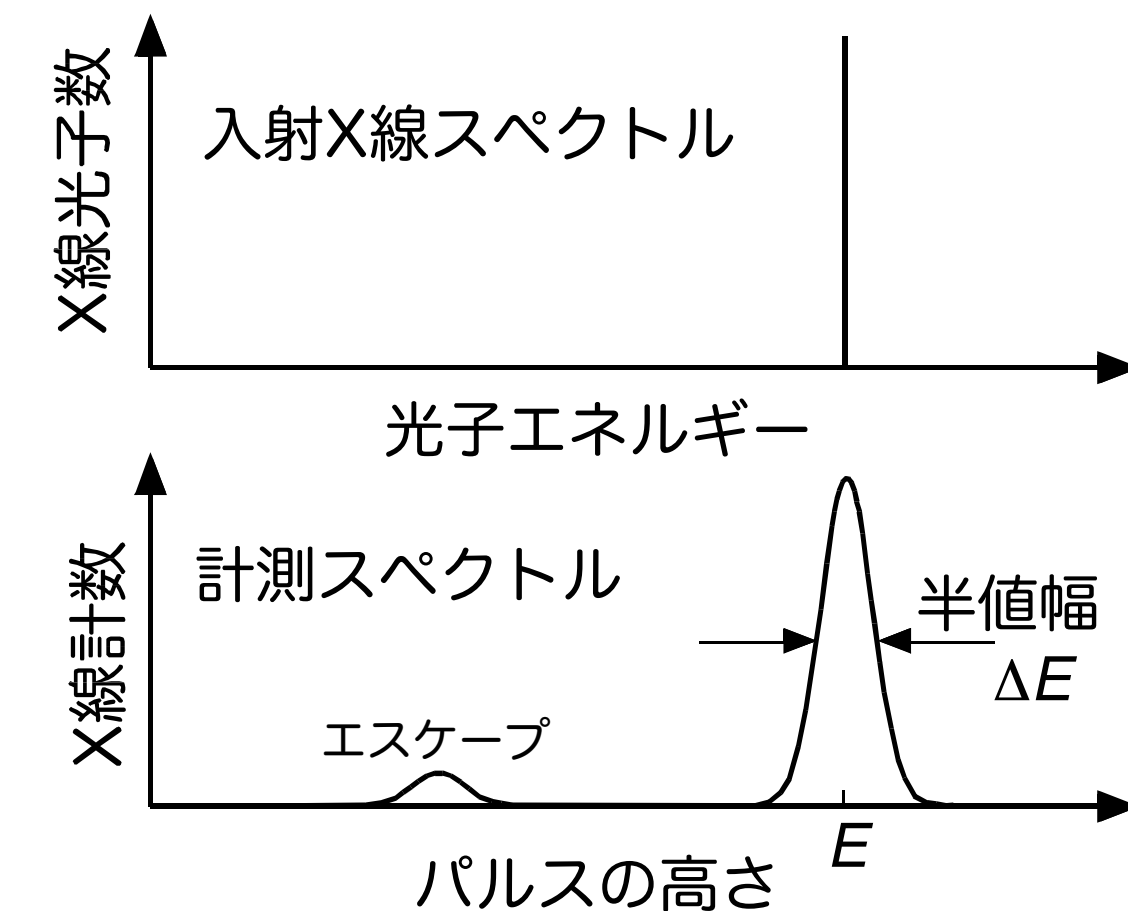
6 keVのX線に対して

半導体検出器(X線CCD)

$$\Delta E \sim 120 \text{ eV}$$

100m K のマイクロカロリメータ

$$\Delta E \sim 5 \text{ eV}$$



ボロメータ・マイクロカロリメータの温度計による違い

温度計	Bol	Cal	特徴
半導体温度計*	○	○	ボロメータ，カロリメータどちらについても最初に実用化された。応答が遅い。極低温での信号多重化が困難なので，大規模アレイ化はできない。
超電導転移端 (TES) 温度計	○	○	半導体温度計よりも応答が速く，高計数率に対応できる。極低温の信号多重化が可能で，大規模アレイ化の可能性はある。
金属磁化温度計 (MMC)	—	○	応答は遅い。広いエネルギー範囲で線形性がよいため，軟 γ 線領域の応用がすすんでいる。極低温での信号多重化は可能で，大規模アレイ化の可能性はある。
動インダクタンス (KID)	(○)	(△)	熱的検出器ではないのでこのカテゴリーにあてはまらないが，エネルギー流量測定と光子計測の両方に応用されている。現状では，NEP/ ΔE ともにTES型ボロメータ/マイクロカロリメータより劣るが，信号多重化を前提とした読み出し系による大規模アレイ化が魅力。

マイクロカロリメータの主な応用

(～研究開始の時間順)

(A)暗黒物質の直接探査

- ・ 電磁相互作用をしない暗黒物質の相互作用(弾性散乱)の小さな痕跡をとらえる。他の検出器と組み合わせて、電磁相互作用をした粒子としない粒子を区別する。

(B)Rare event 探査による素粒子物理学 (ν -less double β decayなど)

- ・ エネルギー分解能が高いため、数イベントでも統計的有意性を確保。

(C)宇宙X線の分光撮像観測

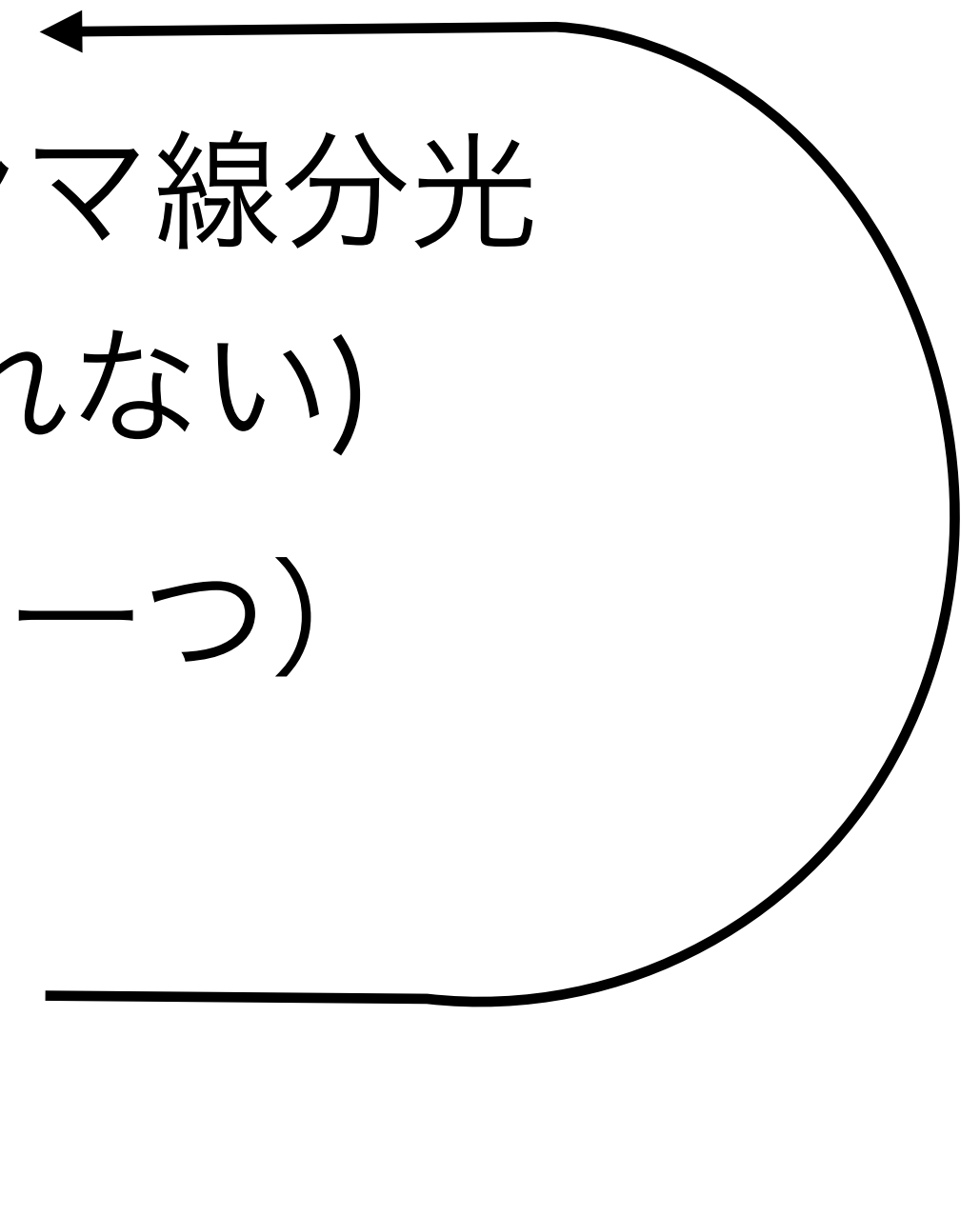
- ・ 撮像と高エネルギー分解能分光を両立する唯一の手段。宇宙暗黒物質の間接的探査による暗黒物質への制限など。

(D)X線, 軟ガンマ線分光による物質科学 (TES型, MMC型)

ここからの内容(応用と開発の現状)

私自身が関わってきた／関わっている研究

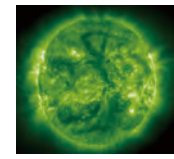
- ・ 応用研究 (前ページの (C), (D), (B) に順に対応)
 - ・ 宇宙X線分光：銀河団高温ガスのマクロな運動の初検出
(宇宙の大規模構造形成と宇宙暗黒物質)
 - ・ 原子核時計の実現を目指したトリウム原子核のガンマ線分光
(宇宙の暗黒エネルギーの理解につながるかもしれない)
 - ・ 太陽アクシオン探査 (アクシオンは暗黒物質候補の一つ)
- ・ 今後のX線分光, アクシオン探査等に向けた研究
 - ・ 大規模アレイのためのマイクロ波信号多重化



宇宙の大規模構造とX線分光

宇宙の階層構造

(大きさ)
10光秒



星

10万光年

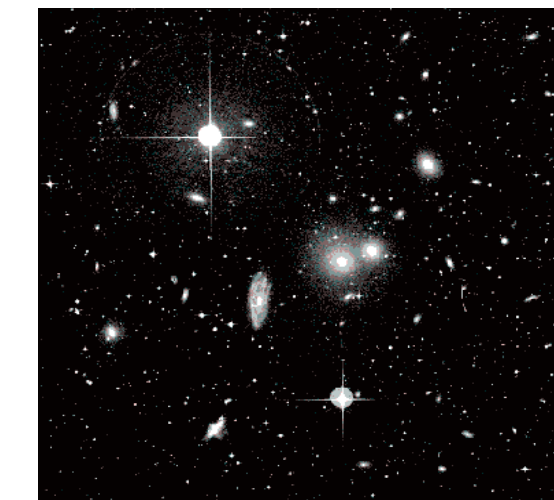


銀河

100万光年

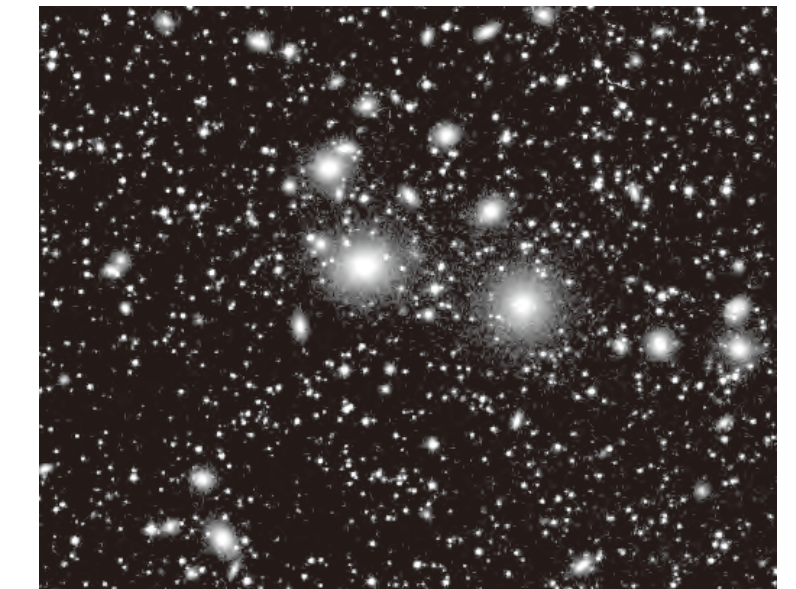


銀河群



銀河団

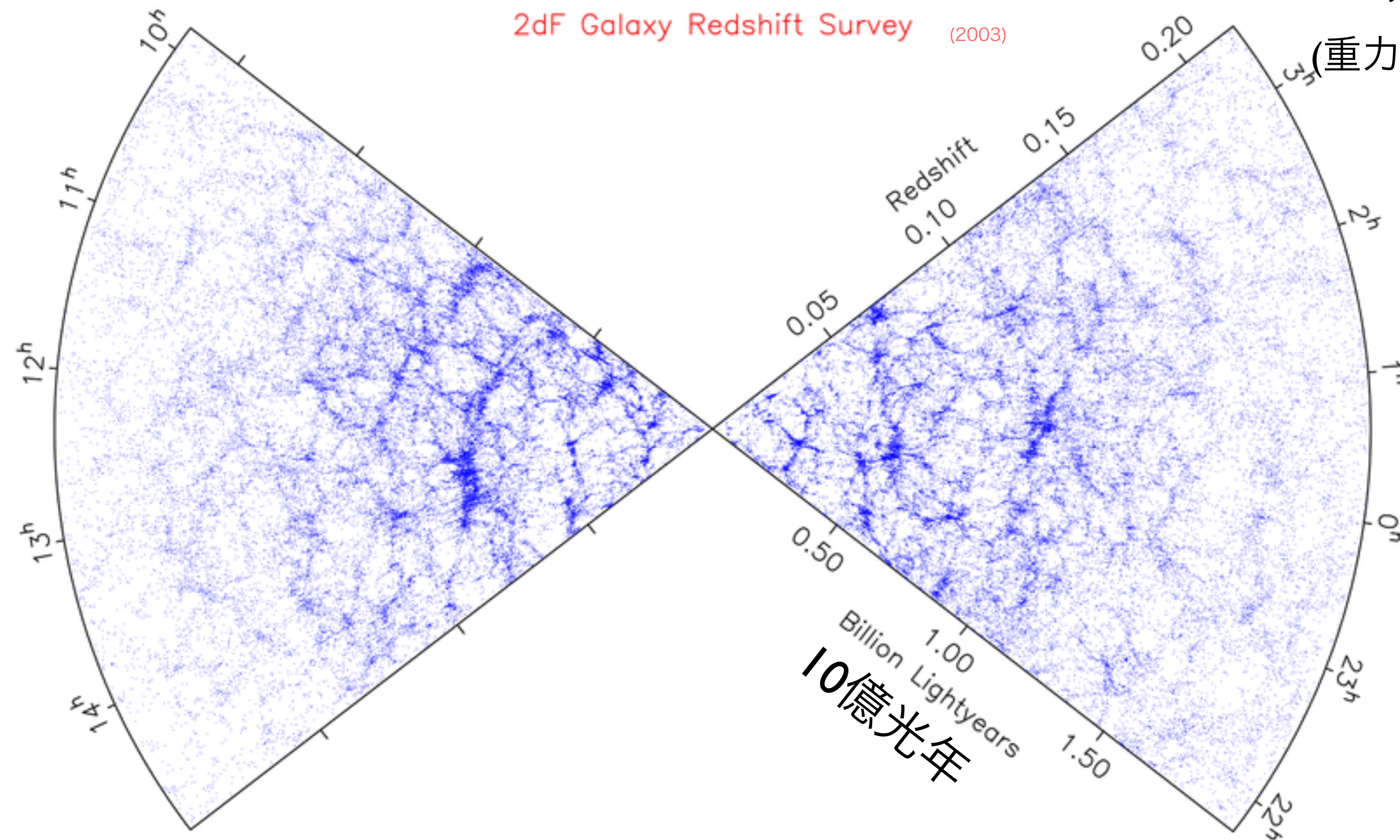
1億光年



スーパー銀河団

(重力的に束縛されていない)

銀河分布のフィラメント／ボイド構造



銀河団高温ガスと暗黒物質

可視光（パロマ天文台）

おとめ座銀河団

数100個の銀河

$2^\circ = 100$ 万光年

X線（あすか衛星）

おとめ座銀河団

~1億度の高温ガス

高温ガスの質量は
銀河質量の総和の約10倍

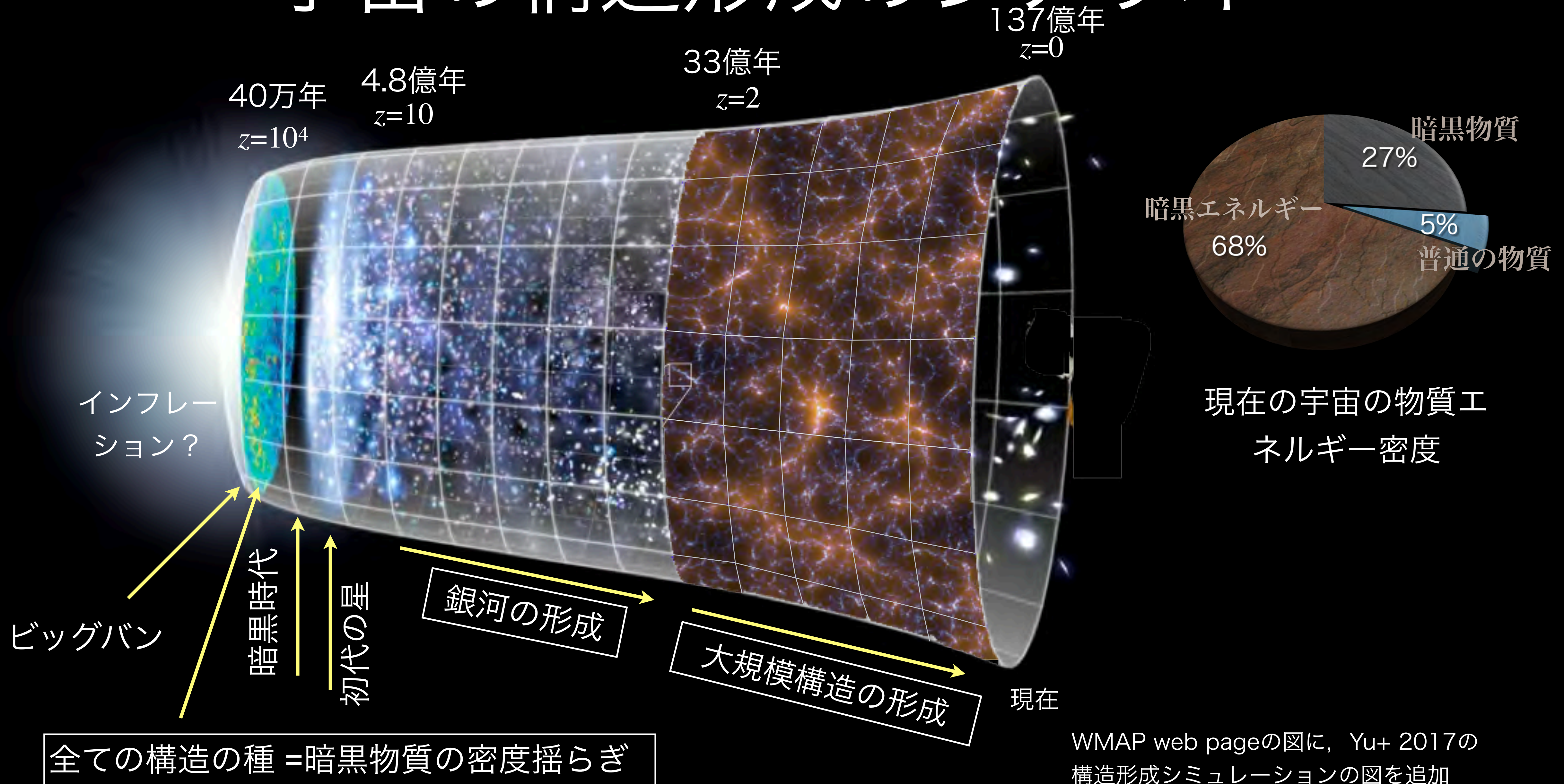
➡ 銀河団は銀河の集合とい
うよりも高温ガスの塊

高温ガスを重力的に束縛するた
めには、高温ガスと銀河の約5
倍の質量が必要

➡暗黒物質の存在

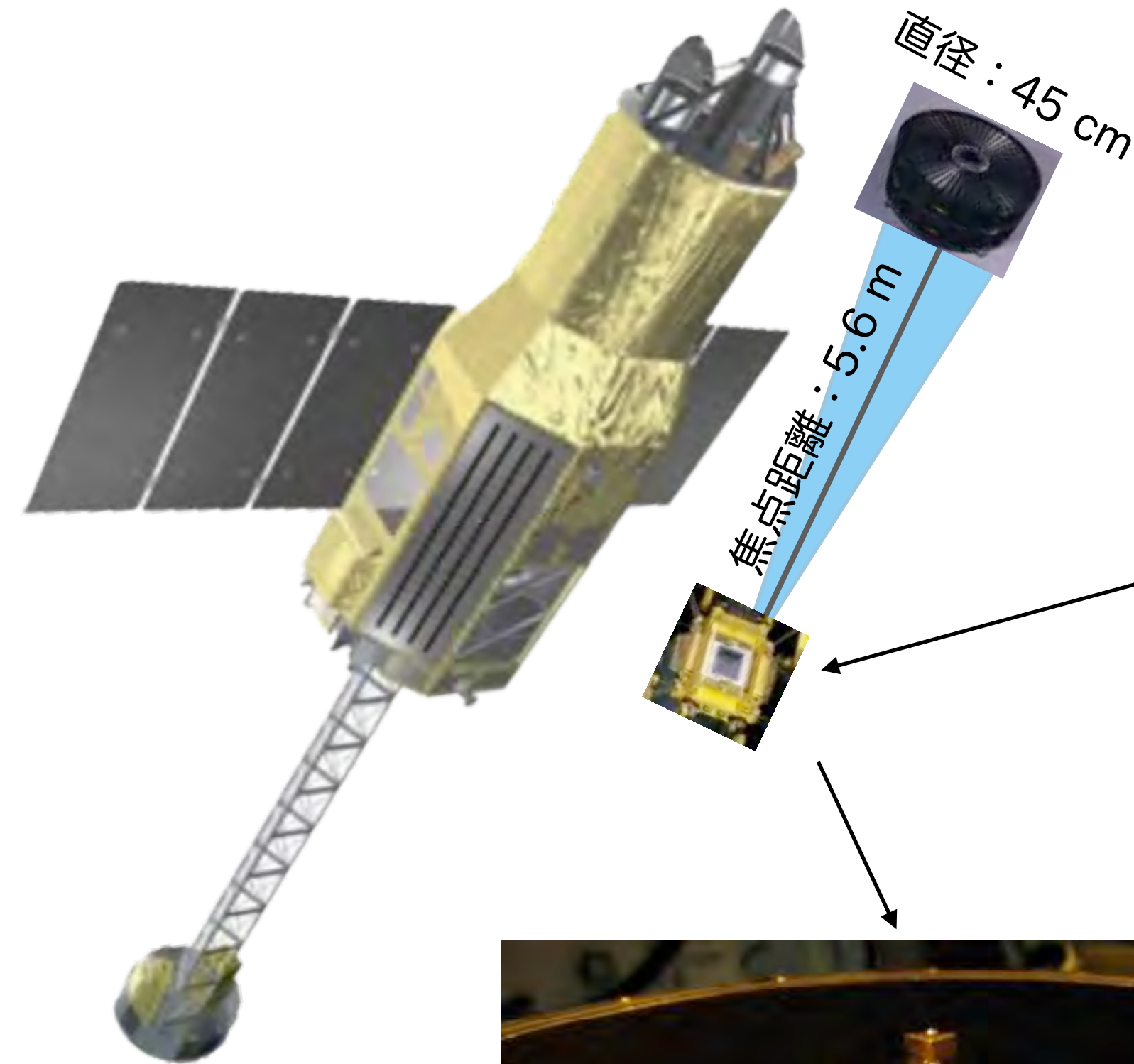
高温ガスの温度と密度分布か
ら、暗黒物質の空間分布を決定
できる。さらに暗黒物質の性質
に制限をつけることができるか
もしれない（特に、銀河団中心
と外縁部）。

宇宙の構造形成のシナリオ

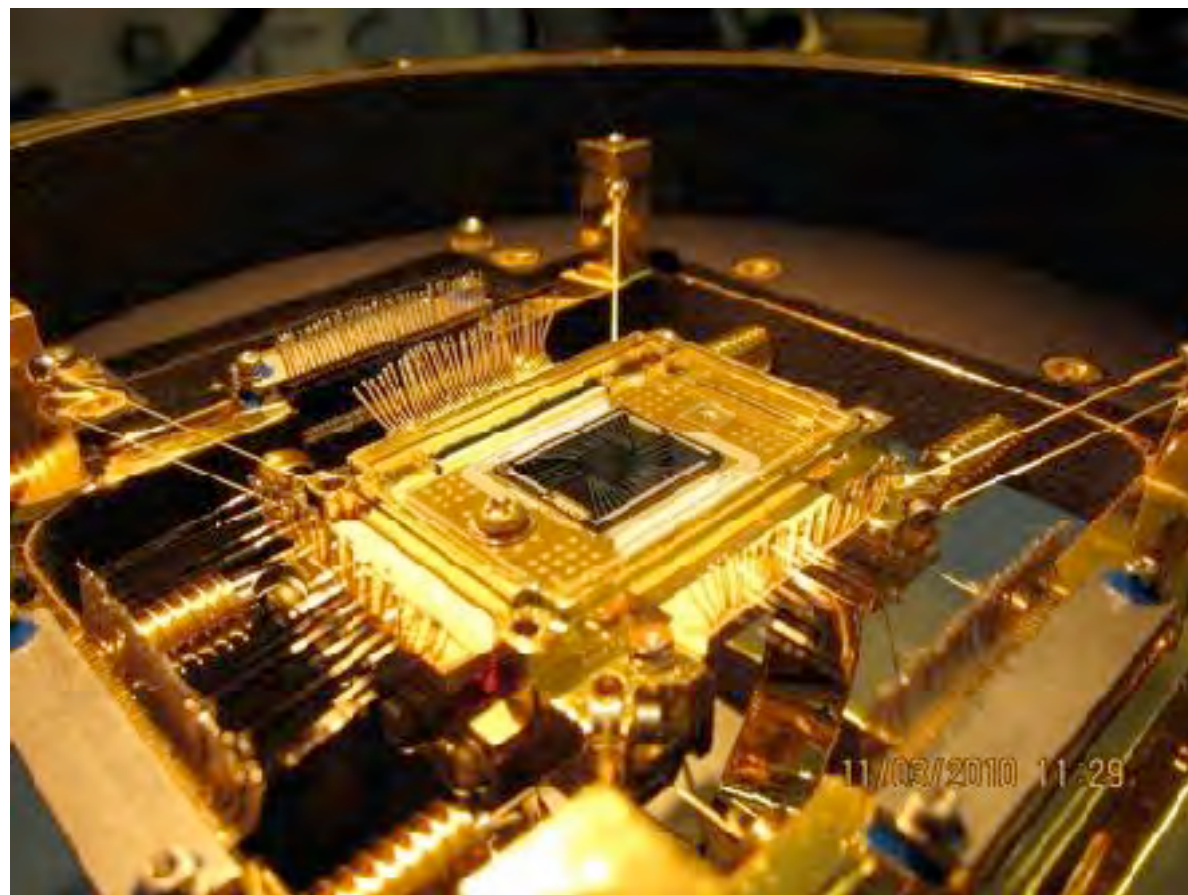


ASTRO-H衛星搭載 SXS

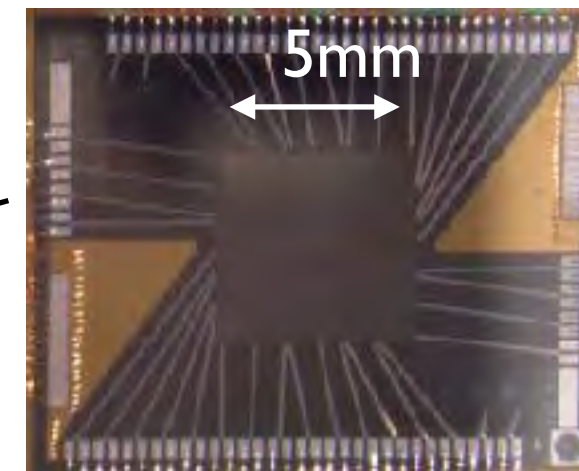
ペルセウス座銀河団



Mitsuda+2012

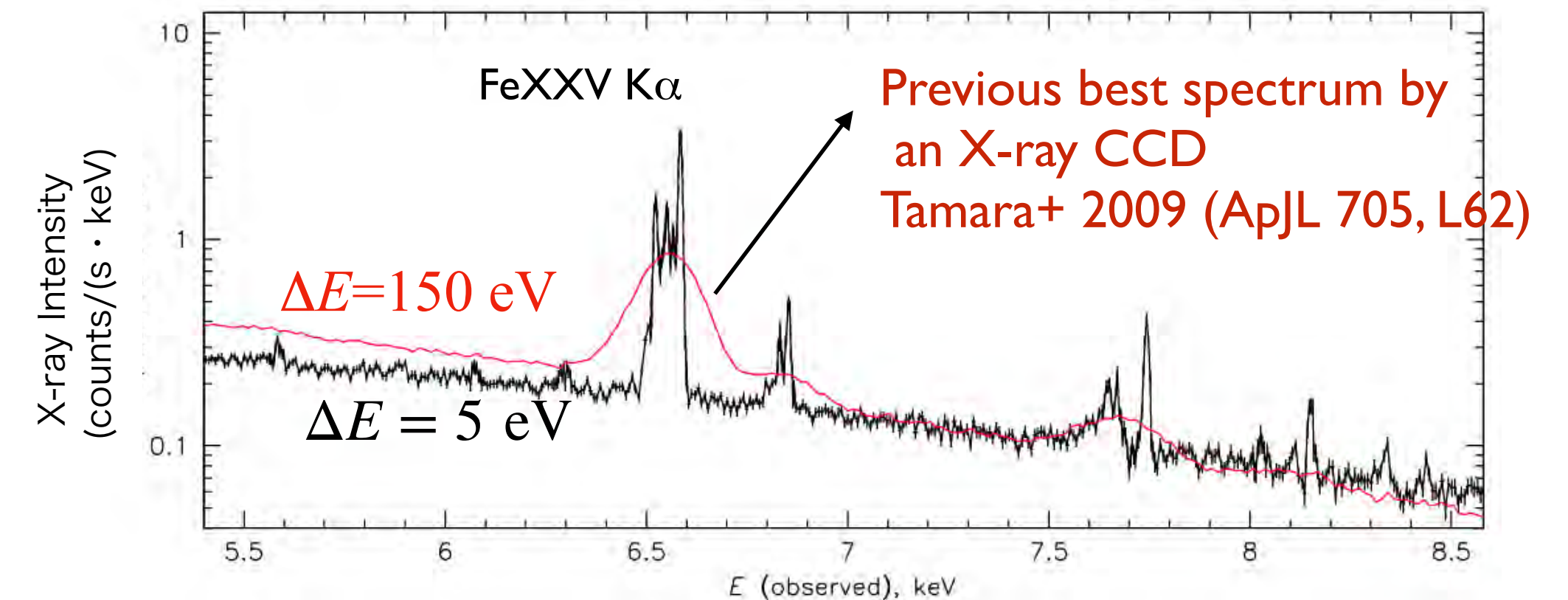
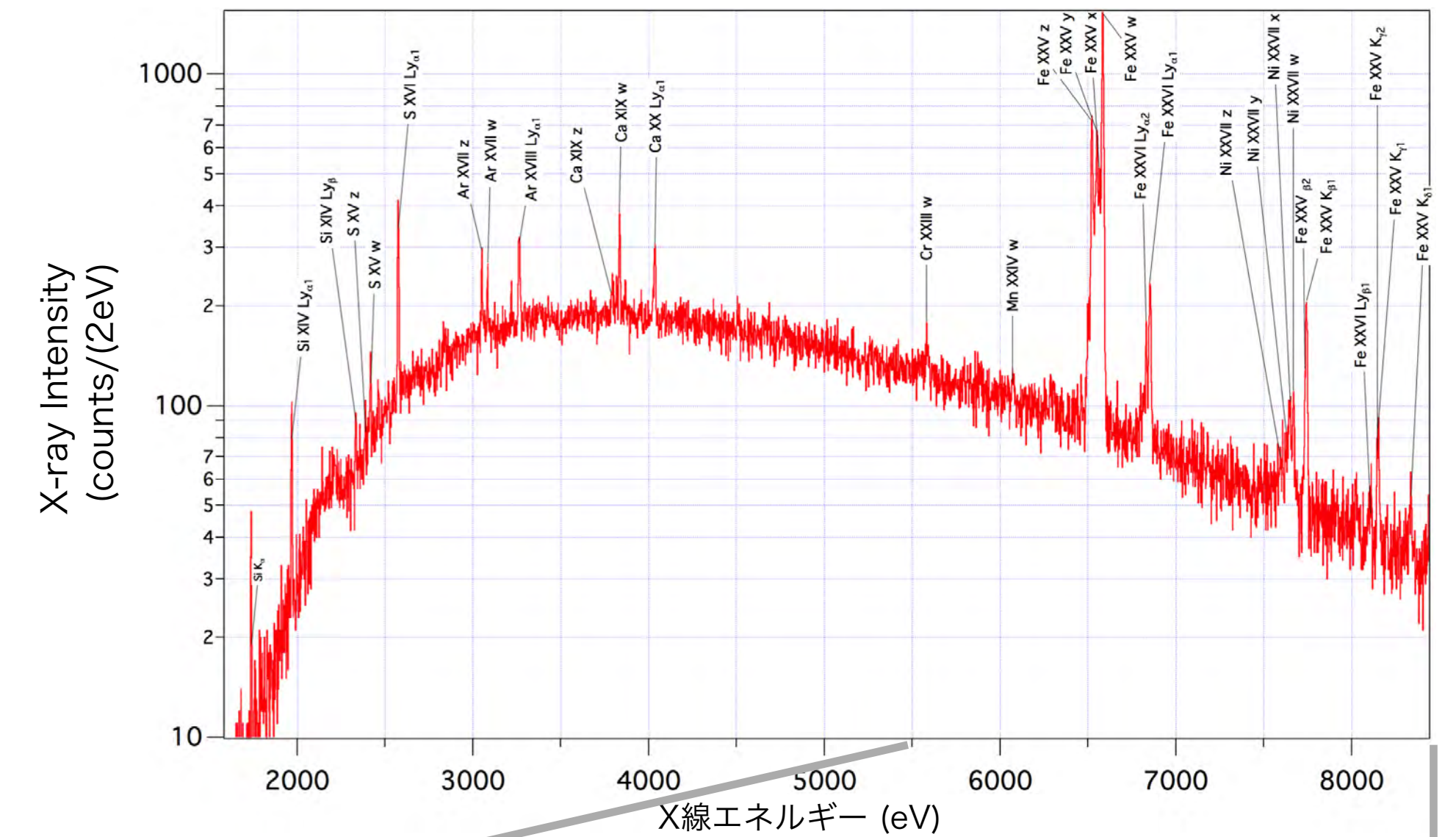


SXS detector



6 x 6 = 36画素の
半導体型マイクロカ
ロリメータアレイ
動作温度 = 50mK

Hitomi collaborations
2016 (Nature, 535,
117)

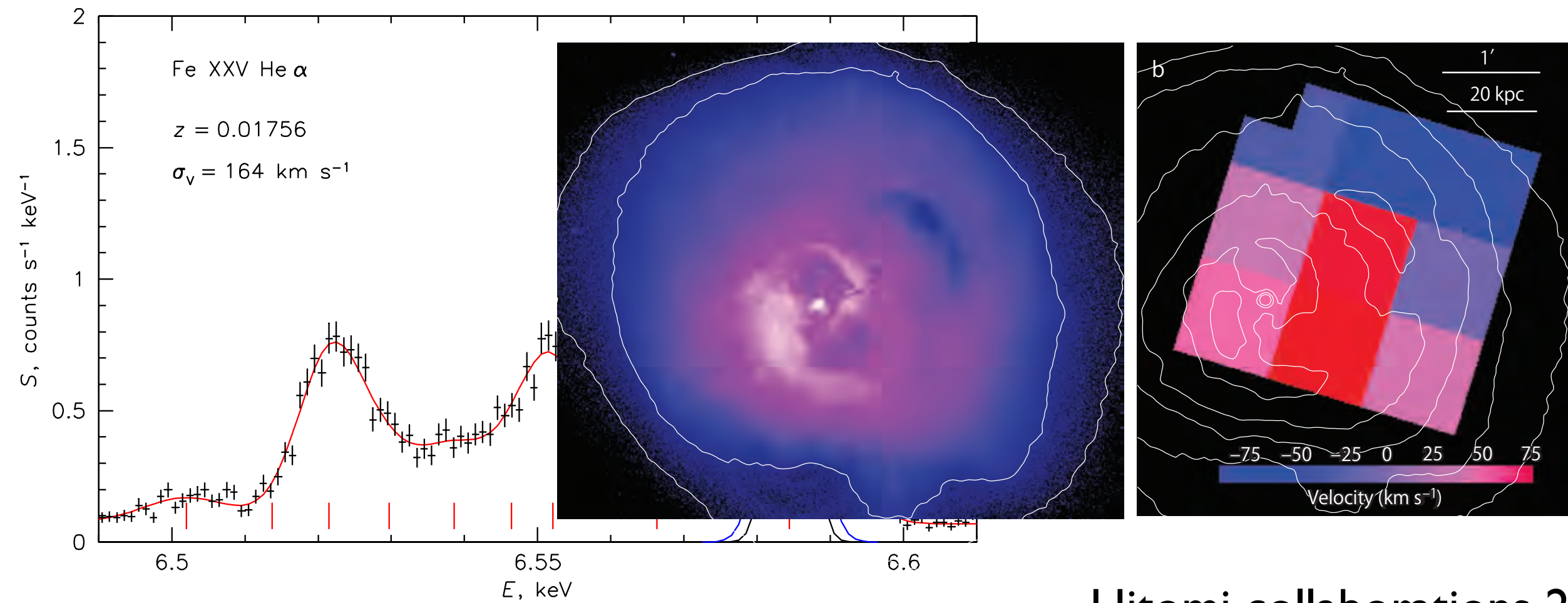


視線方向運動速度を初めて測定

ペルセウス座銀河団

速度分散=160km/s

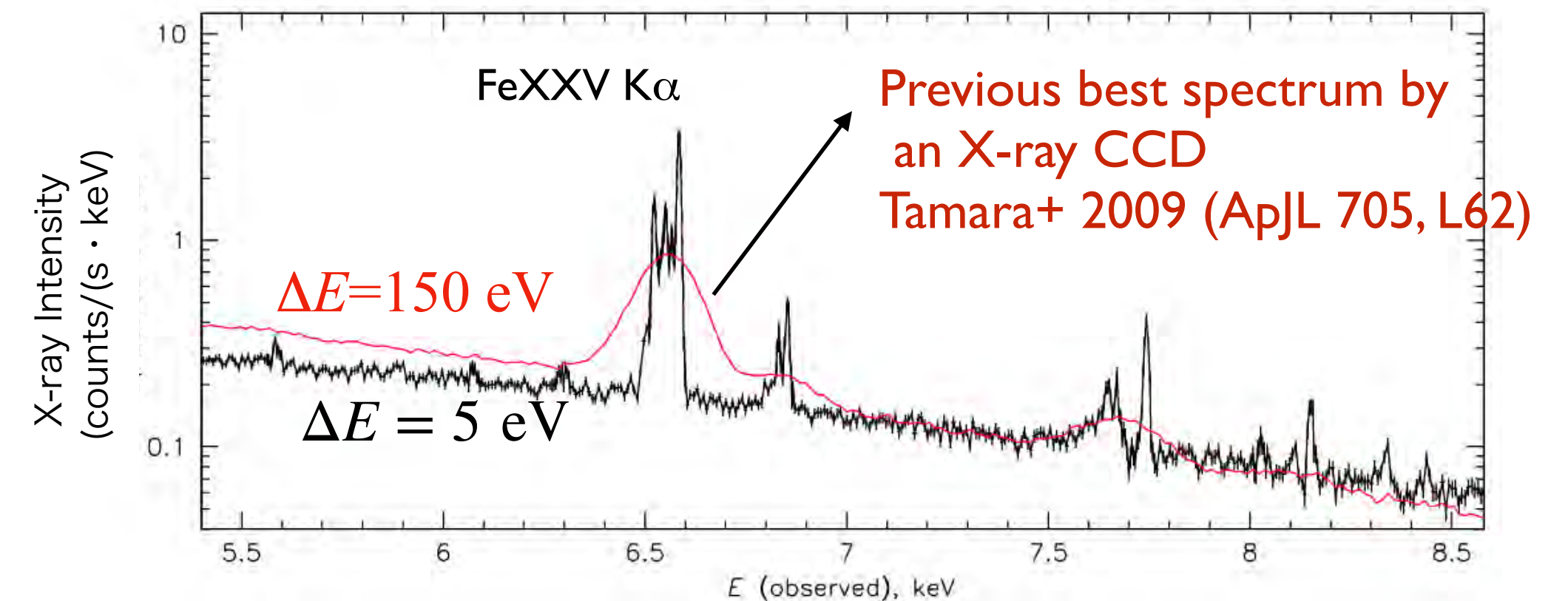
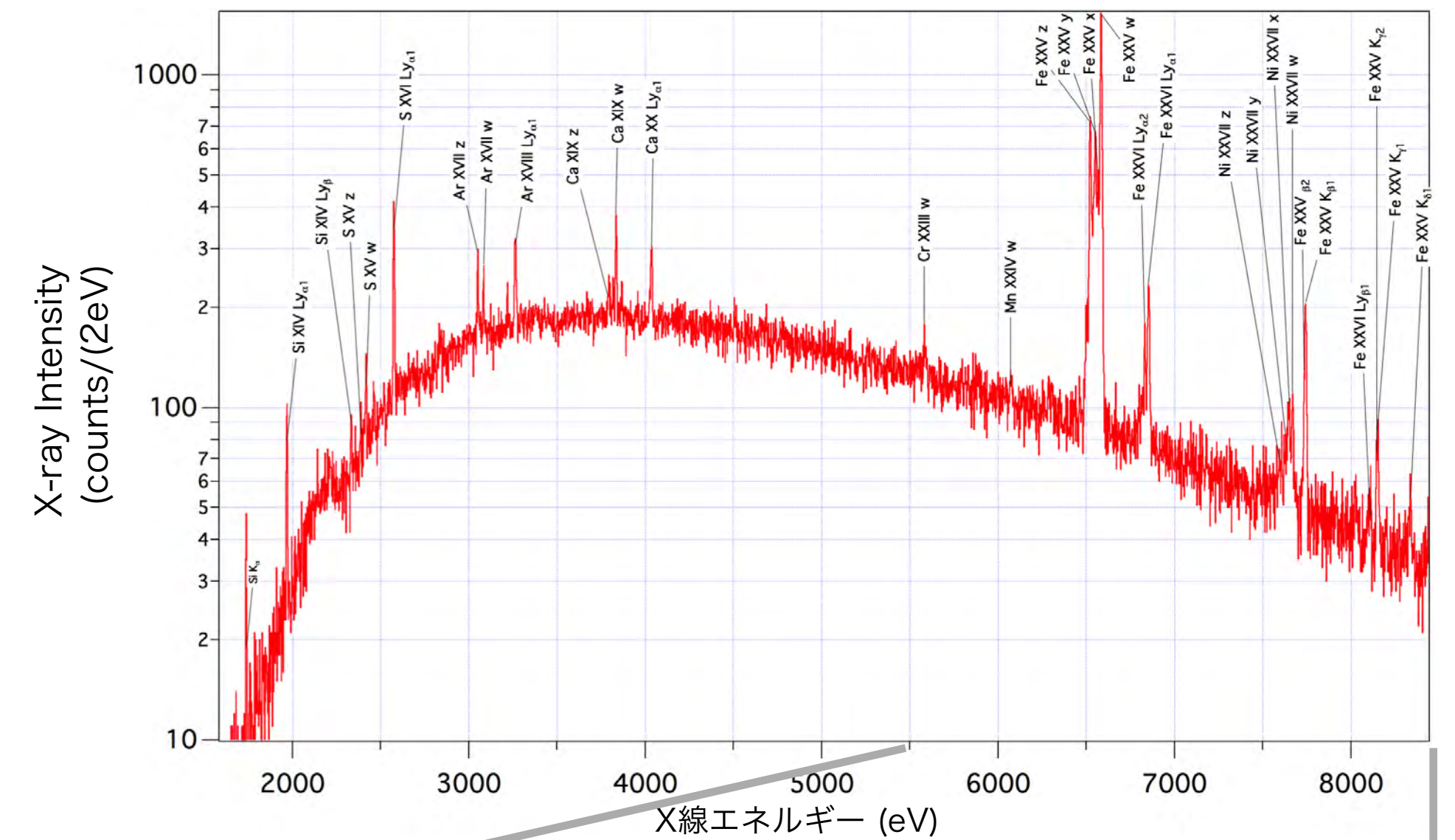
中心速度の位置依
存性~70km/s



Hitomi collaborations 2016
(Nature, 535, 117)

高温ガスの運動速度は「意外に」小さく、これまでの暗黒物質質量推定に大きな影響は与えない。

しかし、高温ガスの運動は、銀河団の衝突合体による成長段階に依存する可能性が高く、これを調べるために10個以上の異なる成長段階にある銀河団を観測する予定であった。衛星の姿勢制御系の不具合で1銀河団しか観測できなかったが、XRISM衛星に引き継がれる。



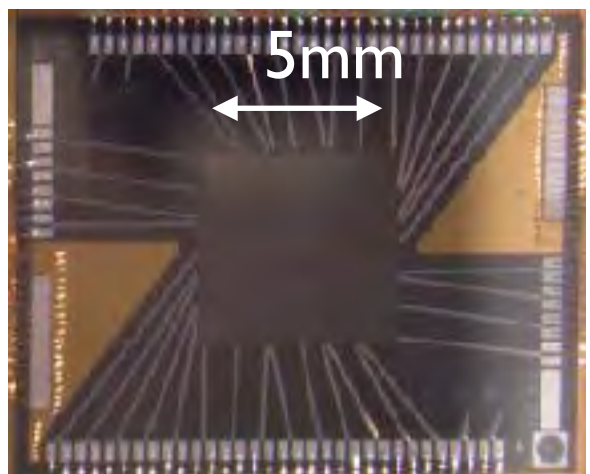
X線天文学の将来計画＝極低温信号多重化がキー技術

High-resolution spectroscopy

ASTRO-H(2016), XRISM (2023)

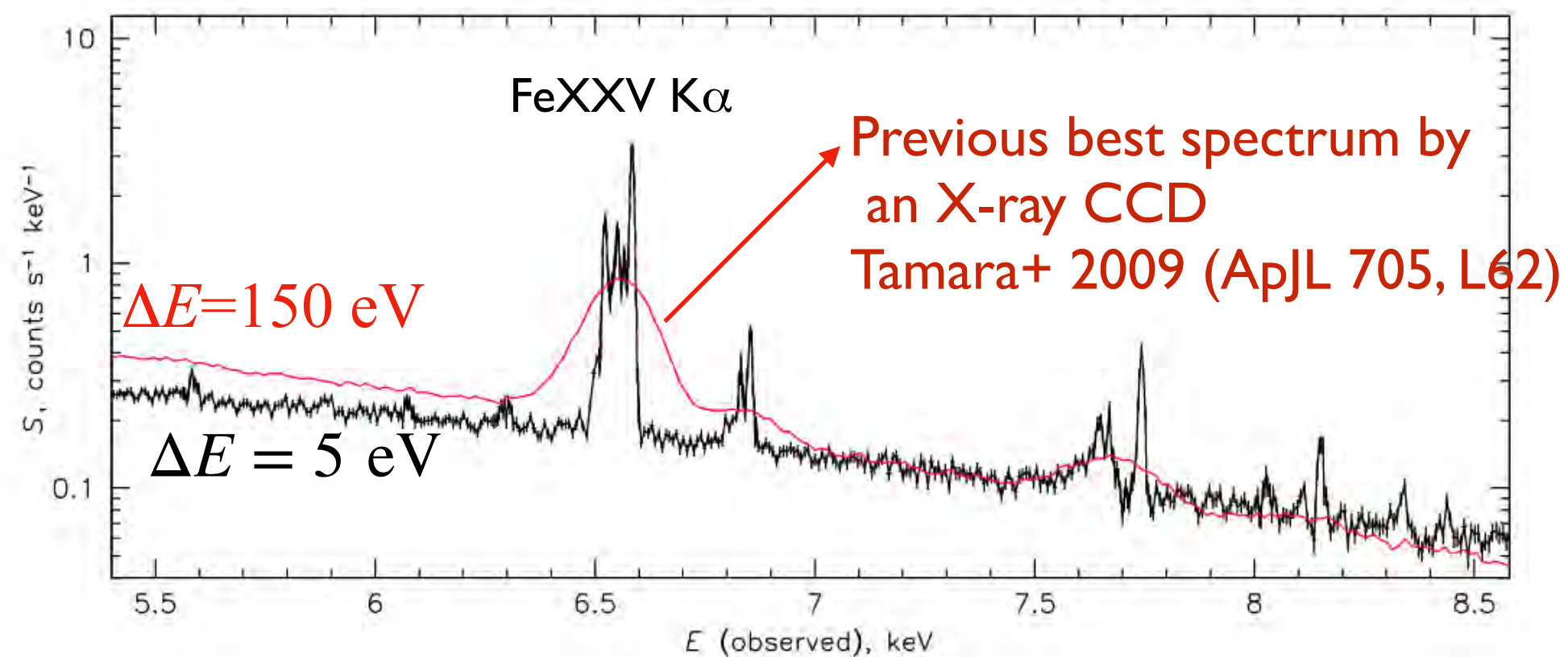


SXS detector



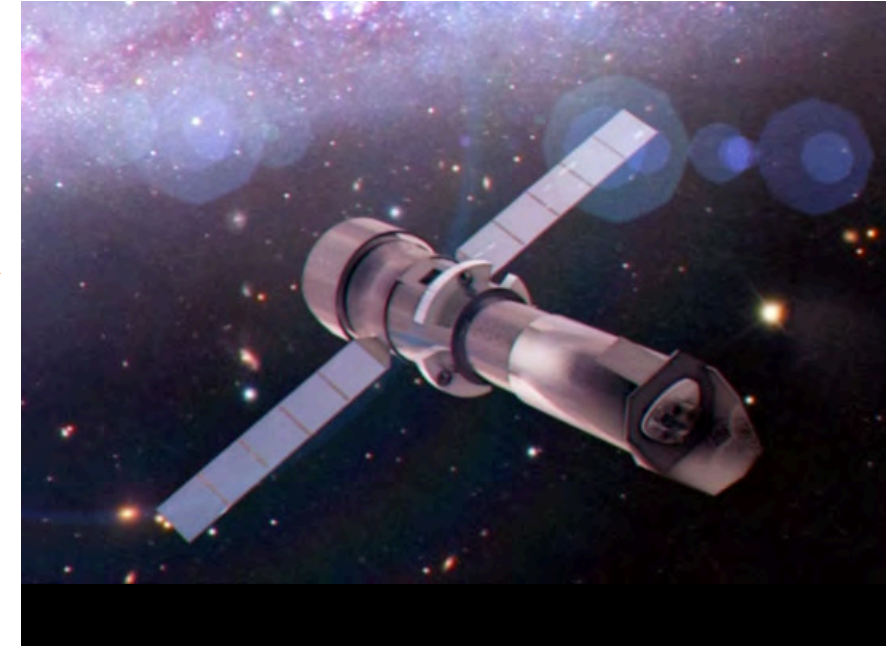
36 pix 半導体μカロリメータ

Hitomi collaborations 2016
(Nature, 535, 117)

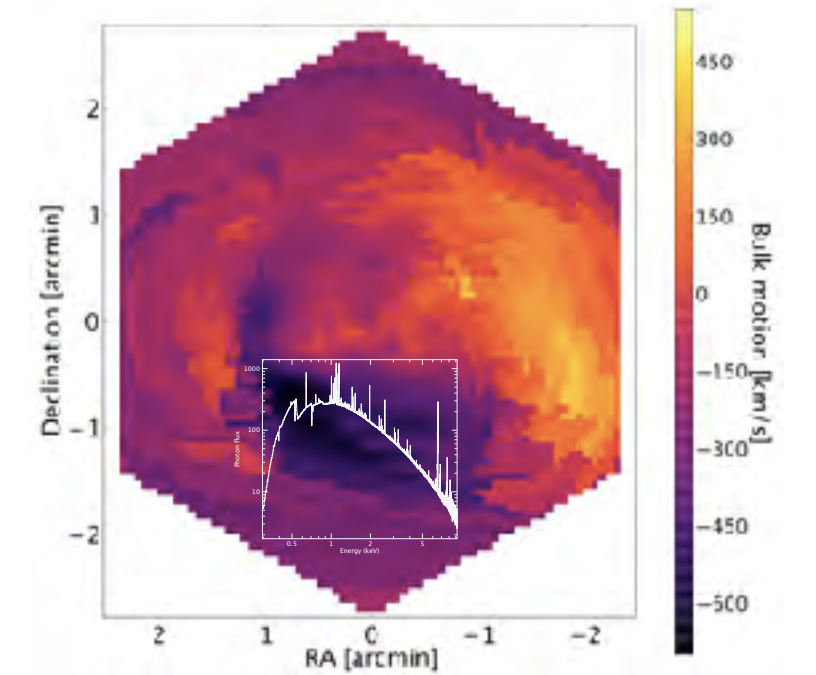


Structure formation, Baryon feedback and Black hole

ATHENA (ESA, 203x)



X-IFU (CNES, SRON, CNRS, JAXA, NASA, ..)



Simulated velocity map of bulk motions of hot plasma in cluster

Barret+2018

3k pix TES + TDM

High-resolution spectroscopy & Wide FOV

HUBS (CNSA, 203x)

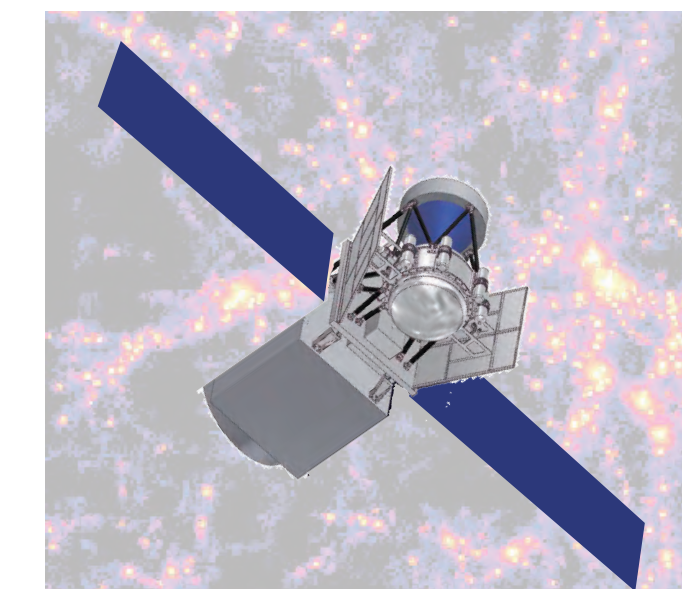


Cui+ 2020

1k pix TES + FDM

Structure formation,
Missing Baryon

sDIOS (日本, 203x)



100k pix TES + MW FDM

Yamada+ 2018

半導体型からTESへ：TES型の利点

高速応答

$$\tau_{\text{eff}} \sim \frac{C}{G} \frac{n}{\alpha} \quad n \sim 3, \quad \alpha \sim 50$$

半導体型よりも～10倍速い

➡ ～10倍の高計数率で使用可能

➡ 地上の分析への応用,
可視光／近赤外線光子検出

低インピーダンス：極低温信号多重化の可能性 =大規模アレイの可能性

TESの信号帯域幅 << SQUID の帯域幅
～ 数10 kHz SQUID自身は ～GHz
上限は下流の増幅器の帯域で
決まる。

高エネルギー分解能

$$\Delta E = 2.35\xi \sqrt{\frac{k_B T^2 C}{\alpha}}$$

$$\sim 2.35\xi \sqrt{k_B T E_{\text{sat}}}$$

$$\frac{CT}{\alpha} \sim C\Delta T \approx E_{\text{sat}} \quad (\Delta T \text{ は超伝導転移幅})$$

α を大きくすれば、 ΔE はいくらでも小さくできるように見えるが、そうではない

動作温度と計測する最大量子エネルギーで原理的な分解能は決まる。

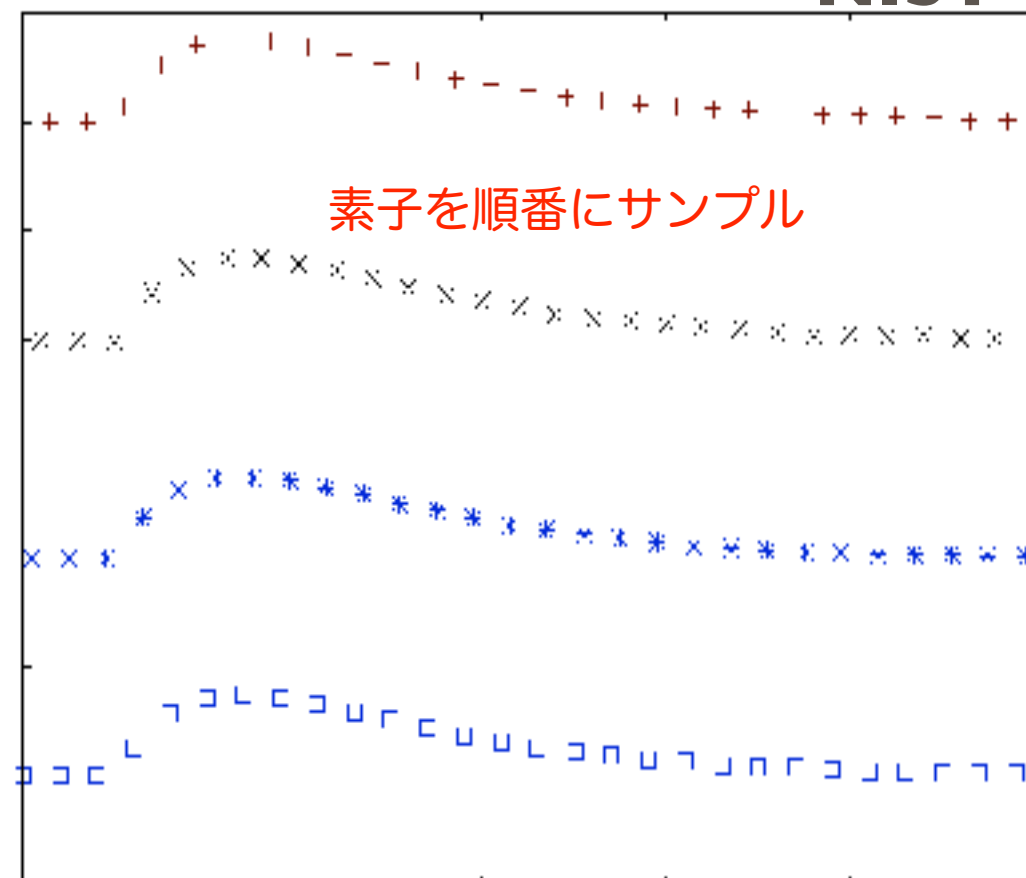
温度は、応答速度とエネルギー分解能の優先順位による

$$\tau_{\text{eff}} \sim \frac{nE_{\text{sat}}}{GT}$$

TES型の極低温信号多重化の4方式

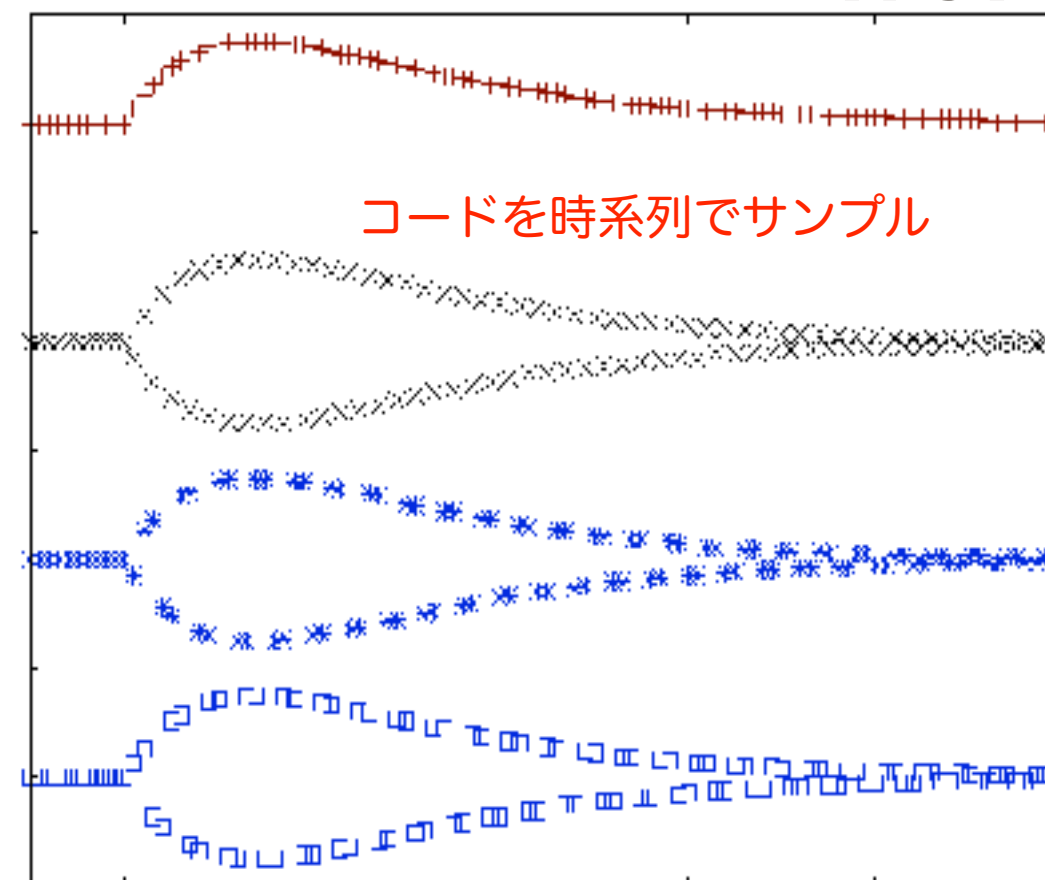
Time Division MUX (TDM)

NIST



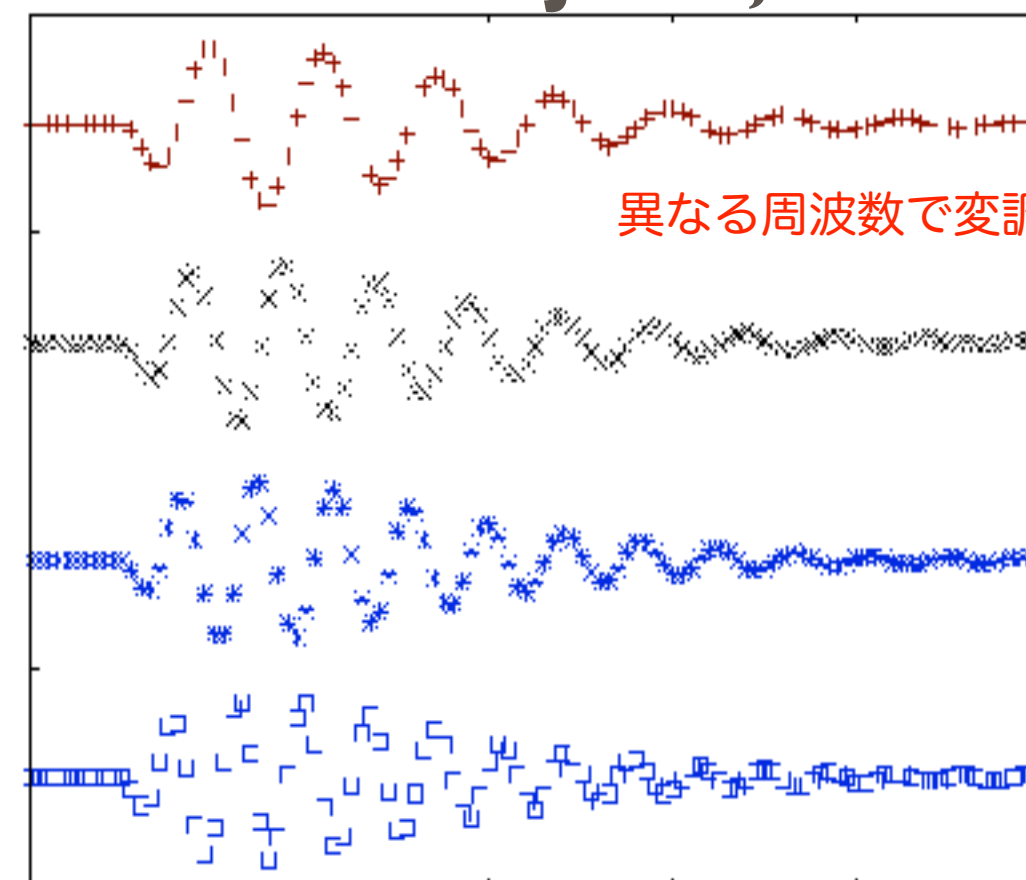
Code Division MUX (CDM)

NIST



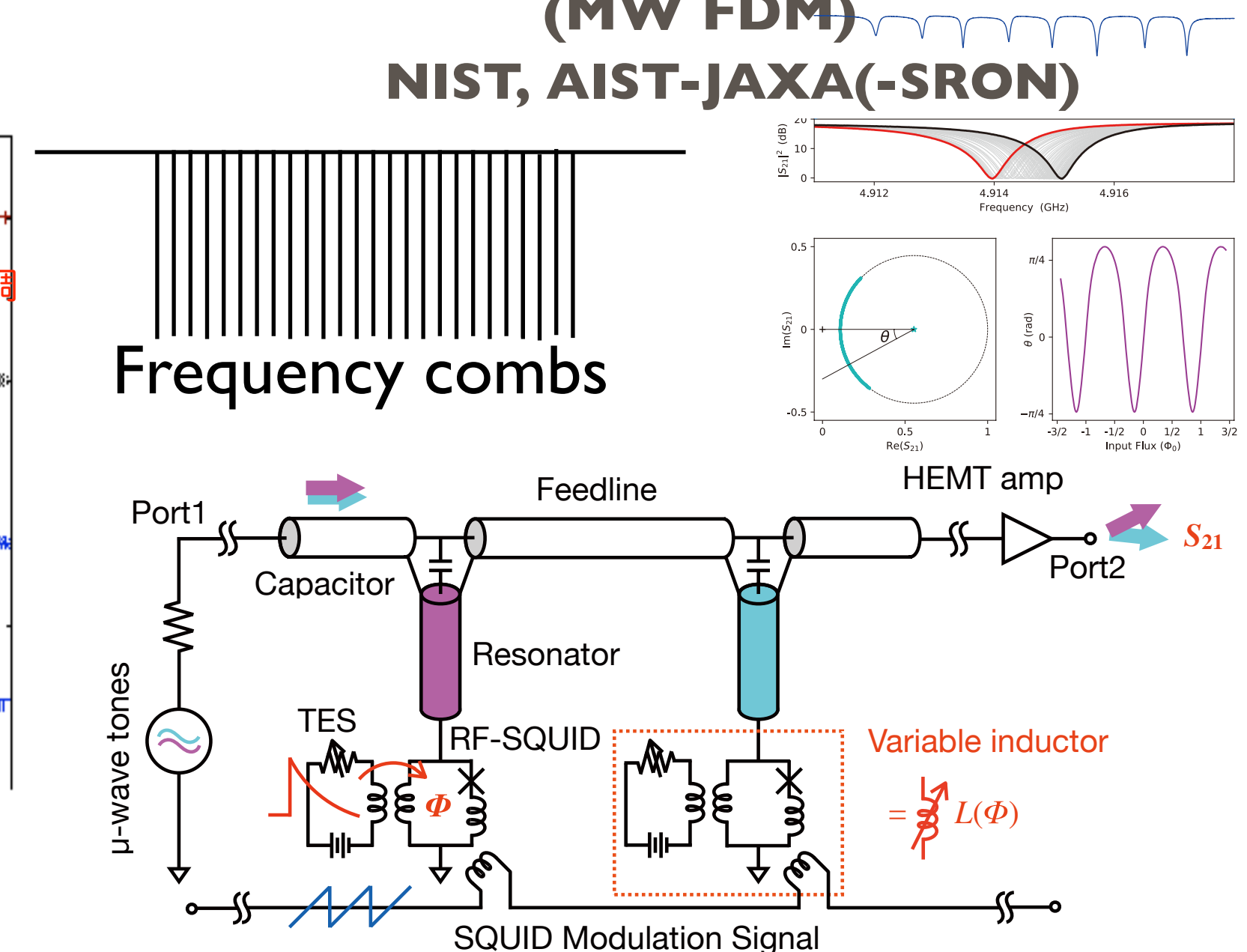
MHz Frequency Division MUX (MHz FDM)

JAXA, SRON



Microwave (GHz) Frequency Division MUX (MW FDM)

NIST, AIST-JAXA(-SRON)



Pros

- TES bias are not modulated (DC bias)
- 1 SQUID/pixel +SAA/column

Cons

- N SQUID/column
- $\sqrt{N}$ SQUID noise aliasing

- No SQUID noise aliasing
- TES bias not modulated

- 1 SQUID/pixel +SAA/column
- Possible code / pulse-shape mixing

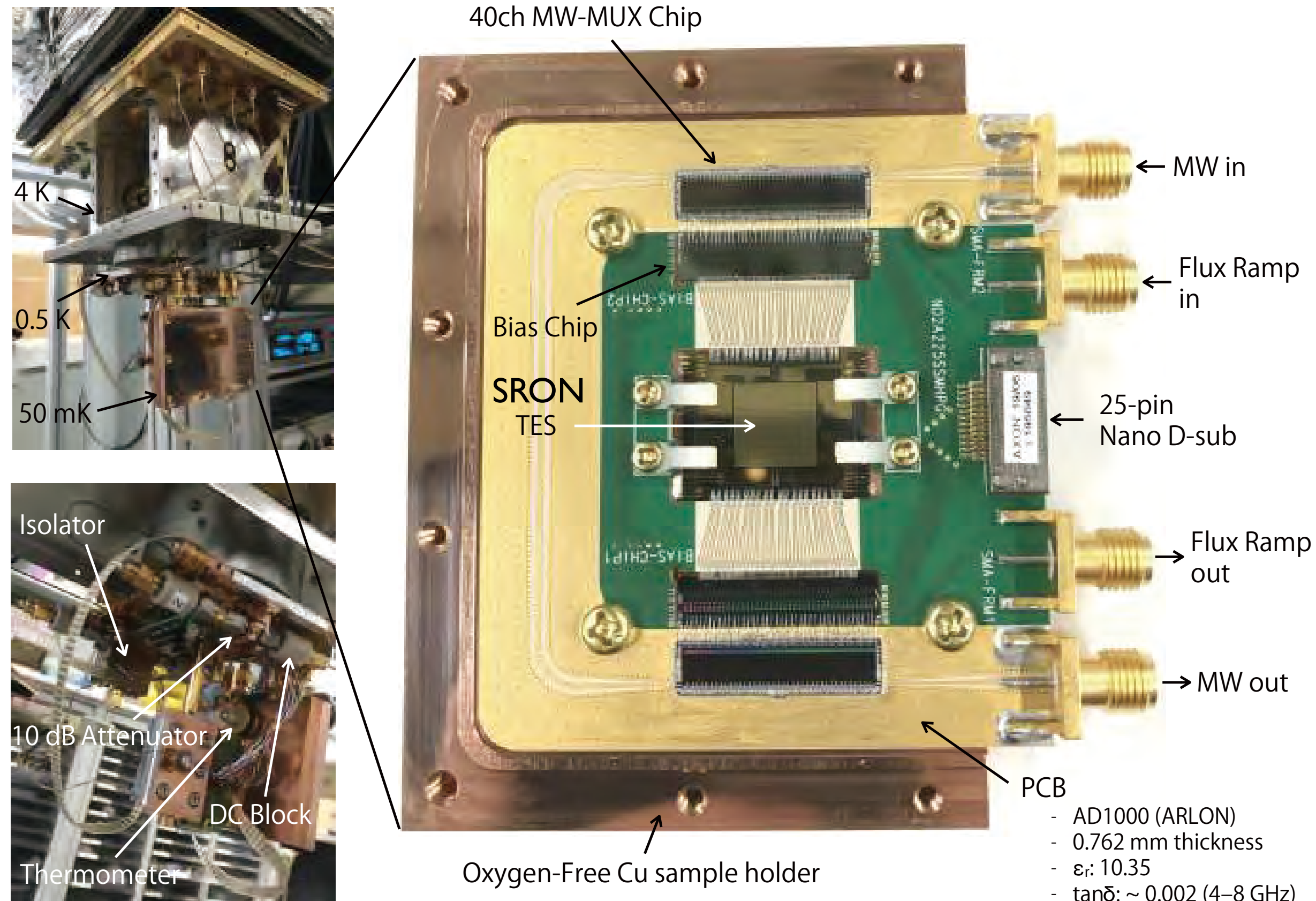
- 1 SQUID/column
- No SQUID noise aliasing

- TES bias modulated (AC bias)
- LC-filter necessary

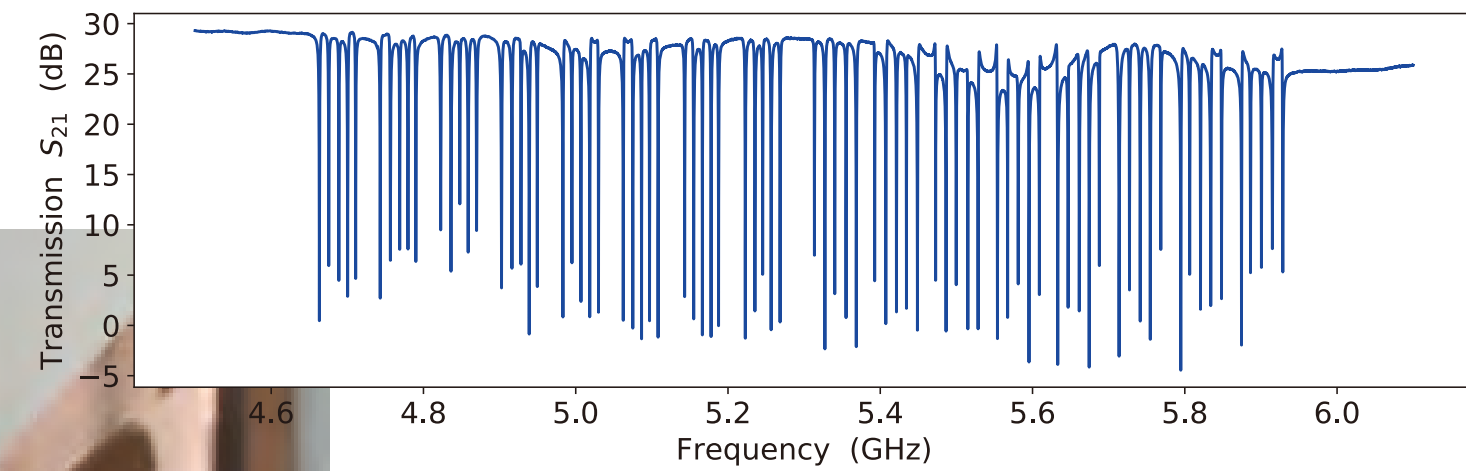
- TES bias is not modulated (DC bias)
- A large MUX factor possible
- No SQUID noise aliasing

Irwin & Hilton 2005, section 4.2

80-ch MW FDM (産総研+JAXA+TMUなど)

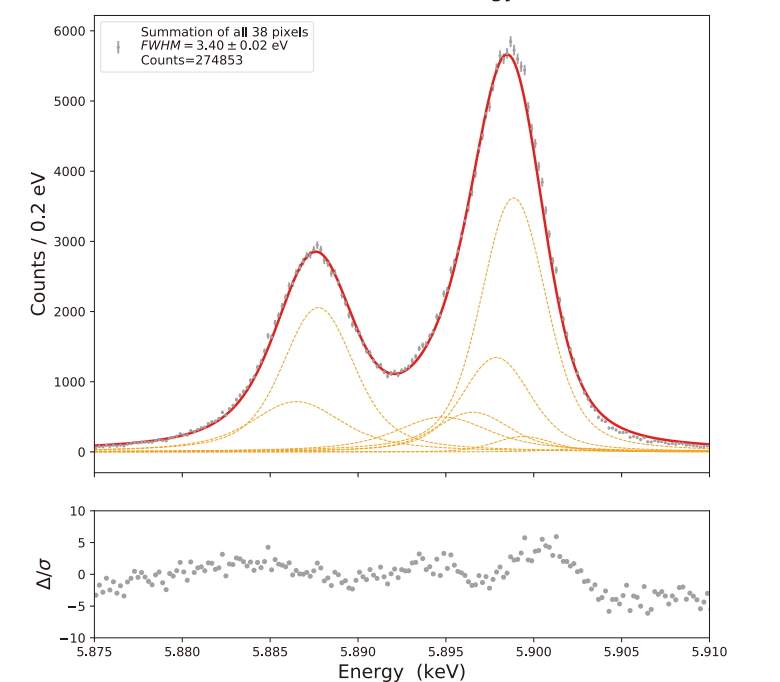
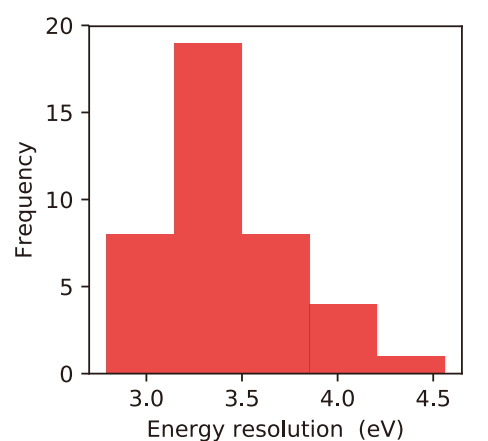
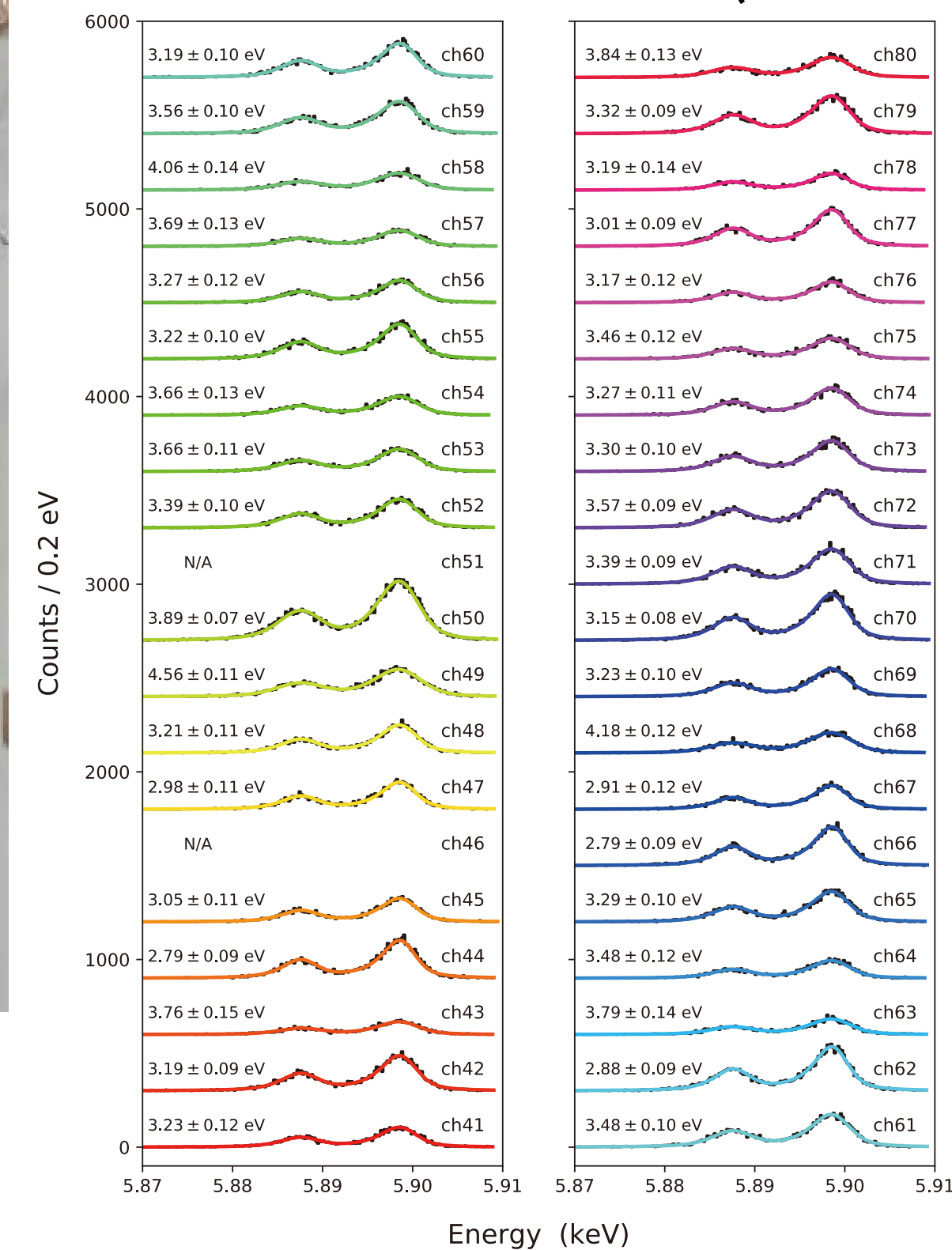


Nakashima 2020, Nakashima+2020



80 Frequency combs

^{55}Fe からのMn $K\alpha$ (5.9 keV) スペクトル (38 pixels)



全ch和, $\Delta E = 3.4\text{eV}$

原子核時計の実現をめざした ^{229}Th (トリウム229)原子核のisomer準位の決定

時計の精度(accuracy)と暗黒エネルギー

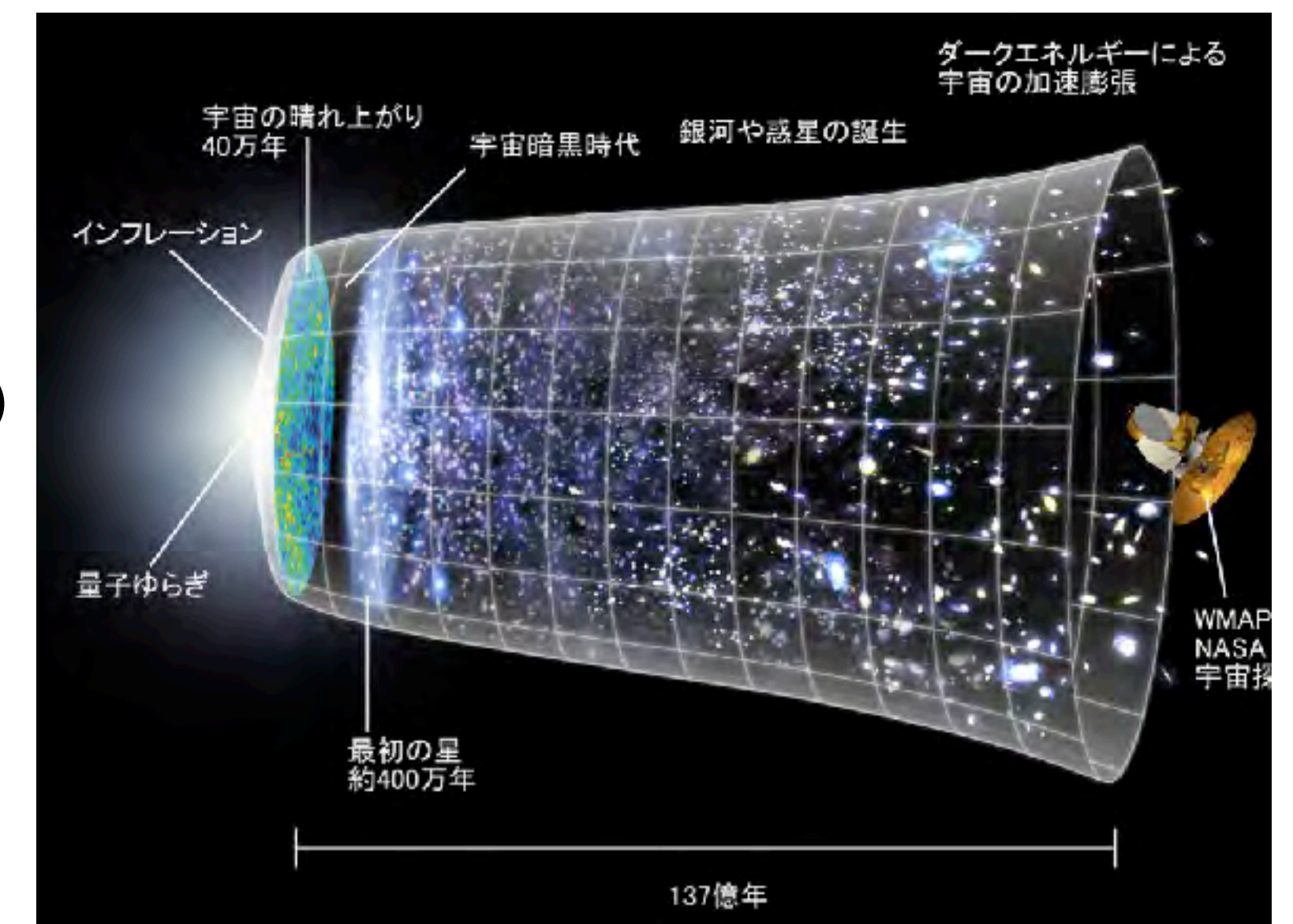
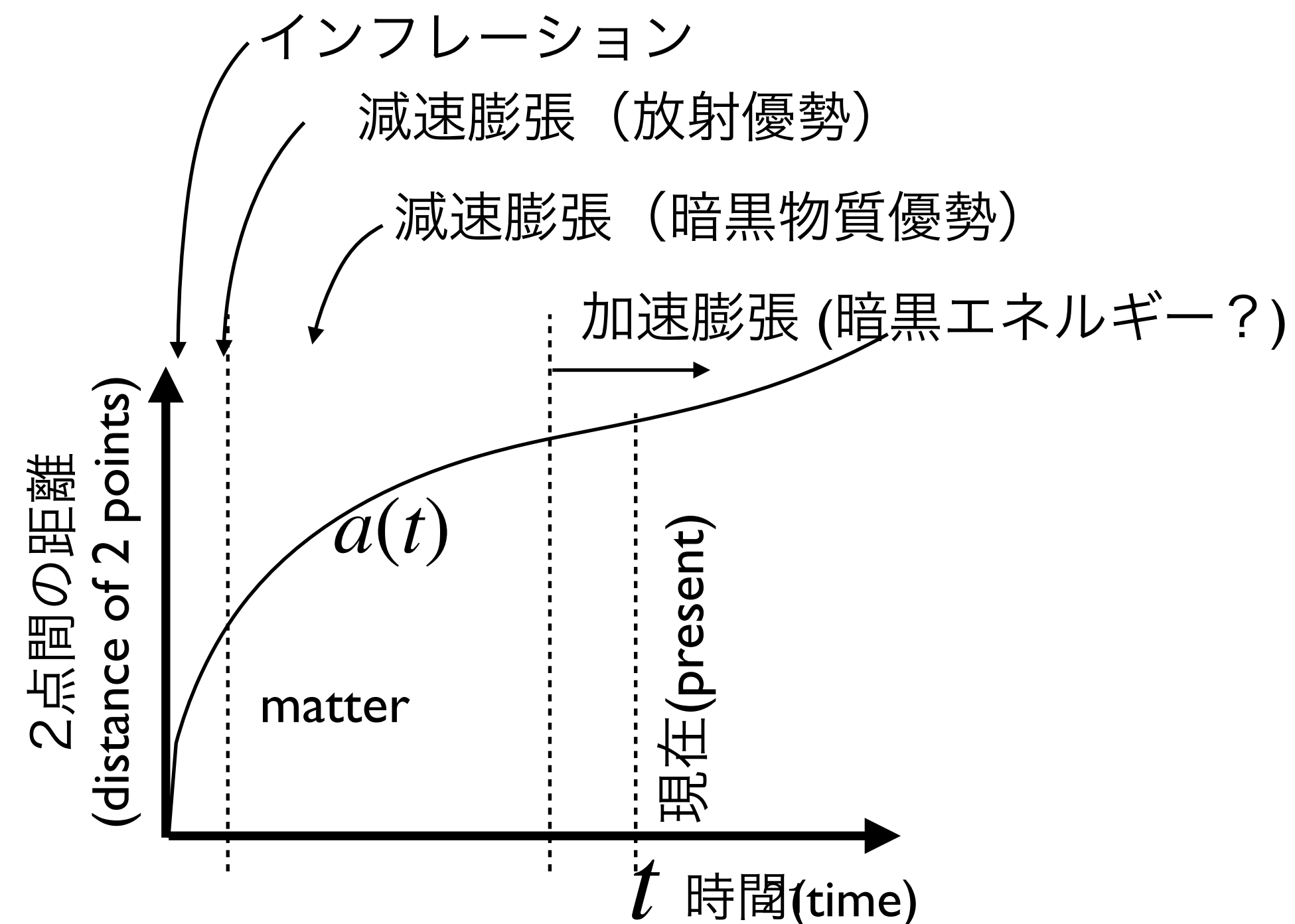
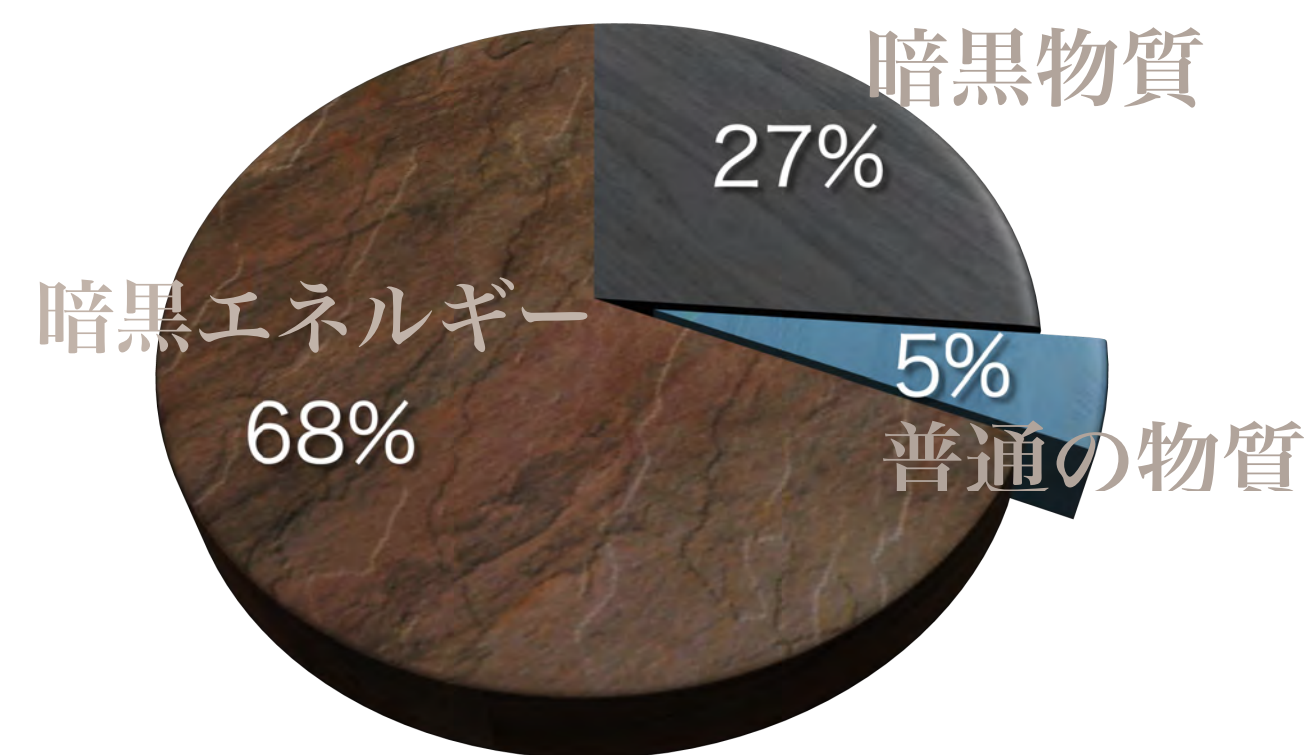
	Accuracy $\frac{\delta f}{f_0} [x10^{-18}]$
セシウム原子時計 (現在の1秒の定義)	200
イオントラップ原子時計*	0.94
光格子原子時計**	1.4
原子核時計***	0.15

* Brewer+2019, **McGrew+2018, ***Campbell+2012

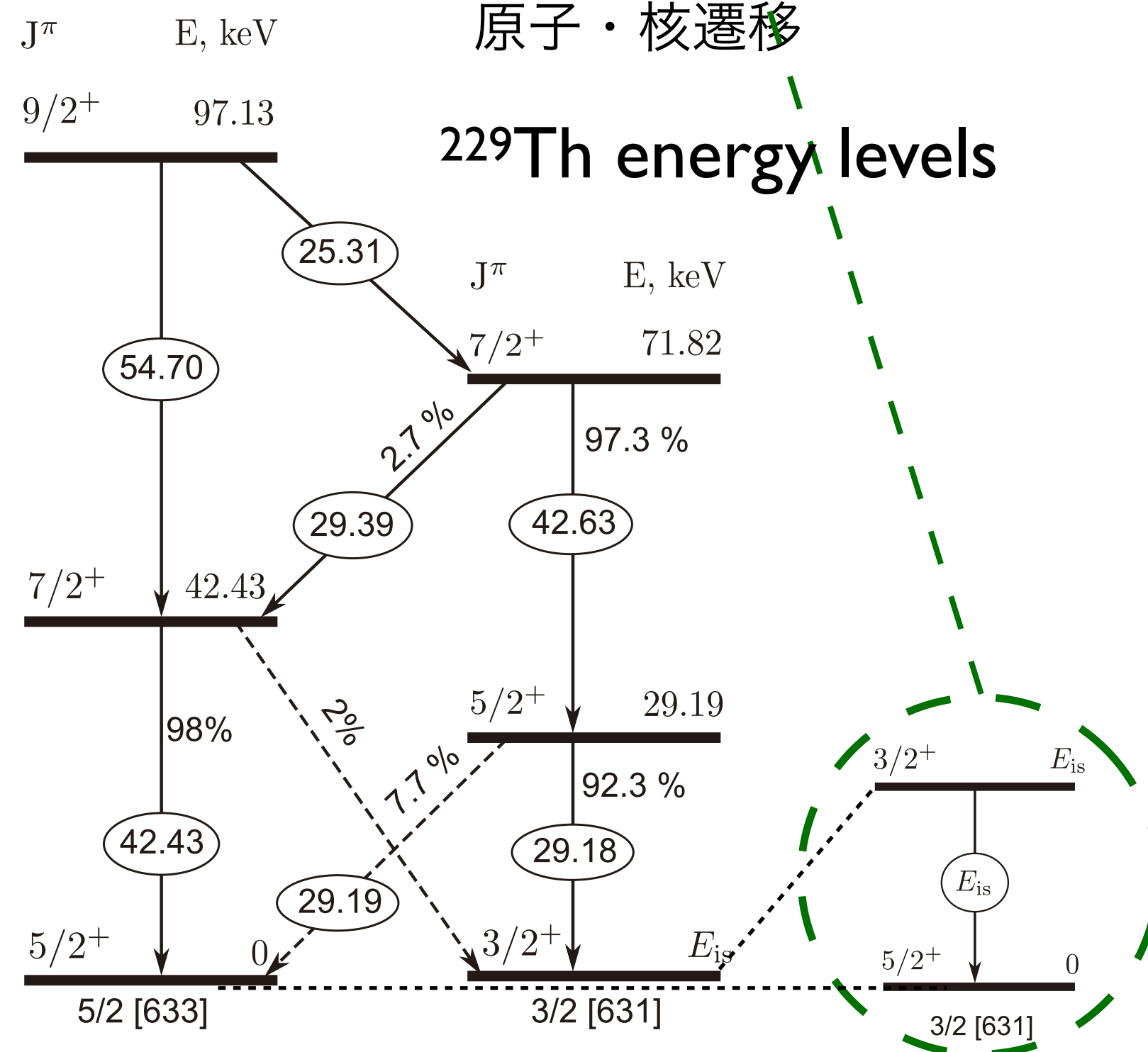
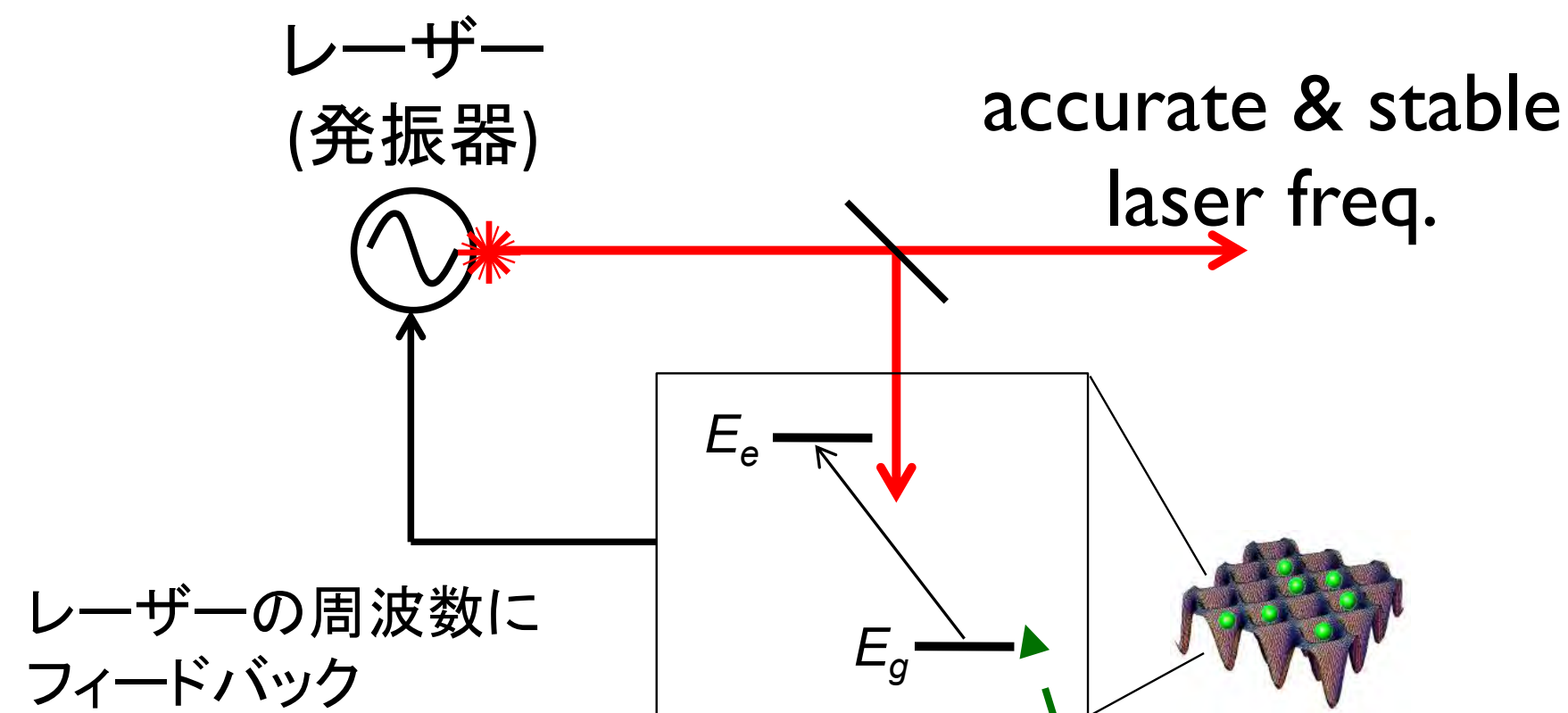
電磁的な外乱変動が精度を決める要因

物理定数の恒常性の検証を通して、宇宙の加速膨張の原因（暗黒エネルギー？）の理解につながる可能性
(e.g. Avelino+ 2006)

現在の宇宙のエネルギー密度

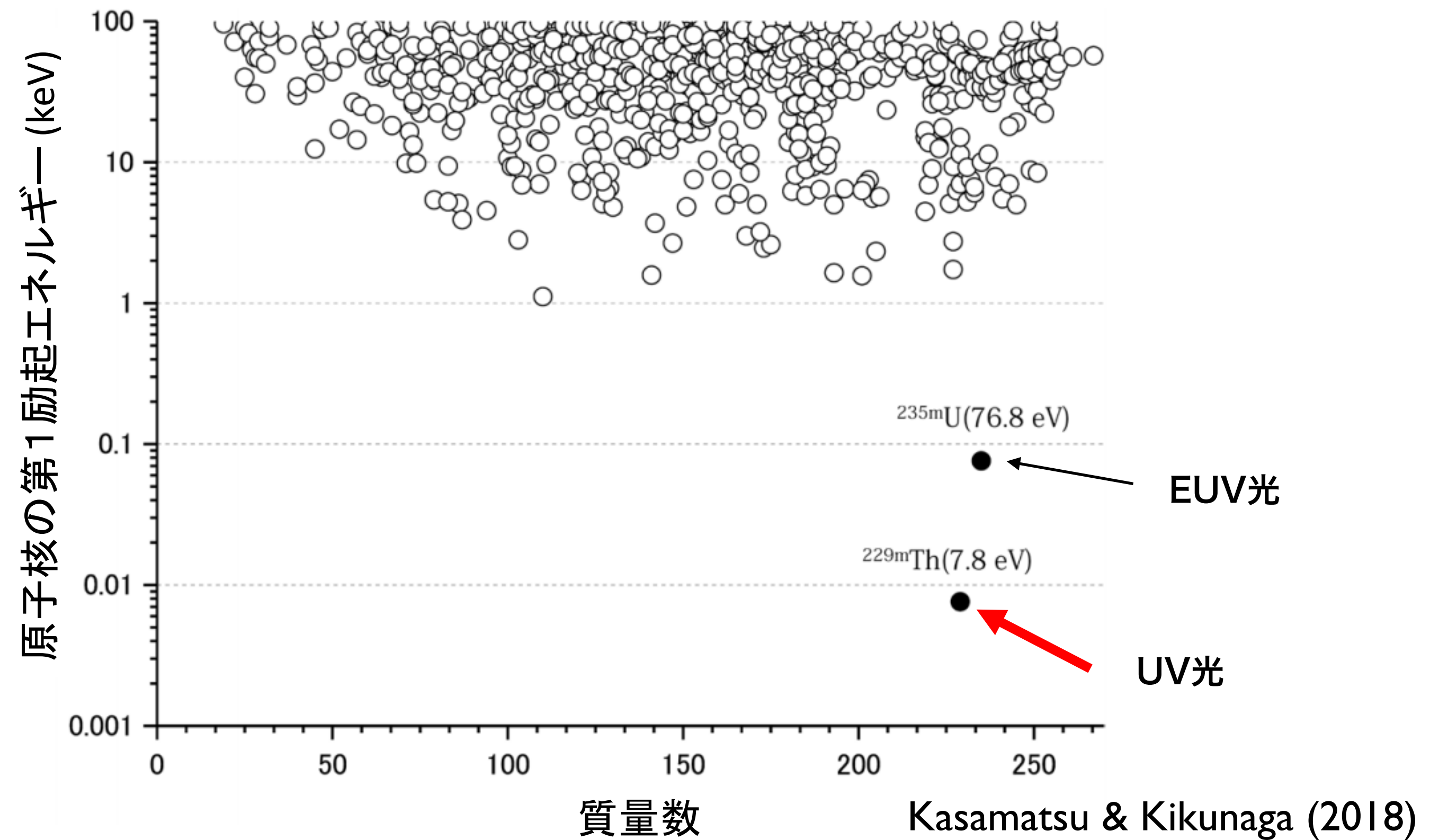


229Thは原子核時計唯一の候補



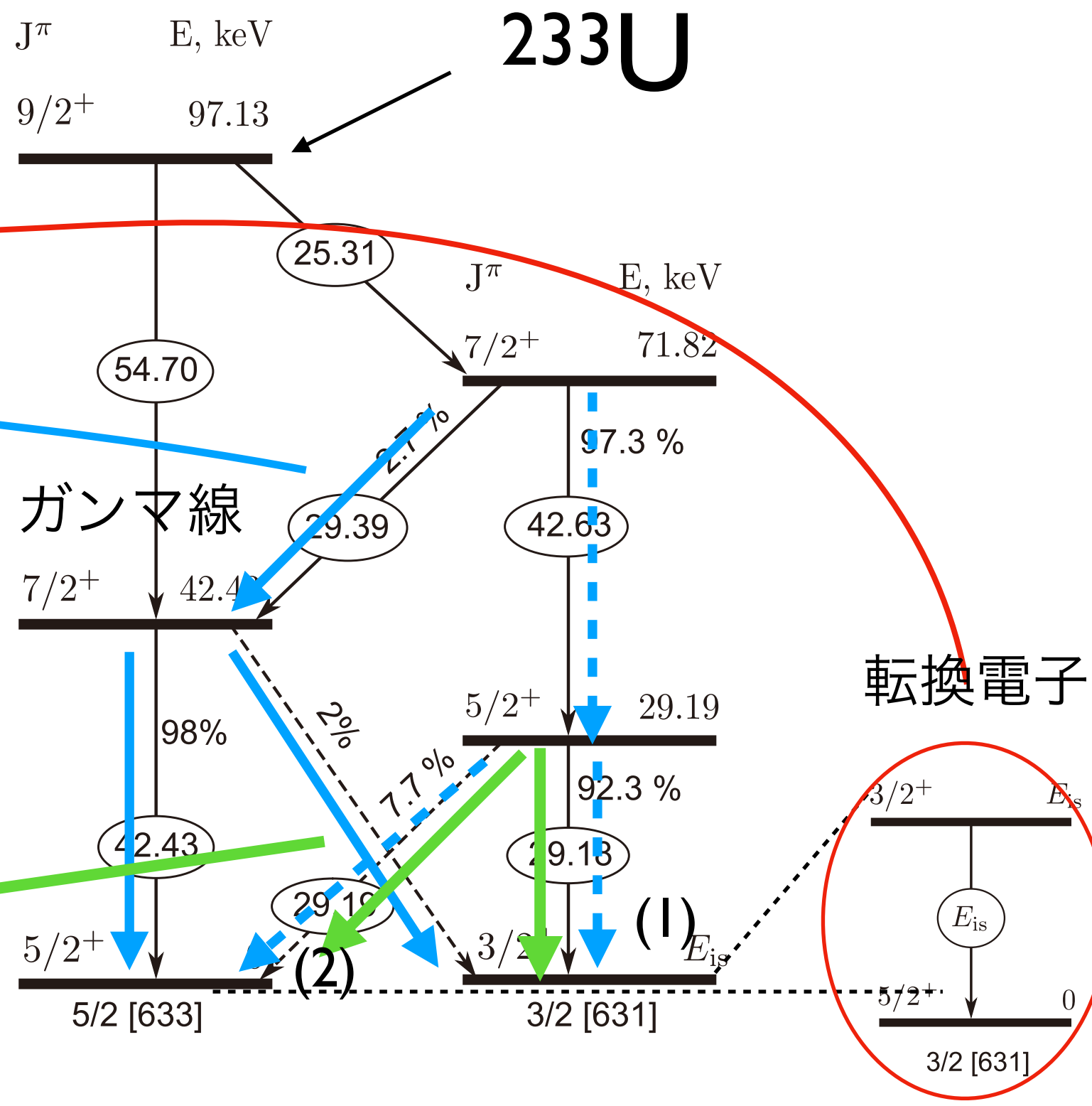
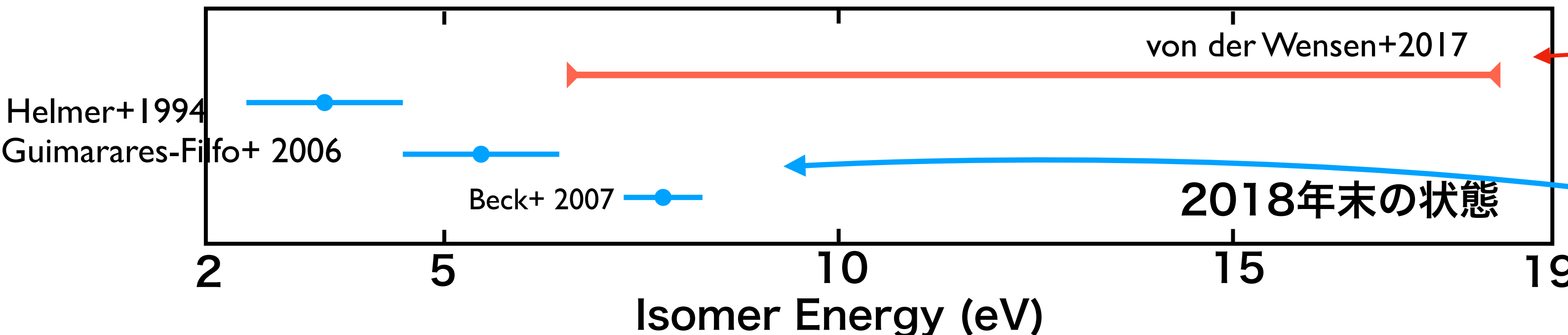
Kazakov+2014

229Th はレーザーと共振できる唯一の原子核

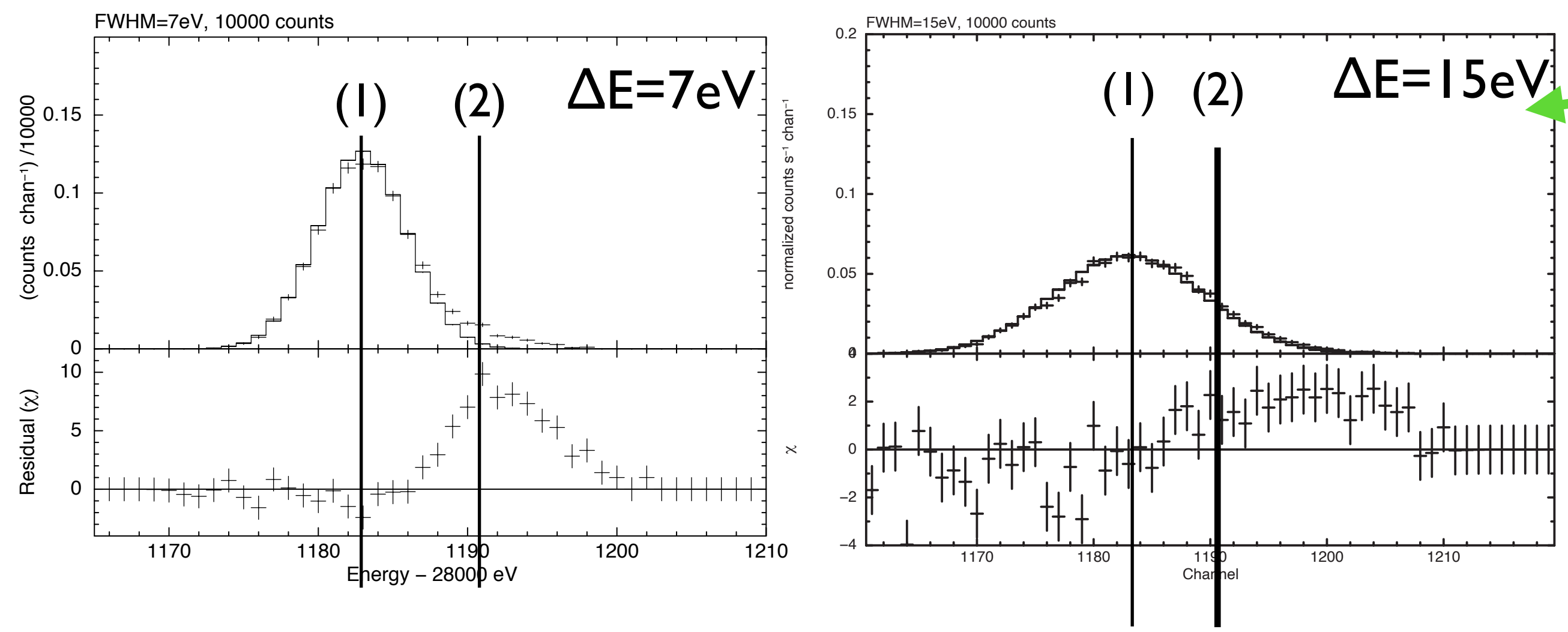


実はエネルギー準位はよくわかっていなかった

Constraints of ^{229}Th isomer energy



29.2 keVのdoubletのシミュレーション (エネルギー差=8eVを仮定)



我々の研究目標

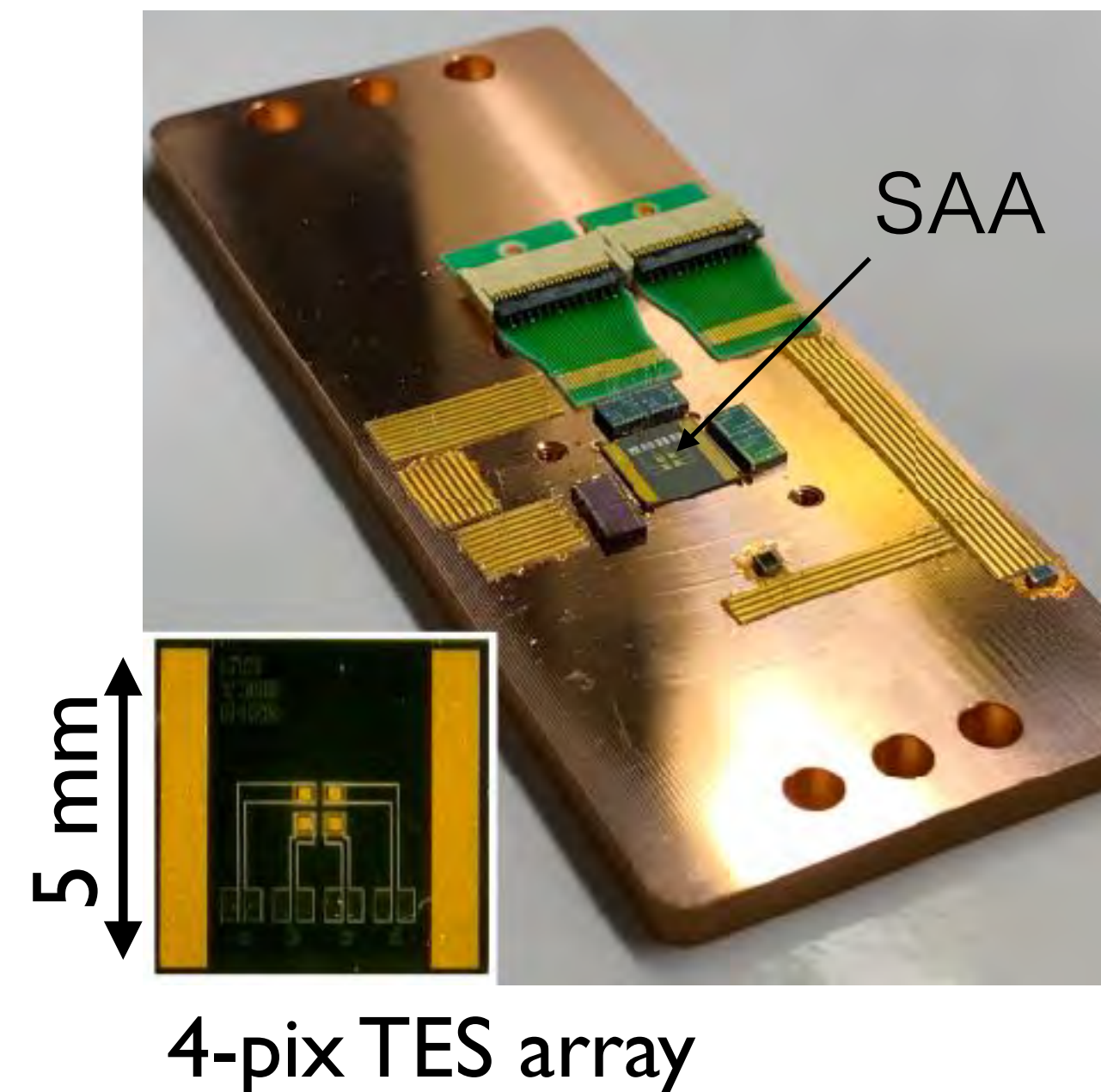
- ・優先順位 1 : (2)のエネルギーと(1)(2)の分岐比をSPRING-8を使った共鳴散乱実験でMasuda+2019 が決定しているので, (1)+(2)のブレンドの絶対エネルギーを高い精度で決定する。
- ・優先順位 2 : 輝線の非対称性から(1)(2)を独立に決定する。

Thorium TES プロジェクト



日本原子力研究開発機構および東北大学の施設に希釈冷凍機を持ち込み実験

開発したTES型マイクロカロリメータアレイ(4素子)と検出器ヘッド

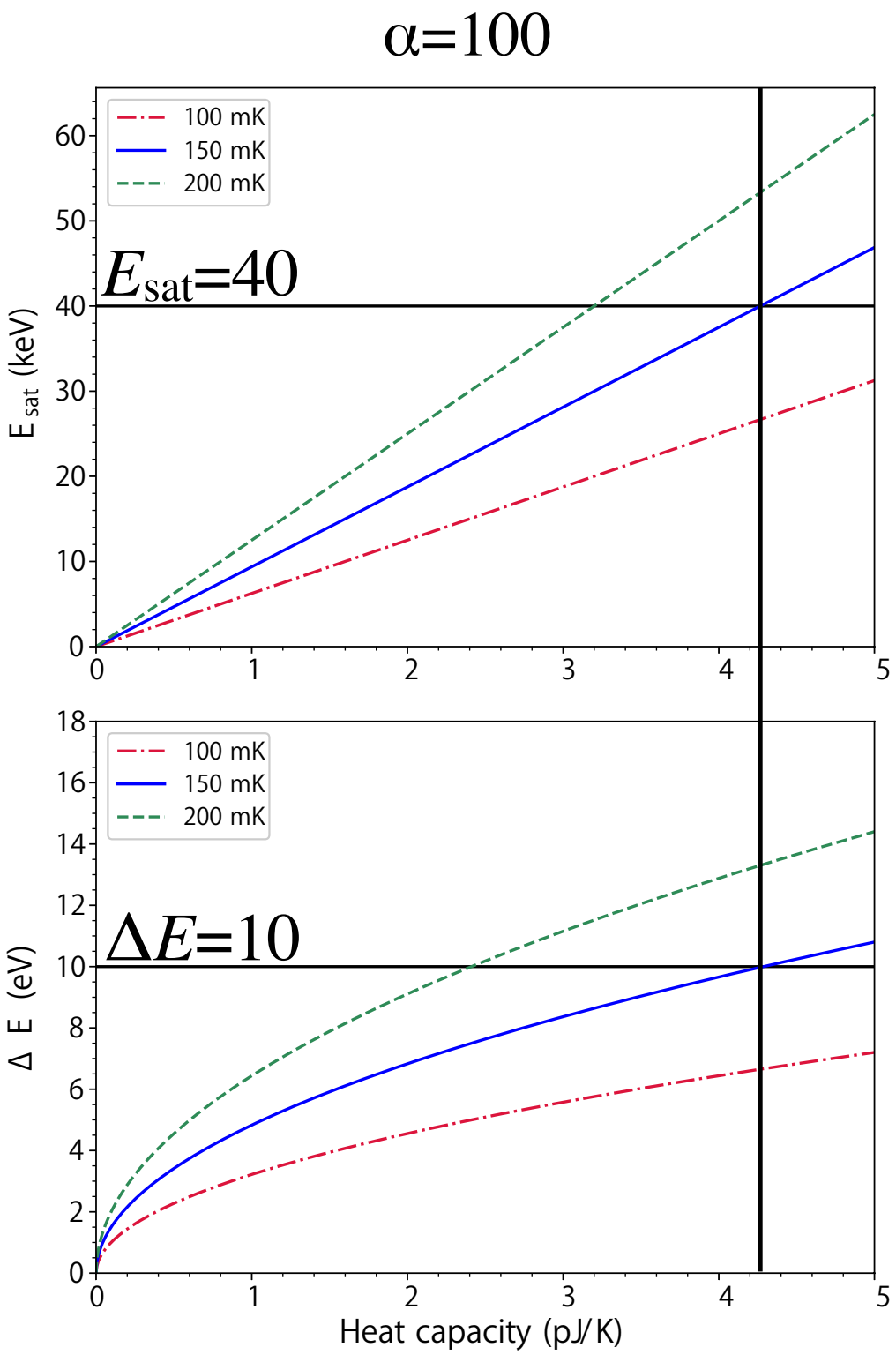


- ・ 2014から準備を開始。
- ・ 科研費B(2017-2021)で実施中
- ・ 優先順位1の目的についての結果を2019年秋にPRLに論文発表 (PRL editor's suggestion)
- ・ 優先順位2の目的のためのデータ解析中。

JAXAの主な責任範囲:

- ・ TES microcalorimeter array
- ・ 極低温電子回路
- ・ 検出器ヘッド
- ・ データ解析

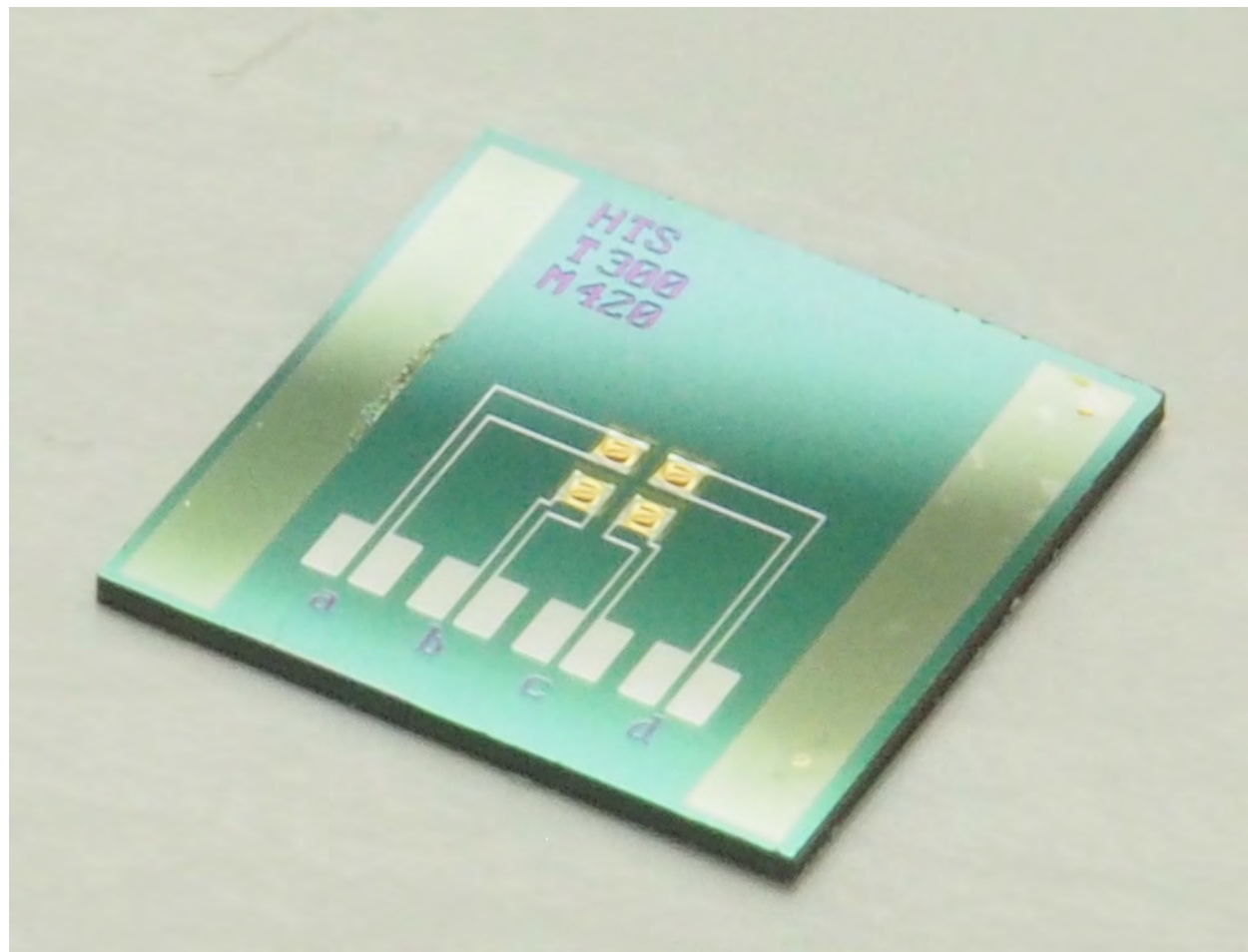
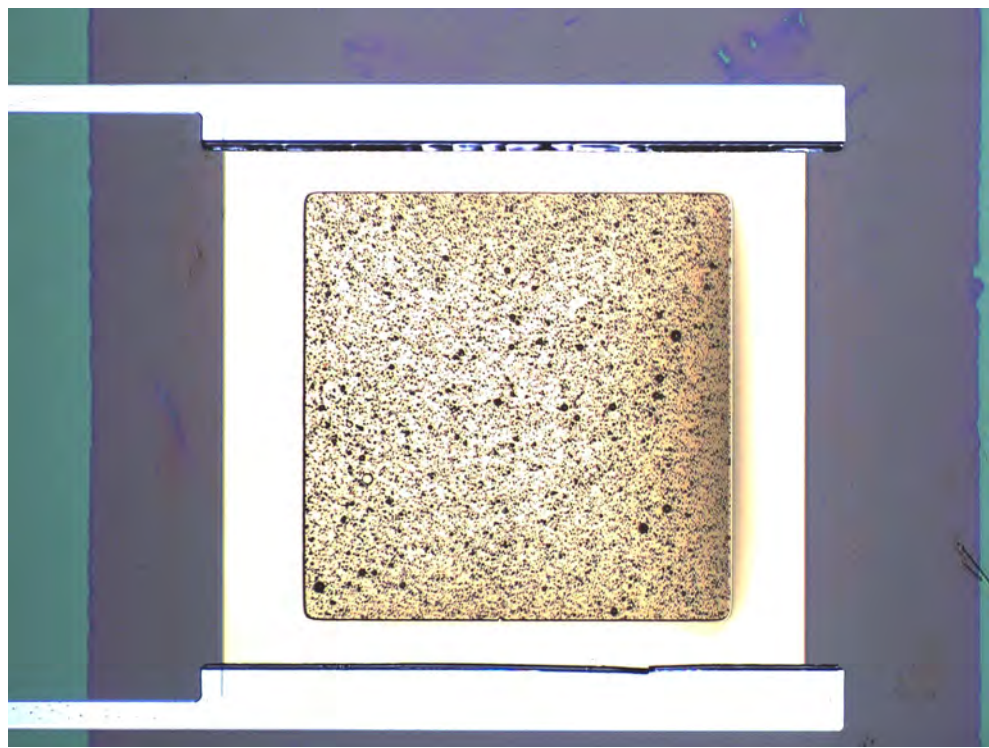
TESマイクロカロリメータの設計と製作



$T_c=150\text{mK}$

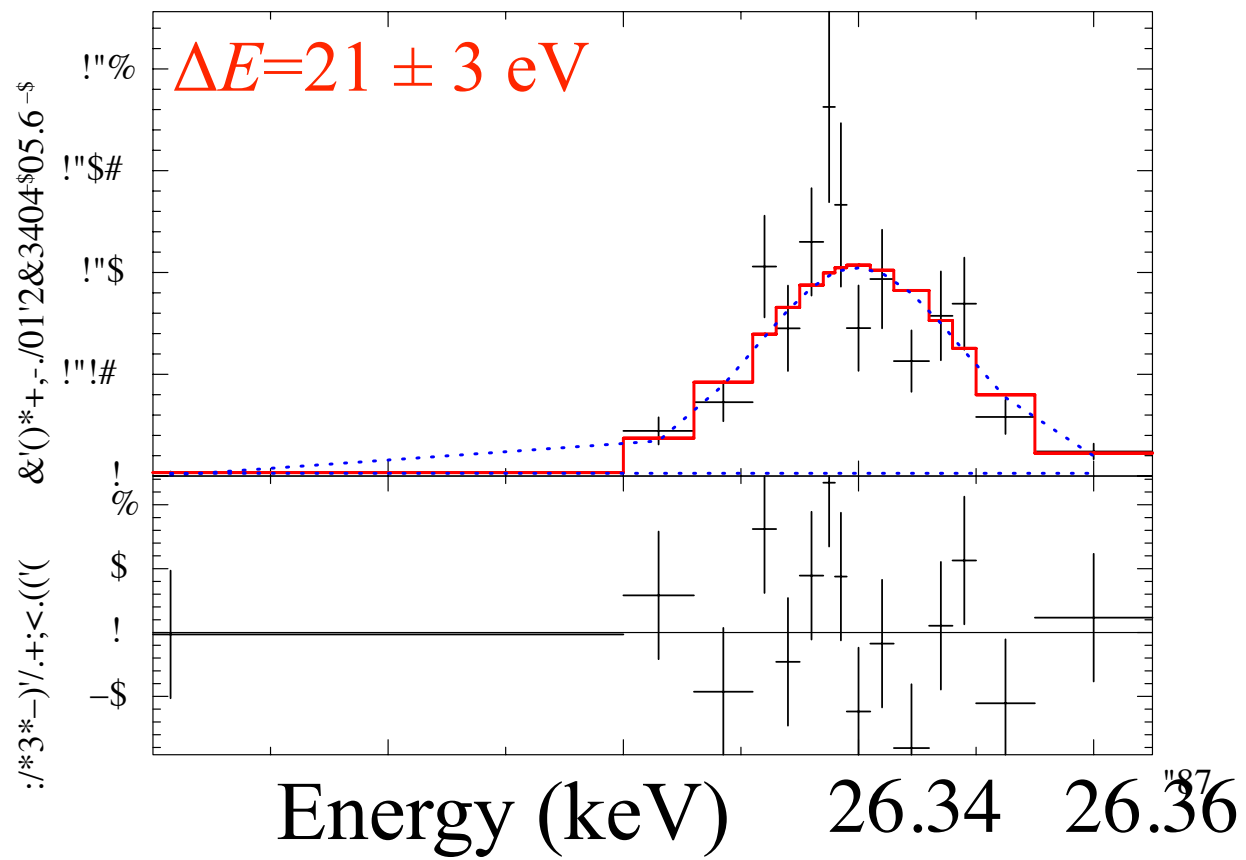
$C=4.2\text{pJ}$

300x300x4.0 μm gold



	目標値	実測値
Au厚さ (μm)	4.0	3.6
転移温度(mK)	150	164
Esat (keV)	40	(51)*
ΔE (eV)	10	(11)* 14@5.9keV 21@26keV

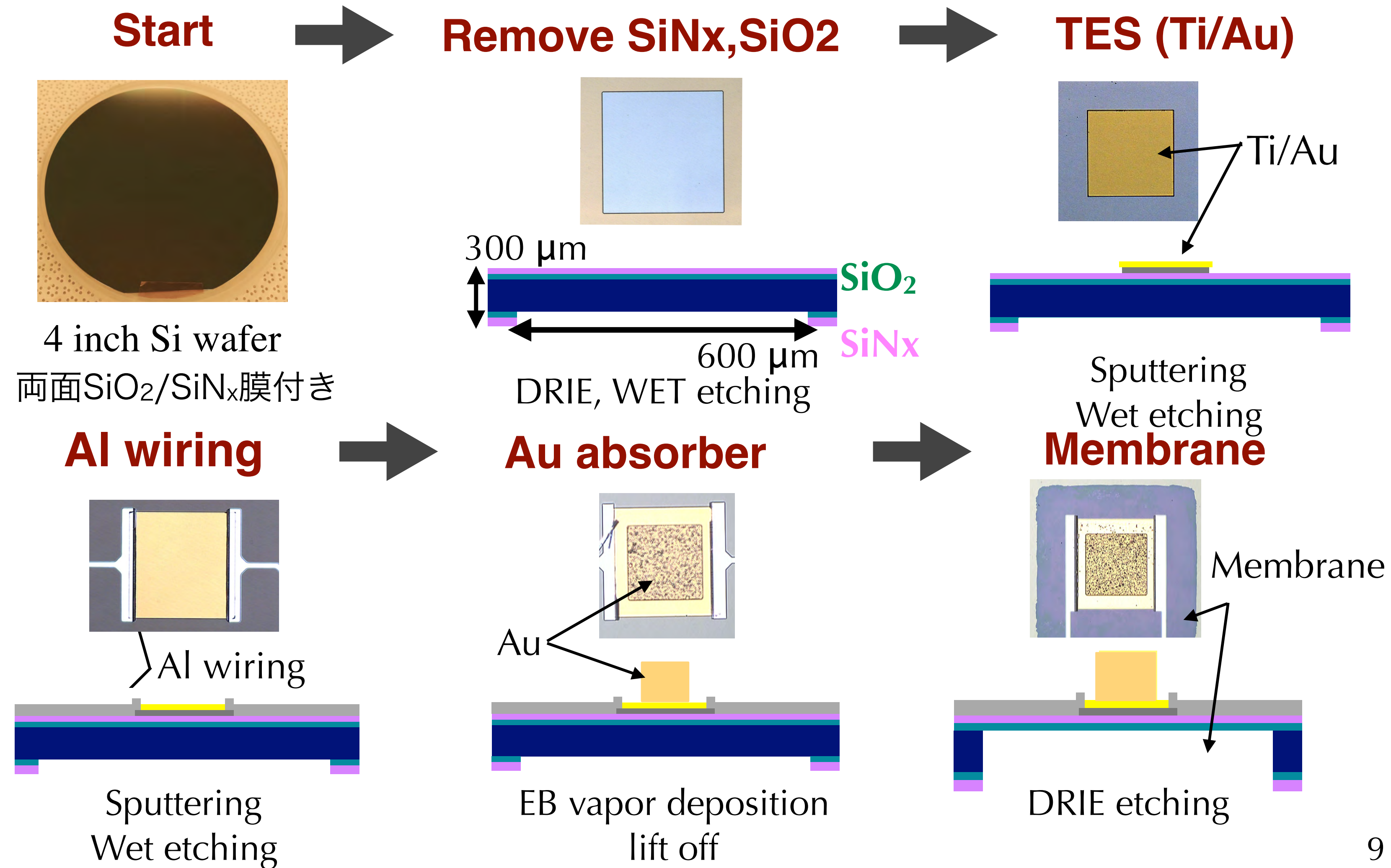
*上記実測値からの予想値



Muramatsu+2017

製作プロセス

TES sputtering (都立大)以外は, JAXA
相模原のクリーンルームで製作



TES membrane
sputtering



Al sputtering
deposition



Photo mask
alignment



EB vapor
deposition



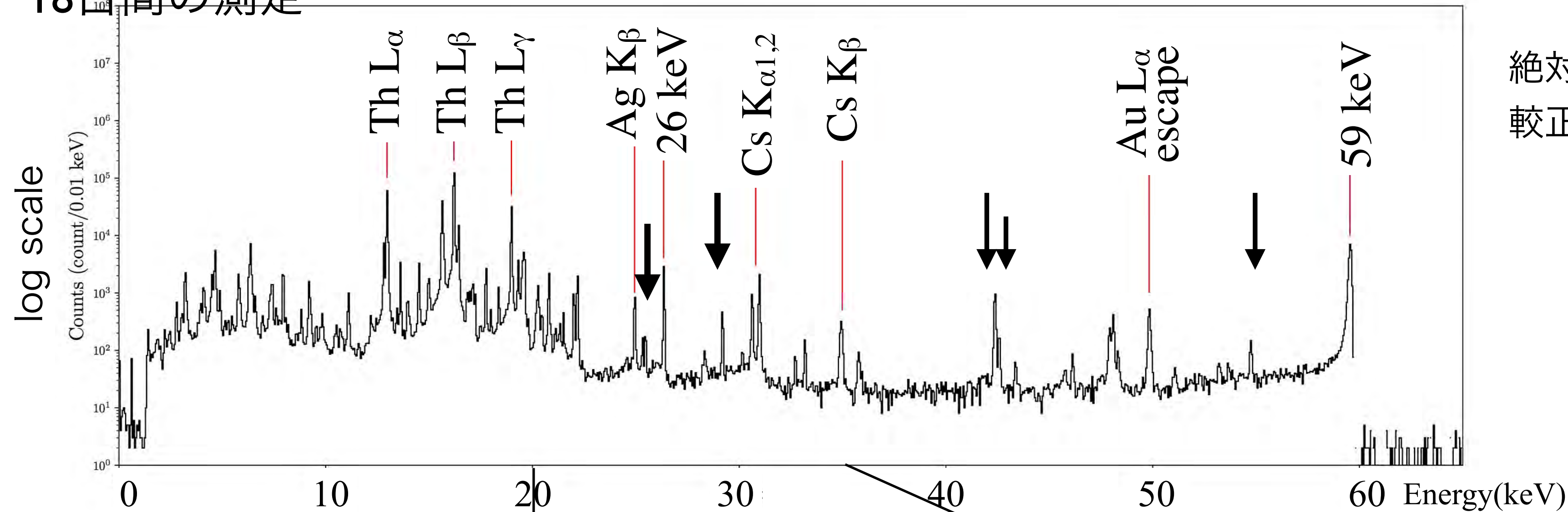
Wet etching



Dry etching
(ICP, DRIE)

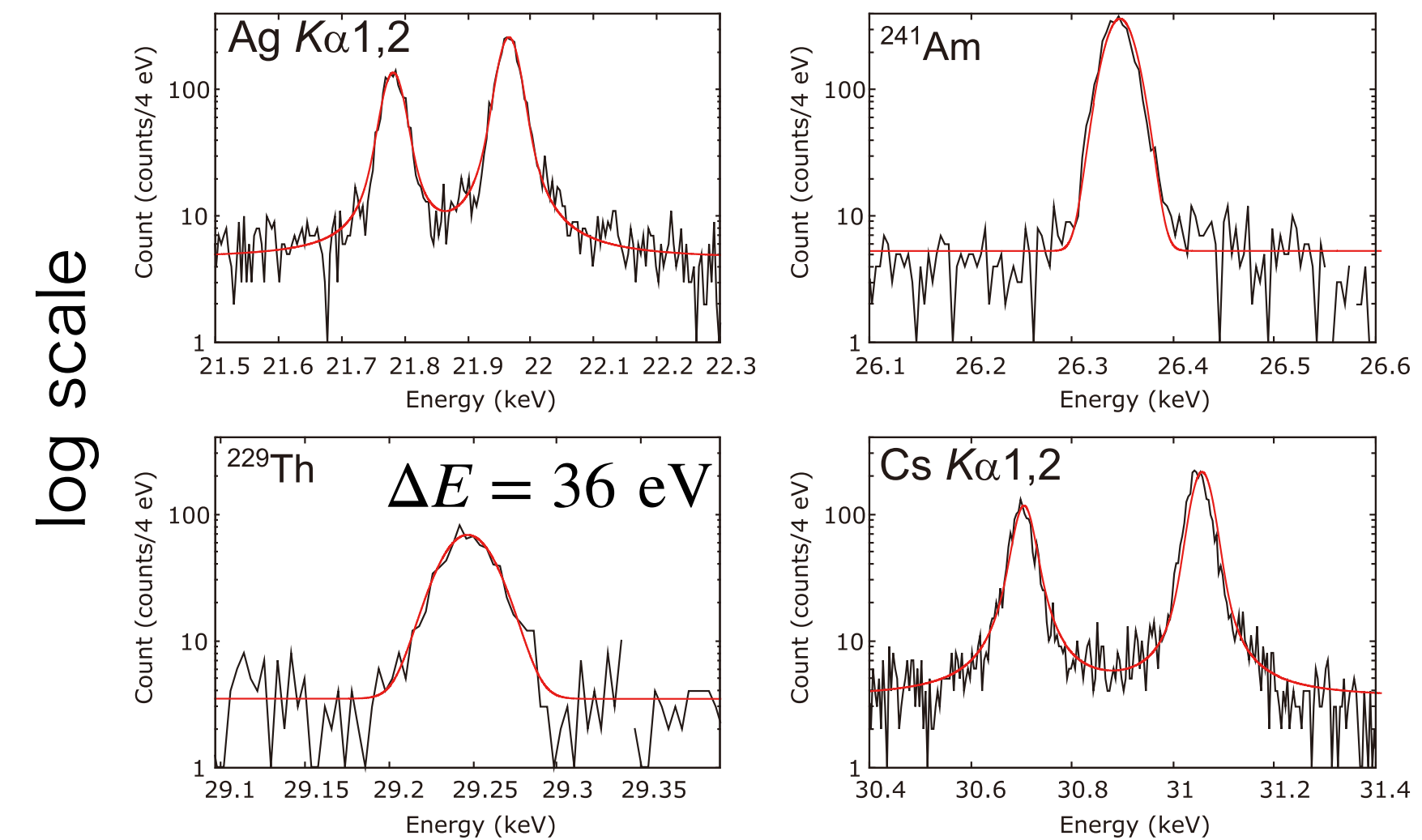
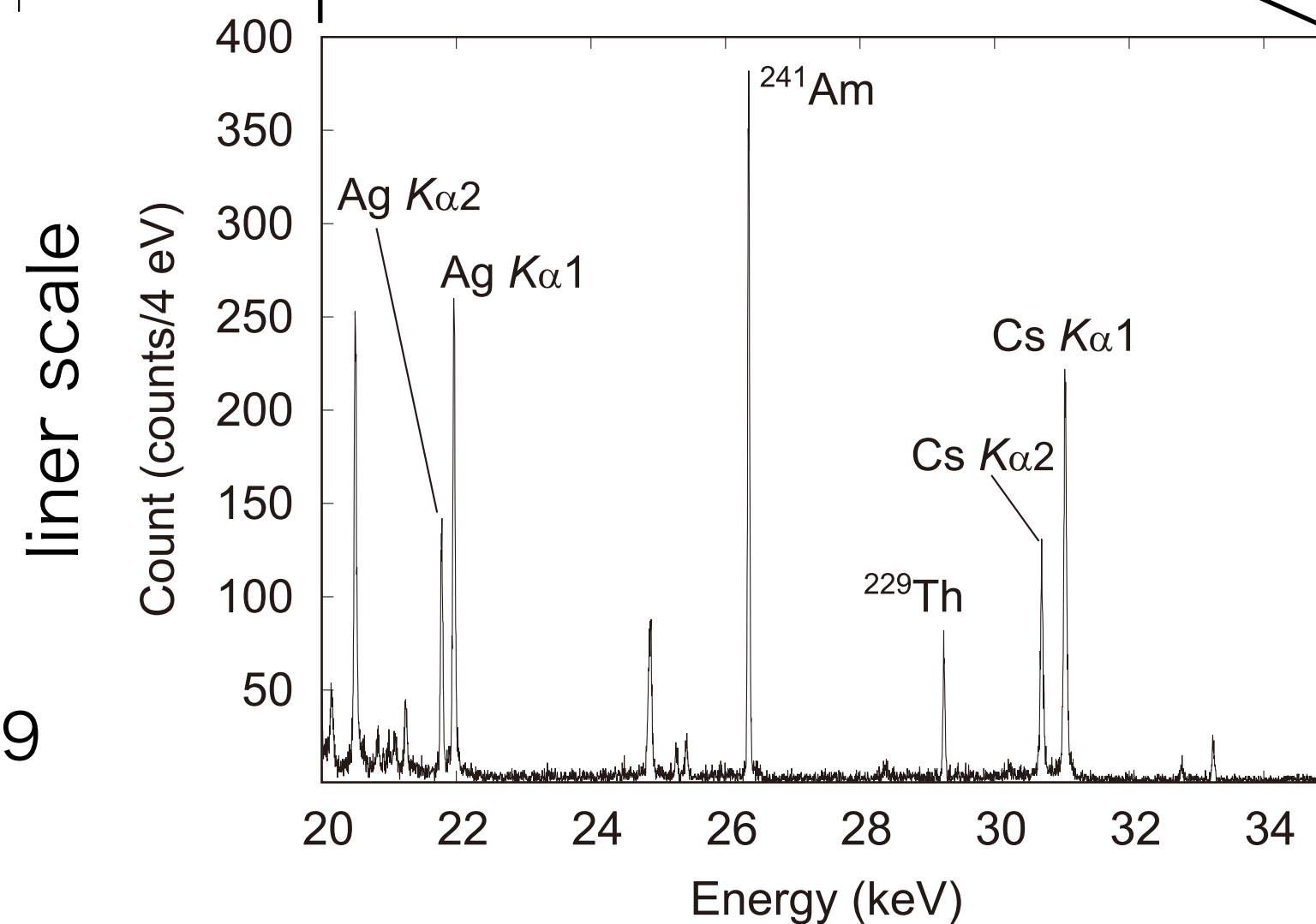
日本原子力研究開発機構での実験結果

18日間の測定



絶対値測定なのでエネルギー較正が重要。
較正用線源を同時に照射

29 keVでの分解能は36eV に悪化。

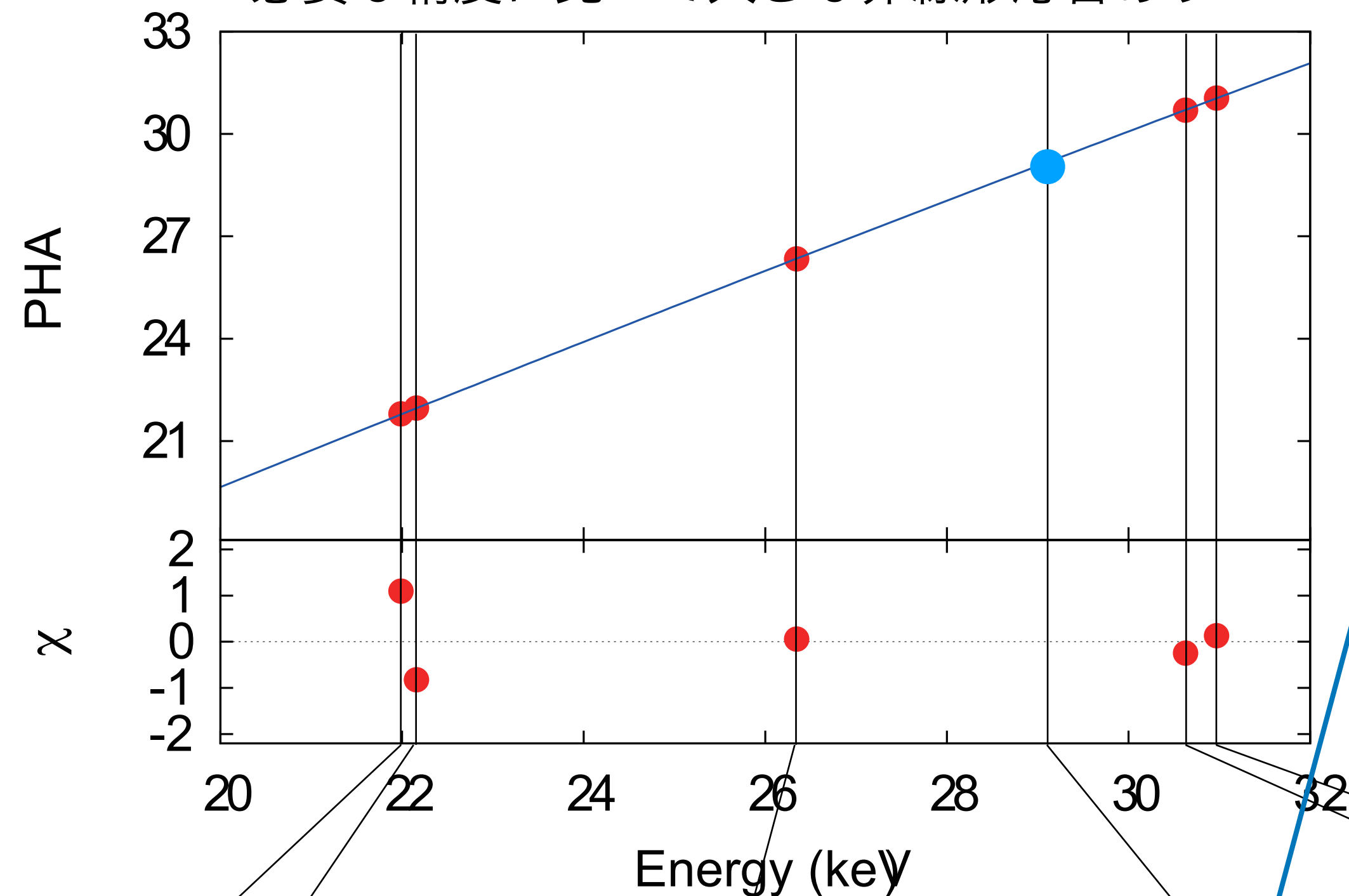


Yamaguchi+2019

Isomer準位

エネルギー較正曲線

必要な精度に比べて大きな非線形応答あり



$$E_{IS} = 8.30 \pm 0.45 \text{ (sys)} \pm 0.81 \text{ (stat)} \text{ eV}$$

統計誤差(stat)

Th ラインセンター

0.67 eV $1/(1-b)$

較正ラインセンター

0.34 eV $1/(1-b)$

系統誤差(sys)

較正ラインエネルギーの不確定性 (Hyper fine structures, chemical shift, shake off)

0.22 eV $1/(1-b)$

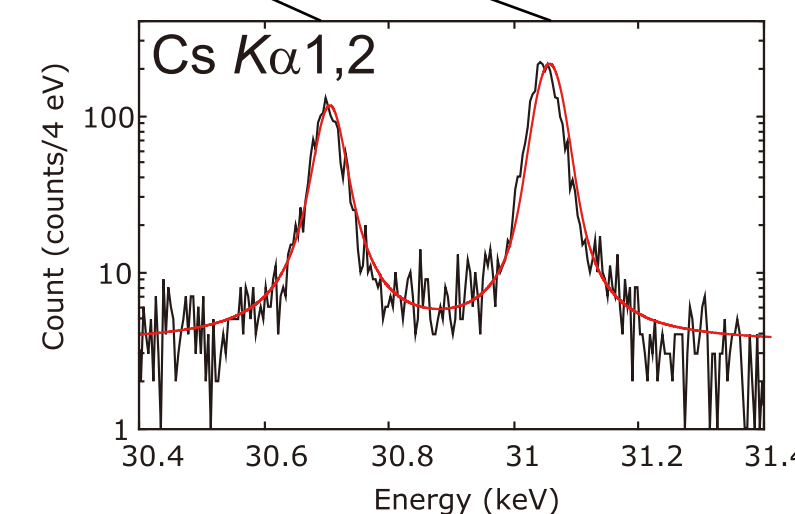
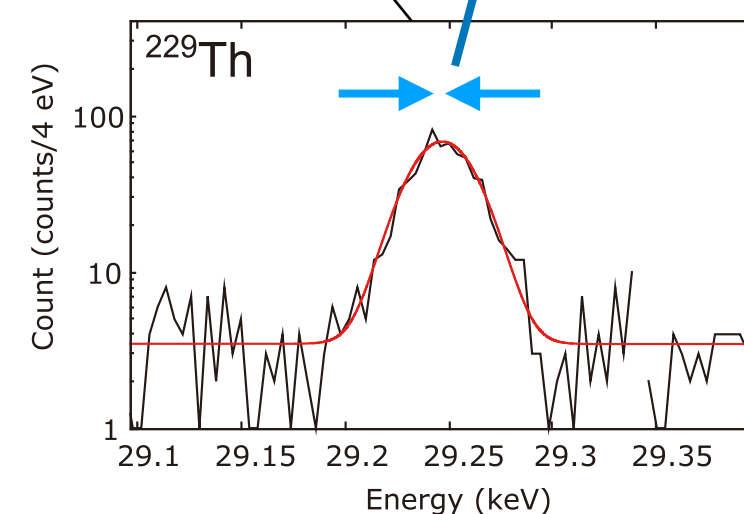
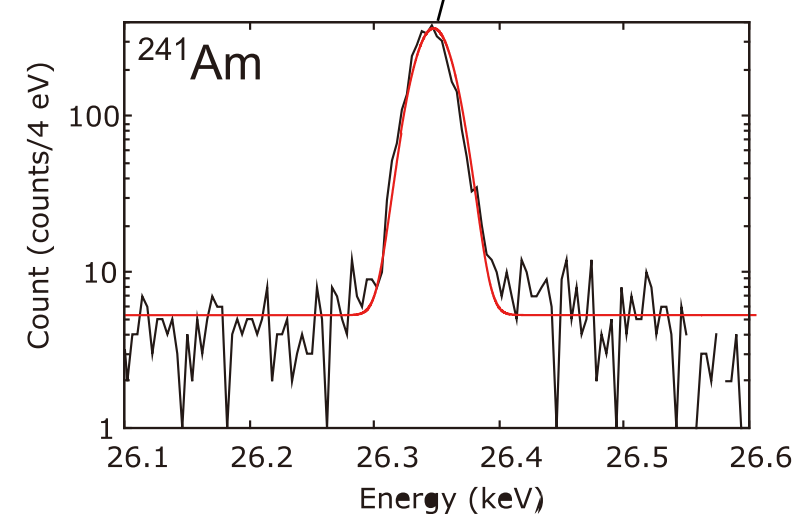
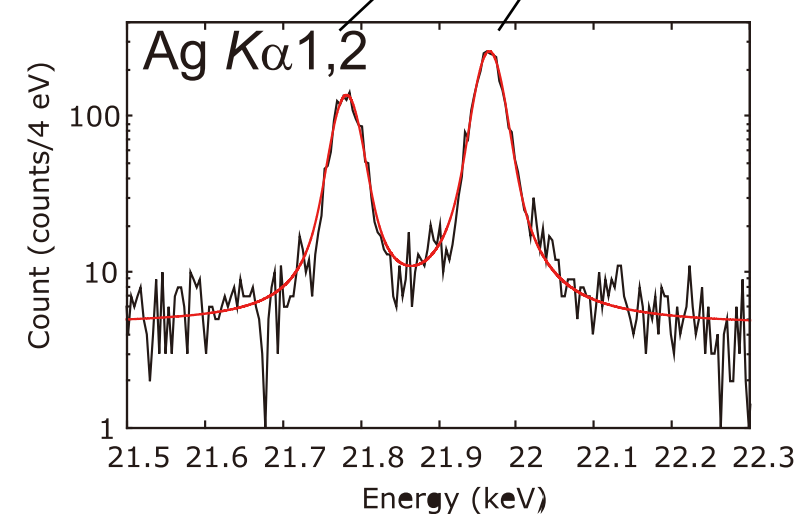
較正曲線の選択

0.25 eV $1/(1-b)$

E_{CR} (Masuda+2020)

0.007 eV $b/(1-b)$

branching ratio (b) (Masuda+2020) 0.027



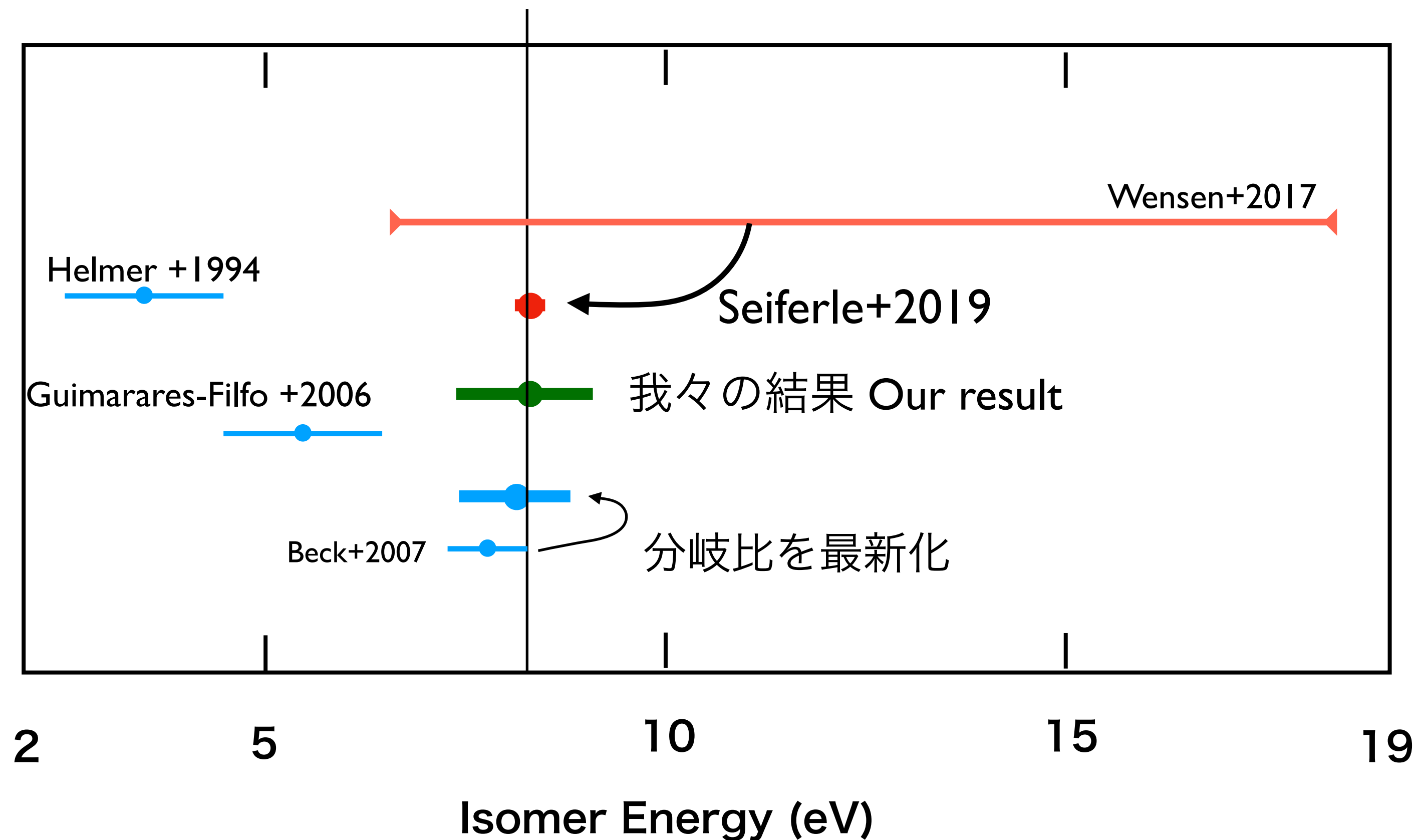
$$E_{IS} = \frac{E_{CR} - E_{Th}}{1 - b}$$

Yamaguchi+2019

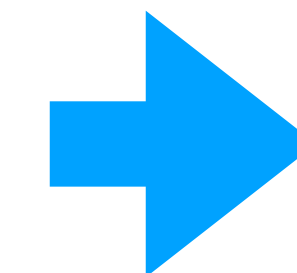
2020年の状況

3つの異なる方法による測定結果が $8.2 \text{ eV} = 151 \text{ nm}$ を示している。

Results of three different methods indicate $8.2 \text{ eV} = 151 \text{ nm}$.



注：2020年に、ハイデルベルク大学グループがMMCによる結果のpreprintを出した。その値は我々の値と矛盾しない。

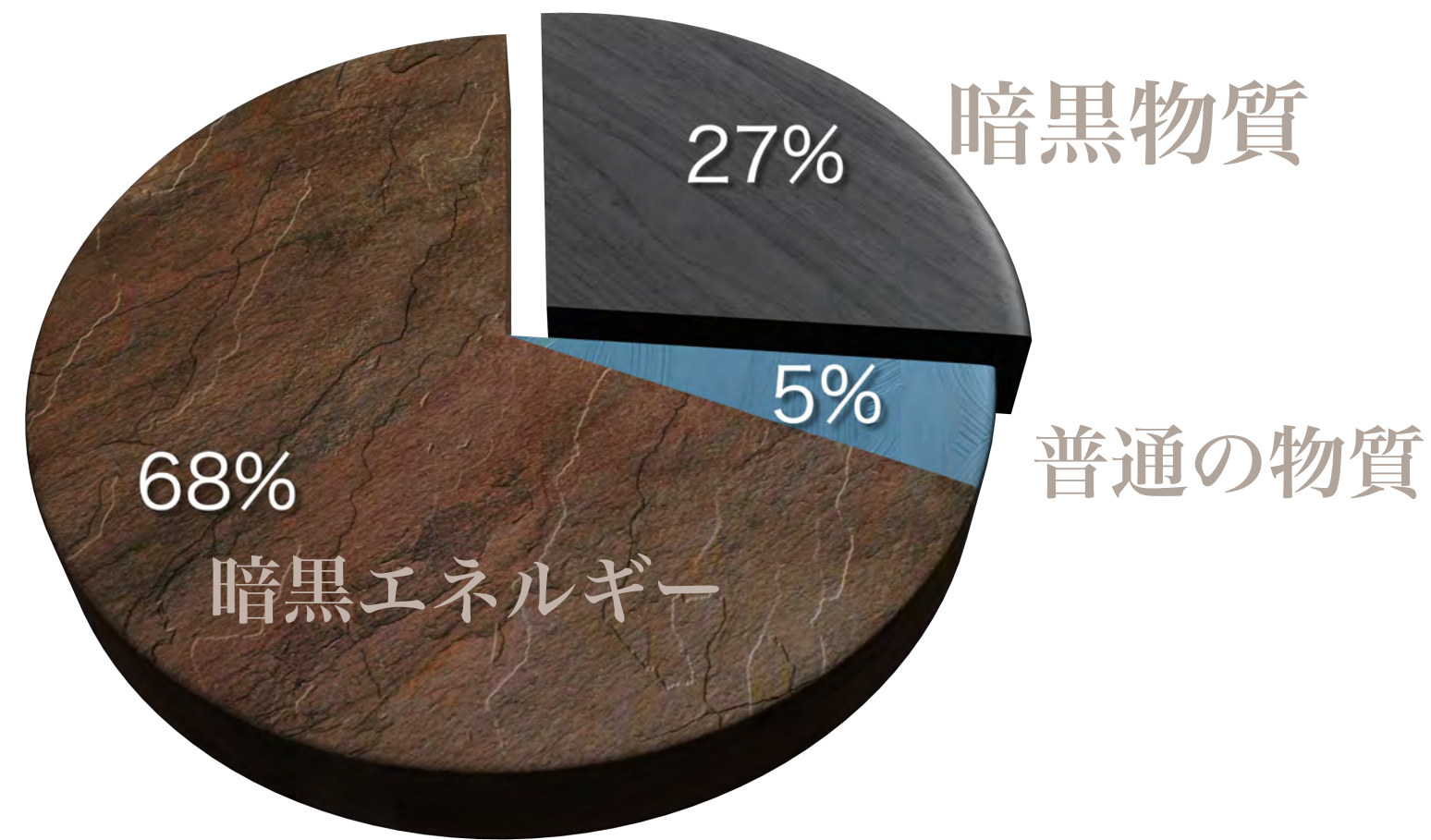


今後は、レーザー分光実験が主力に

太陽アクシオン探査

暗黒物質と太陽アクシオン

現在の宇宙のエネルギー密度



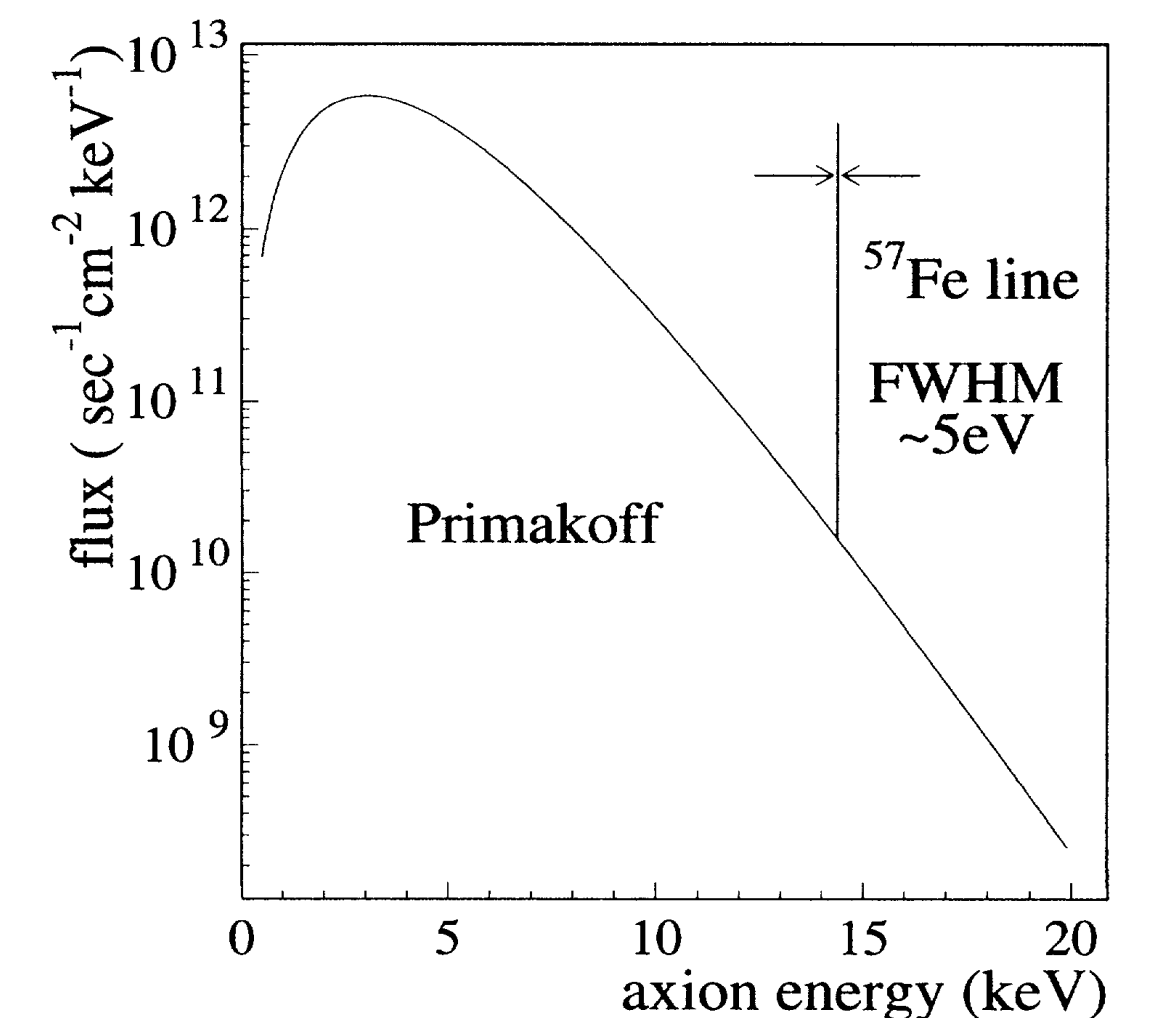
- もしもアクシオンが存在すれば，太陽はアクシオンの発生源（このアクシオンは暗黒物質ではない）
- 14.1keVに線スペクトルが存在する可能性（強度はアクシオンの質量に依存）
- エネルギー分解能の高いマイクロカロリメータは線スペクトルに高い感度
- 「アクシオン変換物質」の量の少なさは，マイクロ波信号多重化による多素子化で補うことができる。

暗黒物質の有力候補（全てではない）

候補	背景物理	質量範囲
WIMP	超対称性	> GeV
ステライルニュートリノ	ニュートリノ振動	> keV
アクシオン	強い CP 問題	> μeV
原始ブラックホール	ビッグバン	

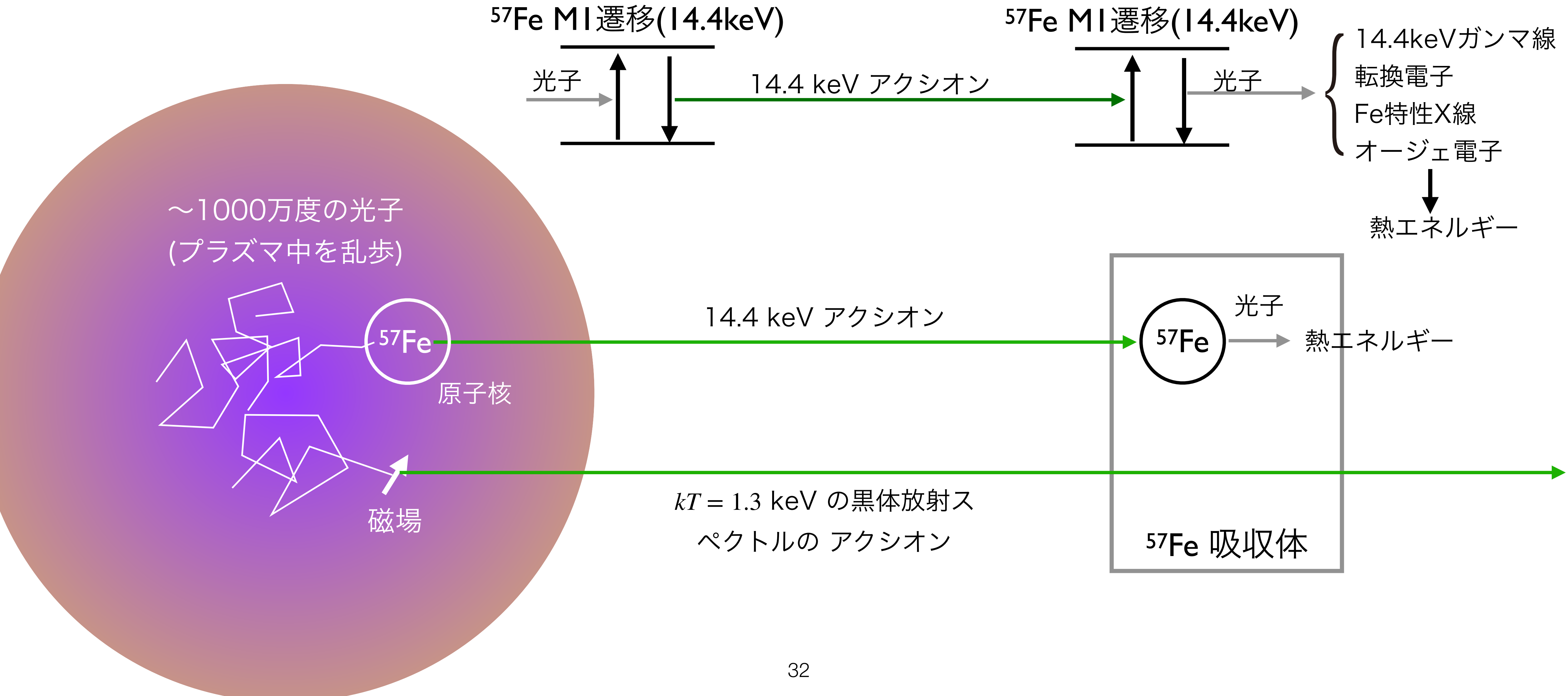
注：最初の3つは，素粒子の標準模型を超えた未知の新粒子。

太陽アクシオンの予想スペクトル
Moriyama (1995)



太陽アクシオン放射と検出の原理

アクシオンは磁場を介して光子へ, また光子から転換する (Primakoff 過程)



アクシオン探査用素子の研究開発

2017年から準備を開始, 小規模アレイ素子の研究開発を科研費B (2018年-2021年度) で実施中
中規模アレイによる実験を科研費学術変革(2020年度半ば開始)で開発開始

JAXA,, (国立天文台), 早稲田大学, 九州大学

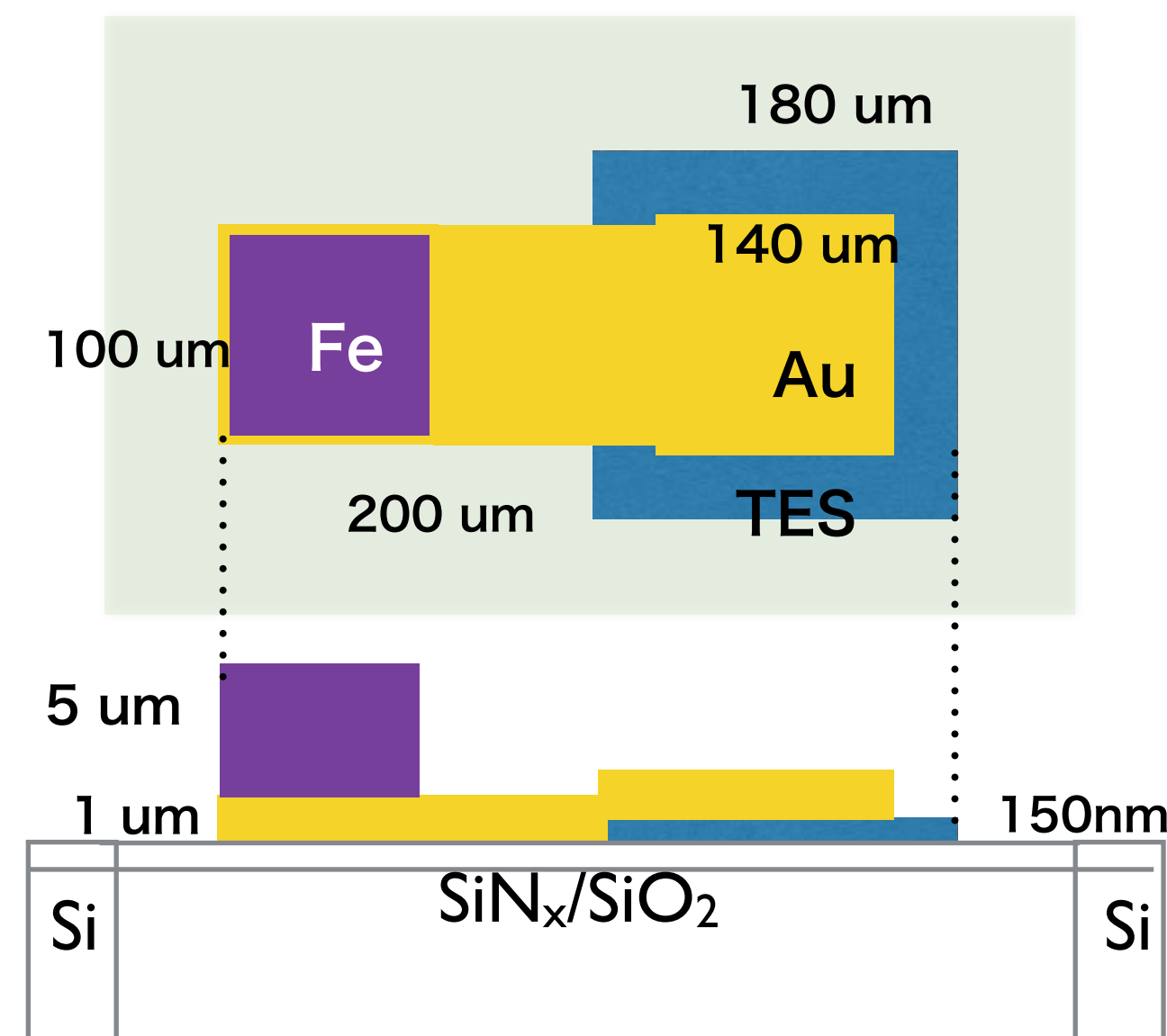
太陽アクシオン探査用TES型マイクロカロリメータの課題

- ✓ 磁性を持つ鉄をアクシオン吸収体（アクシオン-熱変換物質）として使わなければならない。
 - TESと鉄吸収体を幾何学的に離して配置する必要
 - 必要な距離は？
 - マイクロカロリメータとして動作して高いエネルギー分解能($\sim 10\text{eV}$)がえられるのか？
 - 同位体分離した ^{57}Fe は高価($\sim 1\text{M円/g}$)。
 - 収率が高く再利用可能な吸収体形成方法 =電析による成膜
- 大きな吸収体総質量を得るために大規模アレイ化と極低温信号多重化が必須

素子の設計(1)

素子の基本コンセプト

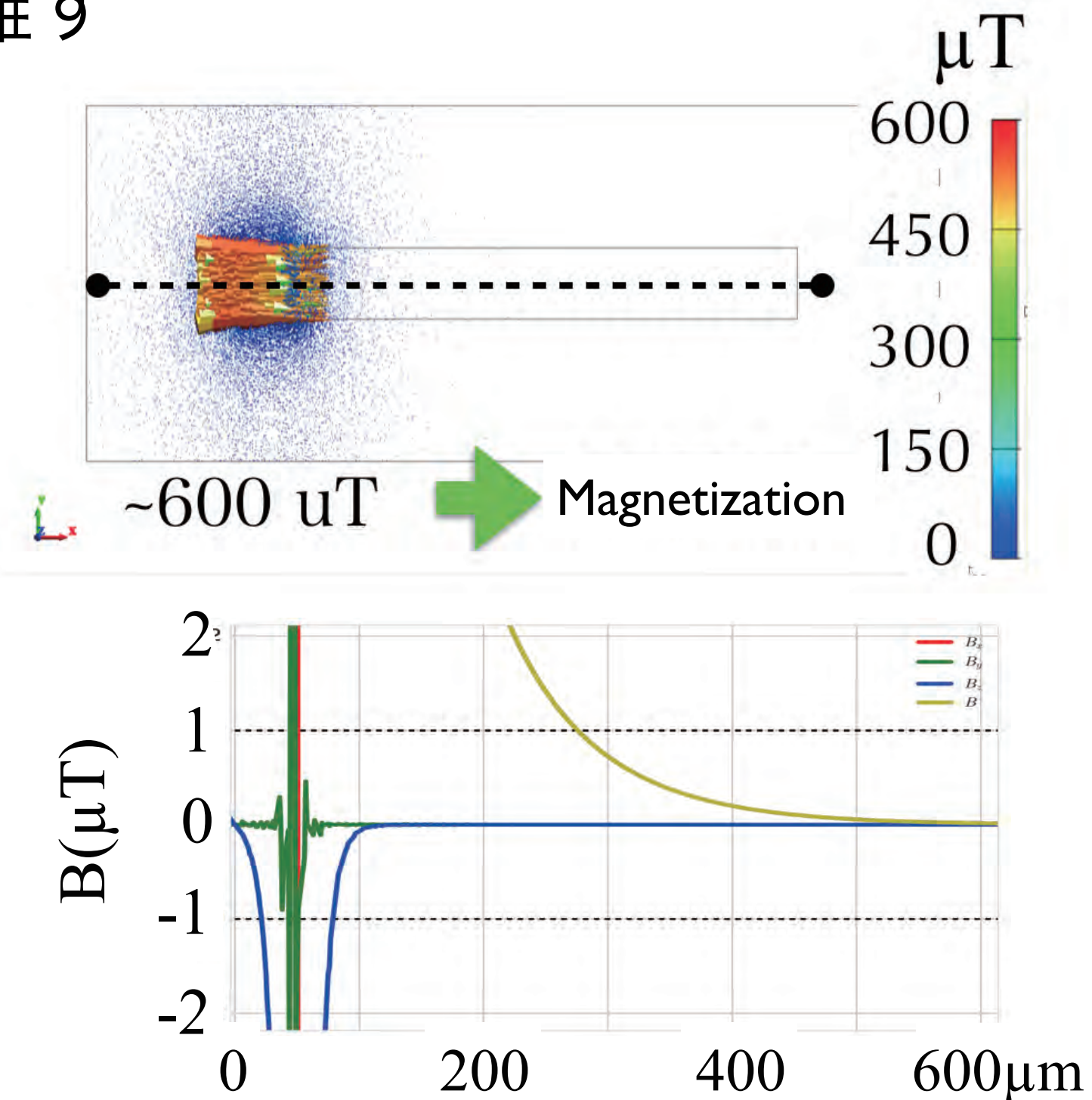
金の熱伝導体で接続し，鉄をTESから離す



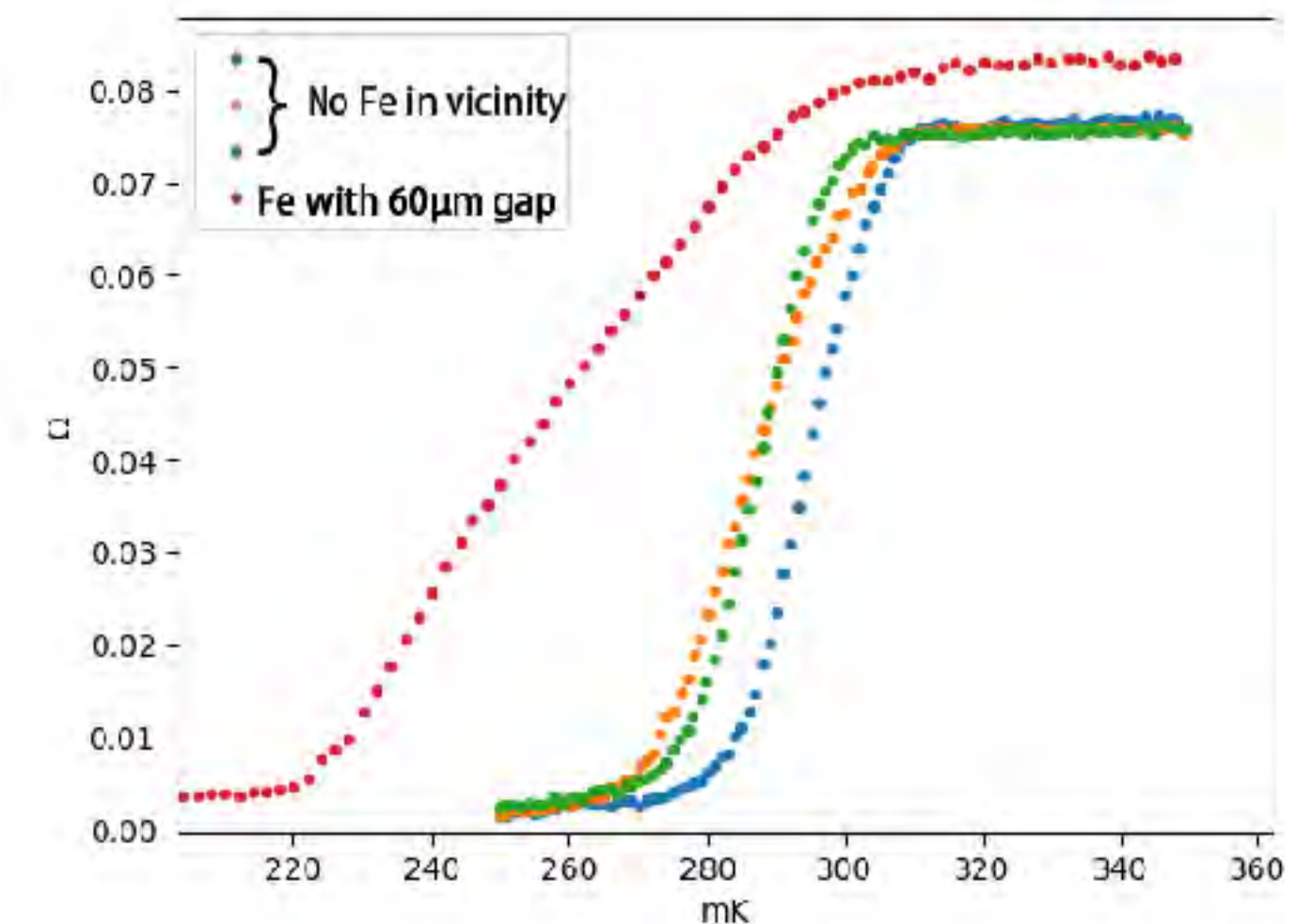
どれだけ離せばよいか？

Condition: $B_{\perp} < 1 \mu\text{T}$ at TES

Konno+2020



地球磁場で磁化した鉄薄膜が、
磁気シールド内で作る磁場を有
限要素法でシミュレーション

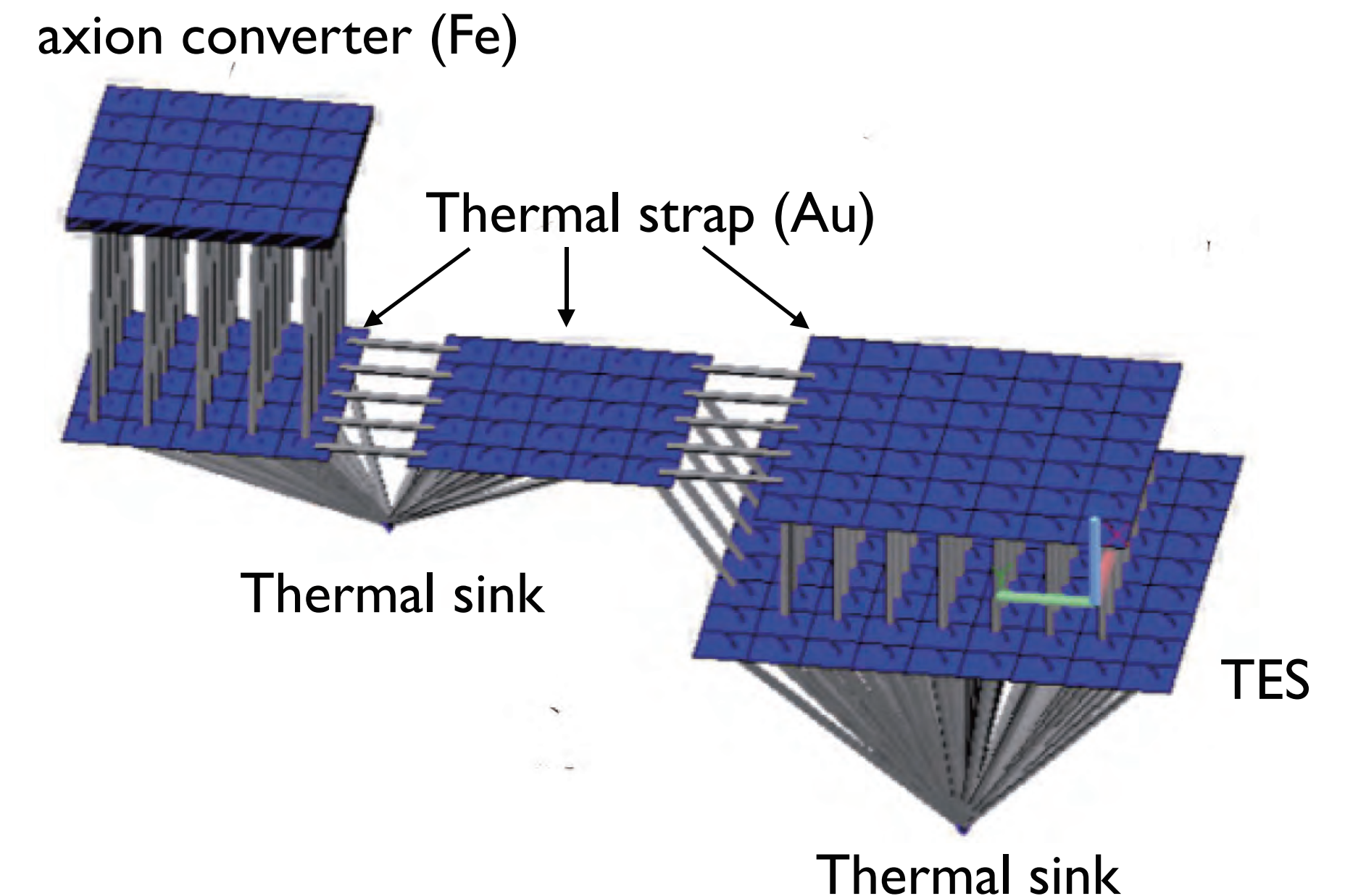
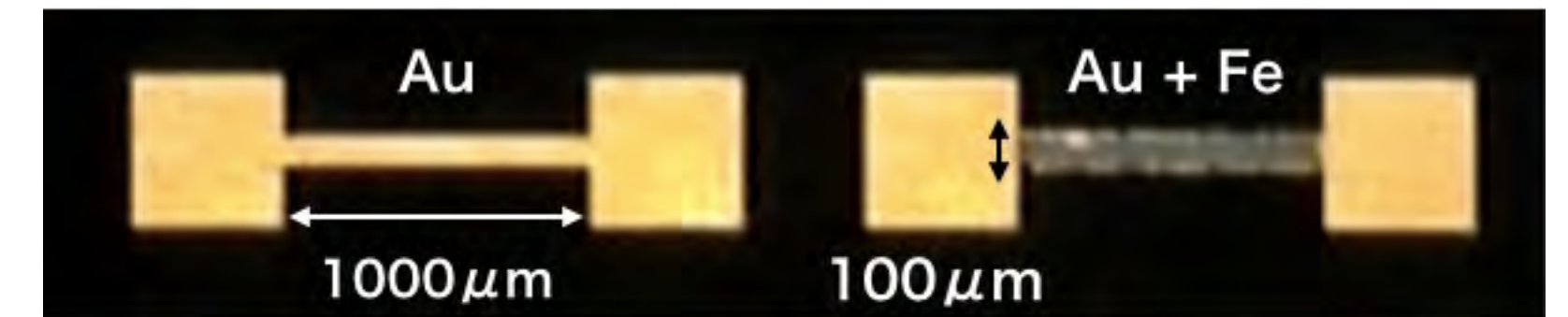


TESの近くに鉄薄膜を配置した
素子を試作し，超伝導転移を確
認

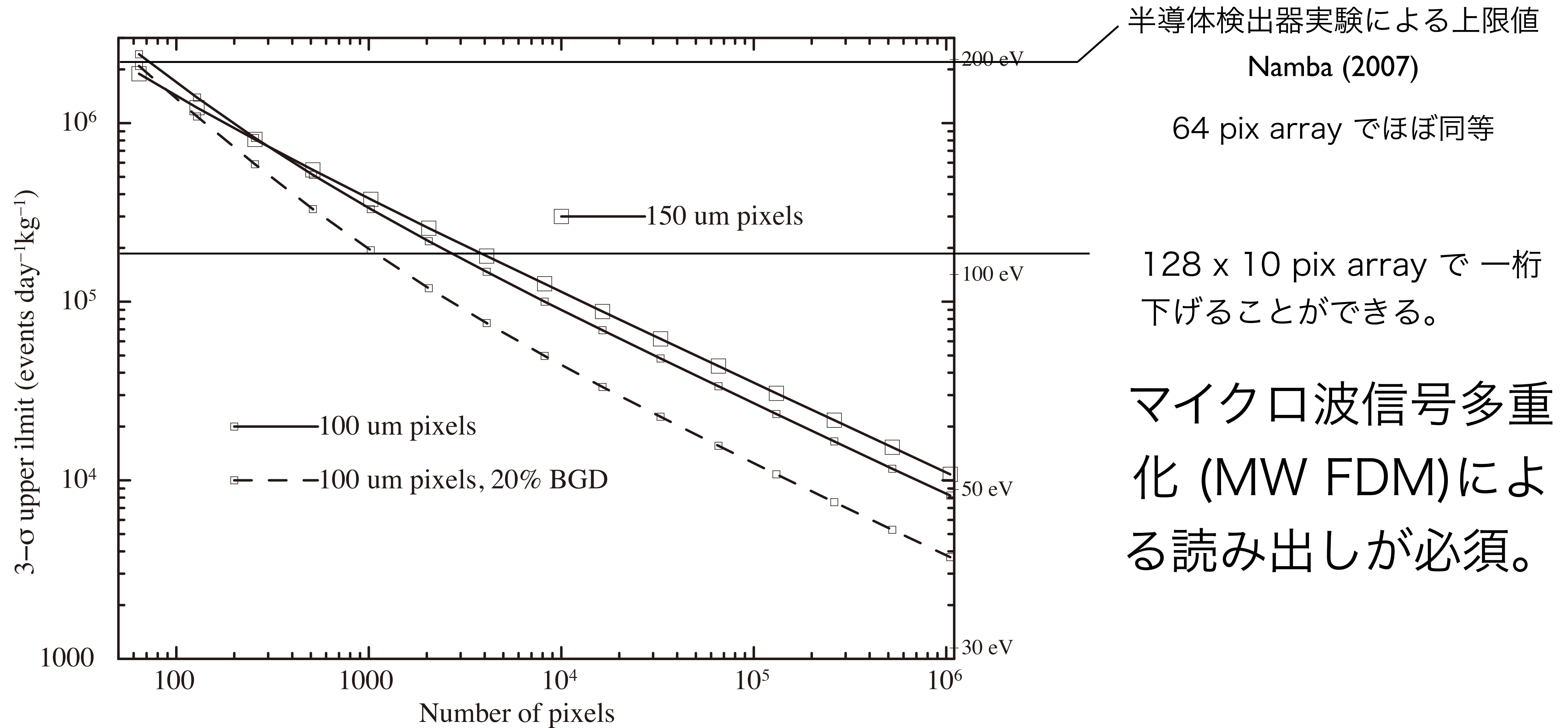
素子の設計(2)

- 素子の熱応答
 - 電析で製作した鉄薄膜の低温での電気伝導度を測定し，熱伝導度を推定
 - その値を用いて有限要素法で鉄薄膜からTESへの熱伝達をシミュレーション。
 - 鉄内部の熱伝導度が遅いことを反映して，TESへの応答に位置依存性が現れ，エネルギー分解能が32eV程度に劣化することが予想される。
 - 電析パラメータ変更で熱伝導度を2-3倍にすることで， $\Delta E = 23 - 17 \text{ eV}$ になると予想。

Konno+2020



感度予測



Maehisa 2017

まとめ

- 極低温検出器により，エネルギー流の測定では高い感度(小さなNEP)，光子計測では高いエネルギー分解能(小さな ΔE)を得ることができる。
- 極低温検出器は大きく分けて熱的な検出器と準粒子の励起を利用した検出器がある。ボロメータ／マイクロカロリメータは前者の，MKIDSは後者の代表的な検出器である。
- マイクロカロリメータは，暗黒物質の探査，レアイベントの探査，宇宙X線観測による宇宙の構造形成の研究，X線ガンマ線分析などに用いられている。
- 宇宙X線の観測， ^{229}Th のisomer順位を決定実験，太陽アクシオン探査実験のための開発と現状を紹介した。
- 本格的な撮像観測，レアイベントの感度向上のために，大規模アレイが求められている。マイクロ波を用いた極低温信号多重化がその最有力手段であり，その研究の現状も紹介した。

References

光子・粒子検出器

- Wikipedia 「電磁スペクトル」
- 浜松フォトニクス 「光半導体素子ハンドブックハンドブック」
<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/our-company/business-domain/solid-state-division/related-documents.html>
- 小田直樹 2008, 映像情報メディア学会誌 62, 1946
- Mather, J.C. 1982, App. Opt.. 21, 1125, <https://doi.org/10.1364/AO.21.001125>
- Moseley+ 1984, J. Appl. Phys. 56, 1257
- Irwin+ 1995, Appl. Phys. Lett. 66, 1998
- Bandler+ 1993, J. Low Temp. Phys. 93, 709
- Day+ 2003, Nature 425, 817
- Doyle 2008, PhD thesis, Cardiff Univ..
- Semenov+ 2001, Physica C 351, 349 (2001), doi:10.1016/S0921-4534(00)01637-3
- Kurakado, 1982, Nucl. Instrum. & Methods 196, 275

宇宙の大規模構造とX線分光

- 2DF galaxy redshift survey <http://www.2dfgrs.net>
- WMAP <https://map.gsfc.nasa.gov>
- Yu+ 2017, Nature Astronomy, 1, id. 0143
- Mitsuda+. J of Low Temp. Phys. (2012) 167:795–802 DOI 10.1007/s10909-012-0482-1
- Hitomi collaborations 2016, Nature, 535, 117
- Tamura+ 2009 Astroph. J. Lett. 705, L62
- Barret+2018, Athena symposium in Palermo, Italy
- Cui+ 2020, J. of Low Temp. Phys. 199, 502

- Yamada+ 2018, J. of Low Temp. Phys. 193, 1016
- Irwin & Hilton 2005, Topics Appl. Phys. 99, 63
- Nakashima 2020, PhD thesis, Univ. of Tokyo
- Nakashima+ 2020, Appl. Phys. Lett. accepted

原子核時計 ^{229}Th 原子核分光

- Brewer+ 2019, Phys. Rev. Lett. 123, 033201
- McGrew+2018, Nature 564, 87
- Campbell+, 2012, Phys. Rev. Lett. 108 120802
- Avelino+ 2006, Phys. Rev. D 74, 083508
- Kazakov 2014, Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A 735, 229
- Kasamatsu & Kikunaga 2018, Radioisotopes, 67, 471
- Helmer+ 1994, Phys. Rev. C 49, 1845.
- Guimarães-Filho+ 2005, Phys. Rev. C 71, 044303
- Beck+ 2007, Phys. Rev. Lett. 98, 142501
- von der Wense+ 2016, Nature 533, 47
- Muramatsu+2017, IEEE Trans. on Appl. Superc. 27, 2815, doi 10.1109/TASC.2017.2661738
- Yamaguchi+ 2019, Phys. Rev. Lett., 123, 222501
- Seiferle+ 2019, Nature 573, 243
- Muramatsu+ 2020, J. Low Temp. Phys., doi 10.1007/s10909-020-02458-7

太陽アクシオン

- Moriyama 1995, Phys. Rev. Lett. 75, 3222
- Konno+ 2020, J. Low Temp. Phys. 199, 654, doi 10.1007/s10909-019-02257-9
- Namba 2007. Phys. Lett. B 645, 398
- Maehisa 2017, 東京大学理学系研究科 修士論文