



超精密時計で探る

ダークマターとダークエネルギー

吉村浩司 岡山大学・異分野基礎科学研究所

素粒子現象論研究会2021 2021.11.8

岡山大学・異分野基礎科学研究所

量子宇宙研究コア



教授：吉村 浩司，笹尾 登，吉村 太彦

准教授：植竹 智，吉見 彰洋

講師：宮本 祐樹，増田 孝彦

助教：原 秀明

学振特別研究員：平木 貴宏，平本 綾美

研究員：今井 康貴

事務員：八田みゆき

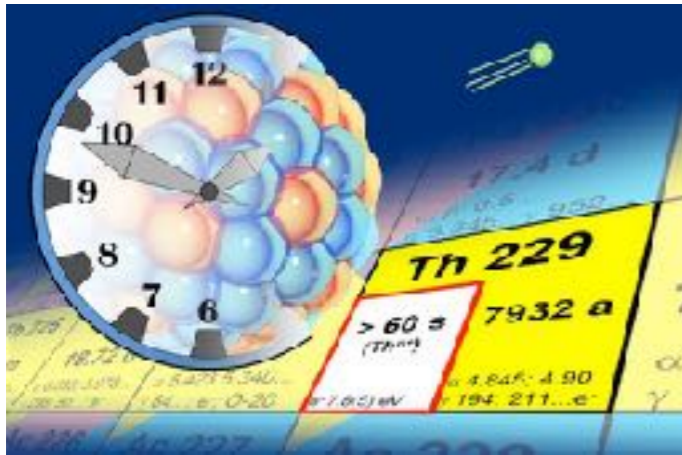
学生：D2 (1名)，M2(2名)，B4(5名)

基礎物理学の謎に素粒子・宇宙物理，
原子核物理，量子光学，化学の知識と
技術を融合して挑む

鍵を握るのは「量子」とレーザー

量子技術を協奏することで実験室から巨大プロジェクトに匹敵する成果を目指す。

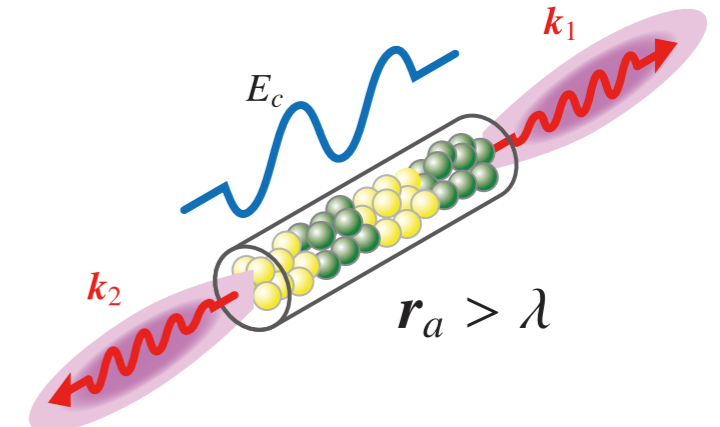
原子核



原子核を制御し超精密な時計を実現
物理定数の経年変化から宇宙史を探る

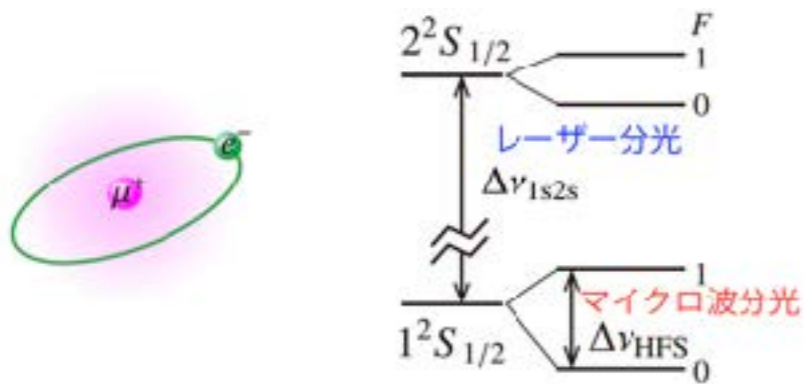


原子からのニュートリノ



検出が困難なニュートリノを量子学的な
重ね合わせで増幅して検出
ニュートリノの性質を調べて、反物質が
消えた謎を探る

ミュオニウム (純レプトン原子)

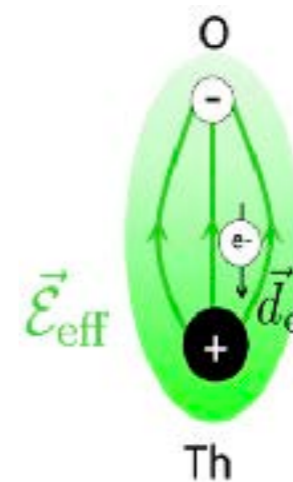


素粒子ミュオンを用いた人工原子
レーザーを用いて超精密に分光して、
未知の素粒子現象を探索

レーザーを武器に使う

- 単色性：
エネルギーが揃っている
- 可干渉性 (コヒーレンス)：
位相が揃って、重ね合わせ
が可能である
- 制御性：
高強度の光を制御して発生可

分子



電子の中の電荷の偏りを見つけて
時間対称性の破れを探る

内容

超精密時計とは

原子時計と原子核時計

原子核時計に向けた取り組み

トリウム229アイソマー研究

精密分光で探る新物理

微細構造定数の経年変化

核子-電子系に関与する未知粒子探索—"King Plot"

トポロジカル暗黒物質探索

超精密時計とは

原子時計とは

針



カウンタ

振動子

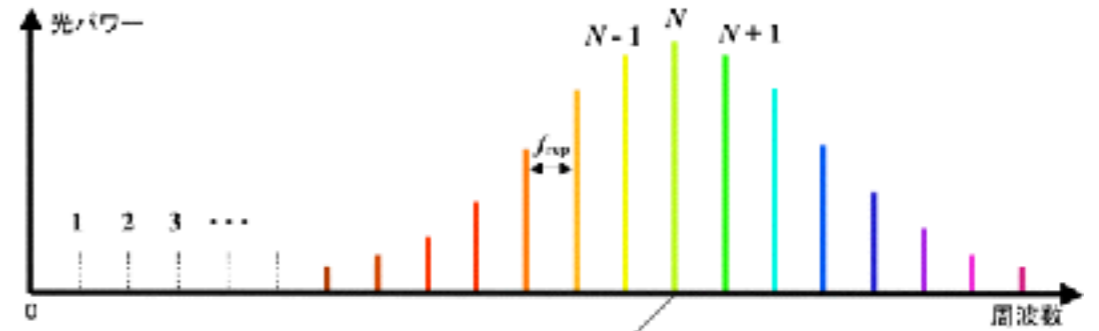
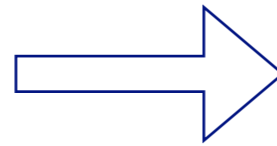
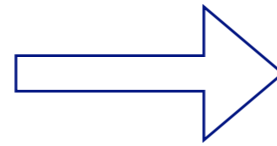
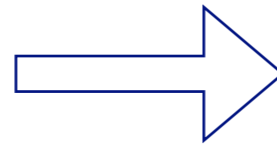
基準

基準に合わせて
振動数を調整

振り子



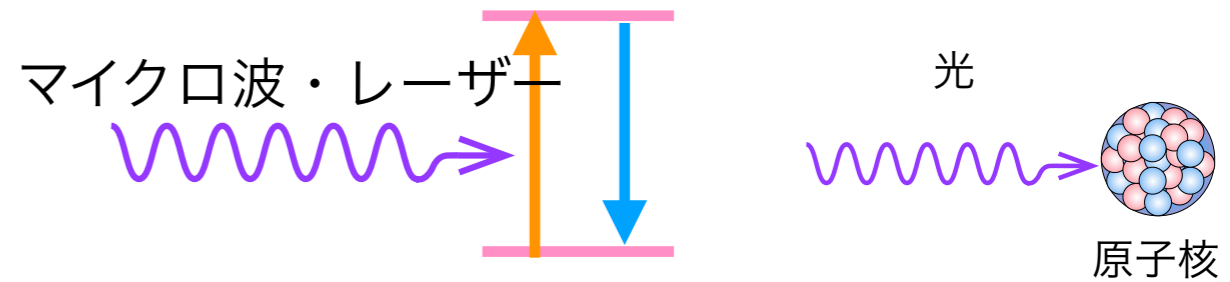
地球の自転周期



光周波数コム



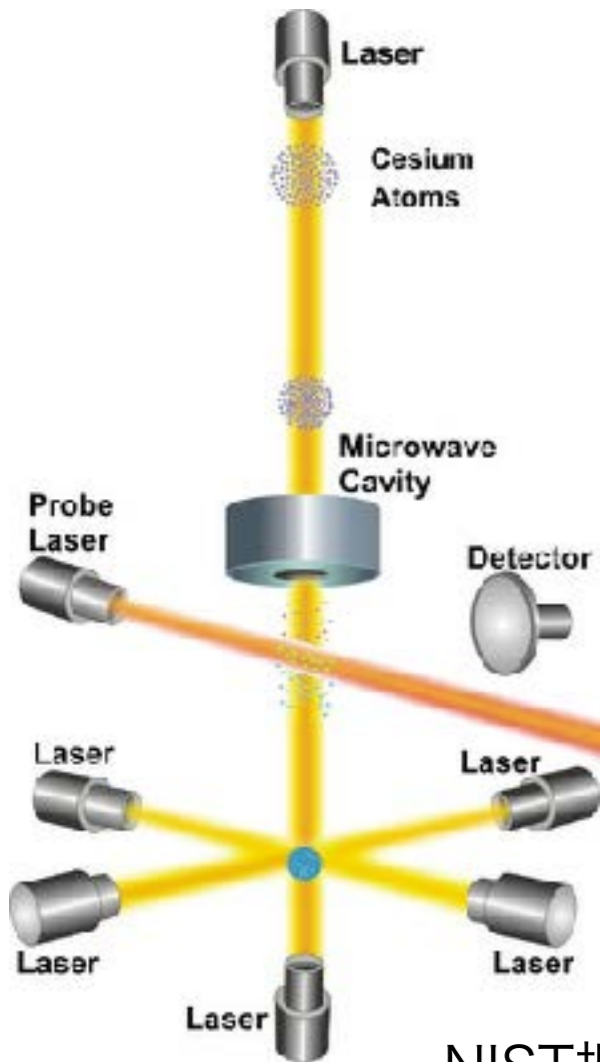
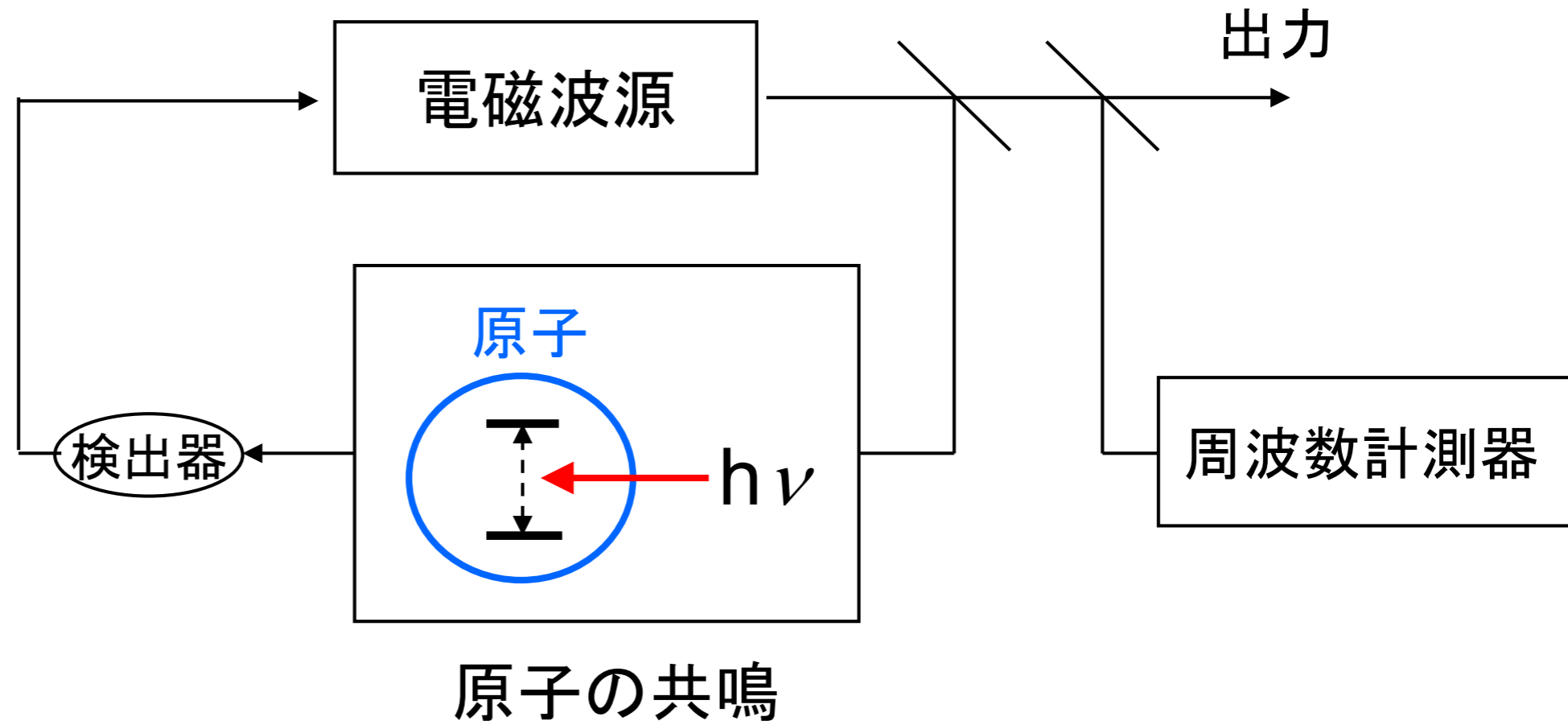
レーザー



原子の励起周波数

原子時計一周波数標準

セシウム泉時計

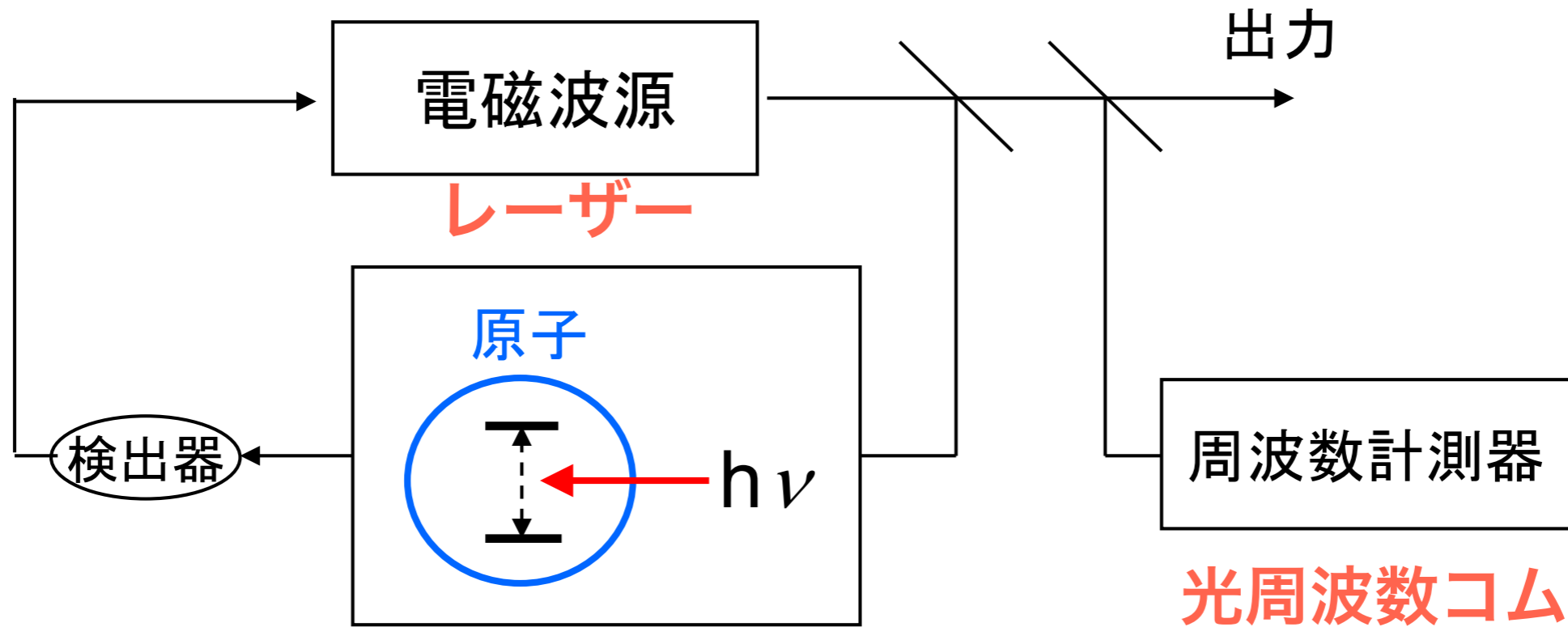


NIST提供

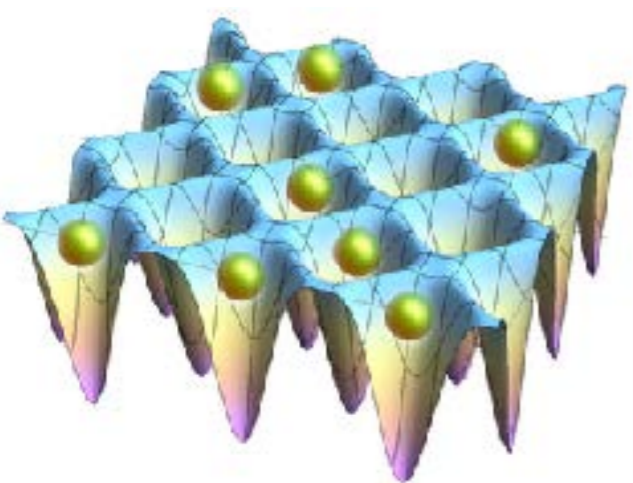
Cs137の 9,192,631,770 Hz を基準に用いる
精度は 10^{-16}

次世代の周波数標準の開発

MW から光へ

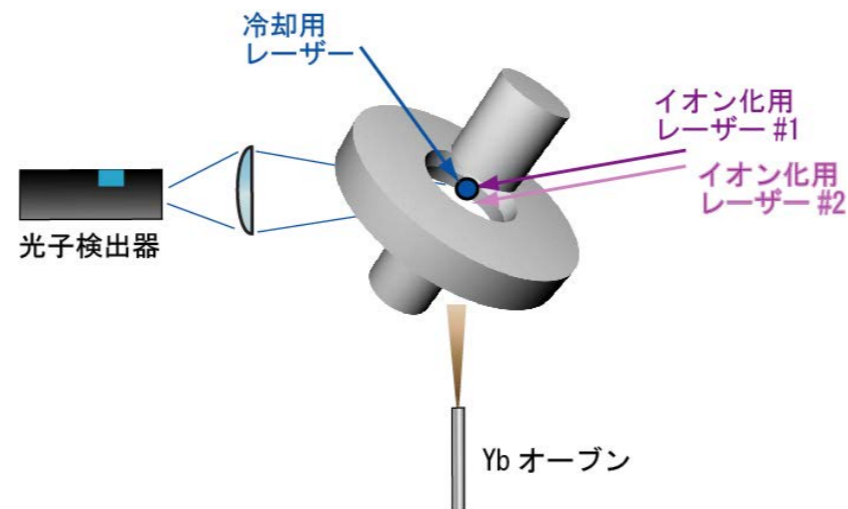


原子の共鳴



光格子

Sr, Yb, Hg



イオントラップ

Yb

400~500THz

精度は 10^{-17} ~ 10^{-18}

時計の不確かさ

$$\frac{\delta f}{f_0} \quad (f_0 : \text{中心周波数}, \delta f : \text{不確かさ})$$

	(x 10 ⁻¹⁸)
セシウム時計 (現在の1秒の定義)	200
イオントラップ*	0.94
光格子時計**	1.4

* S. M. Brewer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **123**, 033201 (2019)

** W. F. McGrew *et al.*, Nature **564**, 87 (2018)

現在の原子時計の精度をリミットしている原因

Sr光格子時計のエラーバジェット ($\times 10^{-18}$)

Sources for shift	Uncertainty
BBR static	1.8
BBR dynamic	3.7
Density shift	0.6
Lattice Stark	3.7
Probe beam a.c. Stark	1.3
First-order Zeeman	1.1
Second-order Zeeman	1.2
Residual lattice vector shift	<0.1
Line pulling and tunnelling	<0.1
d.c. Stark	2.1
Background gas collisions	0.6
AOM phase chirp	0.4
Second-order Doppler	<0.1
Servo error	0.6
Totals	6.4

外場のゆらぎに起因する
不確かさが支配的.

既存の原子時計は全て
電子遷移を参照

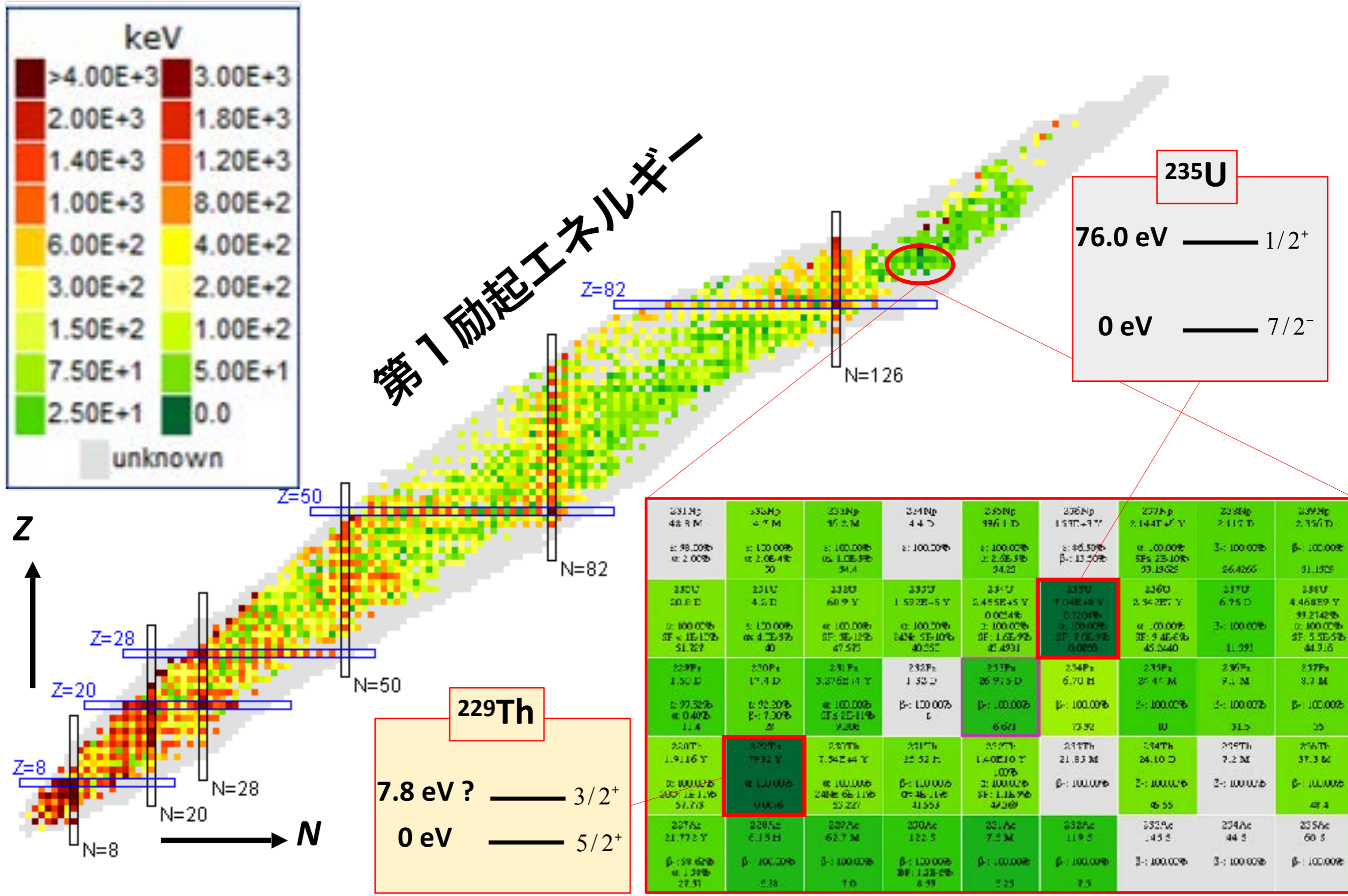


原子核遷移ならば、電子によるシールド効果により外場の影響を受けにくい！

B. J. Bloom *et al.*, Nature **506** 71 (2014)

しかし、核遷移のエネルギーは一般的に keV ~ MeVのオーダーでレーザーが作れない。

自然界で最小のエネルギーを持つトリウム229



PERIODIC TABLE

Atomic Properties of the Elements

NIST National Institute of Standards and Technology
U.S. Department of Commerce
Physical Measurement Laboratory www.pml.nist.gov
Standard Reference Data www.nist.gov/srd

FREQUENTLY USED FUNDAMENTAL PHYSICAL CONSTANTS[§]

1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of ¹³³Cs

speed of light in vacuum	<i>c</i>	299 792 458 m s ⁻¹	(exact)
Planck constant	<i>h</i>	6.626 070 x 10 ⁻³⁴ J s	($\hbar = h/2\pi$)
elementary charge	<i>e</i>	1.602 177 x 10 ⁻¹⁹ C	
electron mass	<i>m_e</i>	9.109 384 x 10 ⁻³¹ kg	
	<i>m_ec²</i>	0.510 999 MeV	
proton mass	<i>m_p</i>	1.672 622 x 10 ⁻²⁷ kg	
fine-structure constant	α	1/137.035 999	
Rydberg constant	<i>R_∞</i>	10 973 731.569 m ⁻¹	
	<i>R_∞c</i>	3.289 841 960 x 10 ¹⁵ Hz	
	<i>R_∞hc</i>	13.605 693 eV	
electron volt	eV	1.602 177 x 10 ⁻¹⁹ J	
Boltzmann constant	<i>k</i>	1.380 65 x 10 ⁻²³ J K ⁻¹	
molar gas constant	<i>R</i>	8.314 5 J mol ⁻¹ K ⁻¹	

[§] For the most accurate values of these and other constants, visit pml.nist.gov/constants

Solids
 Liquids
 Gases
 Artificially Prepared

Period	1	1 IA	2 IIA											18 VIIIA	
	2	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB				18 VIIIA
	3	11 IIIB	12 IVB	13 VB	14 VIB	15 VIIB	VIII			17 IB	18 IIB				18 VIIIA
	4	19 IIIB	20 IVB	21 VB	22 VIB	23 VIIB	VIII			29 IB	30 IIB				36 VIIIA
	5	37 IIIB	38 IVB	39 VB	40 VIB	41 VIIB	VIII			47 IB	48 IIB				54 VIIIA
	6	55 IIIB	56 IVB											86 VIIIA	
	7	87 IIIB	88 IVB											118 VIIIA	

Lanthanides	57 La Lanthanum 138.90547 [Xe]5d6s2 5.5769	58 Ce Cerium 140.116 [Xe]4f5d6s2 5.5386	59 Pr Praseodymium 140.90766 [Xe]4f36s2 5.473	60 Nd Neodymium 144.242 [Xe]4f46s2 5.5250	61 Pm Promethium (145) [Xe]4f56s2 5.582	62 Sm Samarium 150.36 [Xe]4f66s2 5.6437	63 Eu Europium 151.964 [Xe]4f76s2 5.6704	64 Gd Gadolinium 157.25 [Xe]4f75d6s2 6.1498	65 Tb Terbium 158.92535 [Xe]4f96s2 5.8638	66 Dy Dysprosium 162.500 [Xe]4f106s2 5.9391	67 Ho Holmium 164.93033 [Xe]4f116s2 6.0215	68 Er Erbium 167.259 [Xe]4f126s2 6.1077	69 Tm Thulium 168.93422 [Xe]4f136s2 6.1843	70 Yb Ytterbium 173.045 [Xe]4f146s2 6.2542	71 Lu Lutetium 174.9668 [Xe]4f145d6s2 5.4259
Actinides	89 Ac Actinium (227) [Rn]6d7s2 5.3802	90 Th Thorium 232.0377 [Rn]6d27s2 6.3067	91 Pa Protactinium 231.03588 [Rn]5f36d7s2 5.89	92 U Uranium 238.02891 [Rn]5f36d7s2 6.1941	93 Np Neptunium (237) [Rn]5f46d7s2 6.2655	94 Pu Plutonium (244) [Rn]5f67s2 6.0258	95 Am Americium (243) [Rn]5f7s2 5.9738	96 Cm Curium (247) [Rn]5f76d7s2 5.9914	97 Bk Berkelium (247) [Rn]5f7s2 6.1978	98 Cf Californium (251) [Rn]5f107s2 6.2817	99 Es Einsteinium (252) [Rn]5f117s2 6.3676	100 Fm Fermium (257) [Rn]5f127s2 6.50	101 Md Mendelevium (258) [Rn]5f137s2 6.58	102 No Nobelium (259) [Rn]5f147s2 6.65	103 Lr Lawrencium (266) [Rn]5f147s27p 4.96

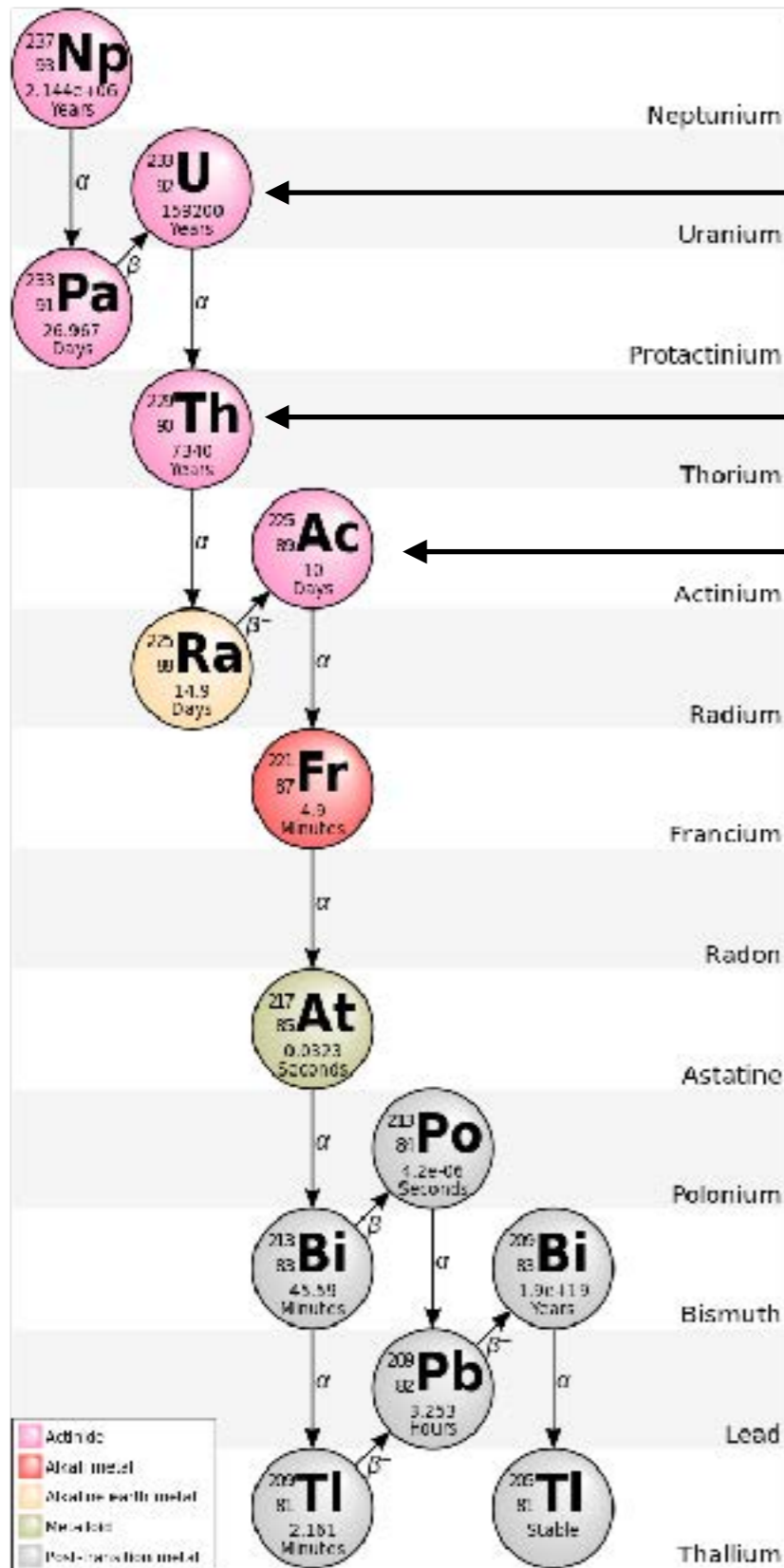
Atomic Number: 58
 Ground-state Level: 1G₄
 Symbol: **Ce**
 Name: Cerium
 Standard Atomic Weight[†](Da): 140.116
 Ground-state Configuration: [Xe]4f5d6s²
 Ionization Energy (eV): 5.5386

[†]Based upon ¹²C. () indicates the mass number of the longest-lived isotope.

^{*}For the most precise value, visit ciaaw.org.

For a description of the data, visit pml.nist.gov/data

ネプチウム系列



ウラン 233

核燃料

トリウム 229

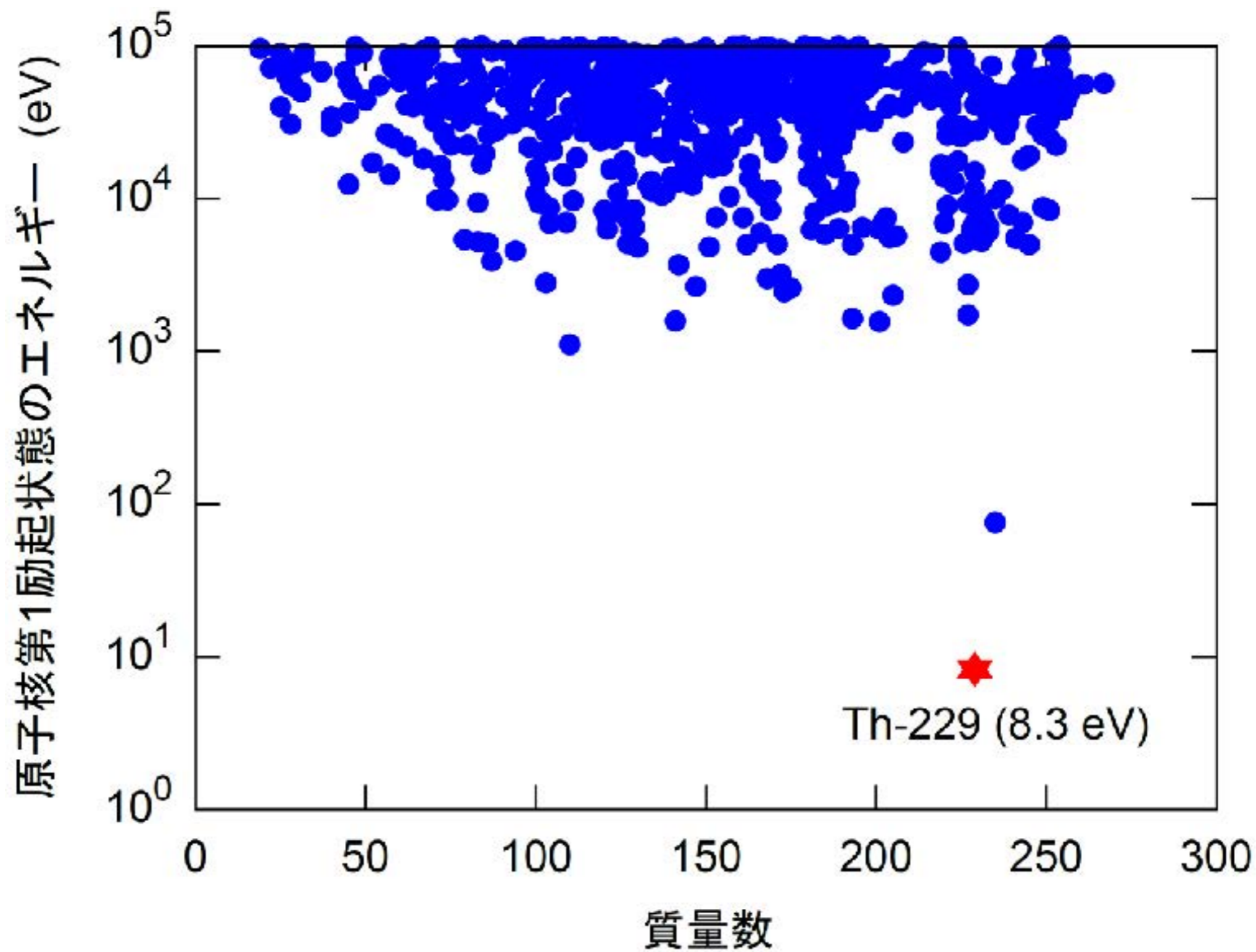
アクチニウム 225

放射線医療

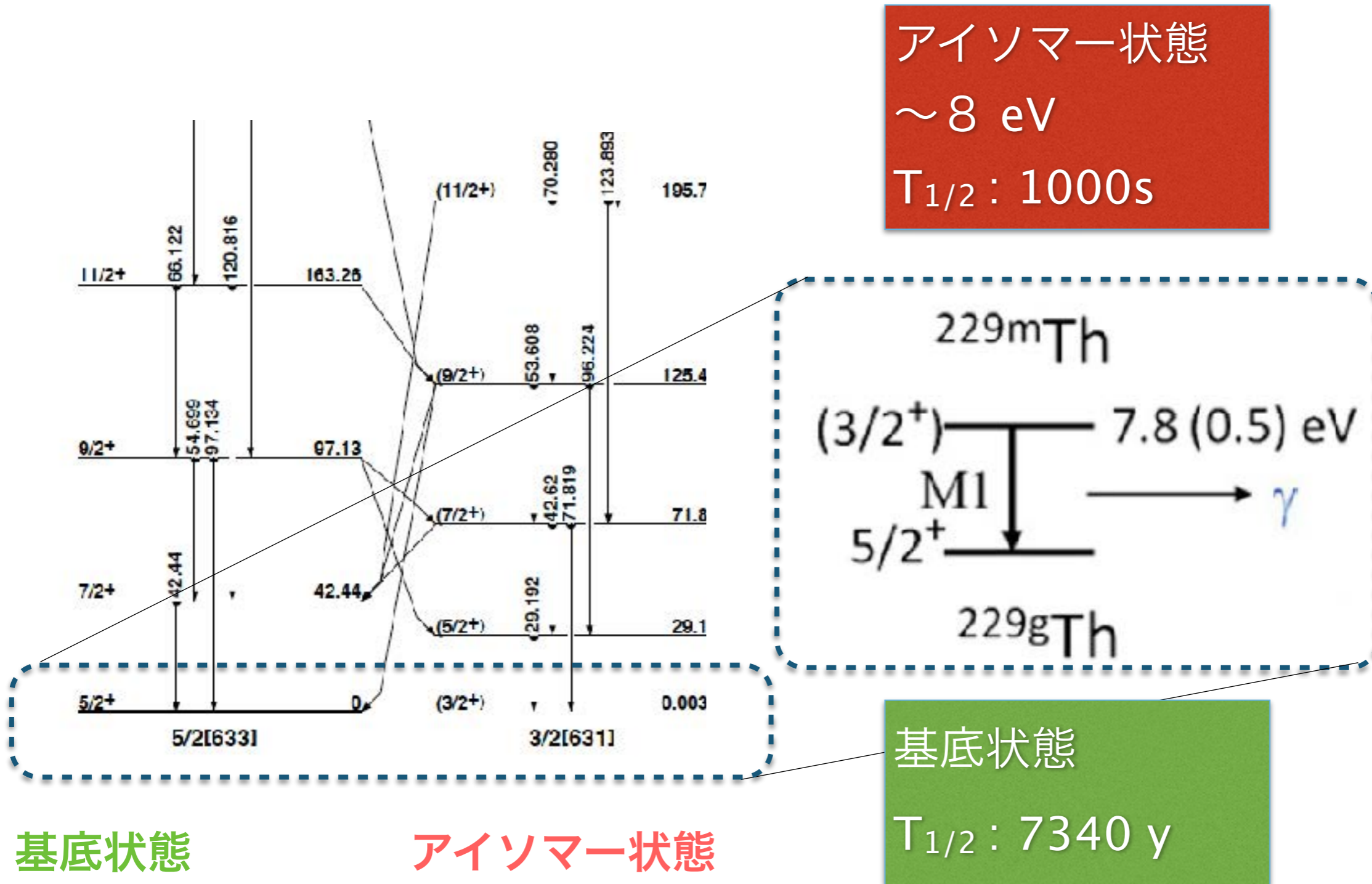
自然界のトリウム トリウム232 100%

$$T_{1/2} = 1.4 \times 10^{10} \text{ y}$$

^{229}Th (トリウム229) の超低エネルギー核遷移



トリウム229 エネルギー準位



基底状態

アイソマー状態

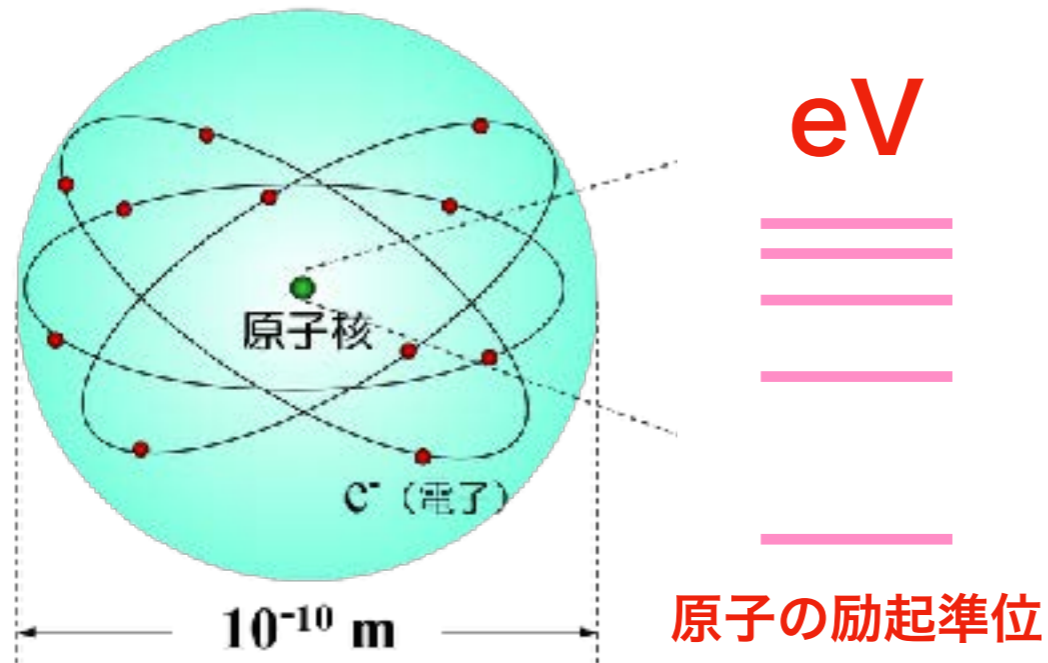
基底状態

$T_{1/2} : 7340\text{ y}$

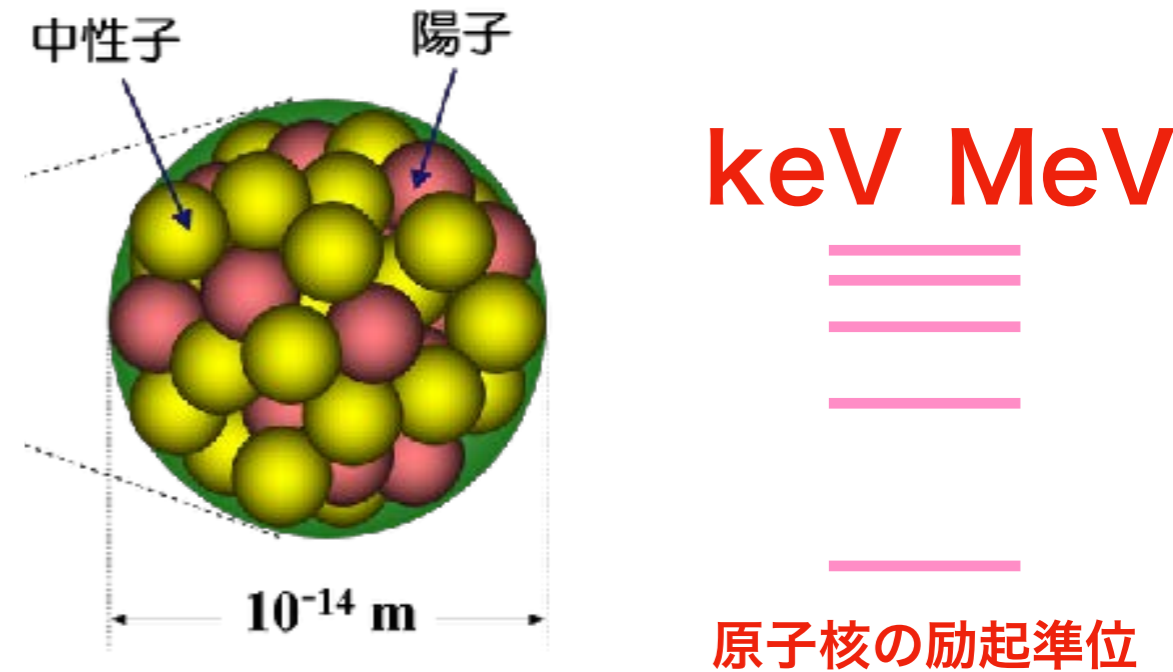
自然界で最小のエネルギーをもつ原子核状態

原子核のレーザー励起の可能性

原子物理



原子核物理



MW, レーザーを用いた多彩な実験手法
分光, 冷却, BEC, トラップ

加速器を用いた実験手法
散乱, 破砕, 融合

原子核をレーザーで励起できれば

原子核の利点

電子による遮蔽
外場の影響を受けにくい
安定な孤立量子系

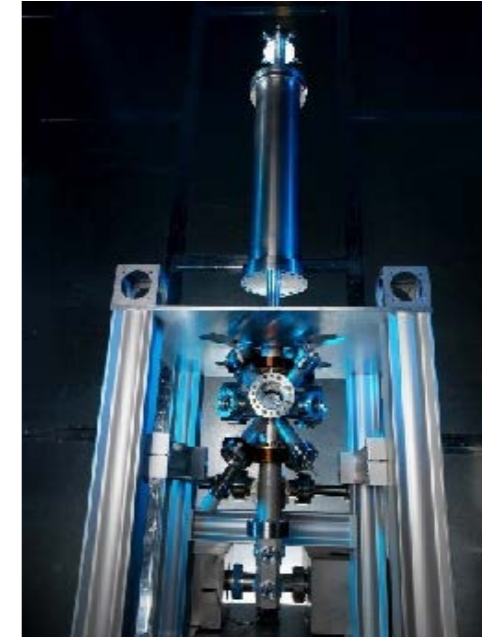
もし原子核時計が実現すると

原子核時計

現在の周波数標準 セシウム 不確かさ 10^{-16}

原子核時計 不確かさ 10^{-19}

固体でポータブル



セシウム原子時計@NICT

相対論的測地学

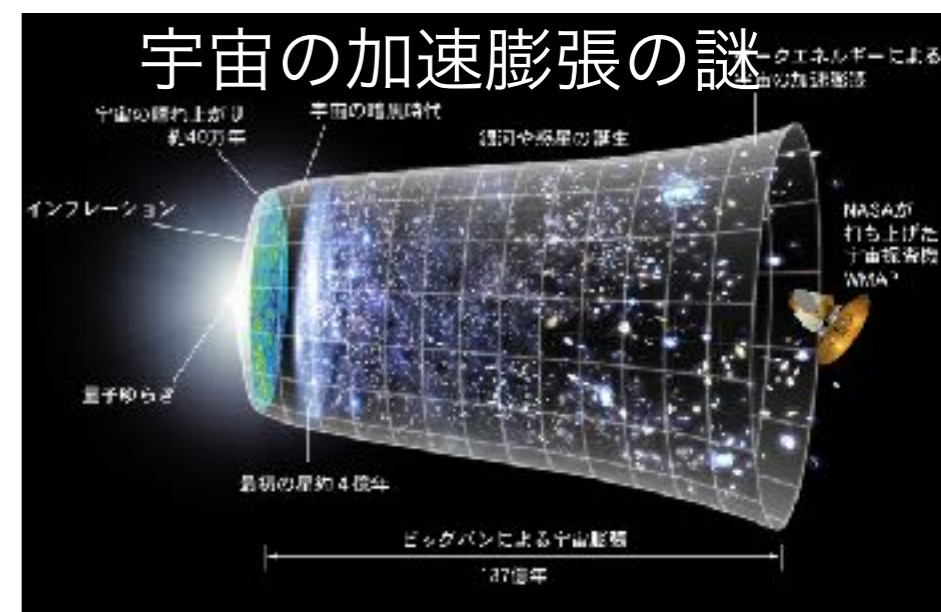
一般相対論効果で重力プローブ応用
地殻変動や資源探査に利用



1cm 持ち上げると 10^{-18} ずれる

基礎物理

物理定数の経年変化を捉える
宇宙の加速膨張の謎を解明



原子核時計の実現に向けて

トリウム229アイソマー状態の研究

40年以上にもわたるアイソマー状態の研究にもかかわらず、レーザーで励起に成功した例はない。

ここ数年で**励起エネルギーの精度が上がってきた**

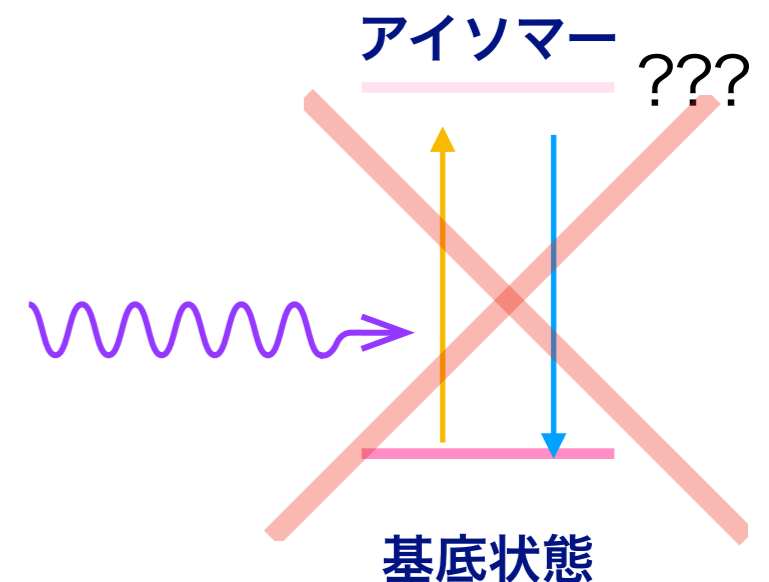
ウラン233のアルファ崩壊から生成されたアイソマー状態を主に使用



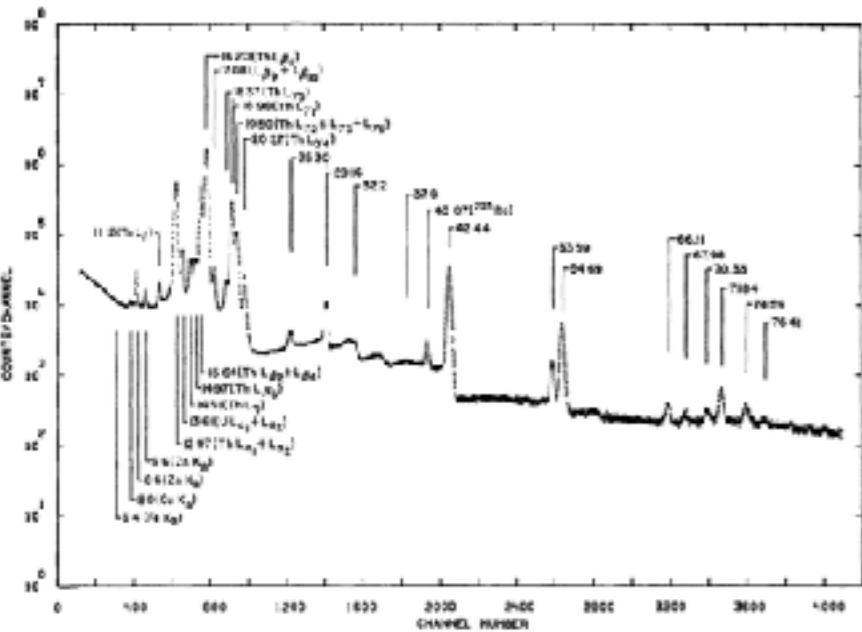
アイソマー状態を自由に生成できない

エネルギー精度が悪く、**エネルギー幅が狭い**

レーザーでは直接励起できない



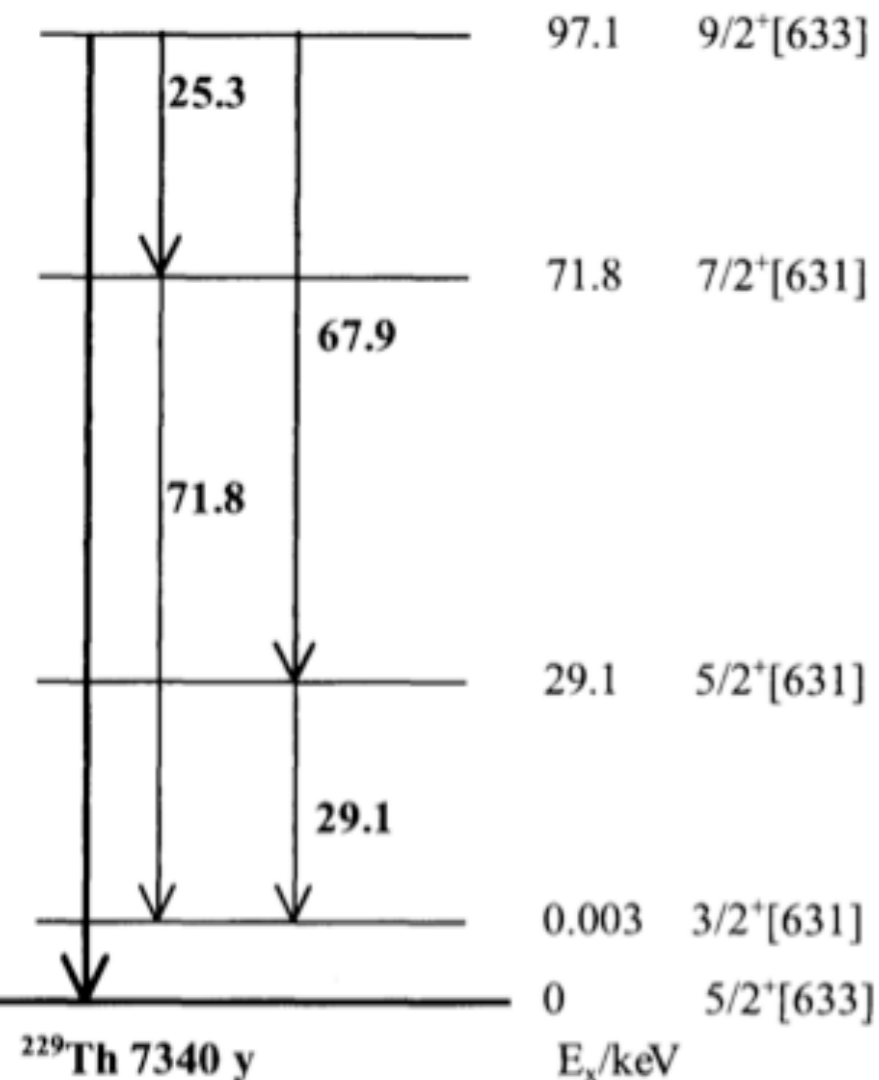
アイソマー探索の歴史



Energy difference was obtained by combining γ spectrum with γ spectroscopy.

In 1994, 4 pairs of energy difference were averaged.

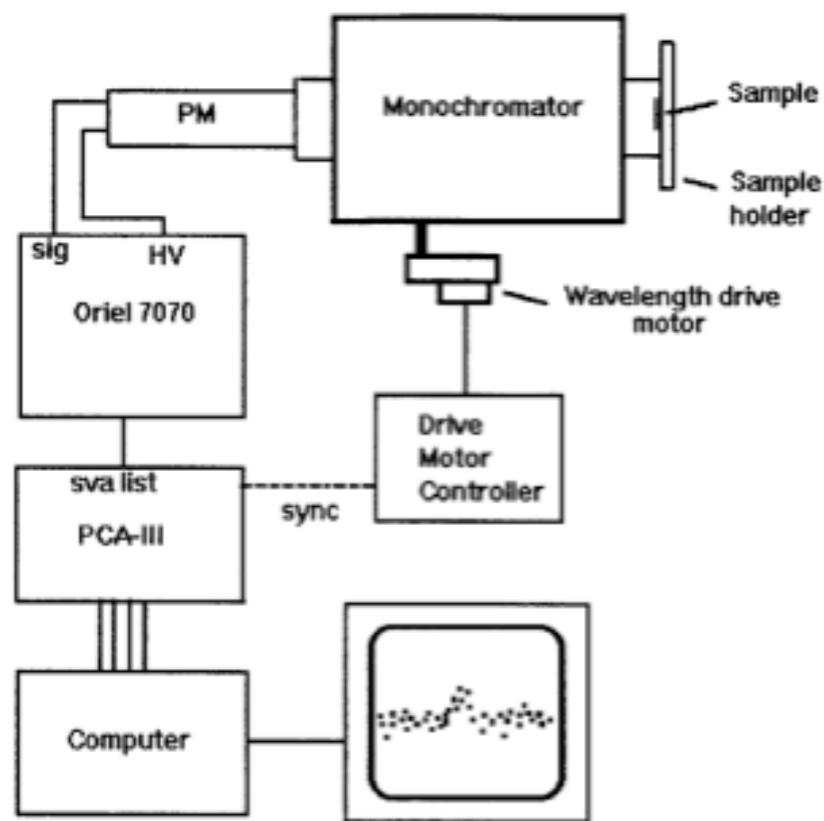
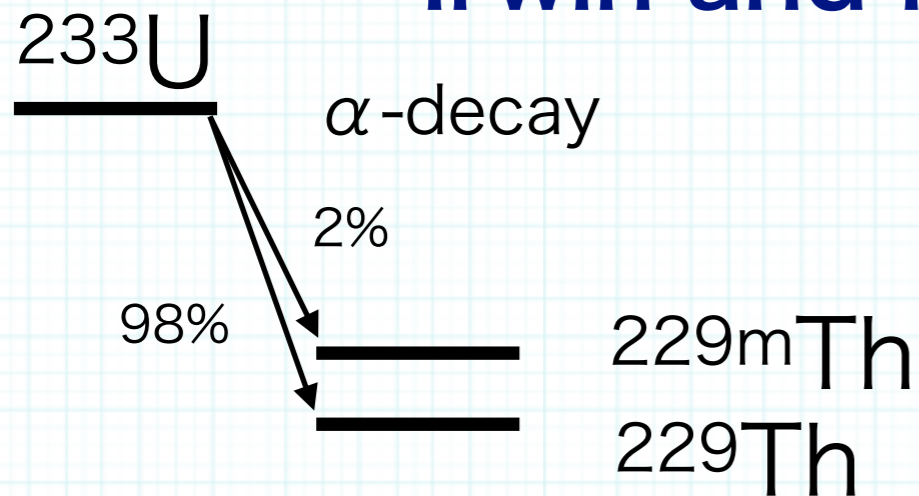
Ge detector was used to report 3.5 eV ~ a few eh pair



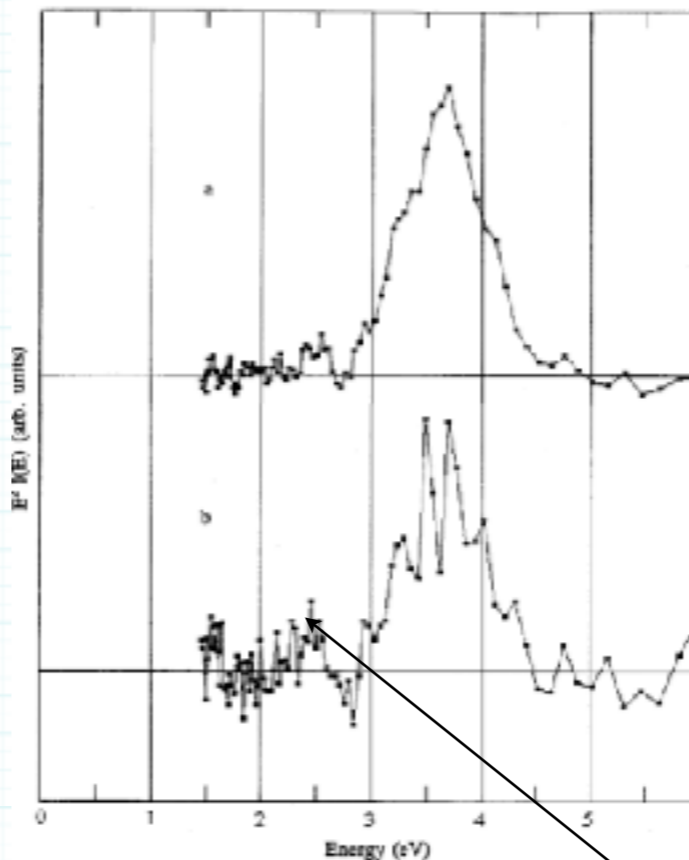
1976	Kroger & Reich	γ spectroscopy	<100 eV
1990	Reich & Helmer	γ spectroscopy	-1(4) eV
1994	Burke & Garret	Angular distribution from $^{230}\text{Th}(d,t)^{229}\text{Th}$	< 5 eV
1994	Helmer & Reich	γ spectroscopy	3.5(10) eV
2005	Guimaraes-Filho & Helene	reanalyze	5.5(10) ev
2007	Beck et al.	γ spectroscopy	7.6(5) eV 7.8(5) eV

Direct search (U-233)

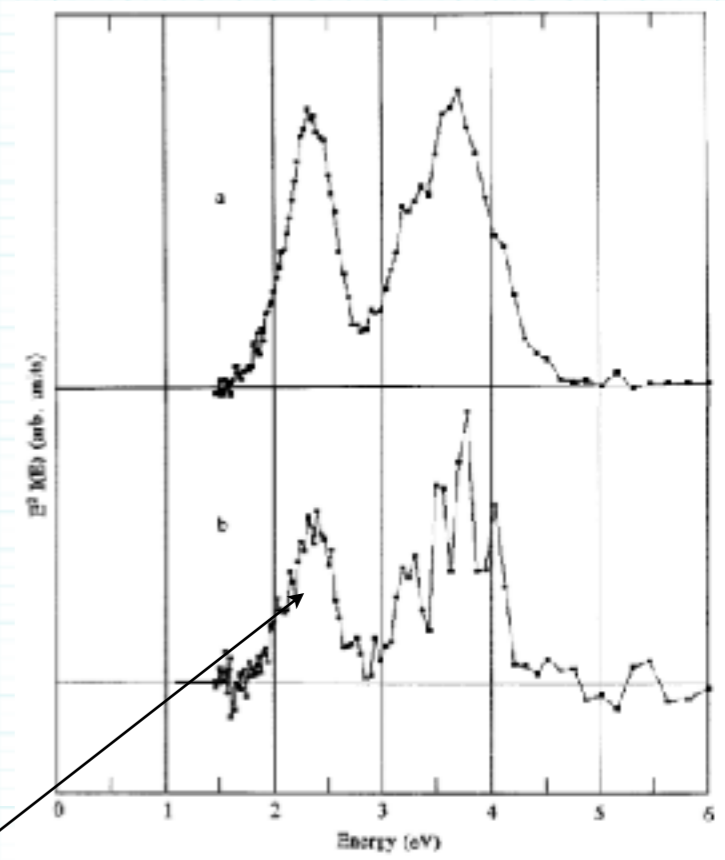
Irwin and Kim, PRL79, 990 (1997)



Sample1
100uCi U-233 on Kapton



Sample2
300uCi U-233 on filter paper



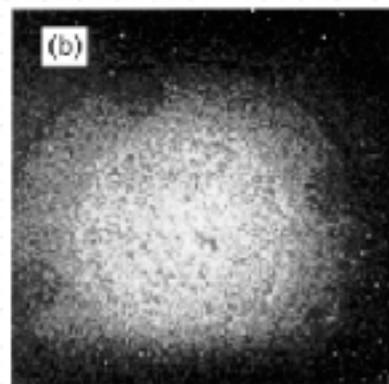
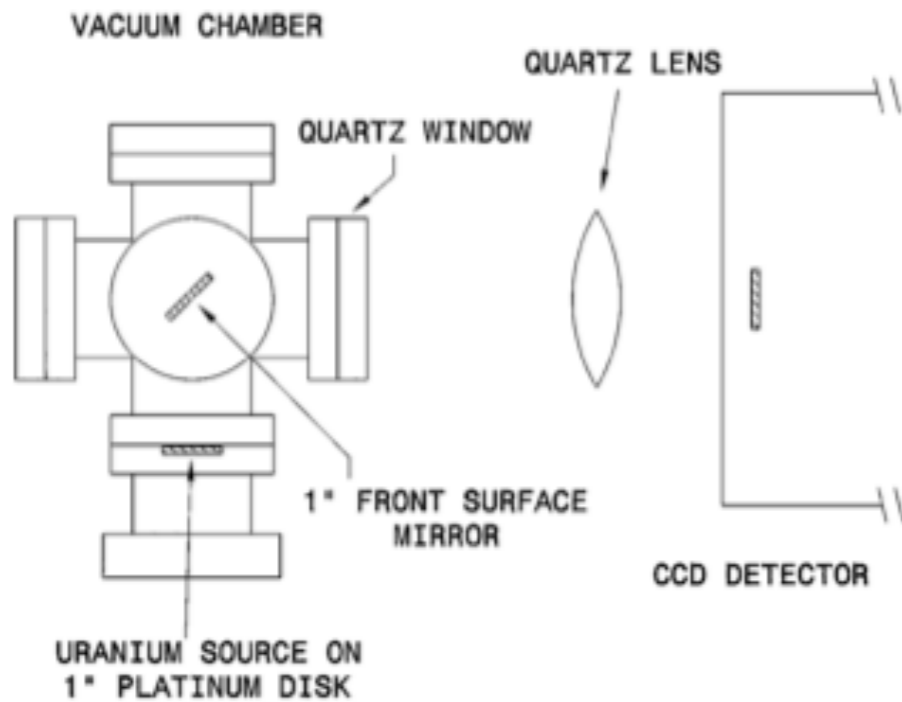
Richardson et al. PRL80, 3206 (1998)
Same peak

inelastic electron bridge?

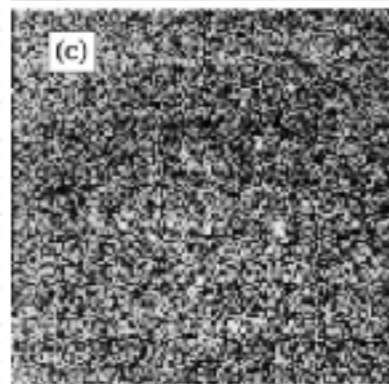
Signal Disappear in Vacuum

Utter et al., PRL 82, 505 (1999)

Shaw et al, PRL82, 1109 (1999)



Atmosphere



Vacuum (5X)

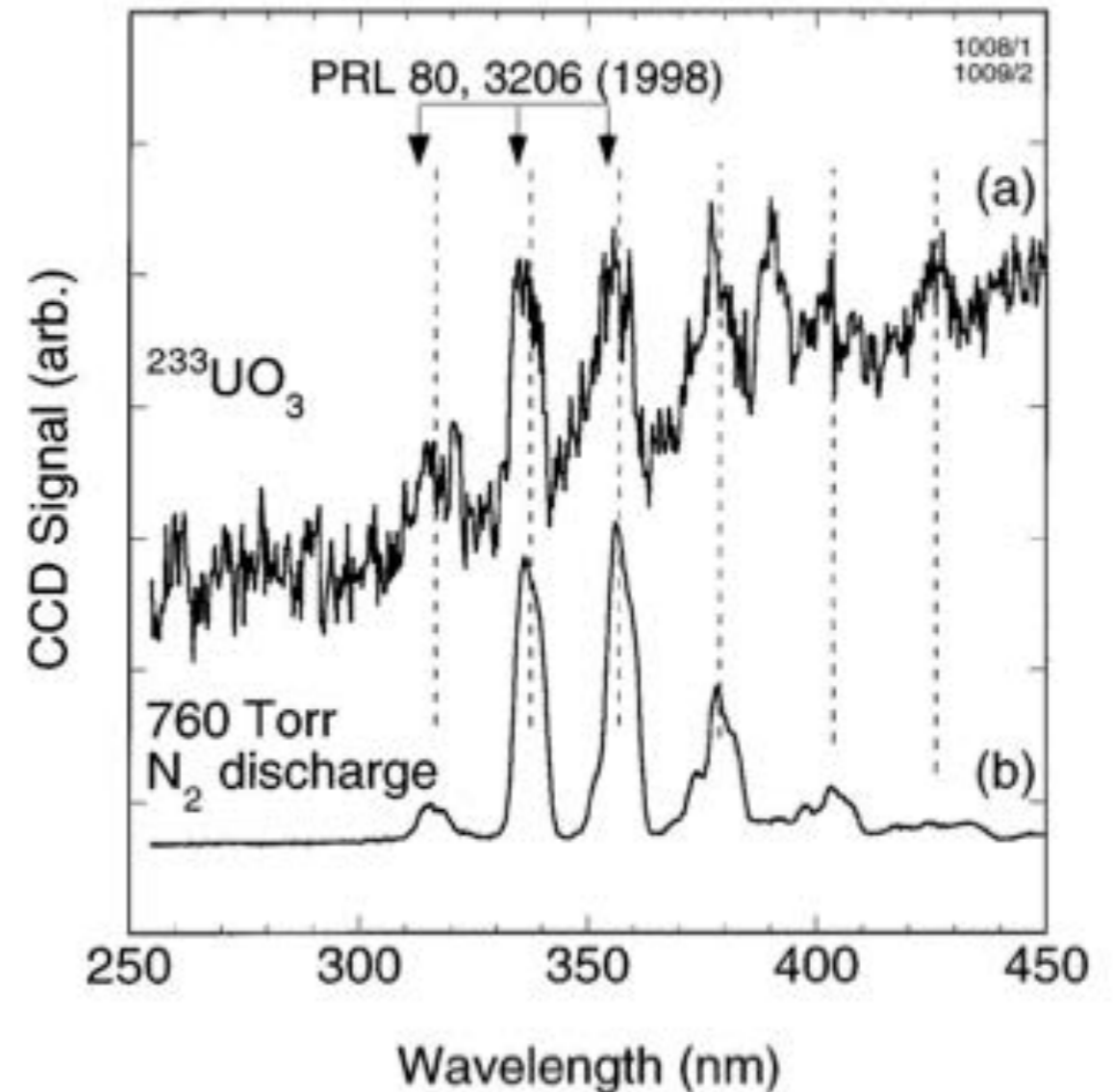


FIG. 1. (a) Spontaneous luminescence spectrum from a $^{233}\text{UO}_3$ powder sample (46 h integration, 0.5 mm slit). (b) Emission spectrum of an atmospheric pressure N_2 discharge, under the conditions of (a), except for a 1 s integration time. The traces are offset vertically for clarity. The arrows mark the line positions reported in Ref. [2].

“原子核時計” revived Th-229

EUROPHYSICS LETTERS

15 January 2003

Europhys. Lett., **61** (2), pp. 181–186 (2003)

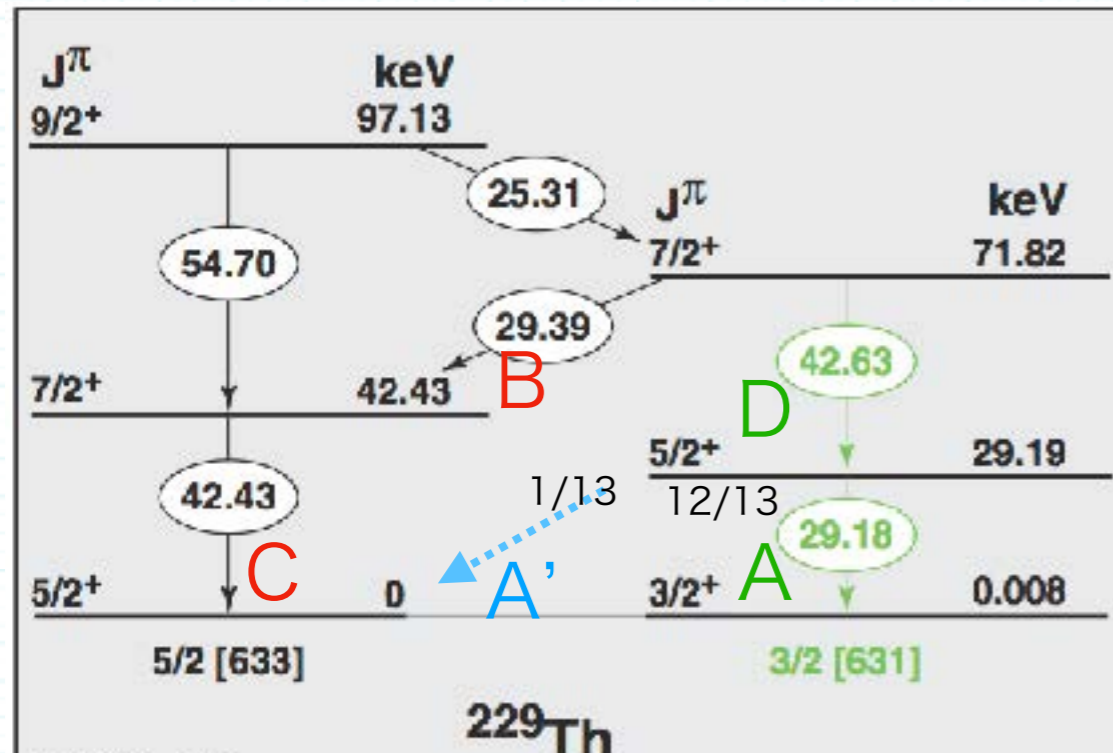
Nuclear laser spectroscopy of the 3.5 eV transition in Th-229

E. PEIK(*) and CHR. TAMM

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt - Bundesallee 100
38116 Braunschweig, Germany*

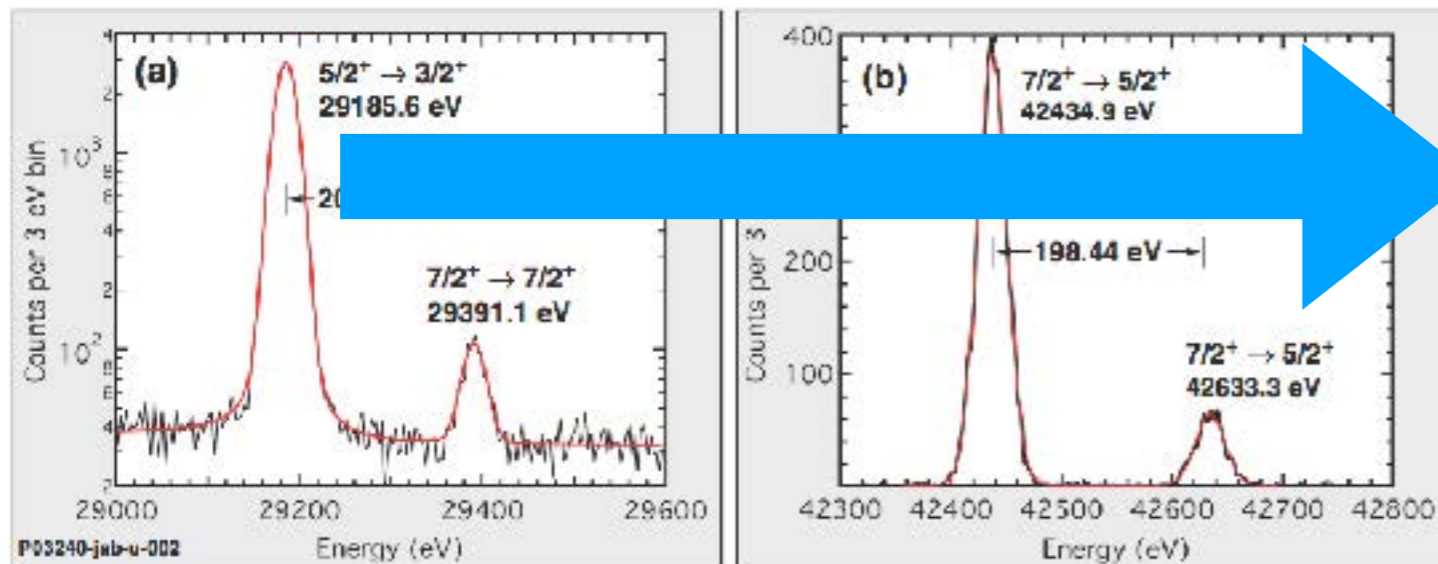
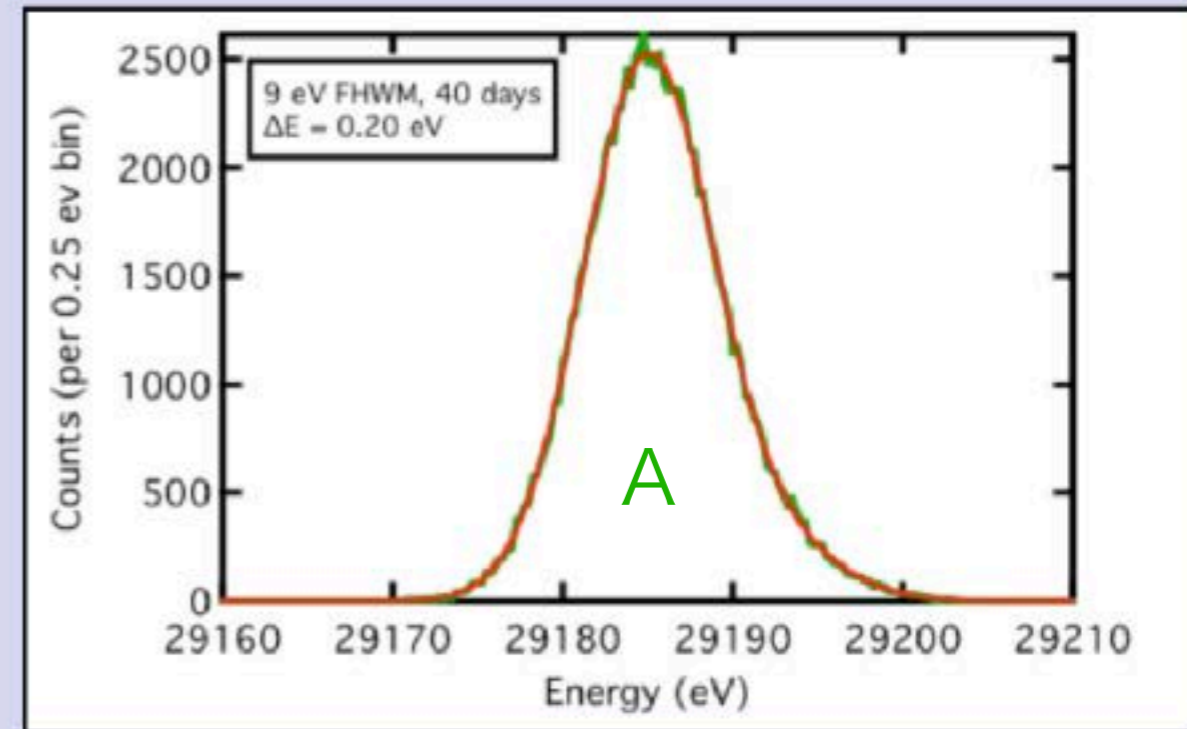
(received 17 June 2002; accepted in final form 11 November 2002)

Indirect method



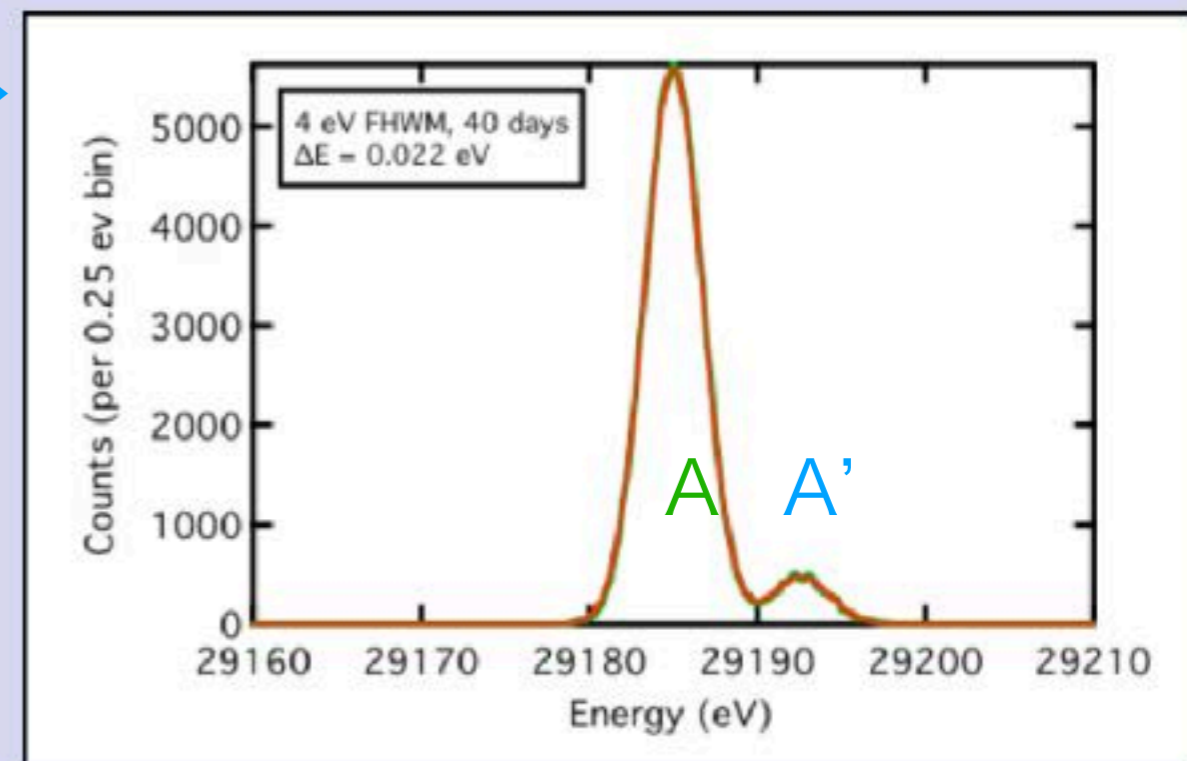
- Utilize
- XRS r

$$E = (B - A) / (C - A) \times 20$$



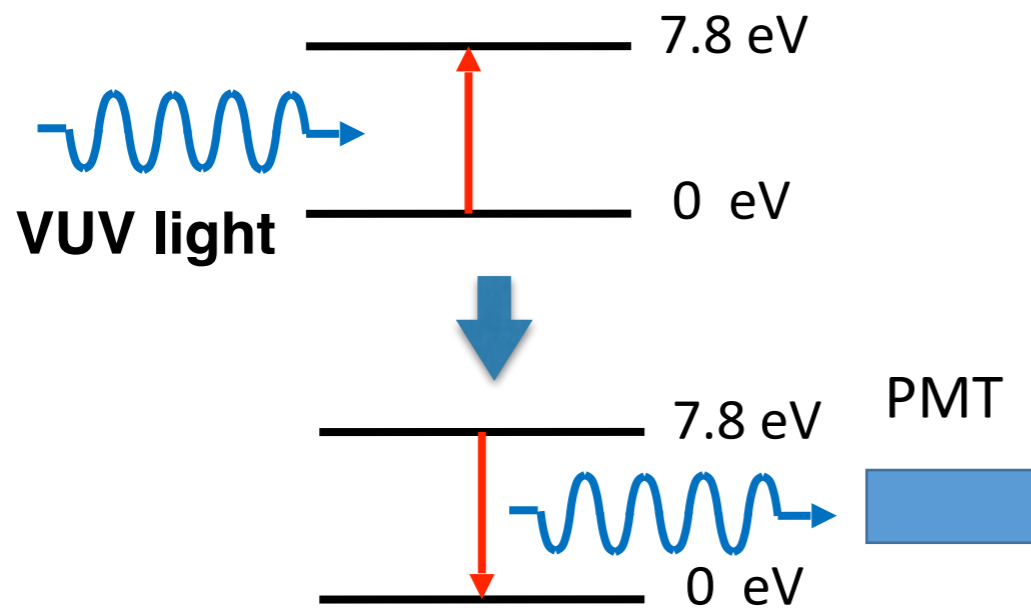
A B C D

Beck et al. PRL 98, 142501 (2007)



直接探索

VUV light source



J. Jeet et al., PRL 114, 253001 (2015)

$E=7.29 - 8.86$ eV at ALS

A. Yamaguchi et al.,

New J. Phys. 17 (2015) 053053

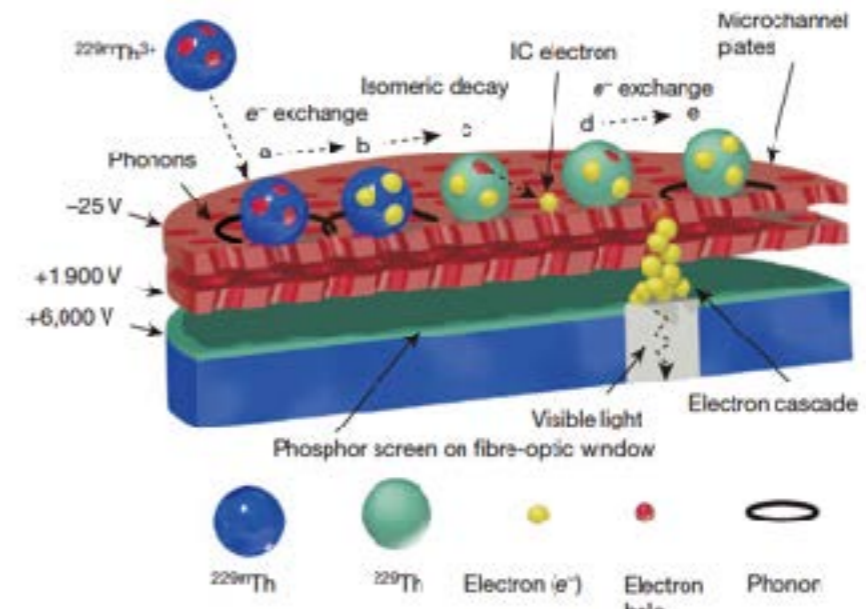
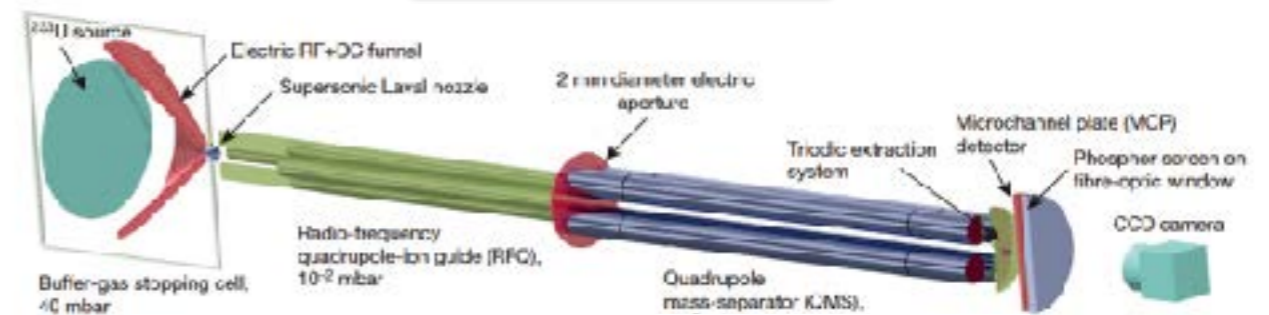
$E=3.54 - 9.54$ eV at MLS

S. Stellmer et al., arXiv 1803.09294

$E=7.5 - 10$ eV at MLS

Life ~ 1 sec

Th Ion beam



Lars von der Wense et al.,
Nature 533 (2016)

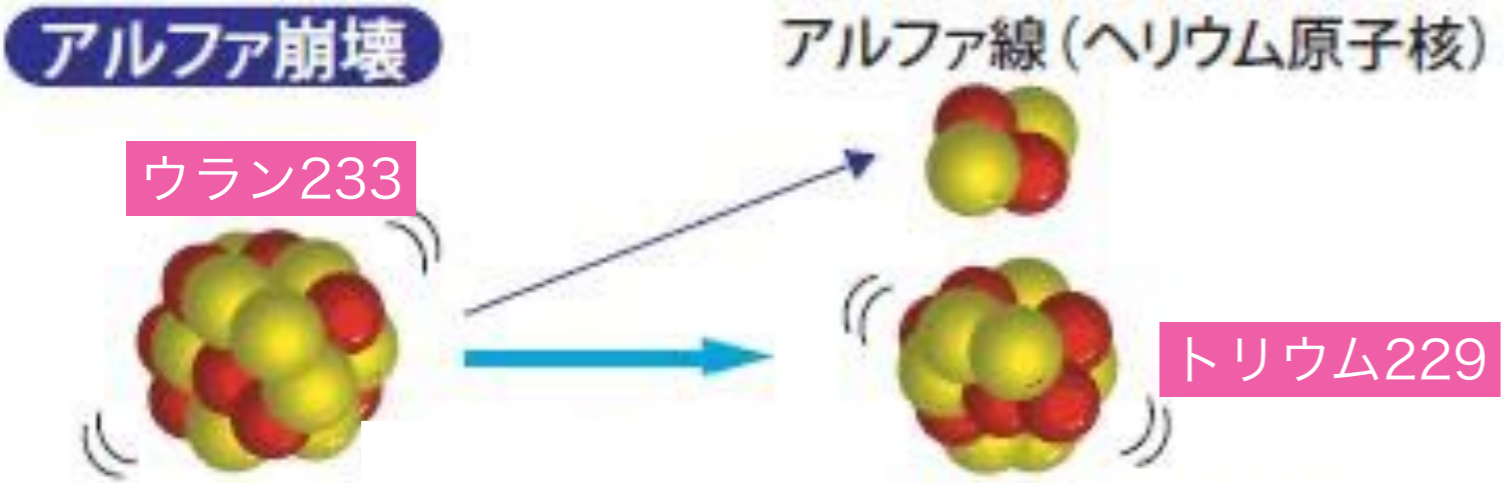
$E=6.3 \sim 18.3$ eV

Physics World 2016 Breakthrough of the Year
3rd Place

No VUV signal was observed yet!

トリウム229アイソマー状態の研究現状

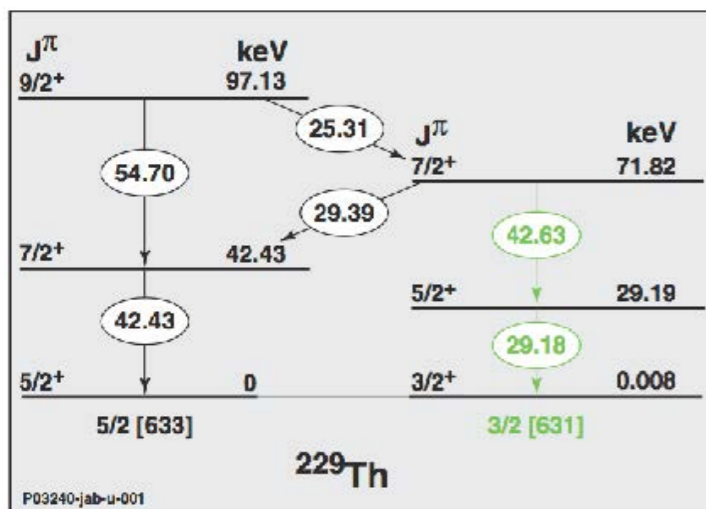
40年以上にもわたるアイソマー状態の研究により **大まかな励起エネルギーが判明**



ウラン233のアルファ崩壊から生じる
トリウム229を用いていた

レーザー励起するには精度が足りない
アイソマー状態の光遷移は確認できず

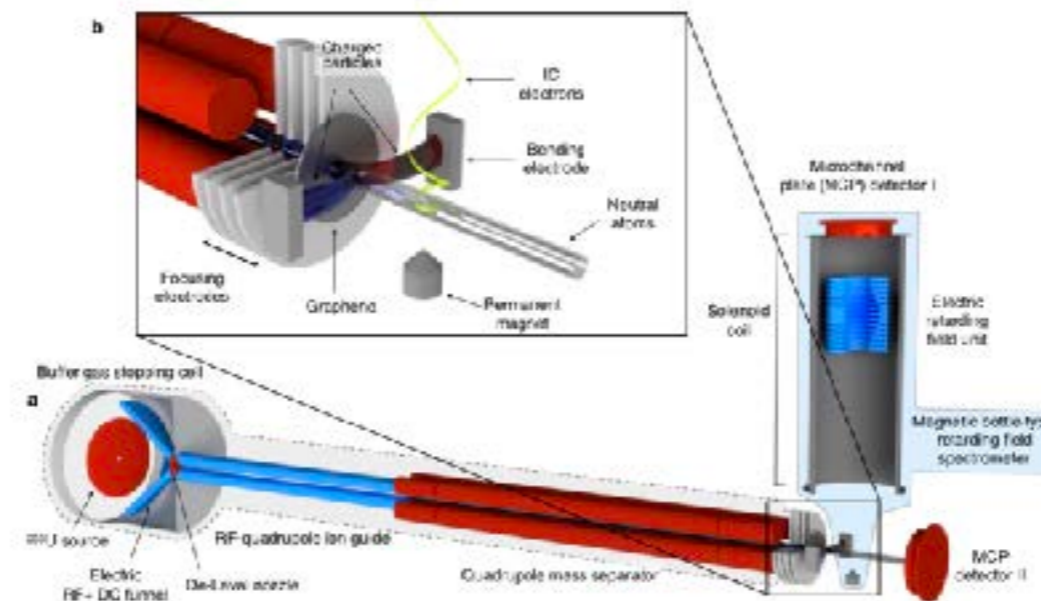
γ線スペクトロスコピー



アイソマー状態のエネルギー

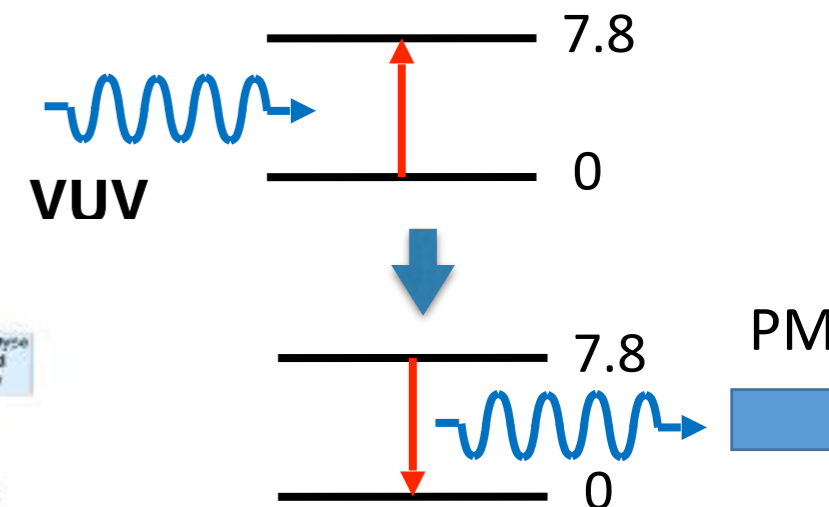
$$E = 8.10 \pm 0.17 \text{ eV}$$

Th Ion beam



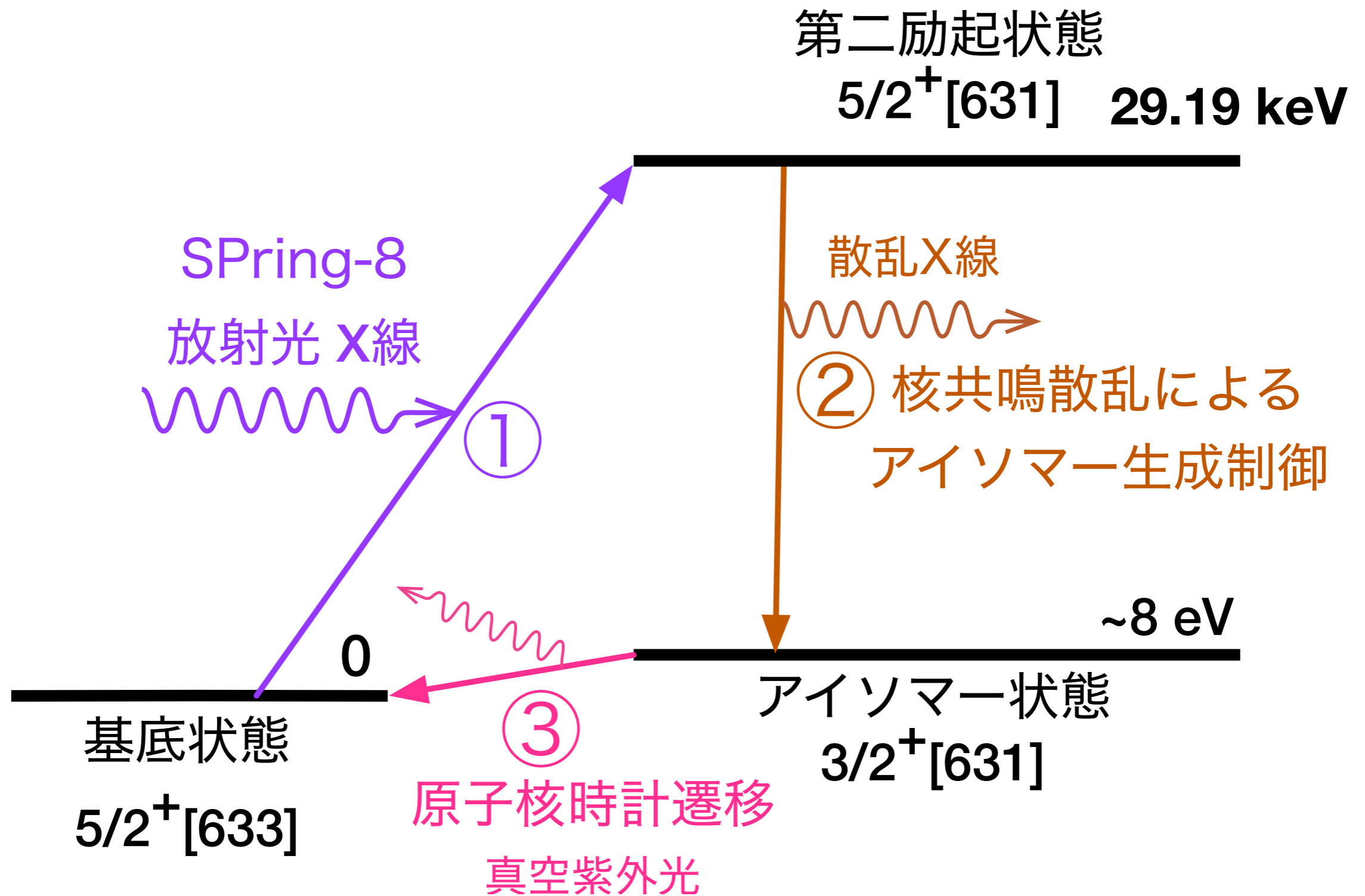
$$E = 8.28 \pm 0.17 \text{ eV}$$

VUV light source



励起確認できず

高輝度X線を用いた新しい手法



Th collaboration



岡山大学

海野弘行, 原秀明, 平木貴宏, 増田孝彦, 宮本祐樹, 岡井晃一, 笹尾登, 植竹智, 吉見彰洋, 吉村太彦, 吉村浩司



理化学研究所

玉作賢治, 山口敦史, 羽場宏光, 横北卓也, 重河優大



大阪大学

笠松良崇, 安田勇輝



東北大学・金研大洗センター

小無健司, 渡部信



京大原子炉

瀬戸誠, 北尾真司



SPring-8

依田芳卓



産総研

藤本弘之, 渡部司

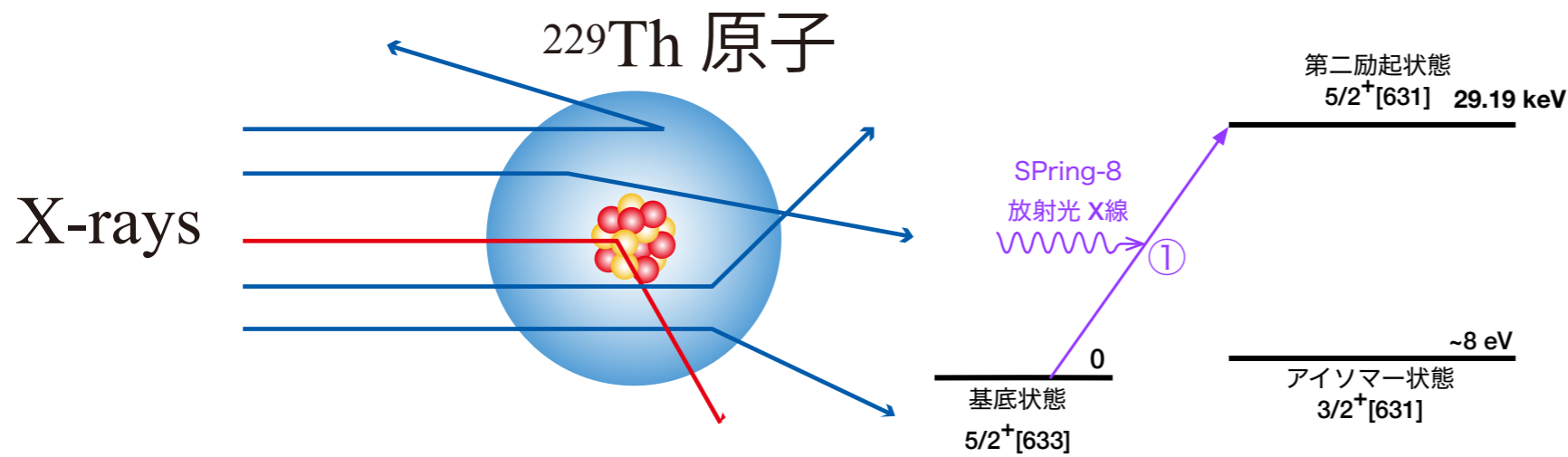


ウィーン工科大学

T. Schumm, S. Stellmer

日本が誇る先端技術の結集
オールジャパンの研究体制で推進

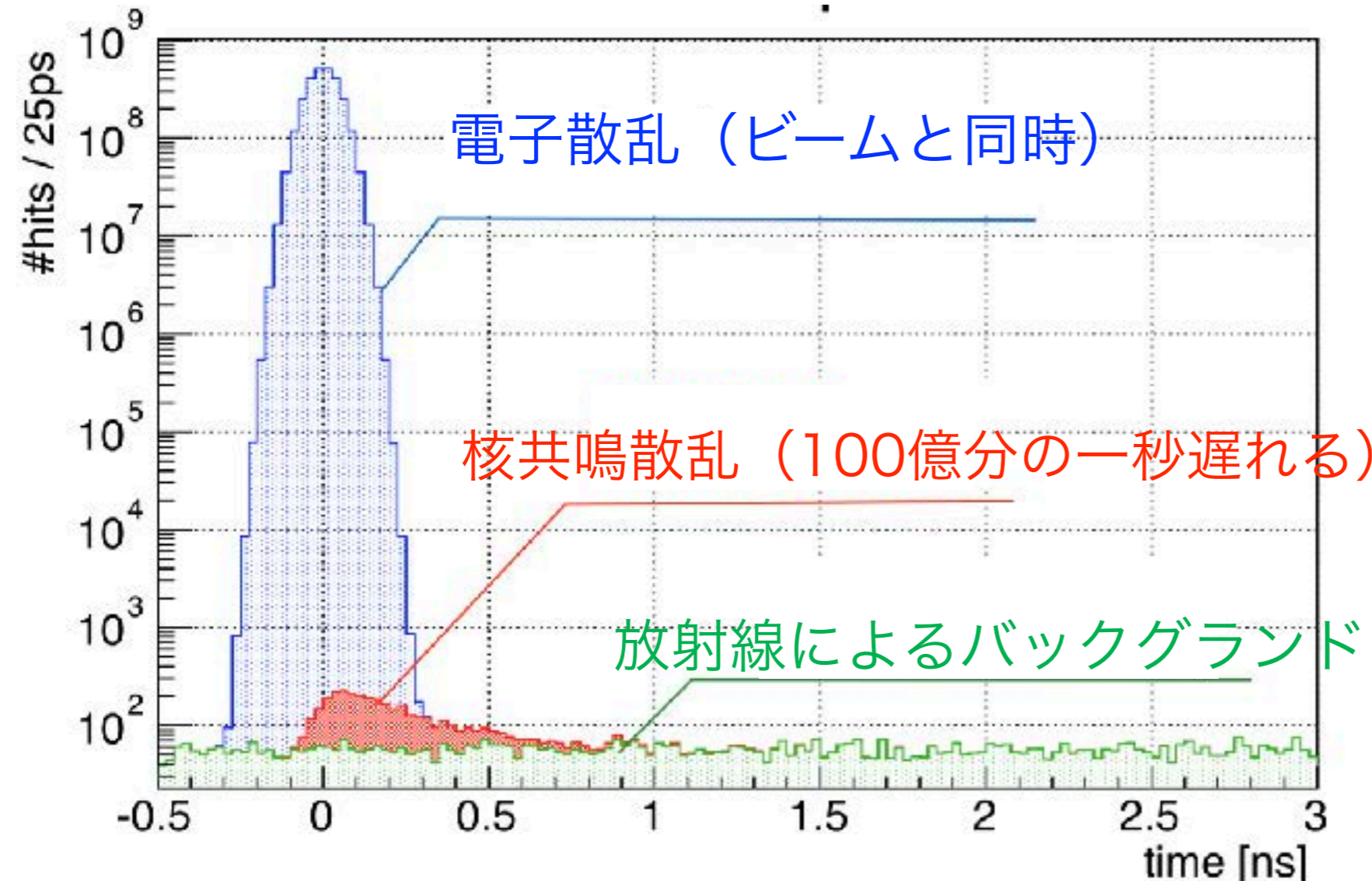
核共鳴散乱



問題点

- ・低頻度（毎秒 1 回以下）
- ・短寿命（100億分の1秒）
- ・高バックグラウンド

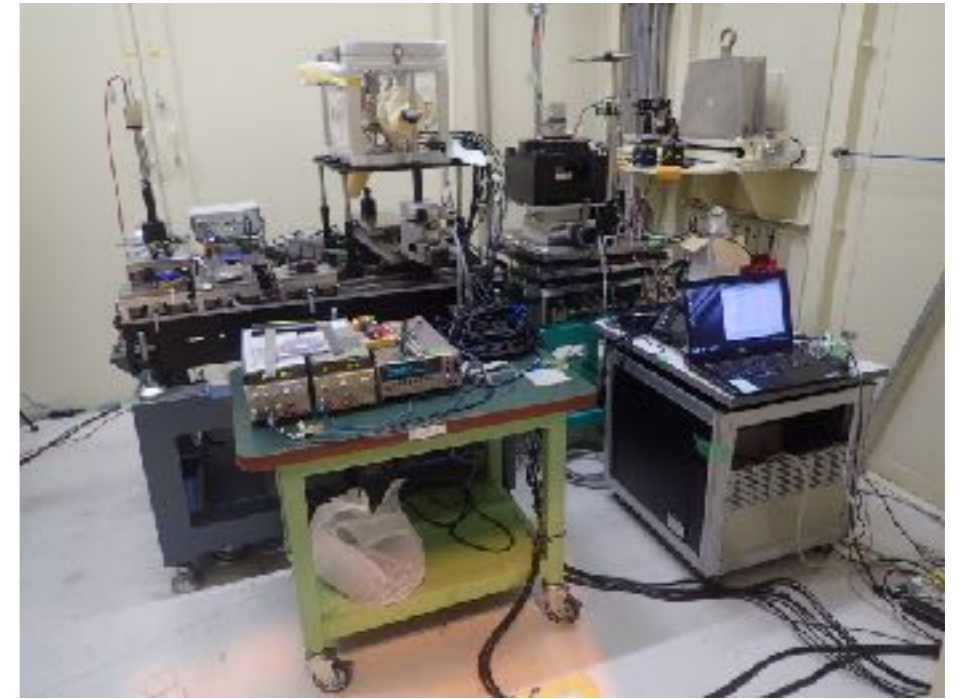
青の電子散乱に比べて
100万分の1以下



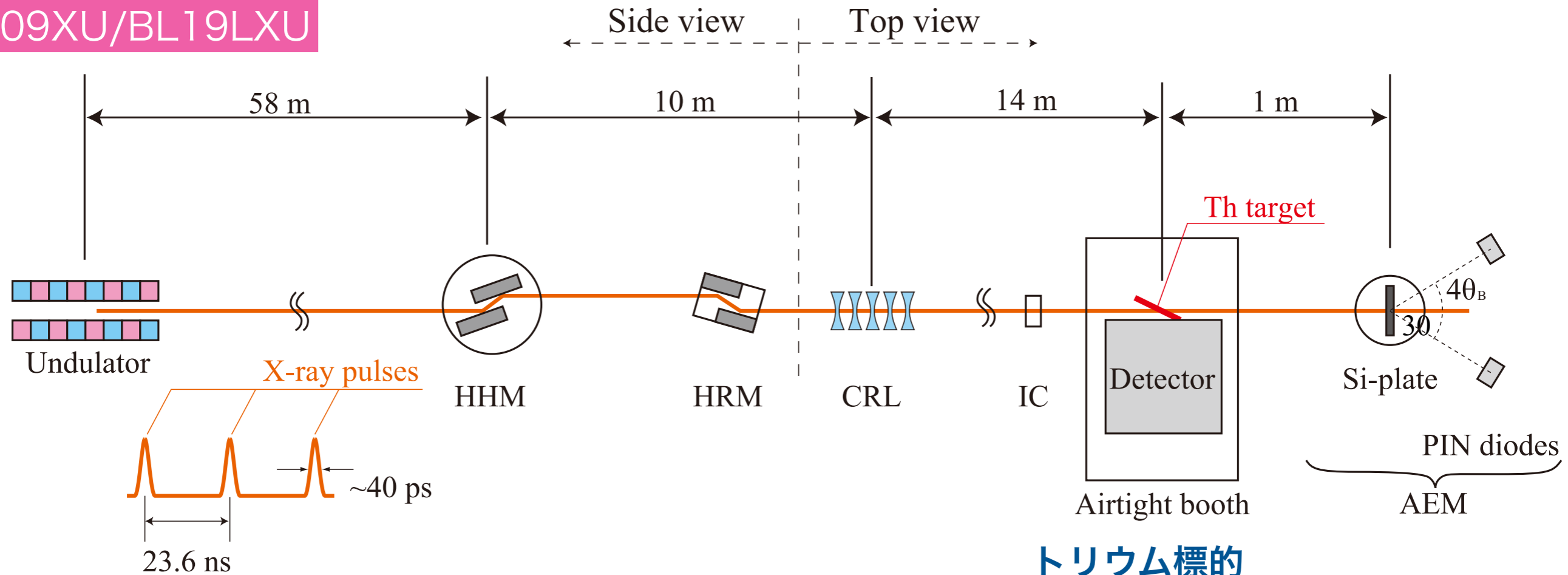
実験への要求

- ・高輝度ビーム（集光）
- ・高分解能ビーム
- ・高密度標的
- ・高時間分解能
- ・高計数率検出器
- ・高精度エネルギーモニター

SPring-8 実験



BL09XU/BL19LXU



高分解能ビームおよびビーム集光

トリウム標的
検出器

エネルギーモニター

トリウム標的

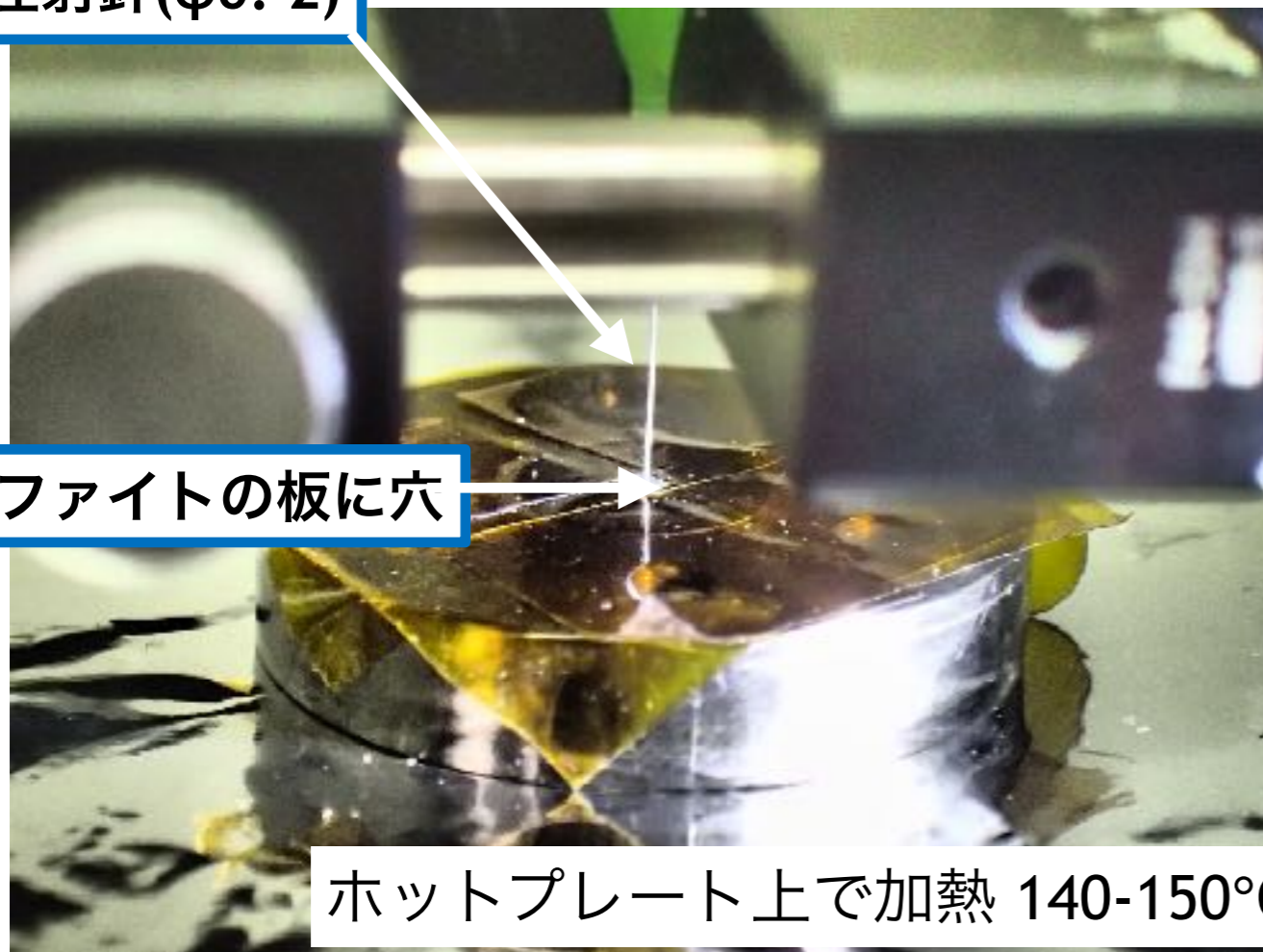
核共鳴散乱観測のための小径高密度化

微量のトリウム²²⁹試料を有効に利用するため小径高密度化が必要

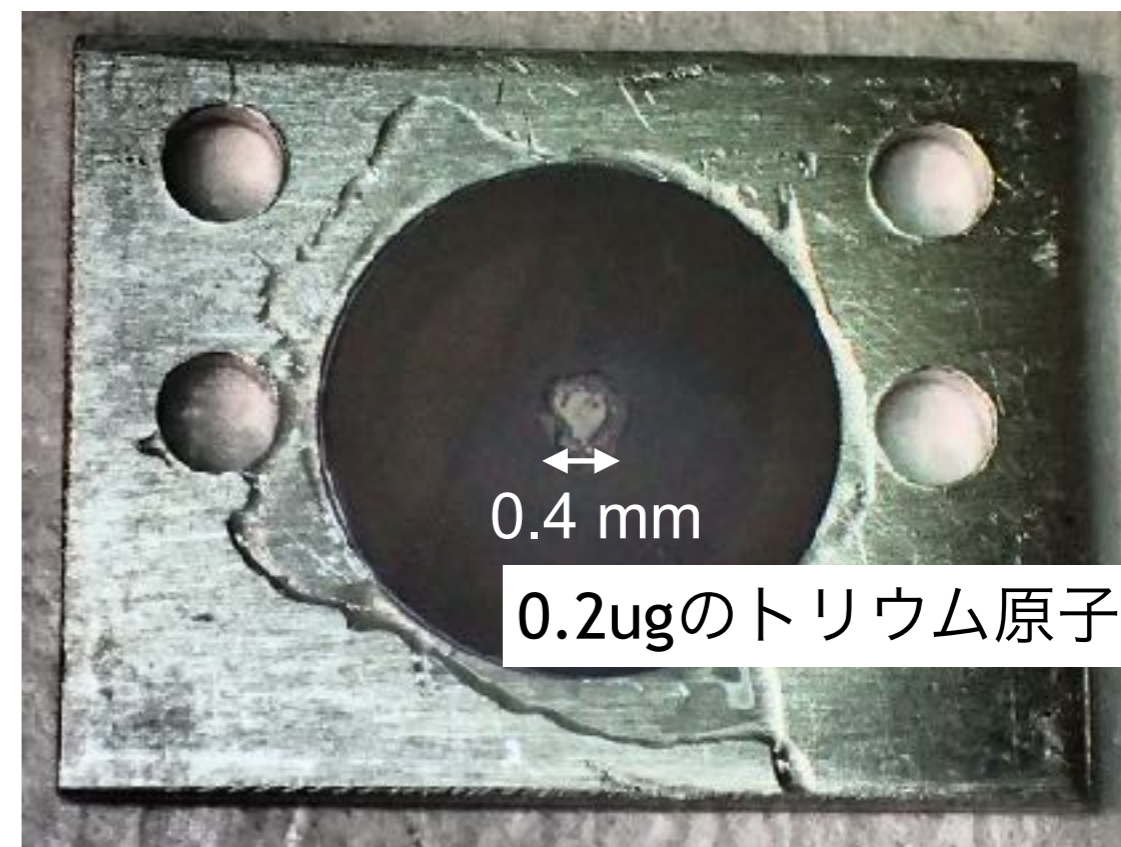
東北大金研大洗センター
小無氏, 渡部氏
阪大・放射化学Gr.
笠松氏, 重河氏, 安田氏
理研RI応用チーム
羽場氏, 横北氏

注射針(φ0.2)

グラファイトの板に穴



ホットプレート上で加熱 140-150°C



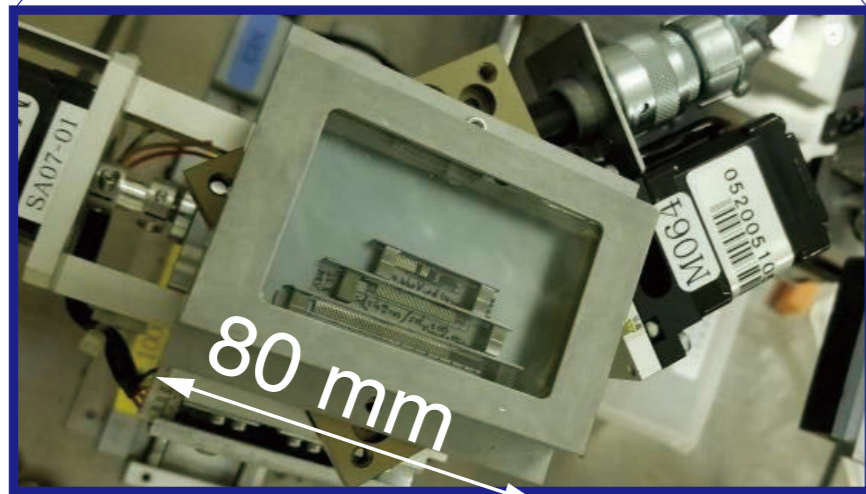
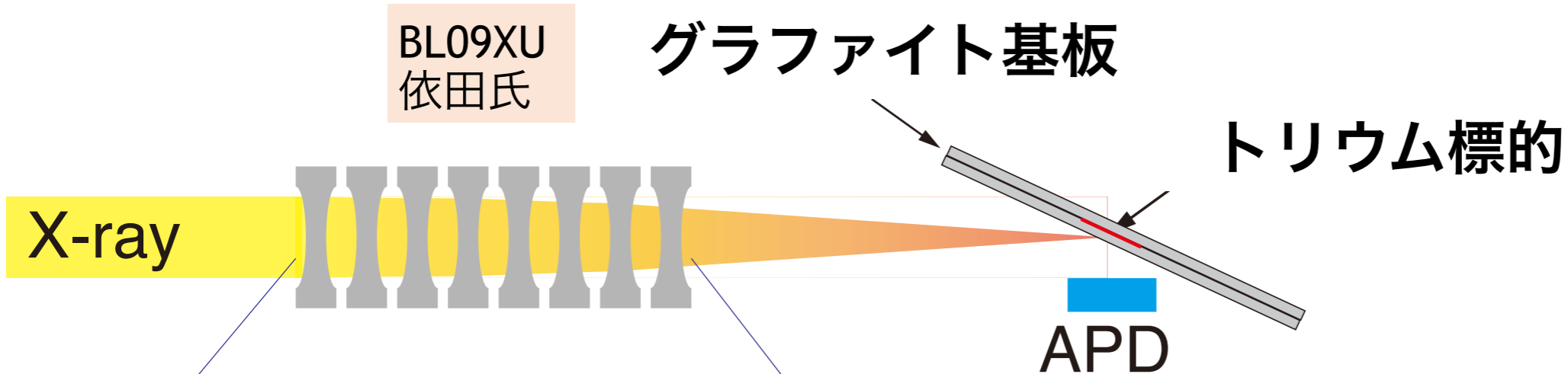
グラファイト板に微量ずつ滴下して, 乾固させて作成

高分解能ビームおよびビーム集光

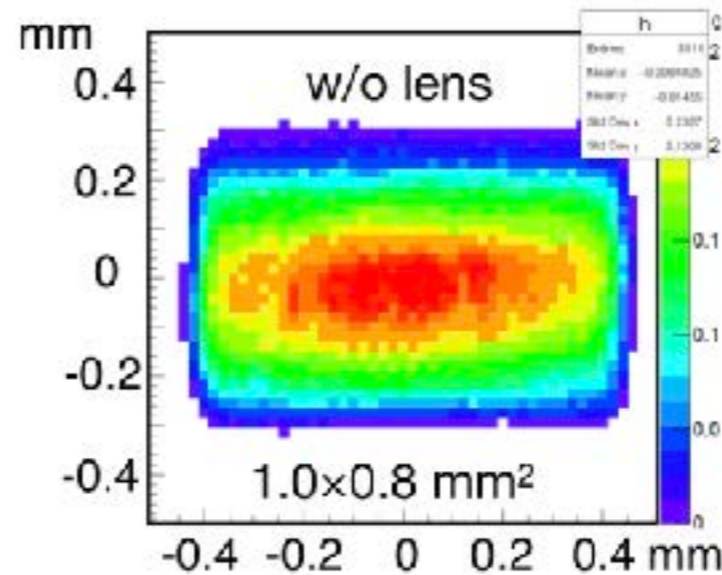
高精度モノクロメータ+集光システム

高精度モノクロメータSi(440), Si(660)で単色化
小径化したスポットにX線を集光することにより信号を増加

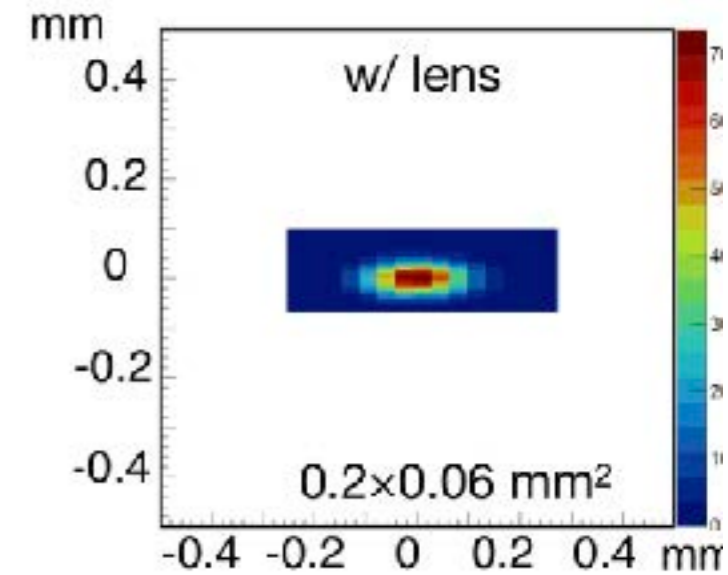
BL09XU
依田氏, 小林氏
BL19LXU
玉作氏, 石野氏
京大原子炉
瀬戸氏, 北尾氏



屈折レンズ



屈折レンズ前
ビームプロファイル



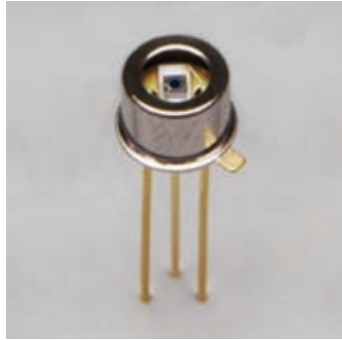
屈折レンズ後
ビームプロファイル

高速高時間分解能X線検出器

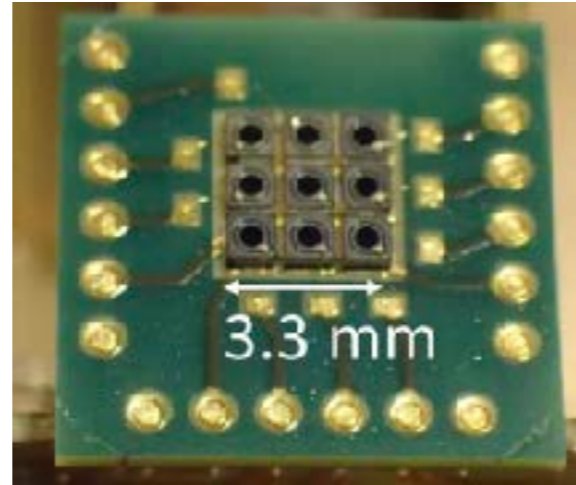
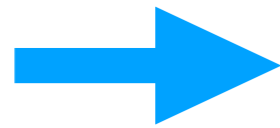
多チャンネルAPD+読み出し系

高時間分解能かつ高効率で波高測定可能

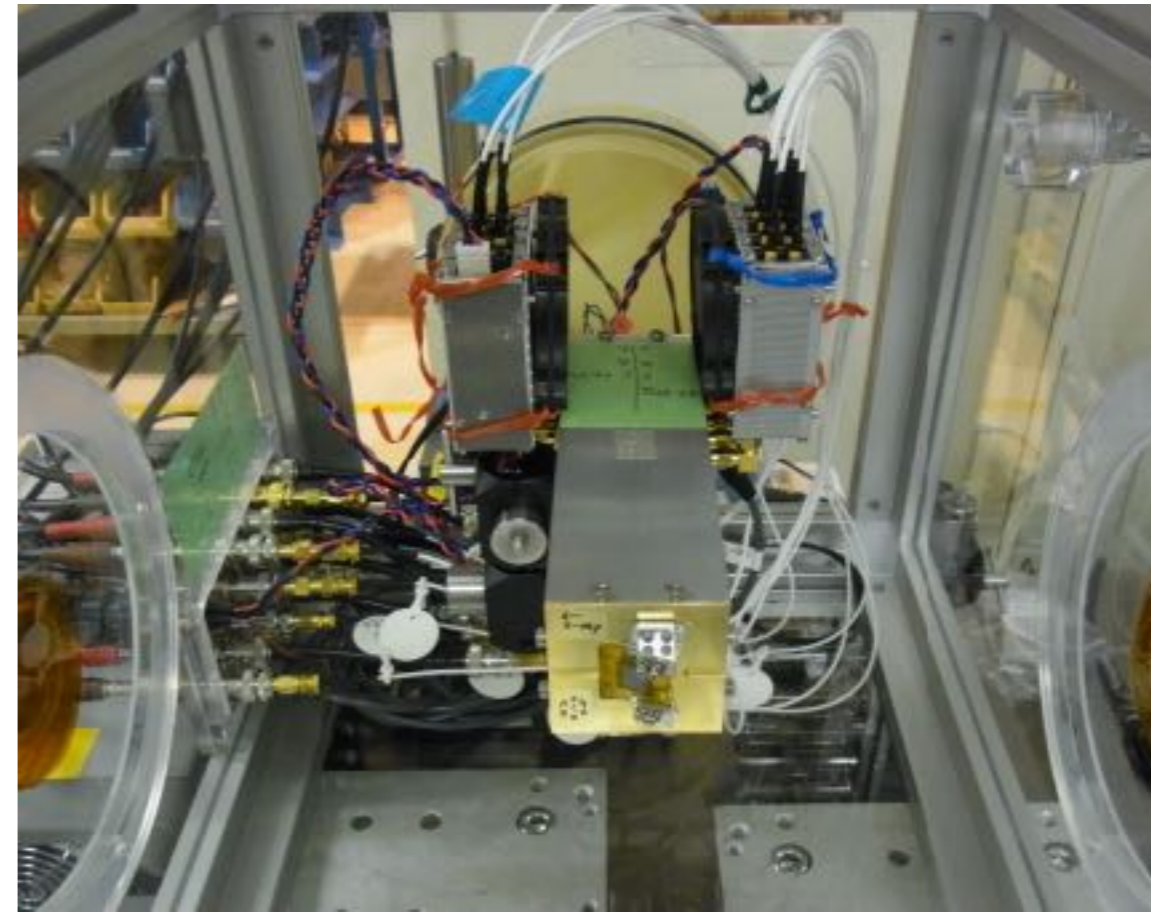
APD



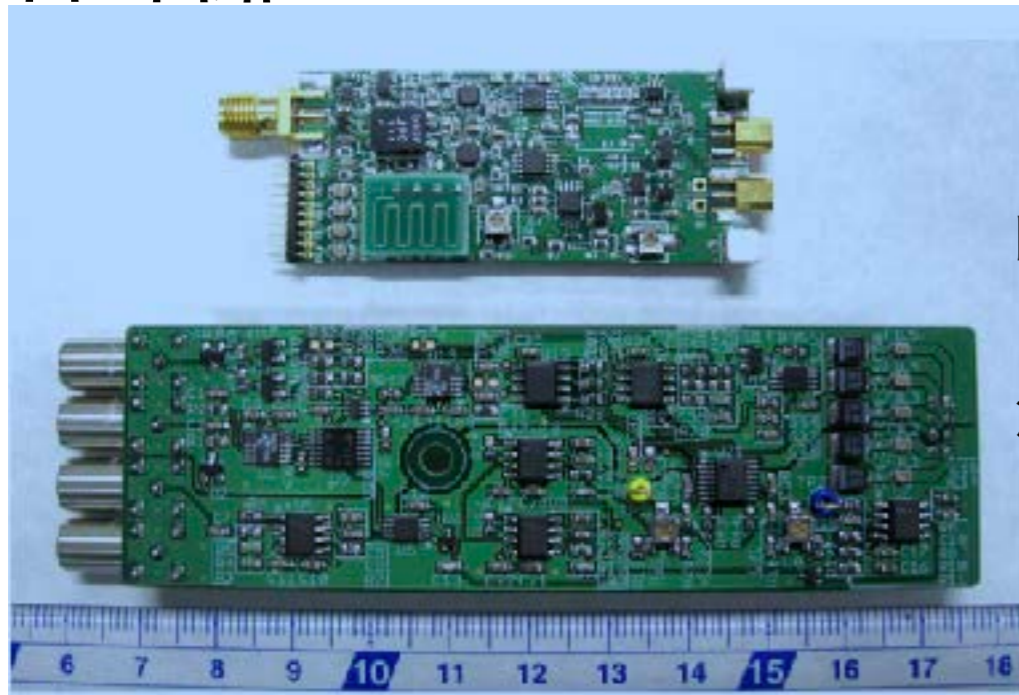
浜松ホトニクス
S12053-05 ($\phi 0.5$)



浜松ホトニクス
特注した 9ch APD



読み出し回路



高速CFD (KEK
Belle グループ)

波高一時間変換回路
(岡山大学)



超高速100 ps時間分解能TDC
COMTECH

X線エネルギーモニター: ボンド法

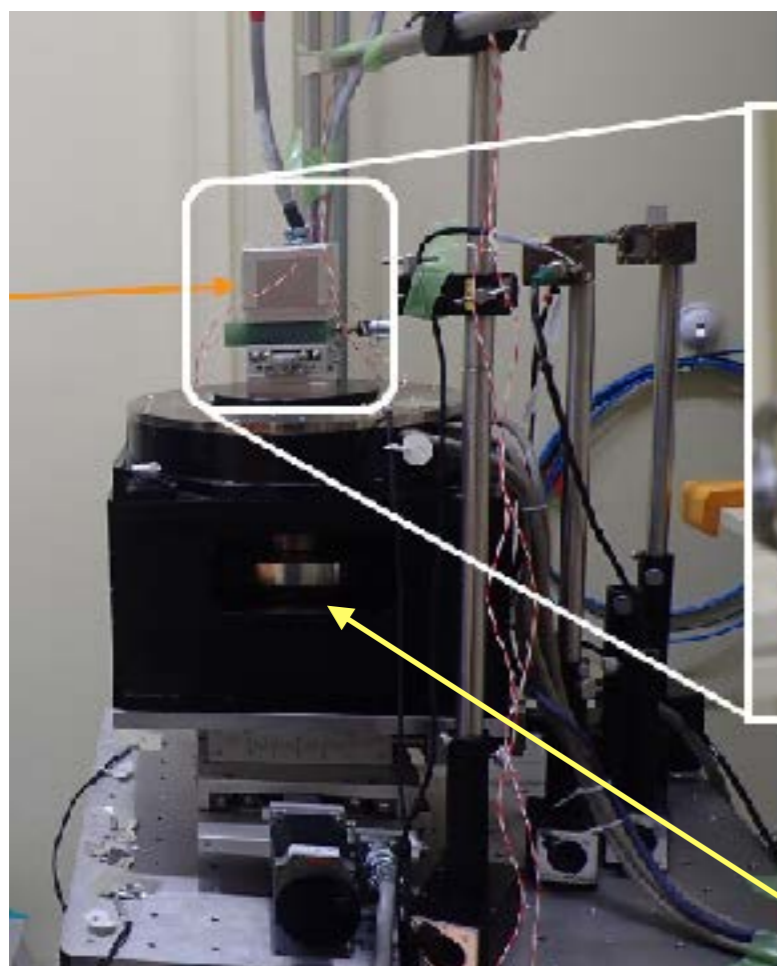
産業総合技術研究所

渡部氏、藤本氏

BL09XU 依田氏

BL19LXU 玉作氏

ビーム最下流に設置

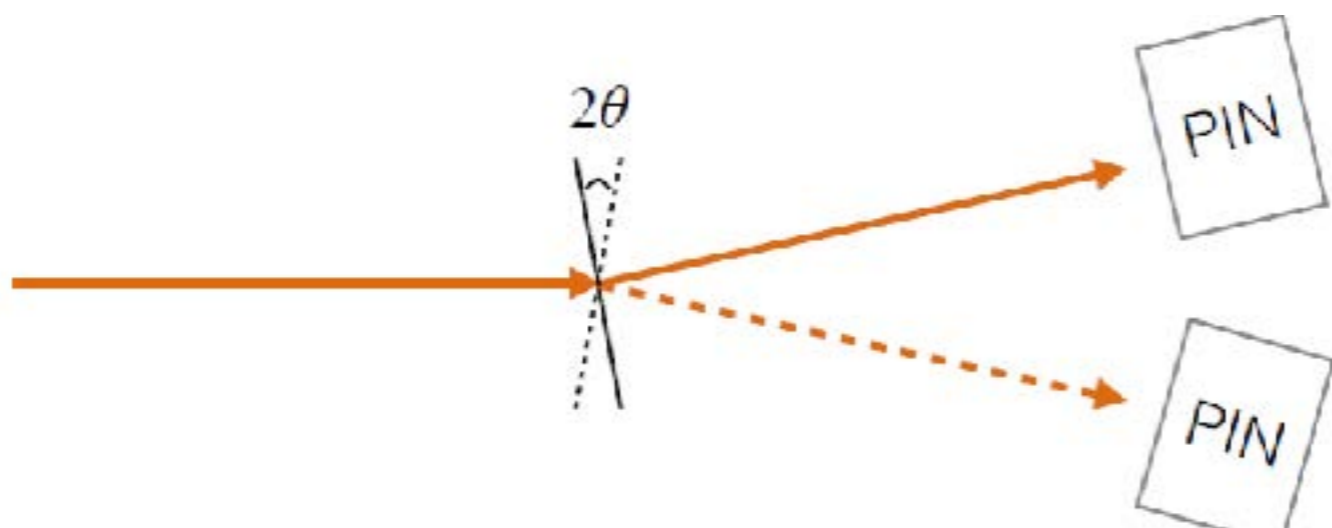


Silicon 結晶



- ・ 格子定数が精度良く調べられている Si 結晶を回転
- ・ 2つの検出器のピークから回折角度 2θ を決定

自己校正型ロータリーエンコーダーを搭載した回転テーブルで超高精度角度計測

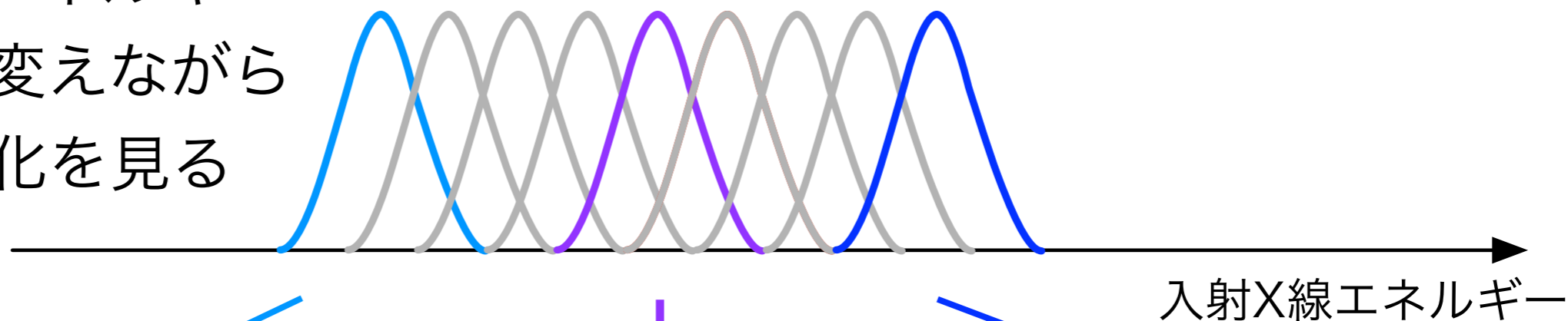
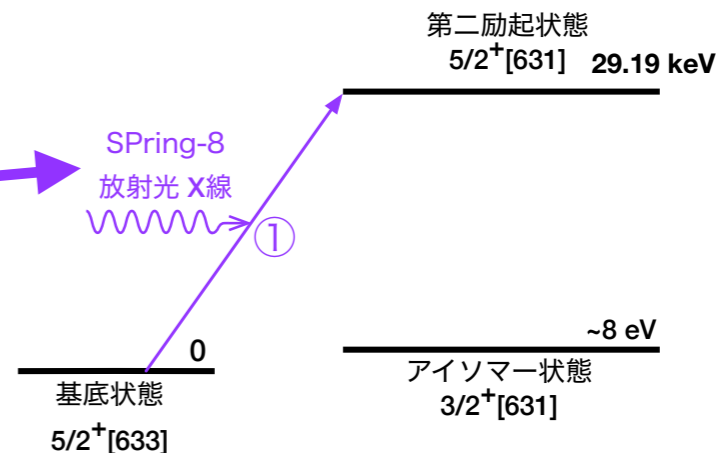


~0.1 eV の絶対精度で
入射エネルギーを決定

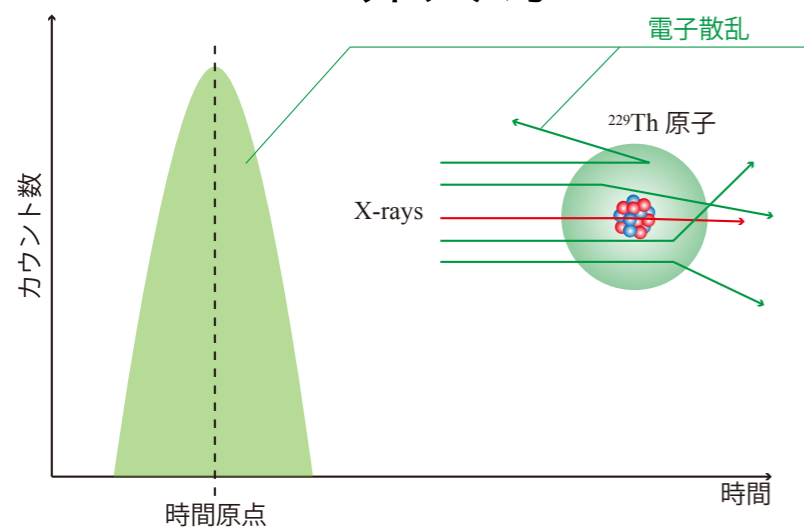
核共鳴探索

入射X線のエネルギーを少しずつ変えながら信号の変化を見る

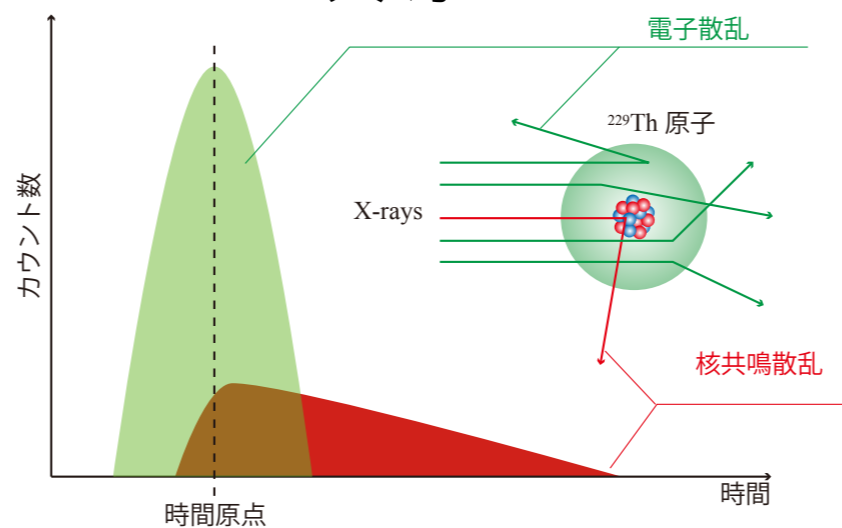
共鳴エネルギー



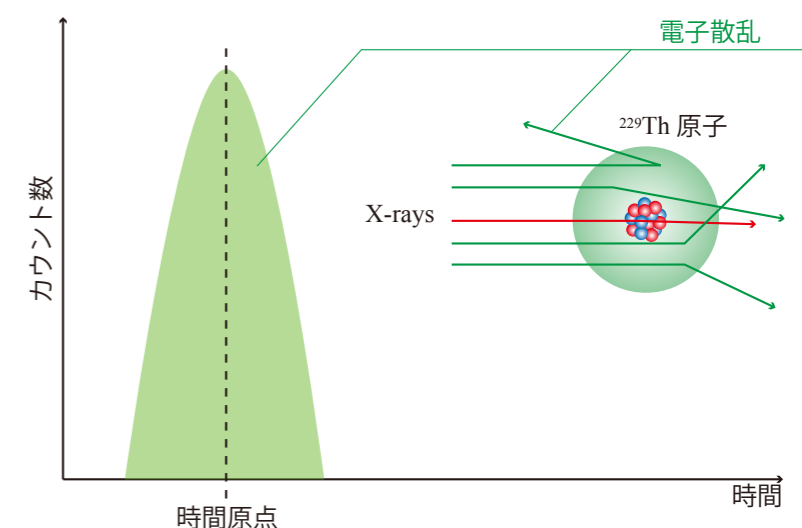
非共鳴



共鳴



非共鳴



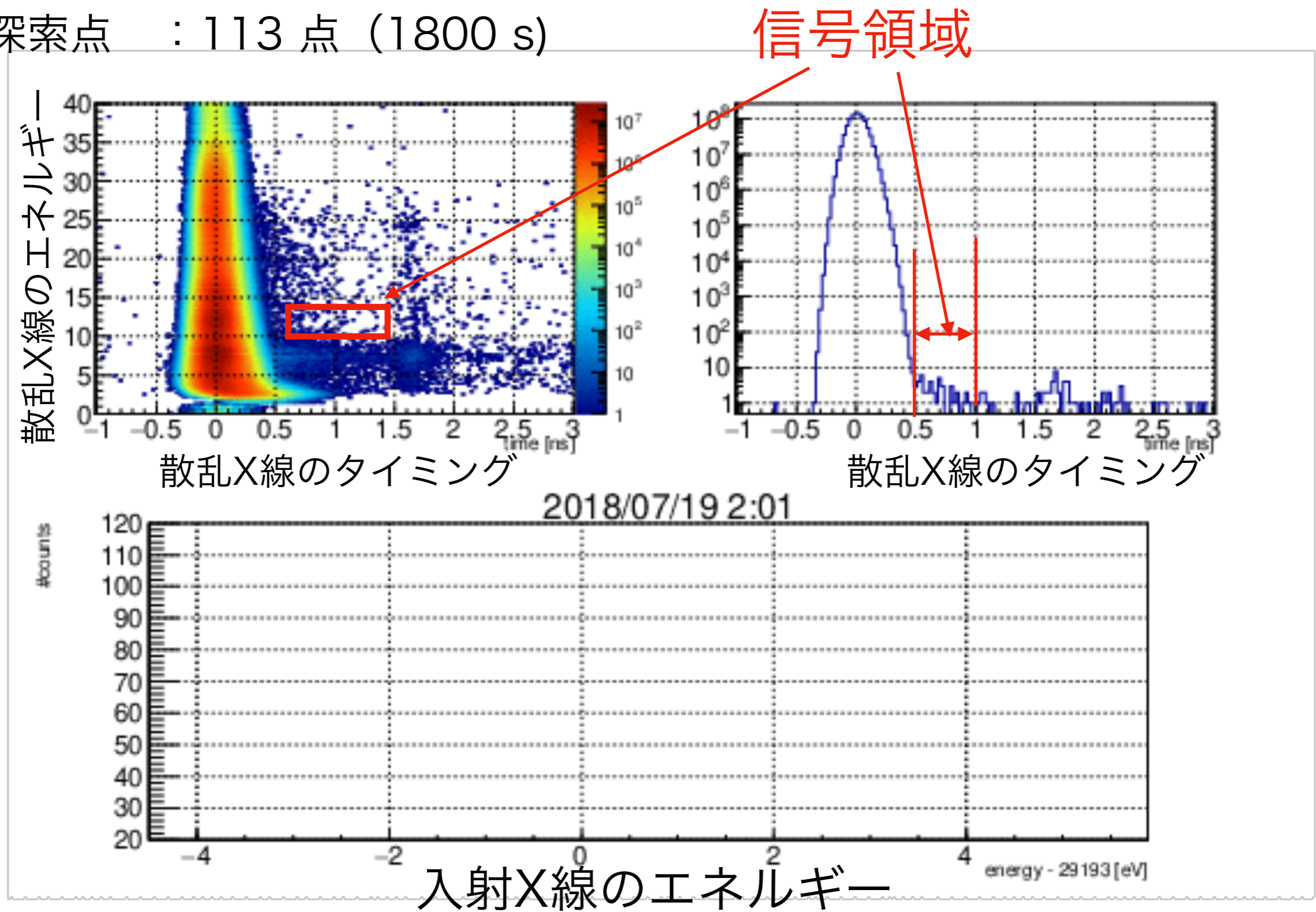
入射X線エネルギーが共鳴エネルギーに一致した時のみ信号が観測される

核共鳴探索

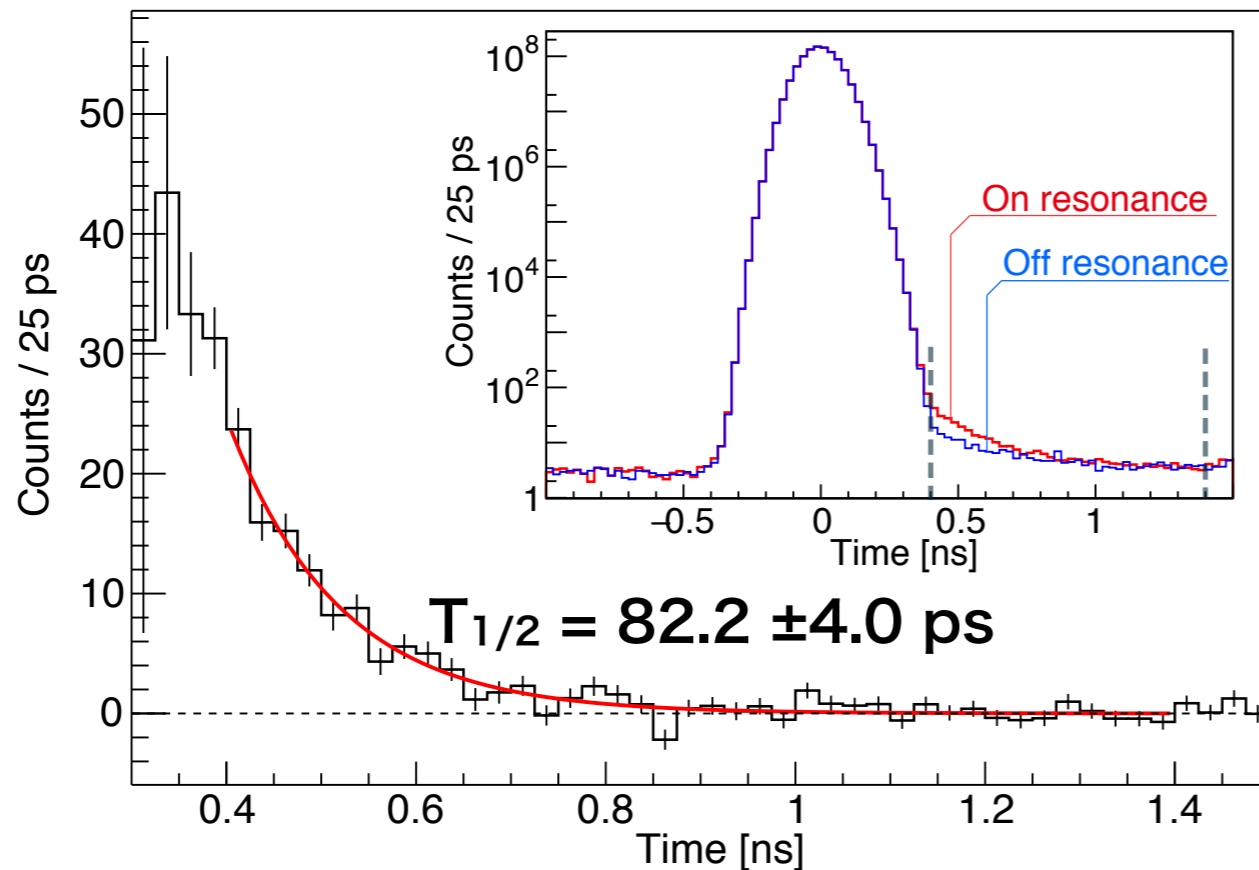
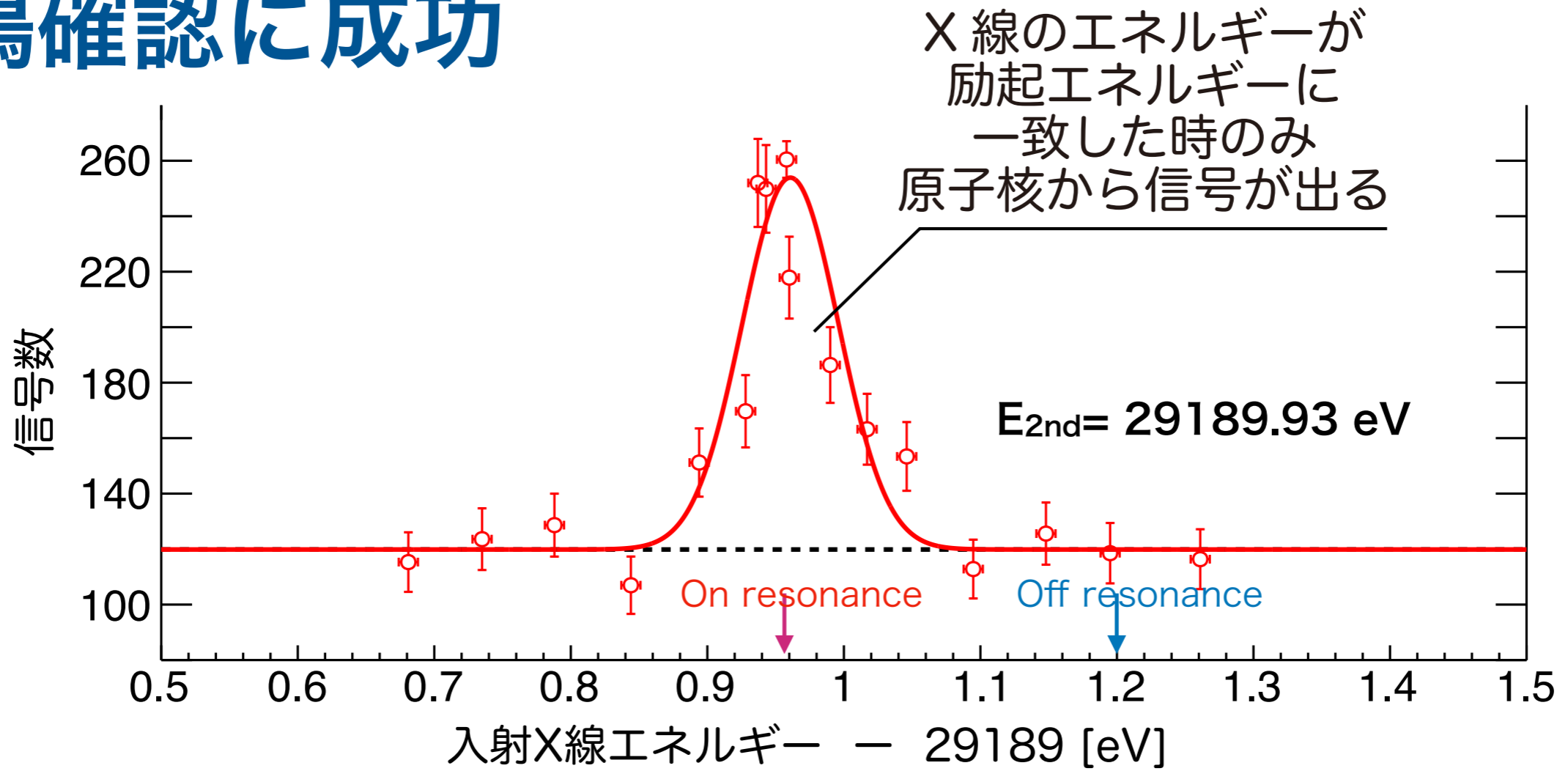
探索時間：67時間 (2018.7.19 2:00 - 7.21 21:00)

探索範囲：8.4 eV (0.1 eV step)

探索点：113点 (1800 s)

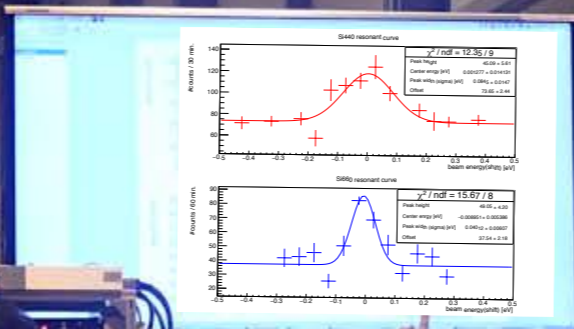


共鳴確認に成功

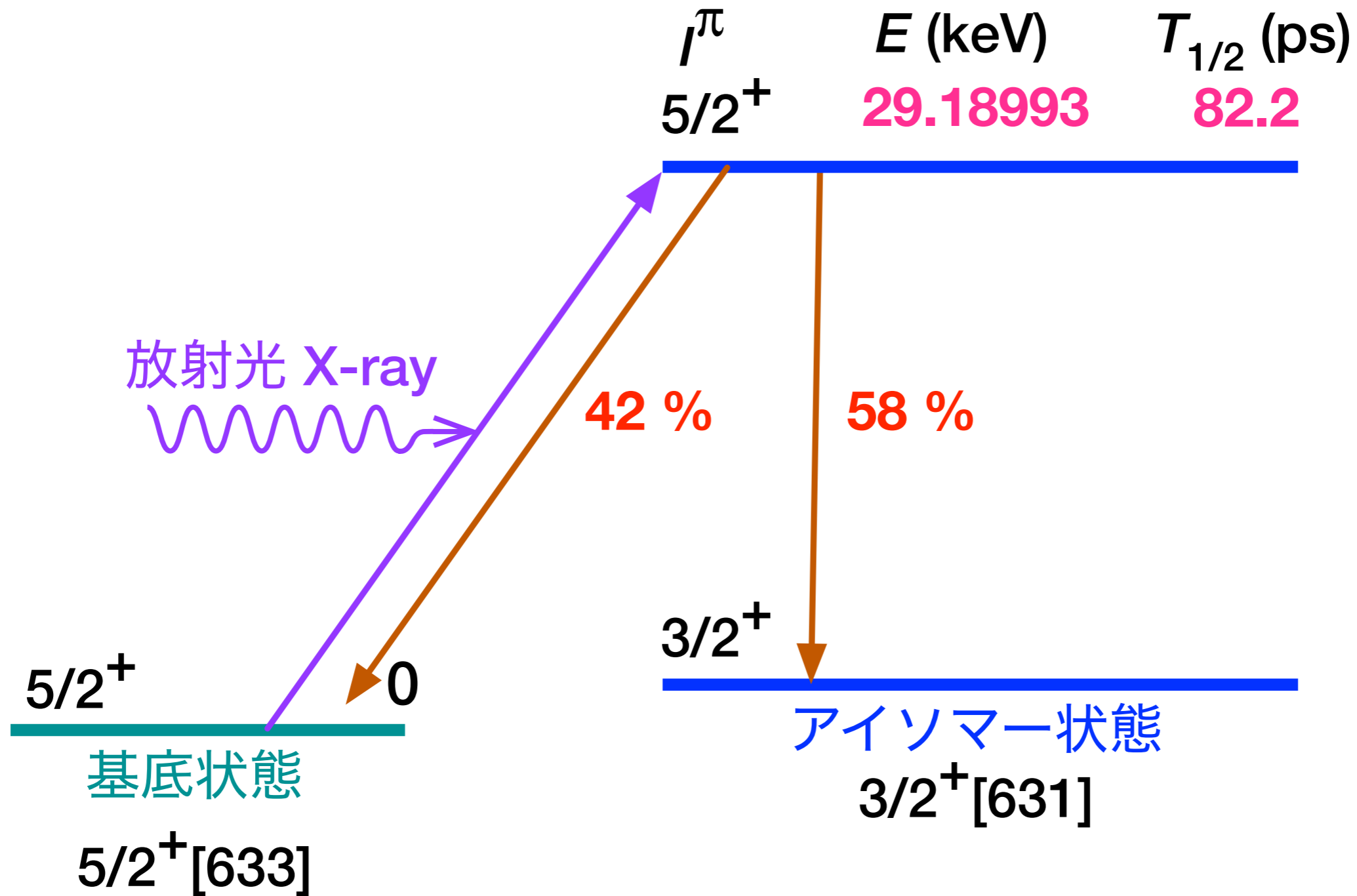


共鳴と非共鳴の差から
共鳴準位の半減期を測定

※画面はハメコミ合成



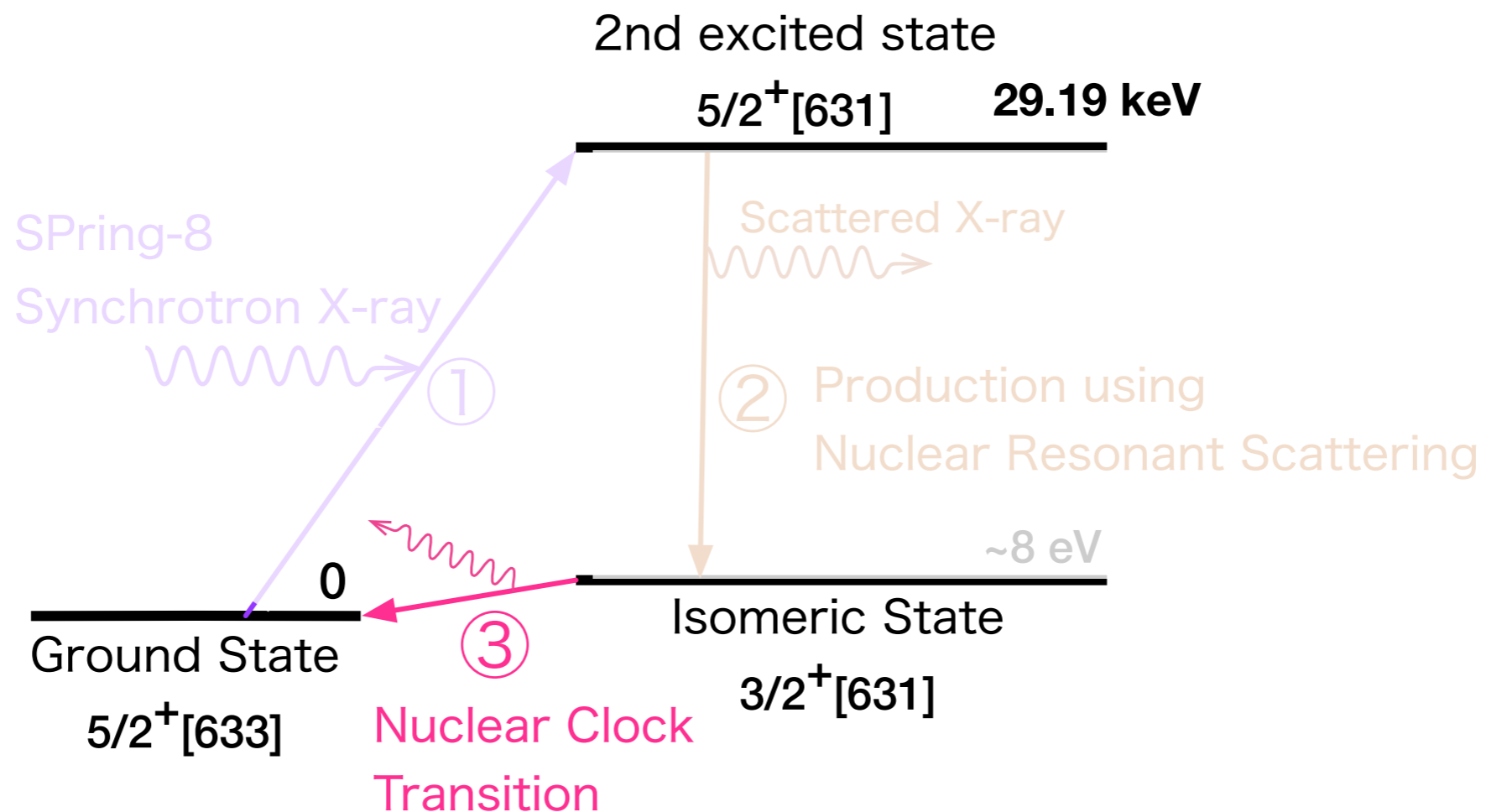
アイソマーの人工的（能動的）生成に成功



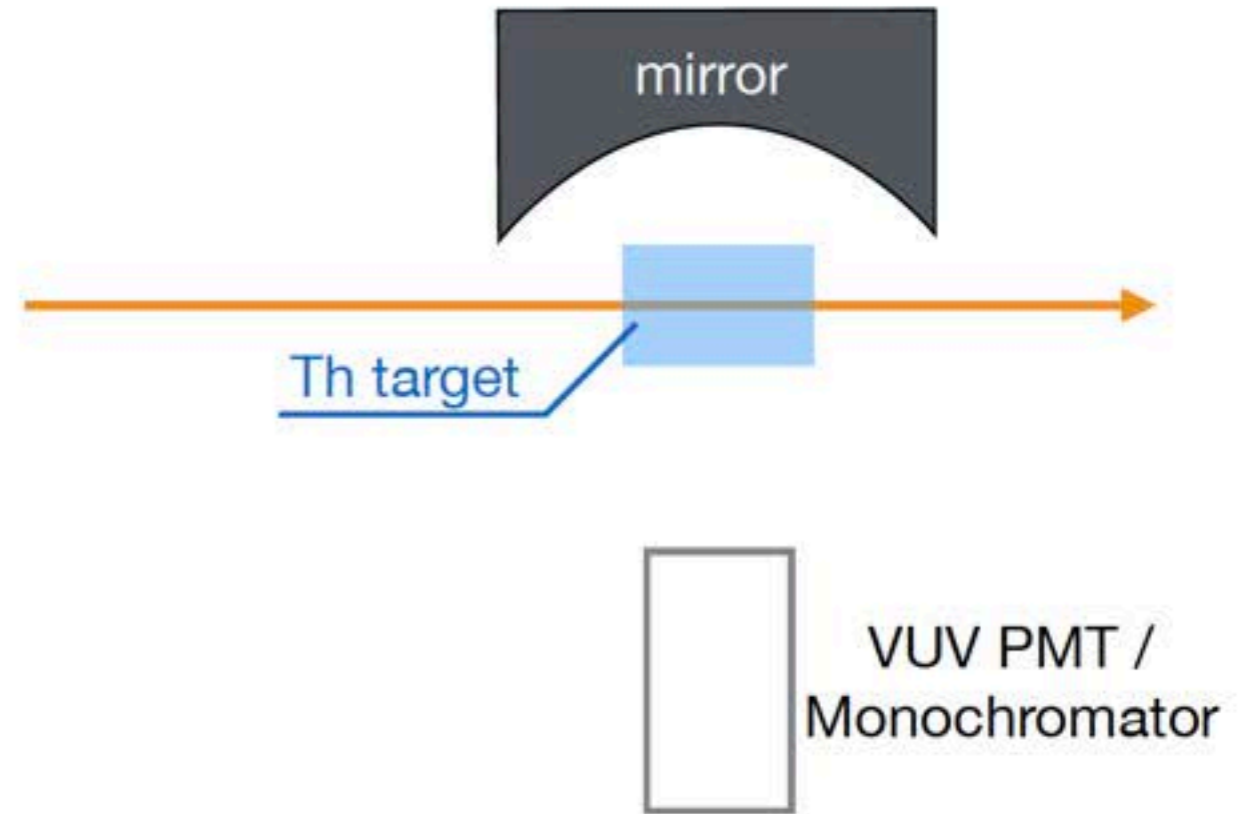
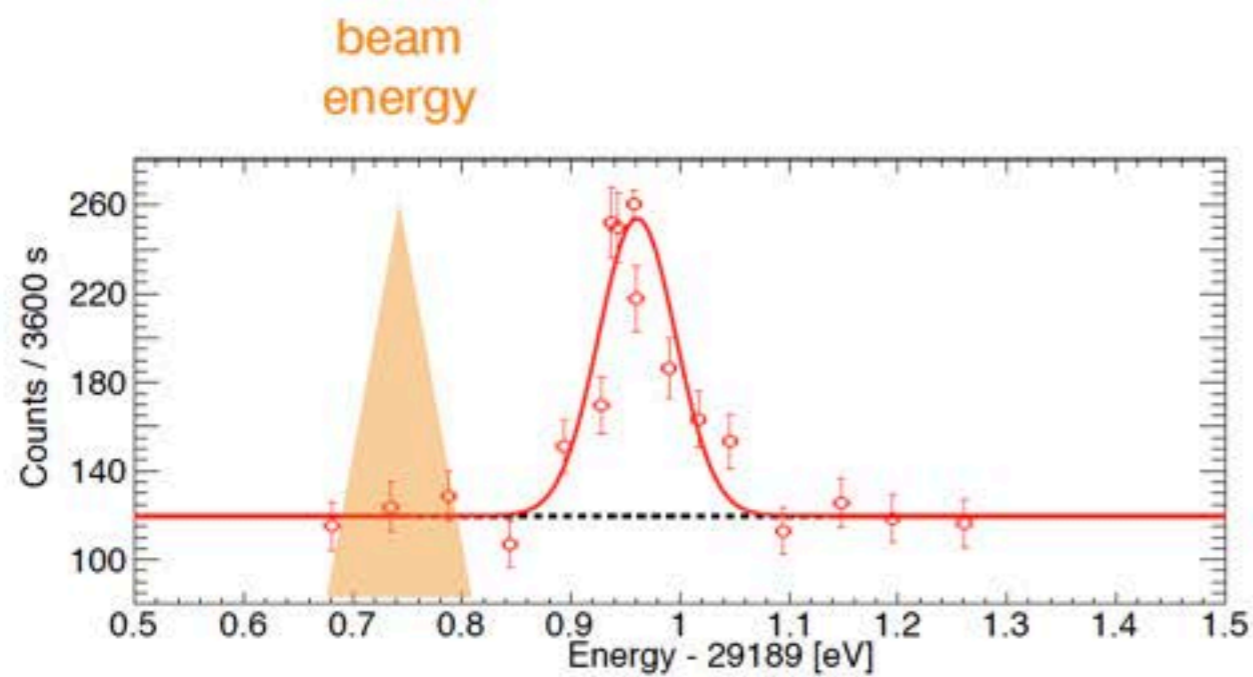
アイソマーの生成レートは 25 kHz

基底状態からの励起に成功（コントロール可能）

アイソマー状態からの脱励起光探索



VUV Search using NRS technique



- **Need VUV transparent target**

Th doped UV transparent crystal have been developed



Th:CaF₂ (Schumm Group, AU)

Th:LiSAF (Hudson Group, USA)

Solid state nuclear clock

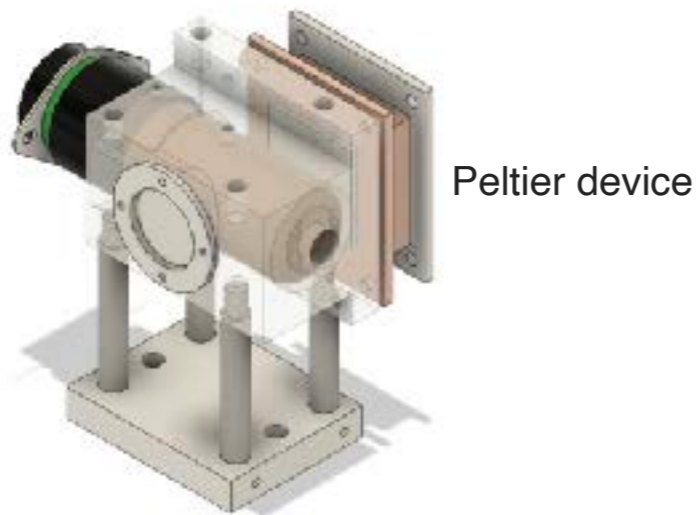
J. Phys.:Condens. Mat. 21, 325403 (2009)

J. Phys.: Condens. Matter 26 (2014) 105402 (9pp)

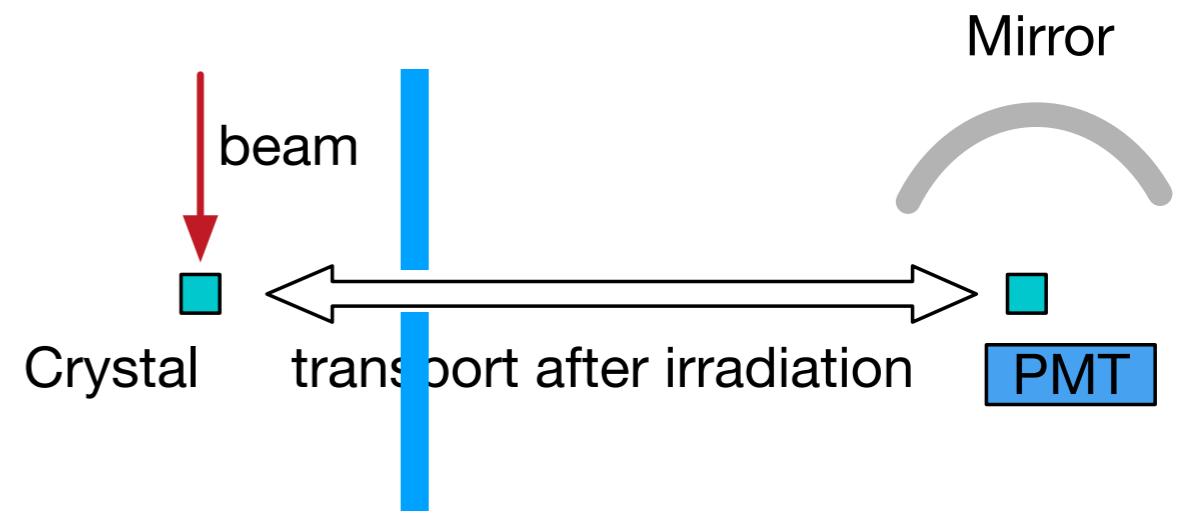
Several Issues

Event rate is low (<0.5 cps)

Cooled PMT(R10454) with positive HV
Dark count ~ 0.04 cps

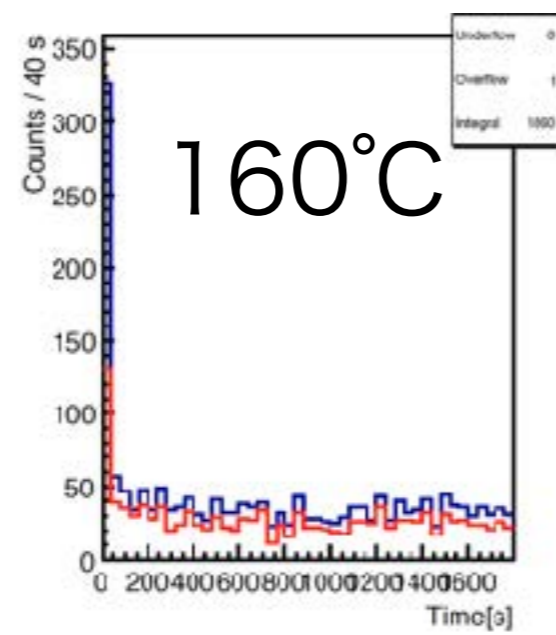
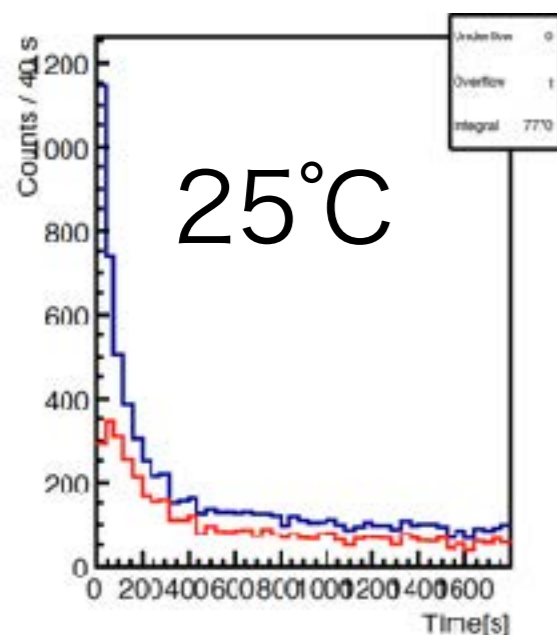


PMT flash during irradiation



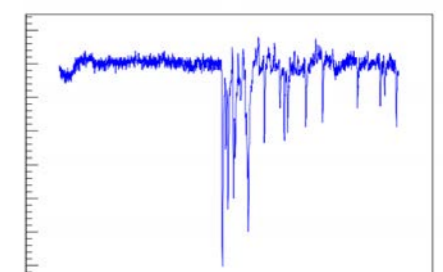
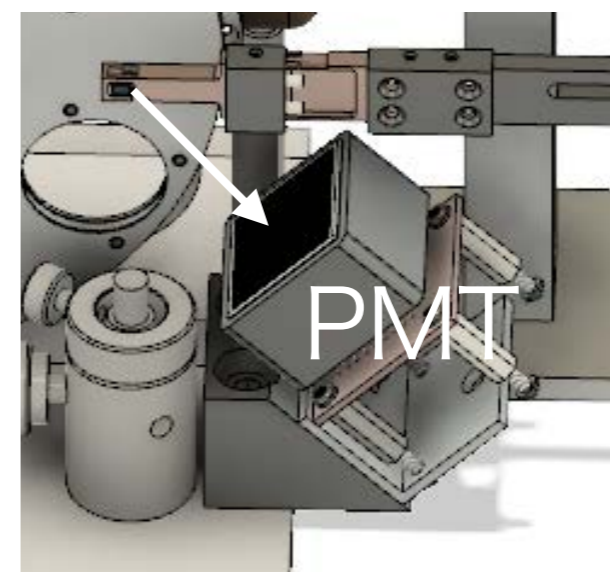
After glow (beam induced)

Heating crystal to 160°C



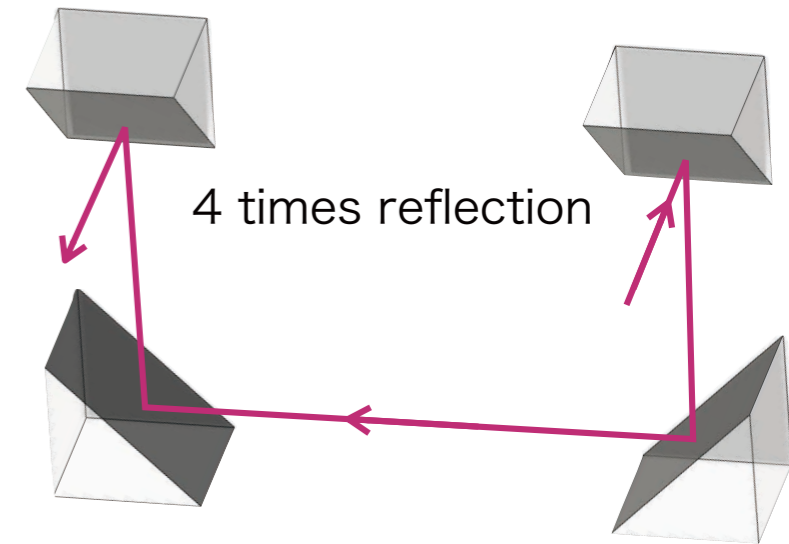
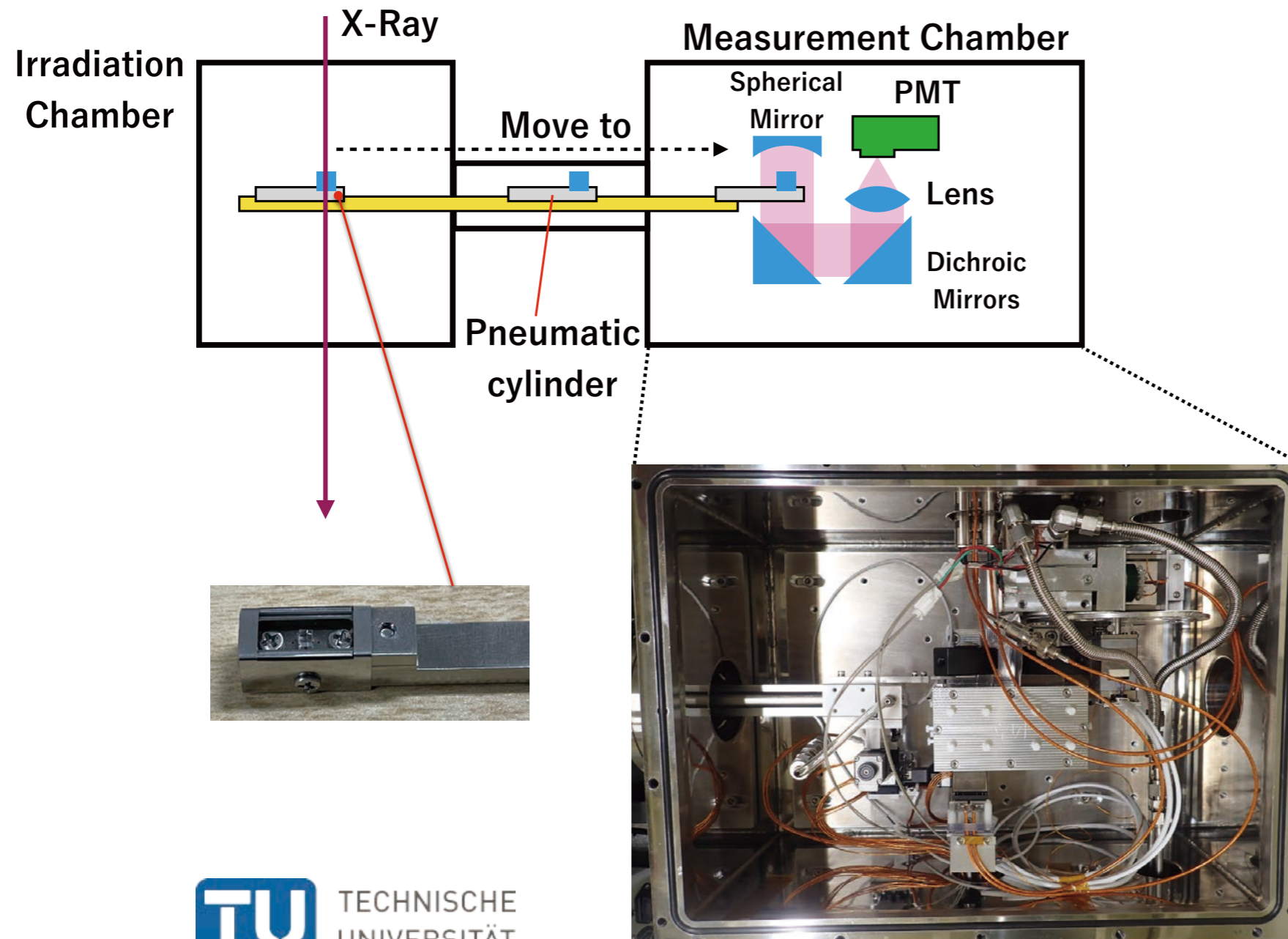
Radio luminescence

Veto counter

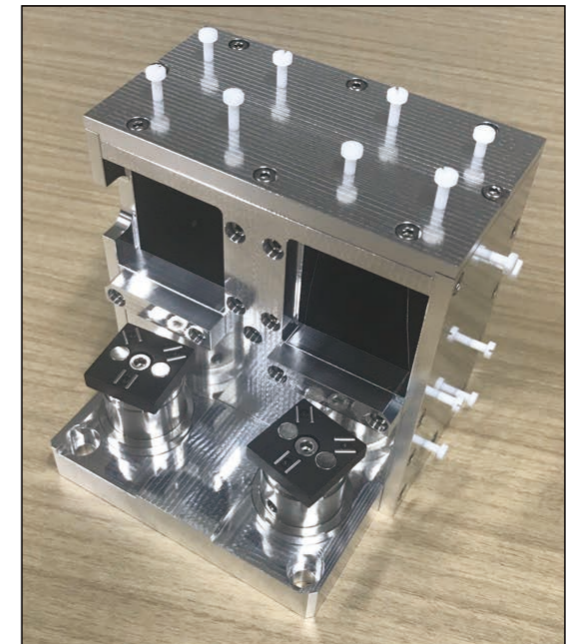


Scintillation

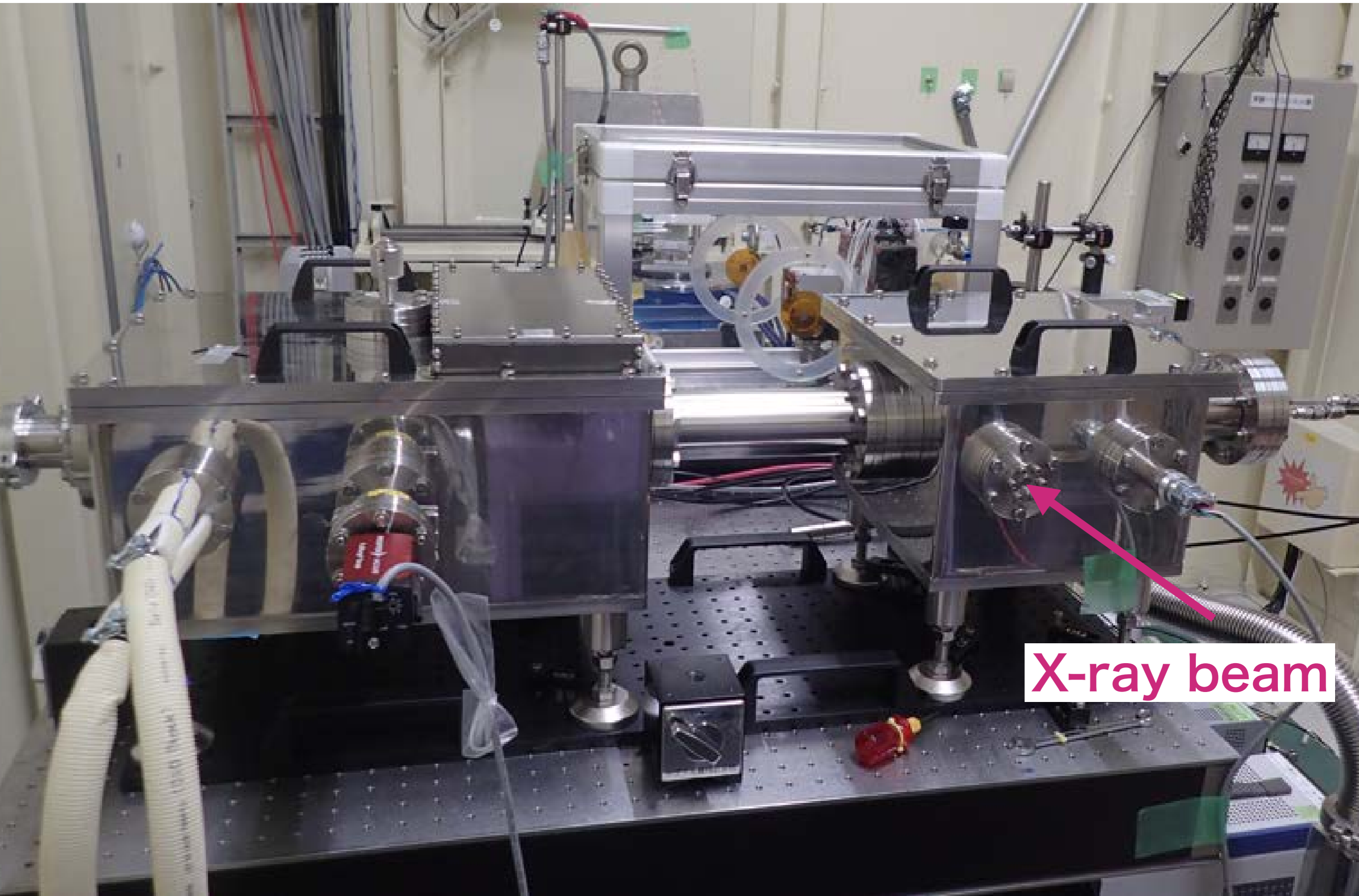
Experimental Setup for VUV search



Dichroic Mirror Assembly



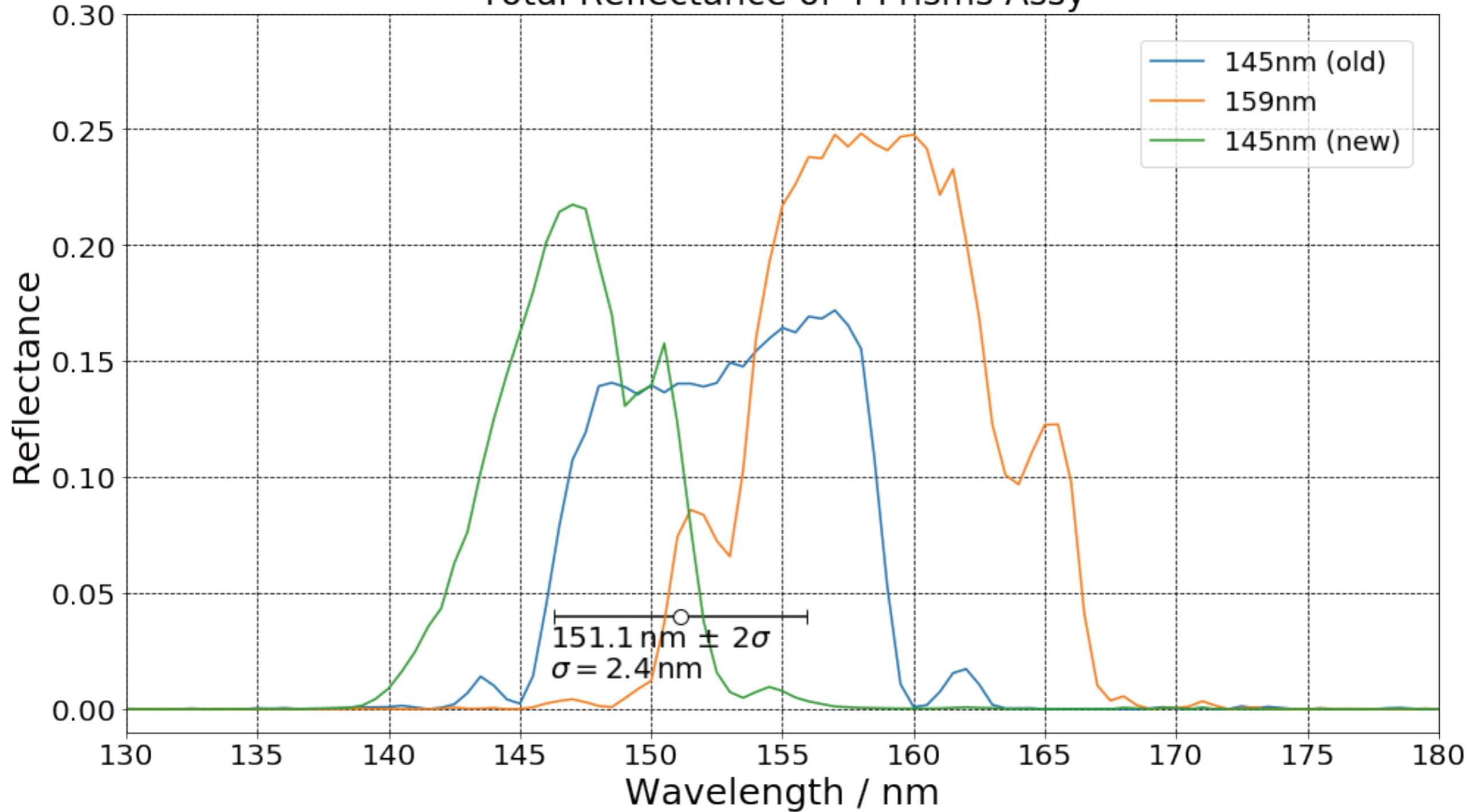
Experimental Setup for VUV search



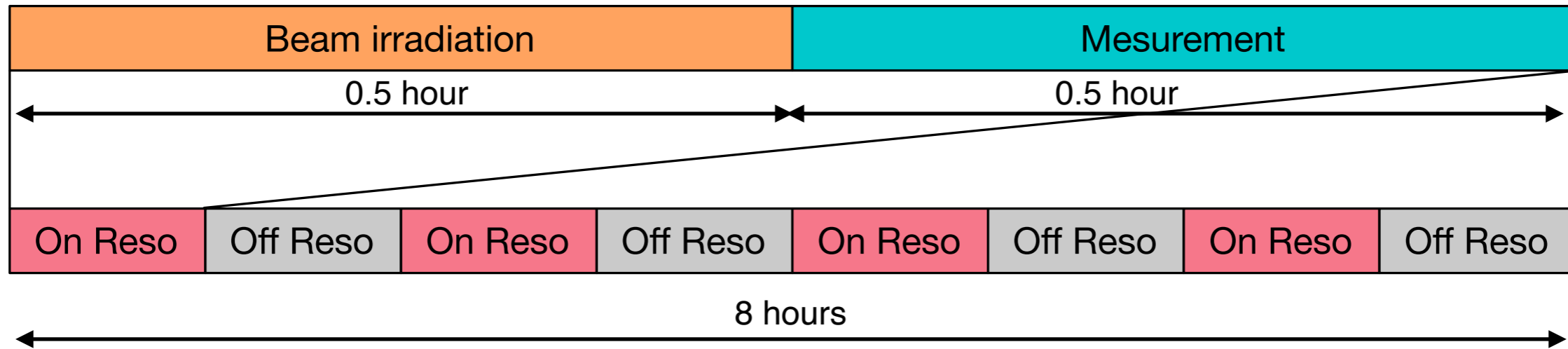
X-ray beam

Search region

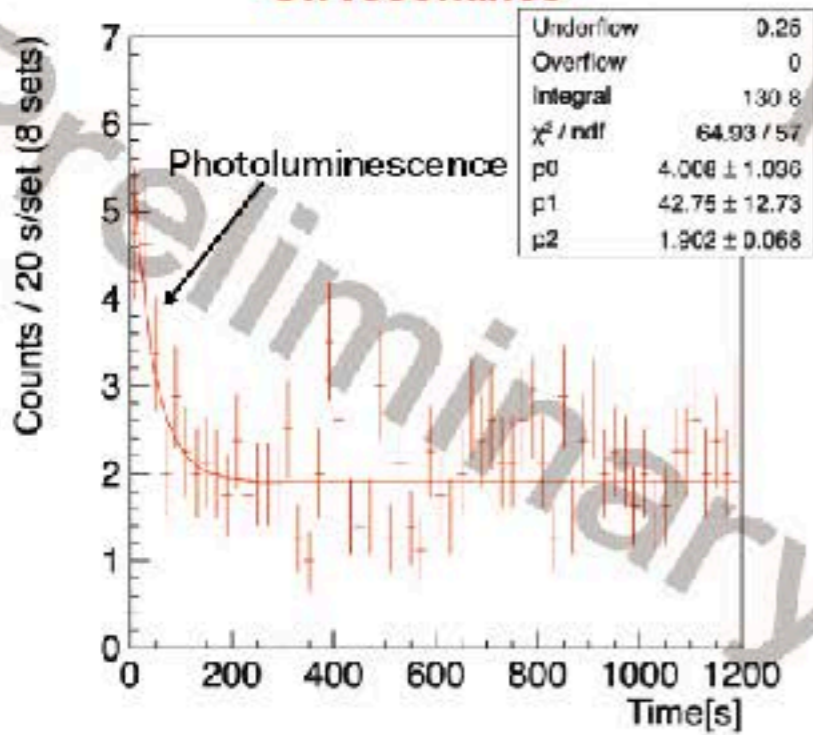
Total Reflectance of 4 Prisms Assy



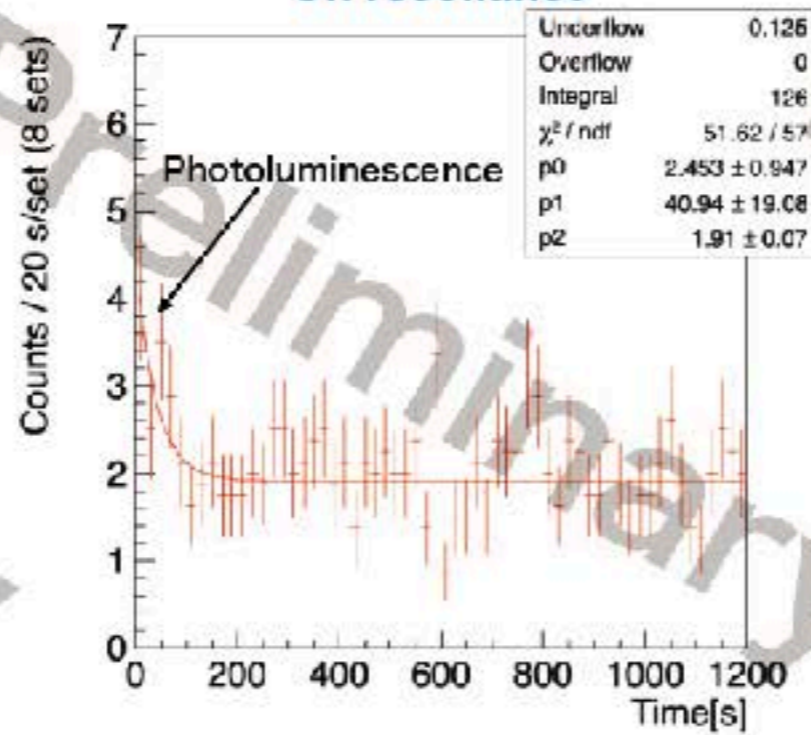
Preliminary Result



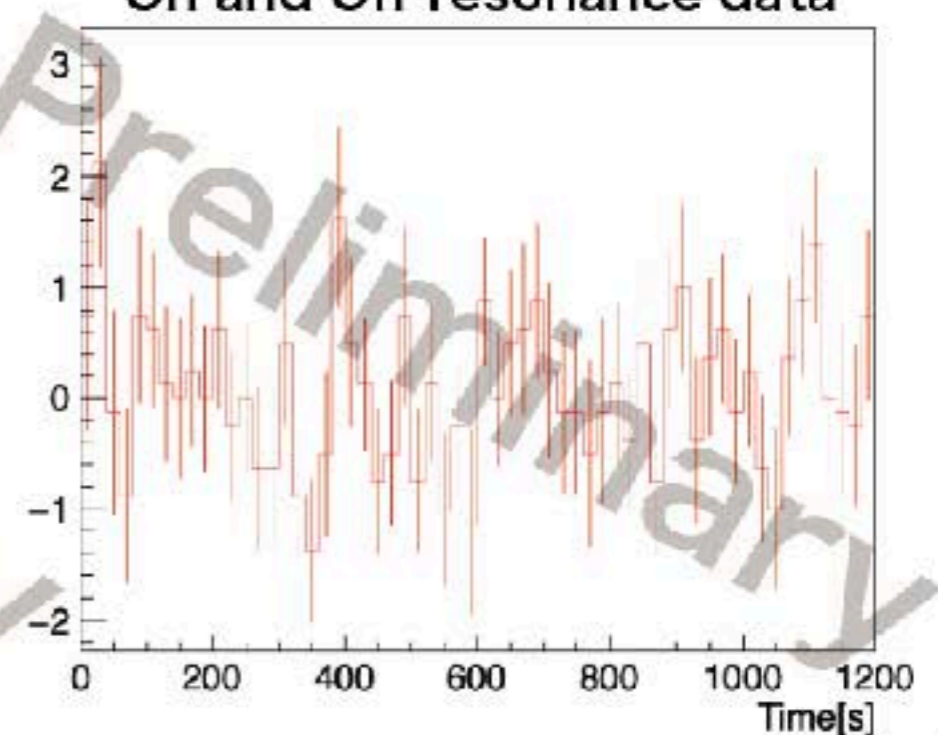
On resonance



Off resonance



Subtraction of On and Off resonance data



原子核時計の実現に向けたみちのり

アイソマー状態
詳細の解明

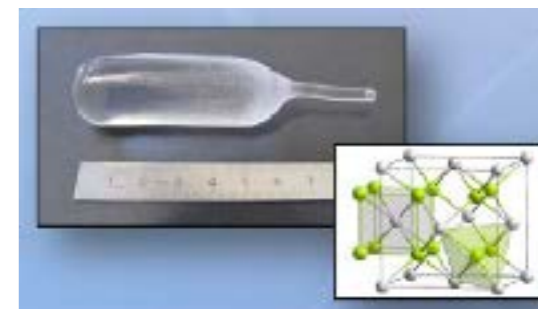
光遷移の観測

エネルギー・寿命決定

トリウム基準作成

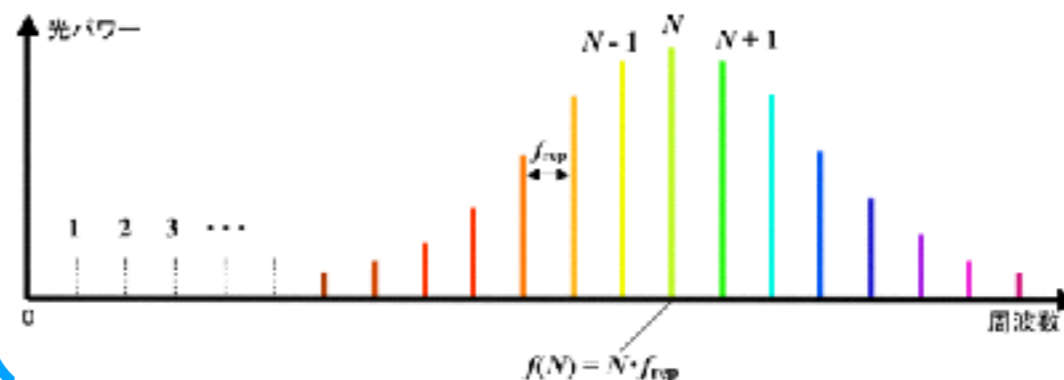


イオントラップ



光学結晶

光周波数コム



レーザー開発

レーザー励起

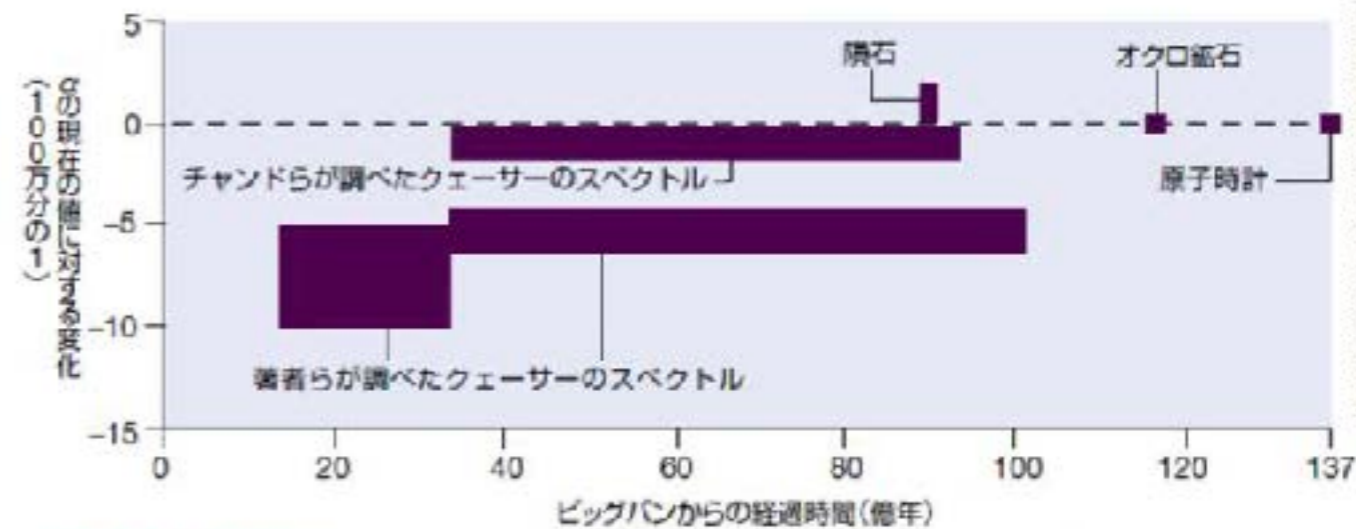
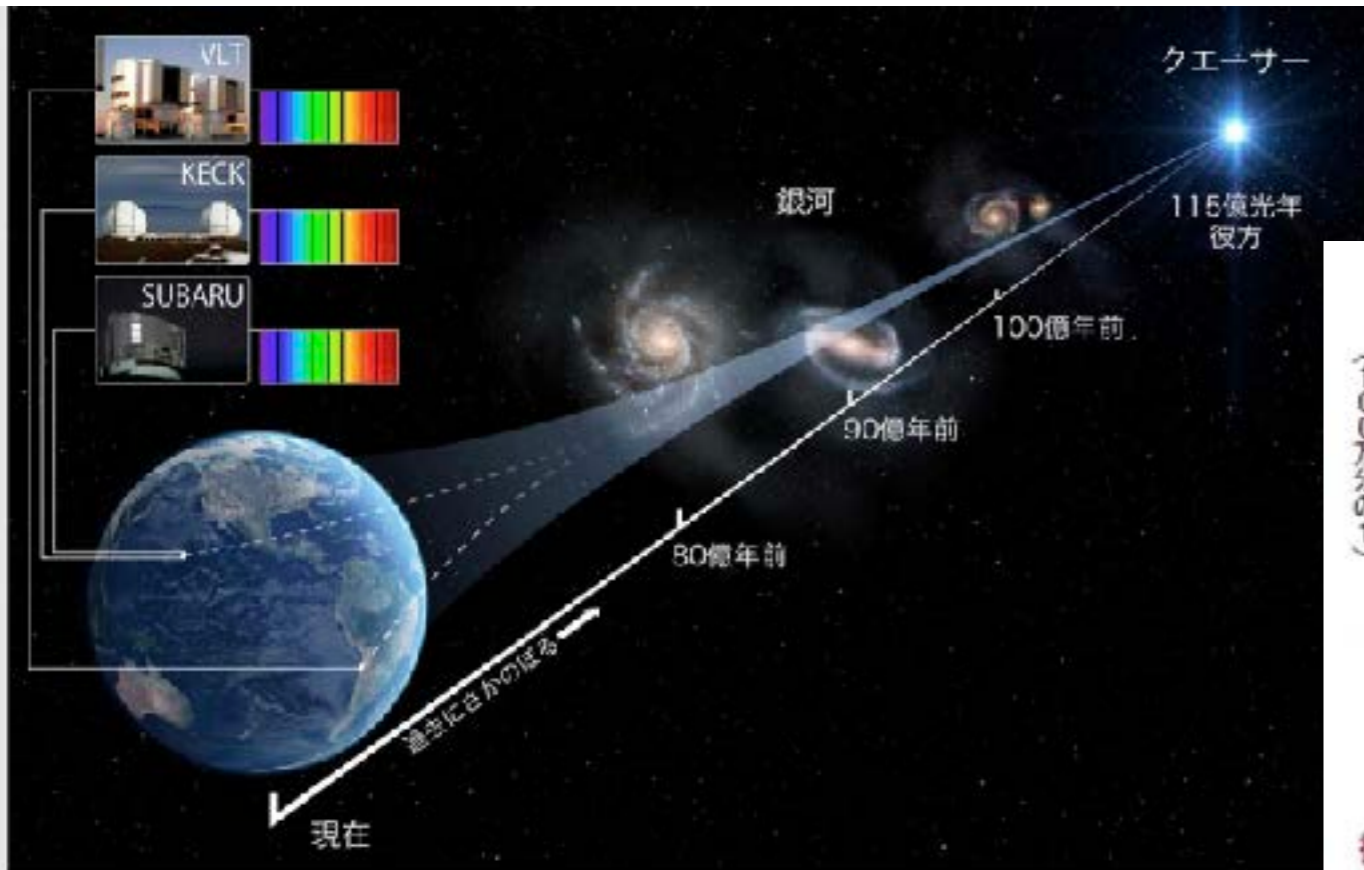
原子核時計の実現

精密分光で探る新物理

物理定数は変化するか？

- 物理定数が時間とともに変化する可能性
 - 膨張宇宙モデルのいくつかは、基礎物理定数が宇宙膨張とともに変化することを示唆している。

- 特に注目されているのが微細構造定数 $\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c}, \frac{m_p}{m_e}$



微細構造定数の観測 結果は一貫していない。過去には値が小さかったという結果もあれば、そうでない結果もある。おそらく初期の宇宙では変化していたのだが、現在は変化しなくなったのだろう(矩形はデータの範囲を示している)。

図1：背後にあるクエーサー HS 1549+1919 からの光が、手前にある3つの銀河によって部分的に吸収され、バードのようなパターンをもって地球に届けられたものを、3つの望遠鏡でとらえている様子を描いた模式図。(クレジット：Swinburne Astronomy Productions)

超高精度の時計で変化を見る

Hg⁺/Al⁺

$(1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17}/yr$ Rosenband et al., Science 319, 1808 (2008)

Yb⁺

$(-2.0 \pm 2.0) \times 10^{-17}/yr$ N. Huntermann et al., Phys. Rev. Lett. 113, 210802 (2014)

$(-0.7 \pm 2.1) \times 10^{-17}/yr$ R.M. Godun et al., Phys. Rev. Lett. 113, 210801 (2014)

原子核時計が実現すれば、原子時計に比べ1桁程度精度が向上する可能性があり 10^{-19} 、より高精度で α の時間変化を探索できる。

トリウム原子核時計はさらに $K \sim 10^4$ さらに感度の高い観測ができる可能性が指摘されている。

Th-229原子核時計でenhanceされる理由

Th-229の励起エネルギー E_{IS} が極端に小さいため

$$\frac{\delta f}{f} = K \frac{\delta \alpha}{\alpha} \quad K = \frac{\Delta E_c}{\Delta E_{IS}} \begin{array}{l} \nearrow \sim \text{MeV} \\ \searrow \sim 8 \text{ eV} \end{array}$$

但し，原子核の変形の効果もあり，Kが小さくなる可能性も残されている

Th-229アイソマーがトラップできれば，アイソマーシフト，同位体シフトを測定することで，Kを実際に確かめることが可能である。

	ΔE_c (MeV)		K	
	Constant density	General	Constant density	General
^{151}Eu , 22 keV	-0.099 (51)	-0.099 (85)	4.6 (2.4)	4.6 (4.0)
^{157}Eu , 103 keV	0.32 (18)	0.02 (15)	3.1 (1.8)	0.2 (1.5)
^{159}Gd , 105 keV	0.030 (22)	0.08 (32)	0.28 (21)	0.8 (3.1)
^{157}Gd , 64 keV	-0.055 (41)	-0.06 (21)	0.86 (63)	0.9 (3.3)
^{161}Dy , 75 keV	-0.031 (23)	0.29 (55)	0.42 (31)	3.8 (7.4)
^{181}Ta , 6 keV	0.19 (13)	0.20 (26)	30 (21)	32 (41)
^{243}Am , 84 keV	0.23 (17)	0.45 (75)	2.8 (2.0)	5.4 (9.0)
^{229}Th , 8 eV	0.067 (19)	0.26 (39)	$0.82 (25) 10^4$	$3.1 (4.8) 10^4$

同位体シフトによる新物理探索

K. Ono et al., arXiv:2110.13544v1

核子-電子系に結合する未知粒子があれば、原子時計遷移に影響を及ぼす

但し、その正確に影響を計算するのは、原子核の効果（電荷分布等）により困難

King plot 線形性

2つの異なる遷移を同位体で測定 ($\lambda = \lambda_1, \lambda_2$)

$$\nu_{\lambda}^{A',A} = K_{\lambda} \delta\mu^{A',A} + F_{\lambda} \delta \langle r^2 \rangle_{A',A} + I_{\lambda} \delta\mu^{A',A}$$

$$\delta\mu^{A',A} = 1/m_{A'} - 1/m_A \quad \delta \langle r^2 \rangle_{A',A} = \langle r^2 \rangle^{A'} - \langle r^2 \rangle^A$$

$$I_{\lambda} \delta\mu^{A',A} \rightarrow G_{\lambda}^{(4)} \delta \langle r^4 \rangle^{A',A} + G_{\lambda}^{(2)} \left[\delta \langle r^4 \rangle^2 \right]^{A',A} + \alpha_{NP} X_{\lambda} (A' - A)$$

非線形項

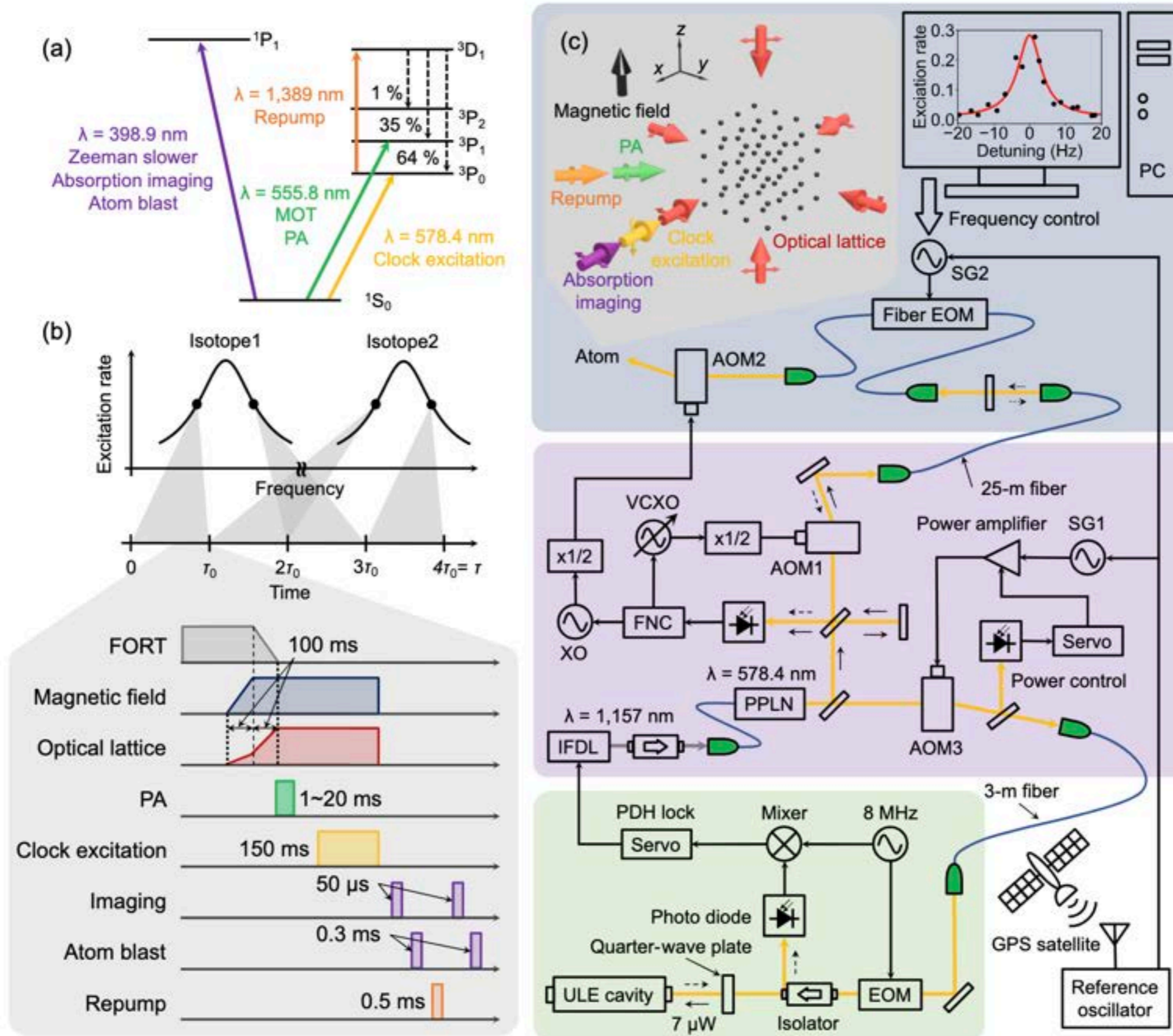
Seltzer Moment

QFS

Particle Shift

Modified IS $\bar{\nu}_{\lambda}^{A',A} \equiv \nu_{\lambda}^{A',A} / \delta\mu^{A',A}$

実験セットアップ

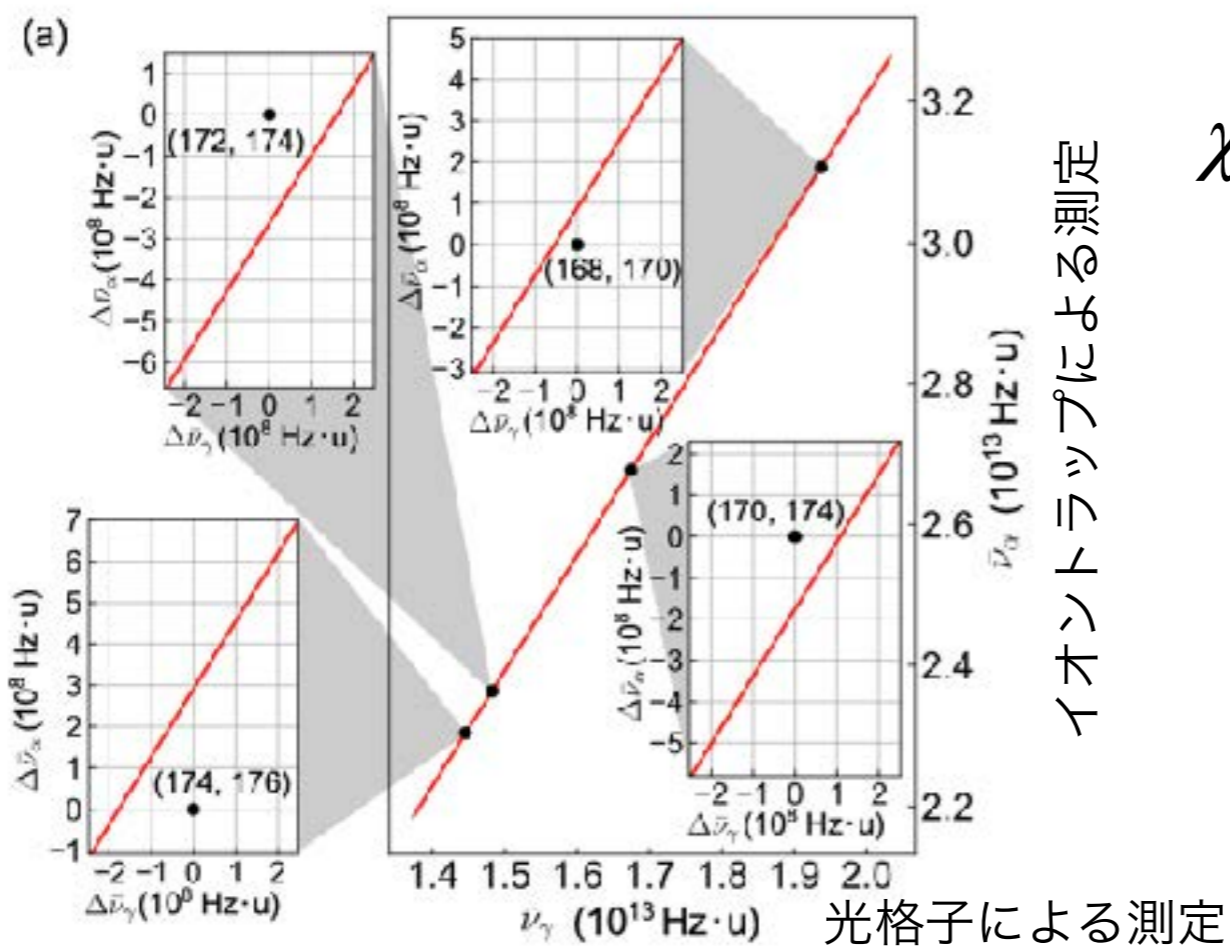


測定データと2D King Plot

TABLE II. Measured ISs of the $\gamma: {}^1S_0-{}^3P_0$ transition. Total 1σ uncertainties are shown as $(\cdot)_{\text{tot}}$.

Isotope pair (A', A)	IS $\nu_\gamma^{A'A}$ (Hz)	References
(168, 170)	1358 484 476.3(2.3) _{tot}	This work
(170, 174)	2268 486 592.7(2.0) _{tot}	This work
(172, 174)	992 714 586.7(2.3) _{tot}	This work
(174, 176)	946 921 775.1(3.0) _{tot}	This work
(171, 174)	1811 281 646.9(2.3) _{tot}	This work
	1811 281 645.8(0.9) _{tot}	[24, 25]

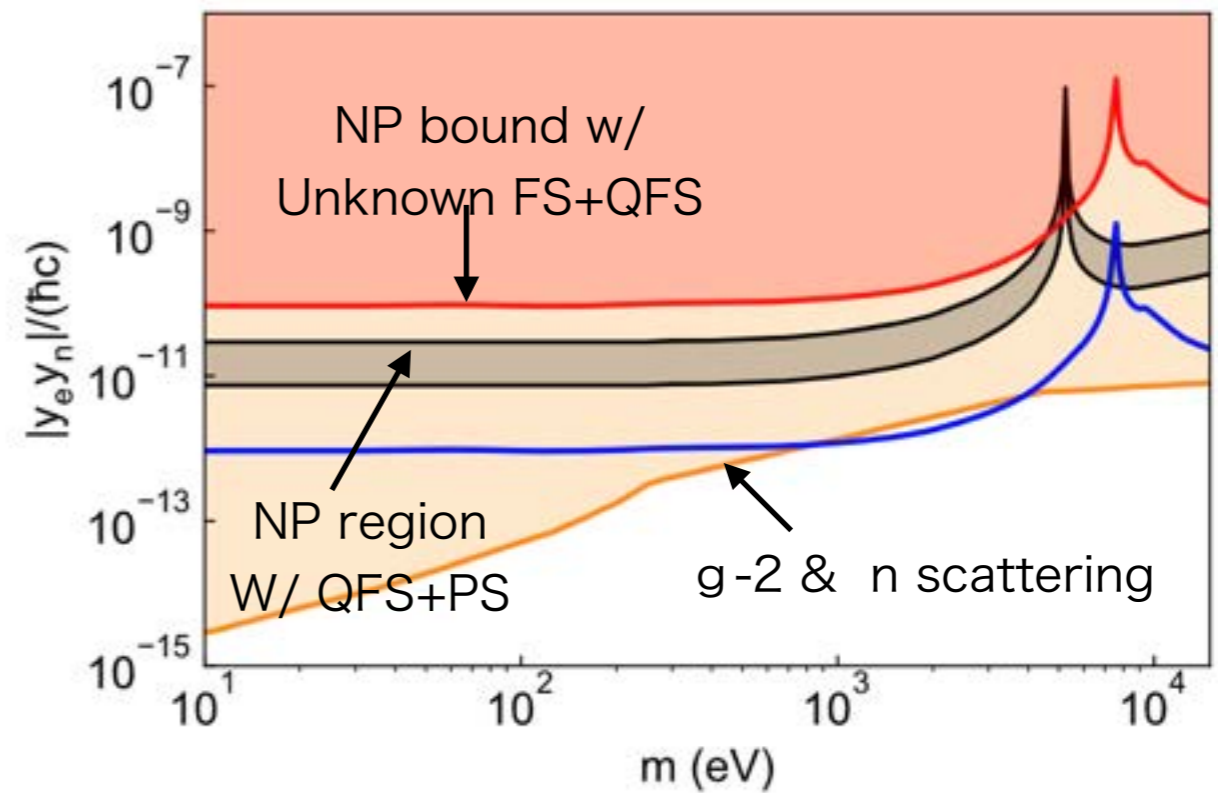
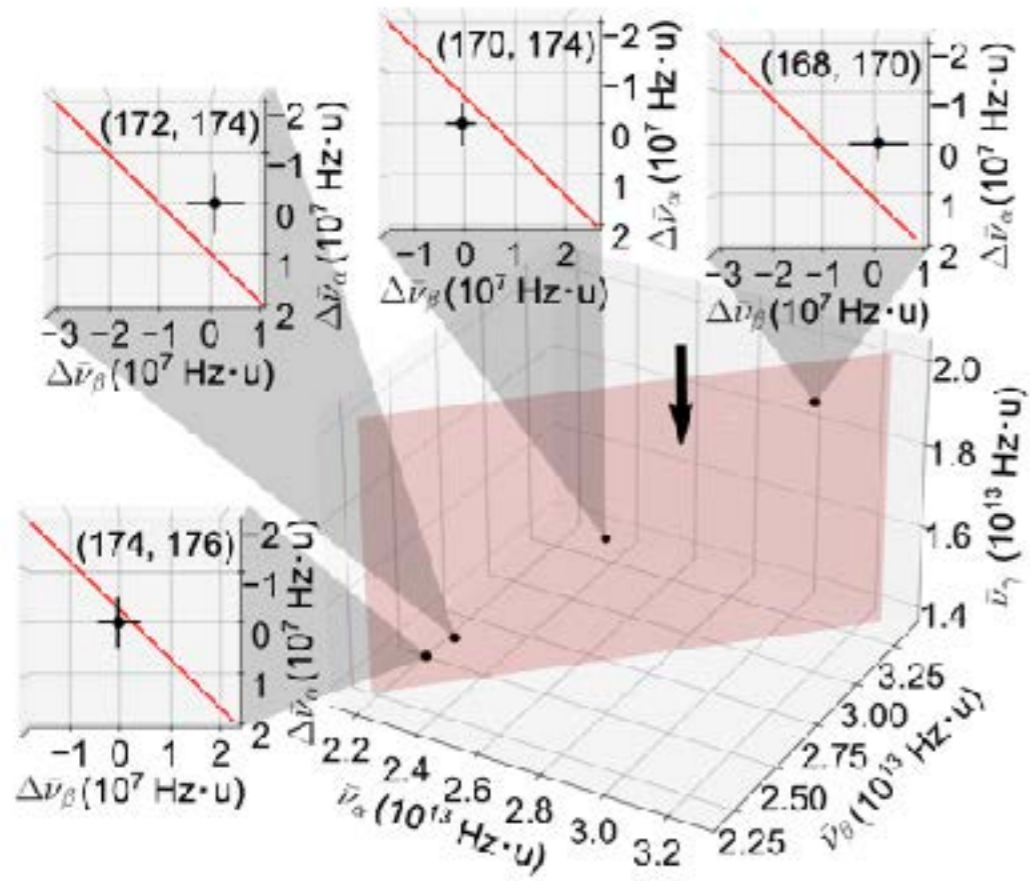
2D KingPlot



$$\chi^2[\gamma, \alpha](\text{QFS}) = 1.0 \times 10^4$$

QFSだけだとNonlinear

3D King Plotと新物理探索

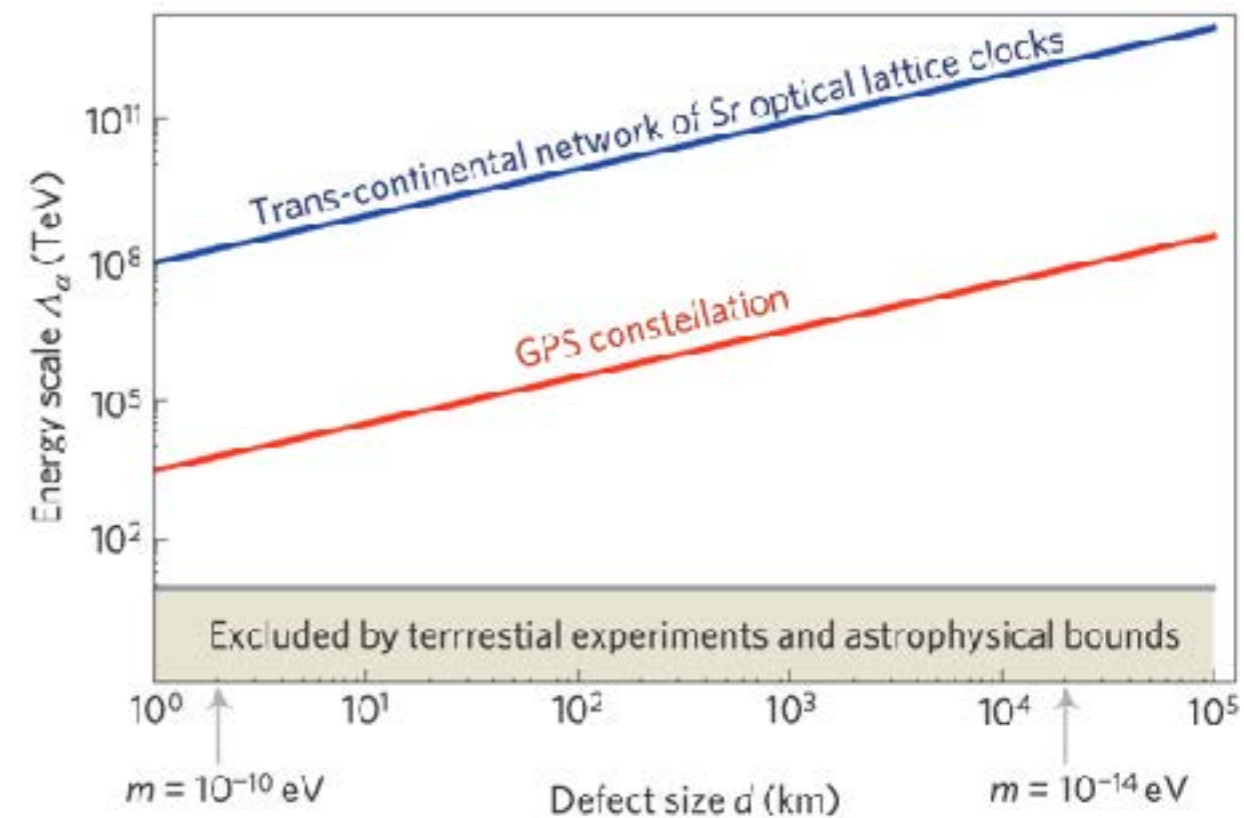
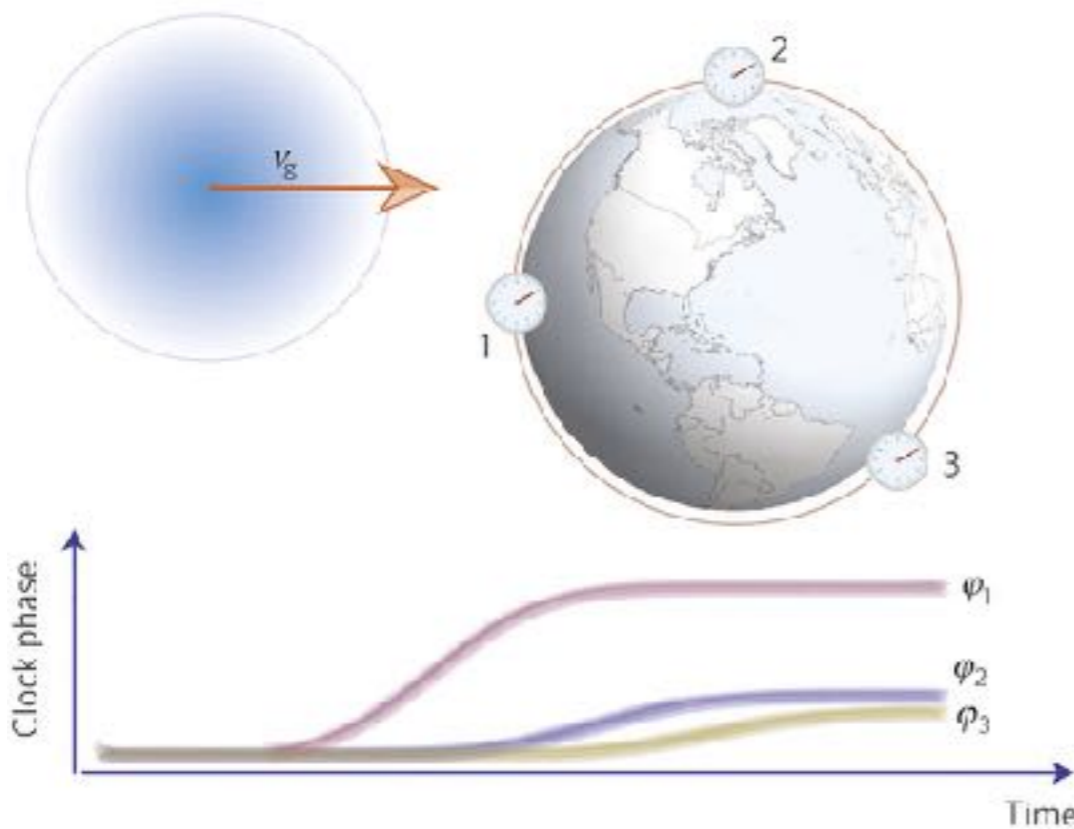
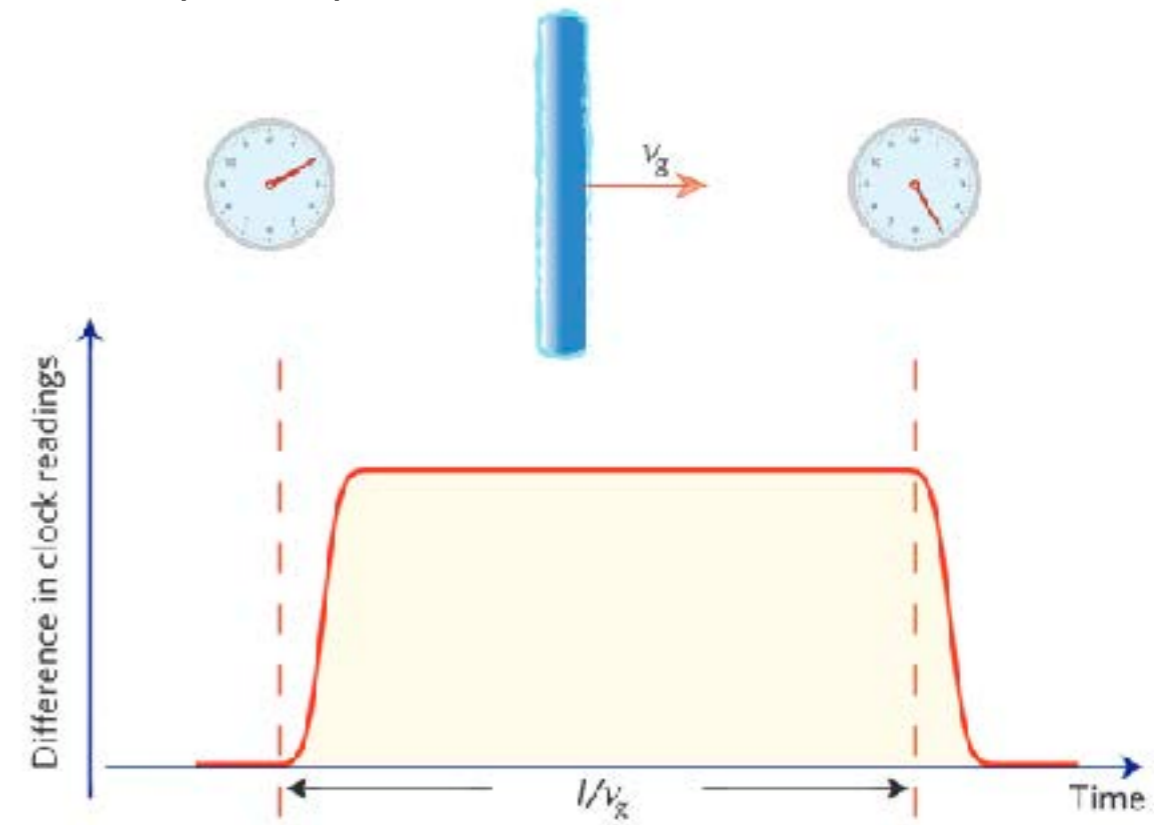


3種類の遷移をすべて使用

トポロジカルダークマター

A.Derevianko and M. Pospelov, Nature Physics 10, 933 (2014)

Topological Defect (monopole, string, domain wall) may be detected using precise clock.



まとめ

- トリウム229の研究が急速に進みつつあり、原子核のレーザー励起を目指して、世界中で熾烈な競争が繰り広げられている。
- 最先端の原子時計を用いた新物理探索が行われて、興味深い成果が得られつつある
- 究極の「原子核時計」が実現すれば、その精度と特性を生かした、さらに新しい物理探索のプラットフォームとしての利用が期待できる。