

KISSでの核分光実験と元素合成

(KEK Isotope Separation System : KISS)

元素選択型質量分離器

平山 賀一

(Wako Nuclear Science Center, IPNS, KEK)

Outline :

1. 研究目的

2. KISS

3. 実験結果

β 崩壊核分光、質量測定、レーザー核分光

4. 今後について

「中性子捕獲反応で迫る宇宙の元素合成」

2月9,10日、小柴ホール、東京大学本郷キャンパス

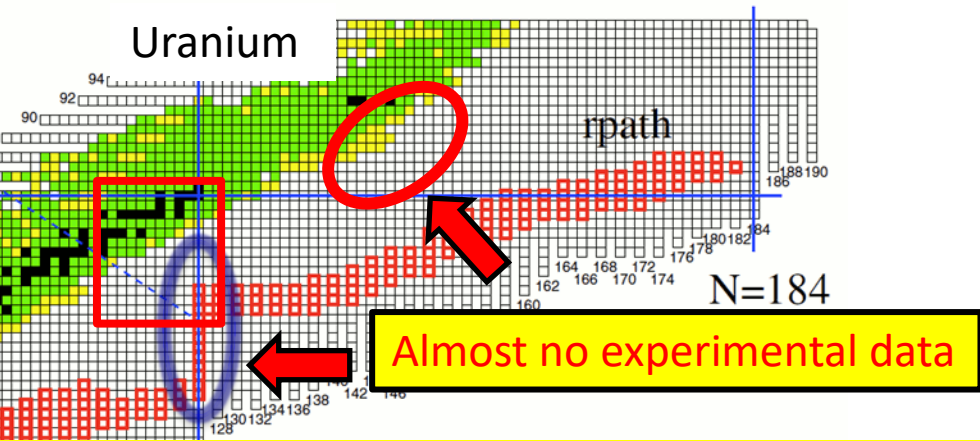
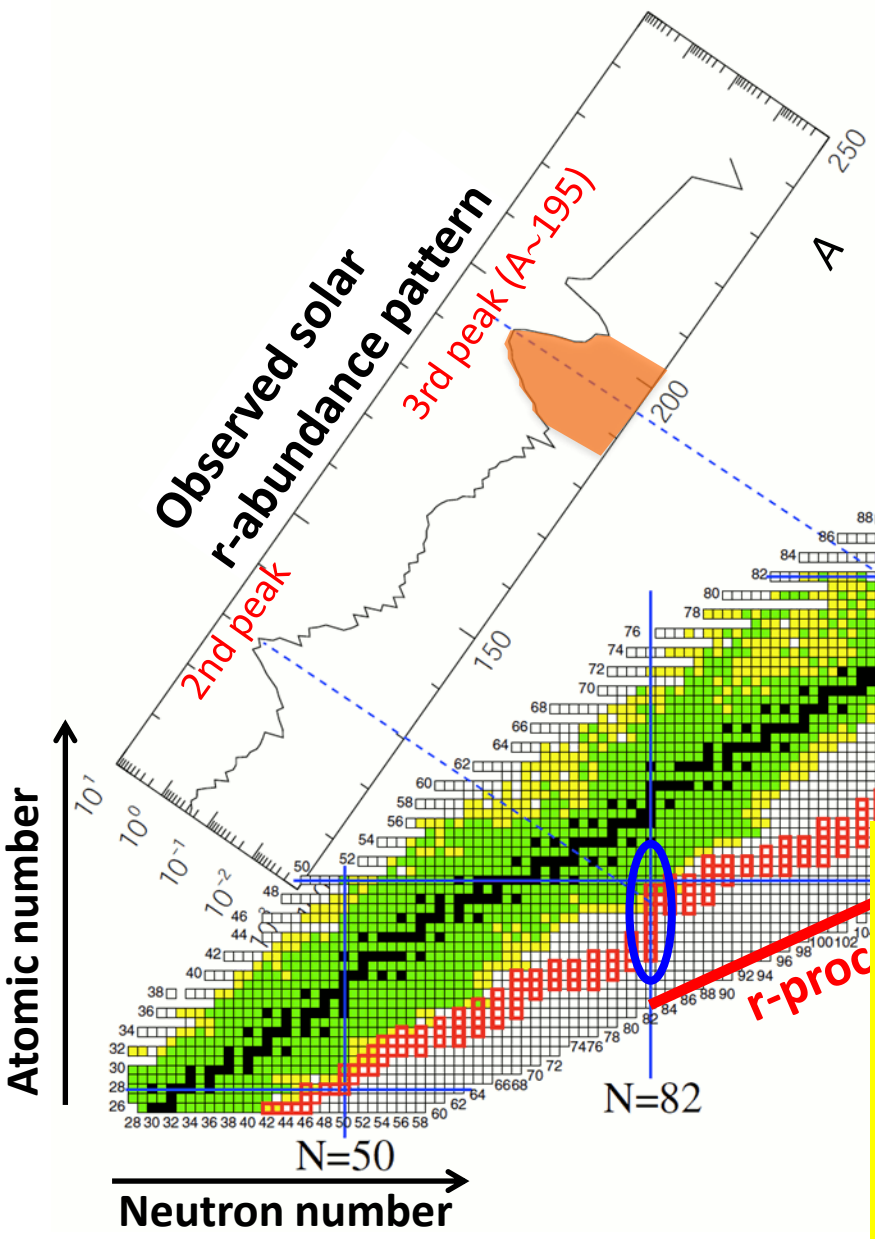
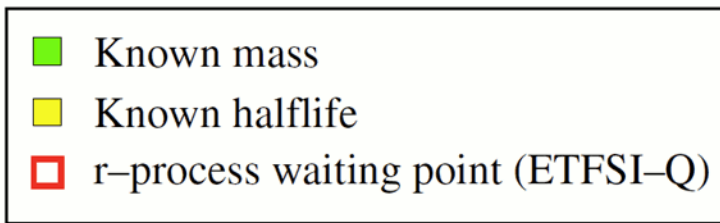
Introduction

Physics motivation

KISS計画: Identification of astrophysical site for r-process

~ How are the elements of Gold, Platinum and Uranium synthesized ~

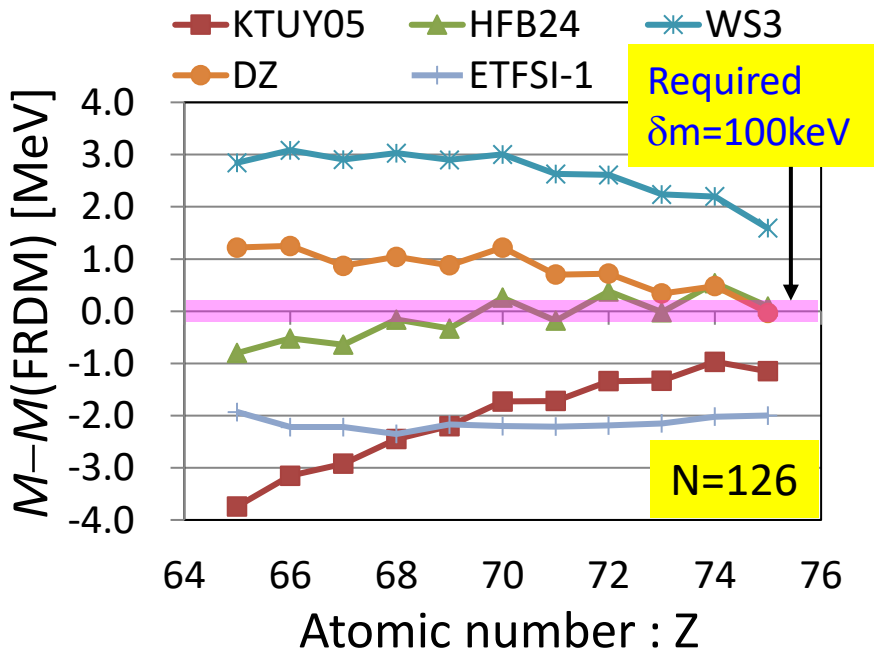
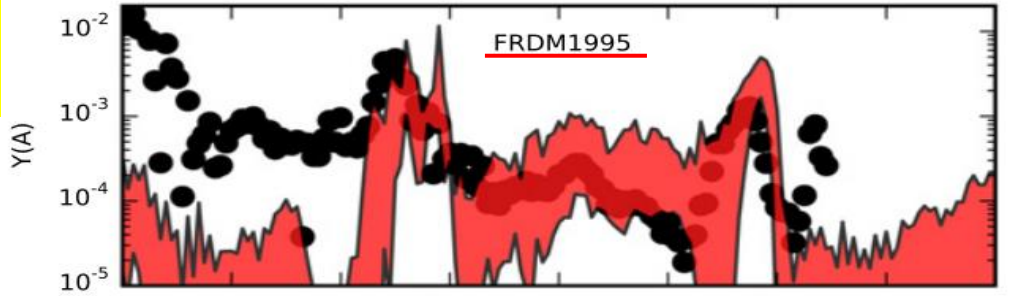
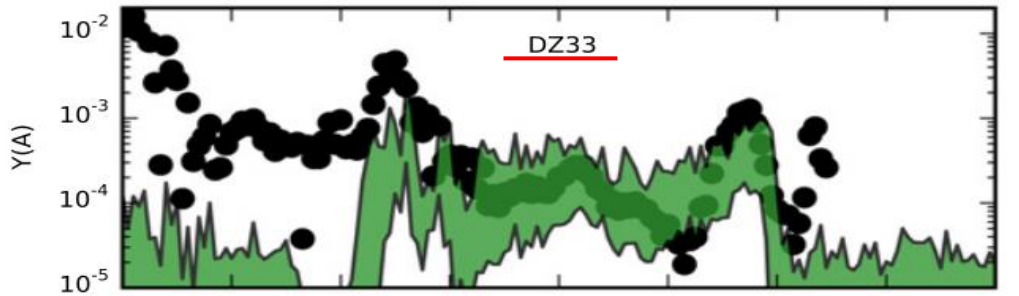
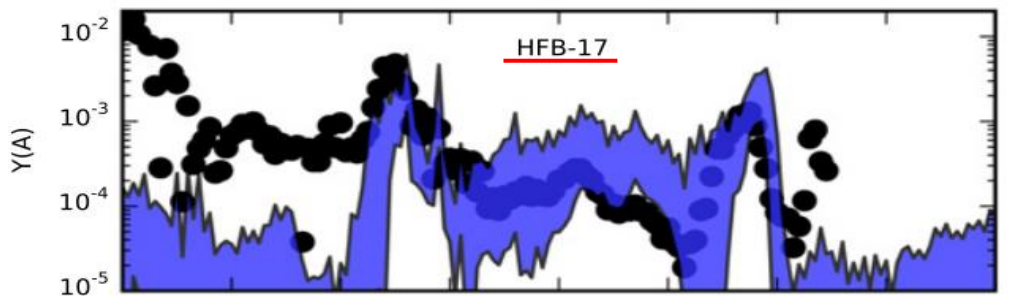
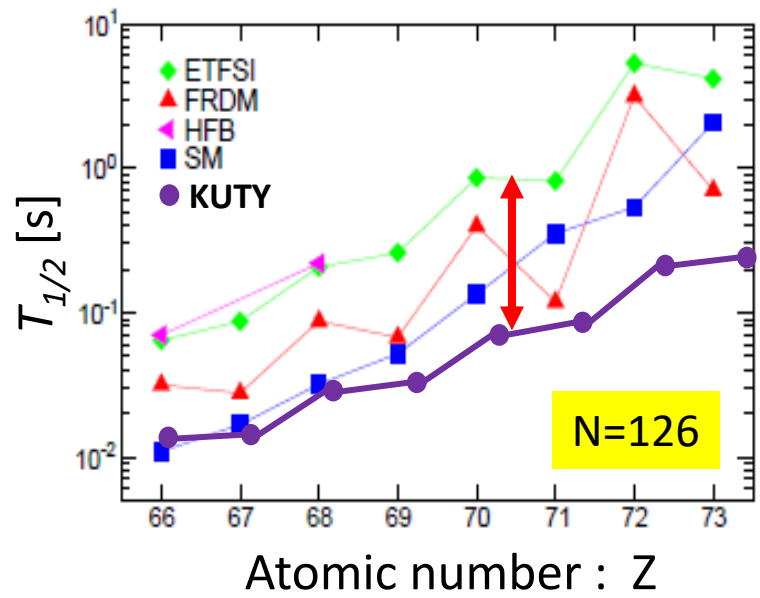
H. Grawe et al., Rep. Prog. Phys. 70 (2007), 1525-1582.



- Ultimate goals**
- Half life :**
- Actual r-process path
 - Duration time passing through waiting point
- Mass :**
- Astrophysical $\rho_n - T$ condition

寿命と質量の重要性@N=126

R-process abundance pattern :
 $T_{1/2} \times (0.1 - 1.0)$, Different mass models

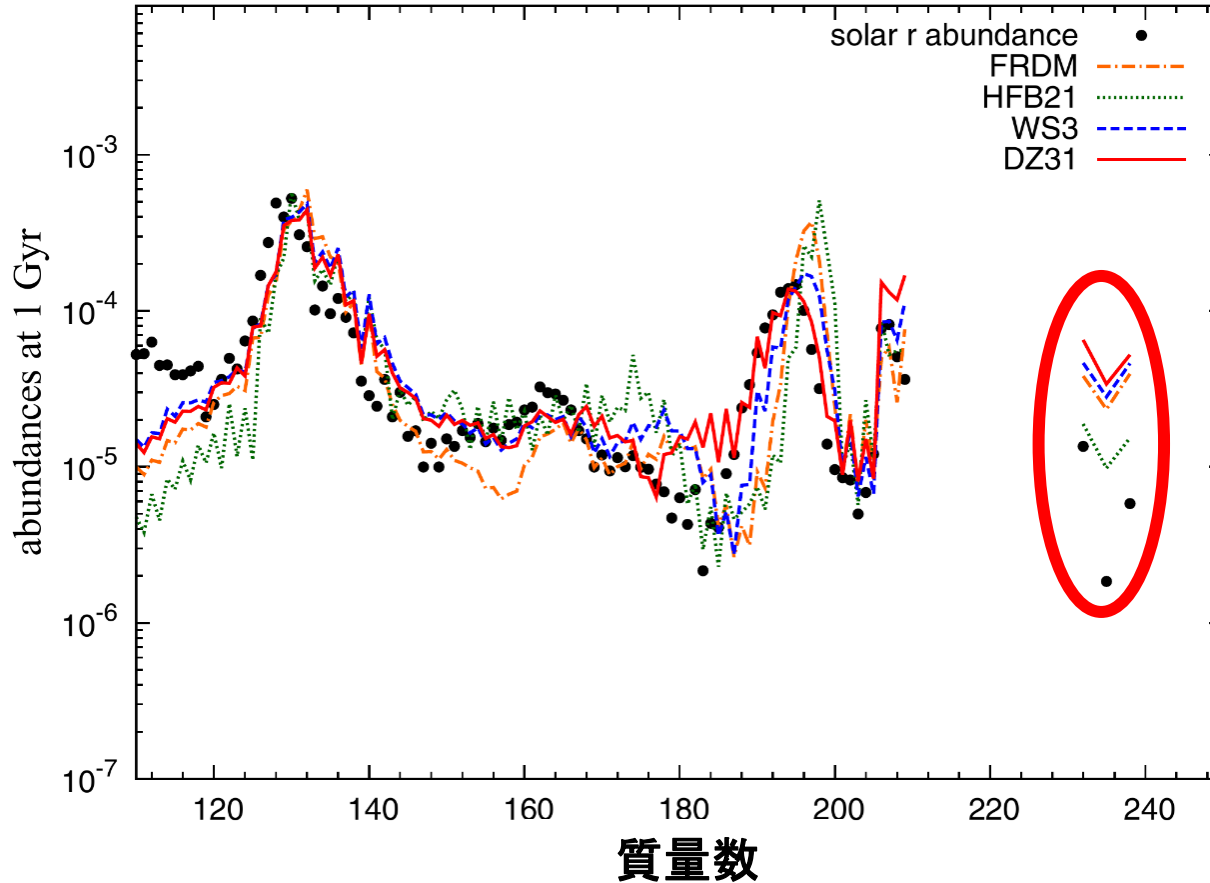


More precise predictions for $T_{1/2}$ and mass
 → Nuclear spectroscopy

寿命と質量の重要性@トリウム・ウラン領域

異なる理論模型を用いたr過程元素合成シミュレーションによる
元素存在度パターンの変化

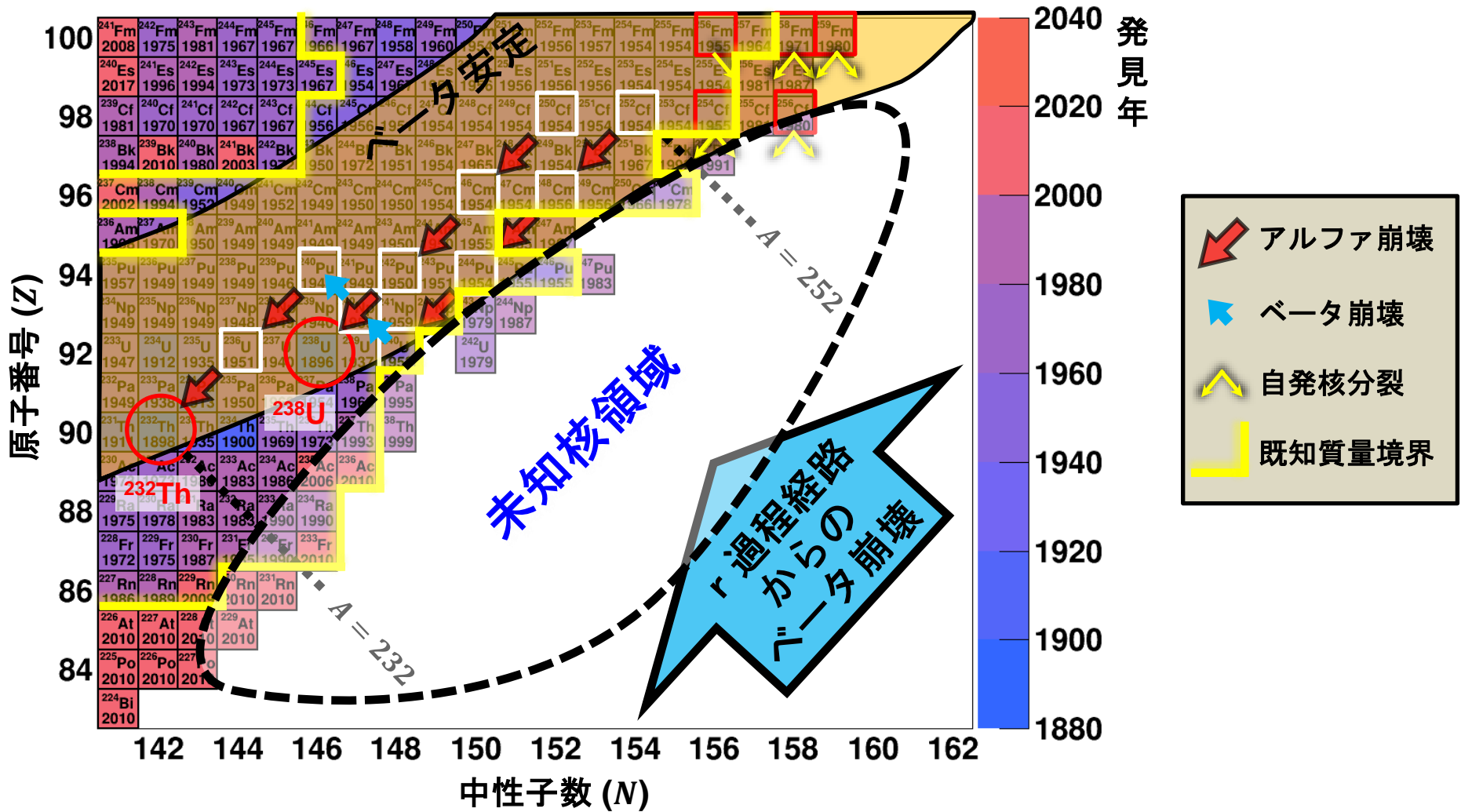
r 過程元素合成から10億年後の元素存在度



J.J. Mendoza-Temis et al., Phys. Rev. C 92, 055805 (2015).

トリウム、ウランの存在度の計算値は原子核質量の理論模型により大きく異なる。

ウラン,トリウムの起源を探る ~中性過剰アクチノイド領域での核分光~



- 質量数が232から252程度までの r 過程経路核がトリウムやウランの起源となる。
- これまでの研究はベータ安定核の近傍に限られる。
- 多核子移行反応により中性子過剰アクチノイドを生成する。

KISS

KEK Isotope Separation System

Production (**MNT reactions**)

Separation (**KISS**)

of the nuclei around $N = 126$ and actinoid

RIKEN RIBF (RI Beam Factory)

Nishina bldg.
(低エネルギー)

RILAC2

RRC

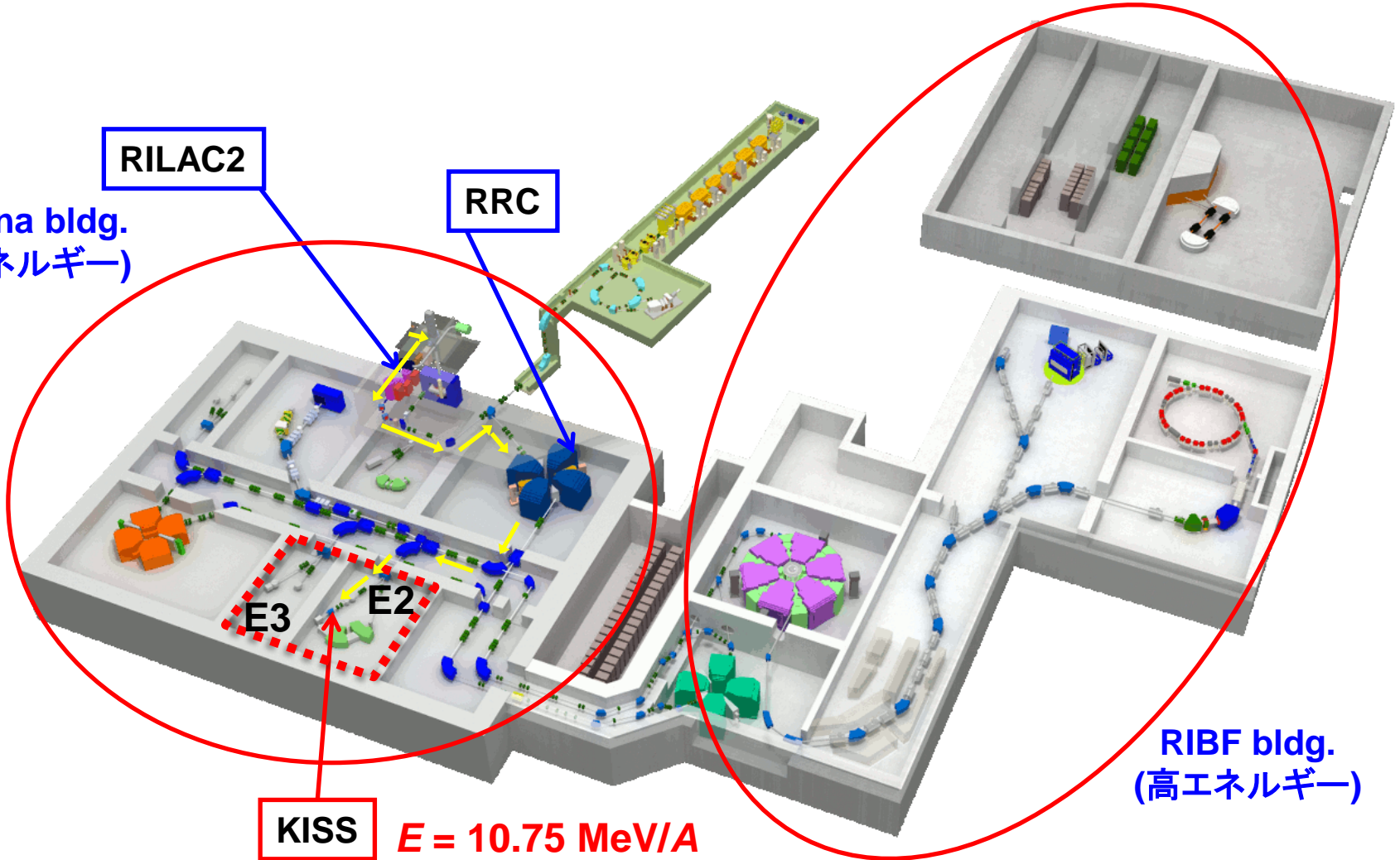
E3

E2

KISS $E = 10.75 \text{ MeV/A}$

RIBF bldg.
(高エネルギー)

KEK Isotope Separation System

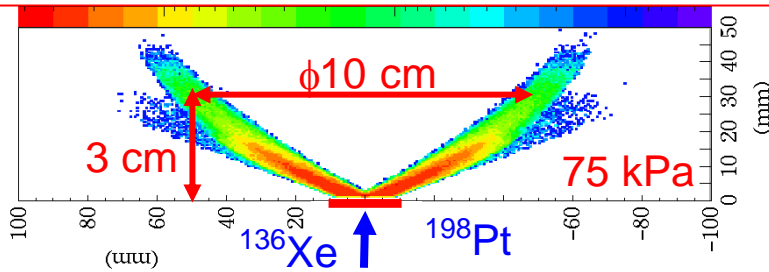


KEK Isotope Separation System (KISS)

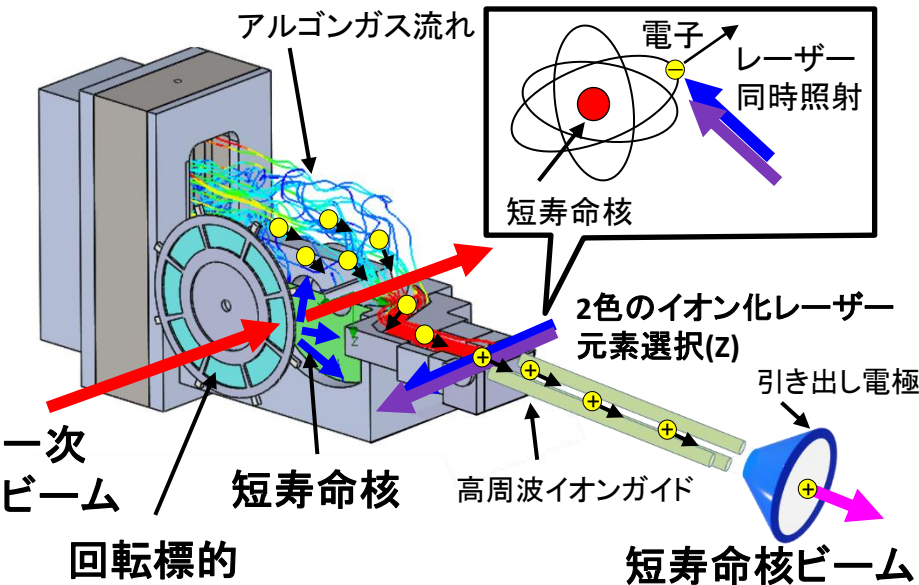
低エネルギー(~10MeV/A)多核子移行反応
 $^{136}\text{Xe}/^{238}\text{U}$ ビーム + $^{198}\text{Pt}/\text{nat. U}$ 標的

Y.X. Watanabe et al. PRL 115 (2015) 172503.

反応生成物のアルゴンガス内停止分布

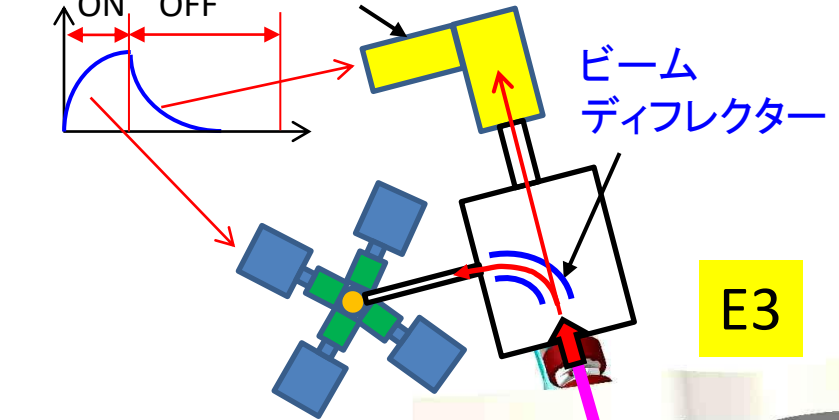


ドーナツ型ガスセル 不安定核の捕集



Y.H. et al. NIMB 412(2017)11

飛行時間測定による精密質量測定
 MRTOF-MS



β崩壊核分光用検出器

- β検出器
32ch比例系数管
- 4台のSCGe検出器
- テープ輸送装置

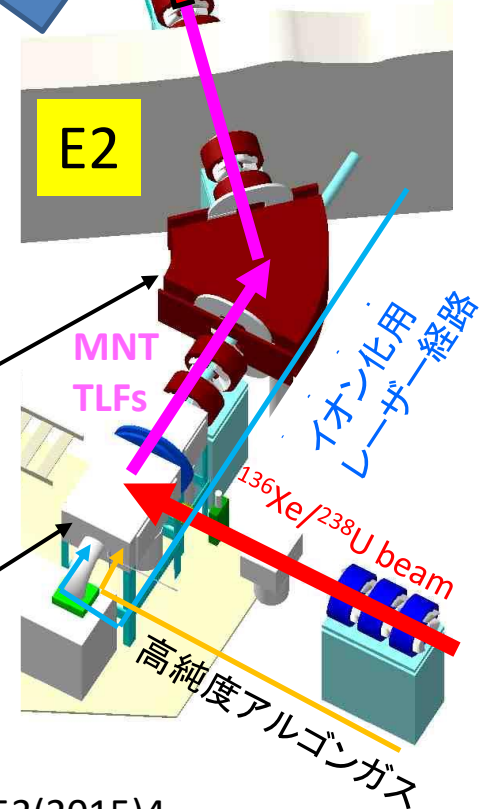
質量分離器

質量数A選択
 $m/\Delta m = 900$

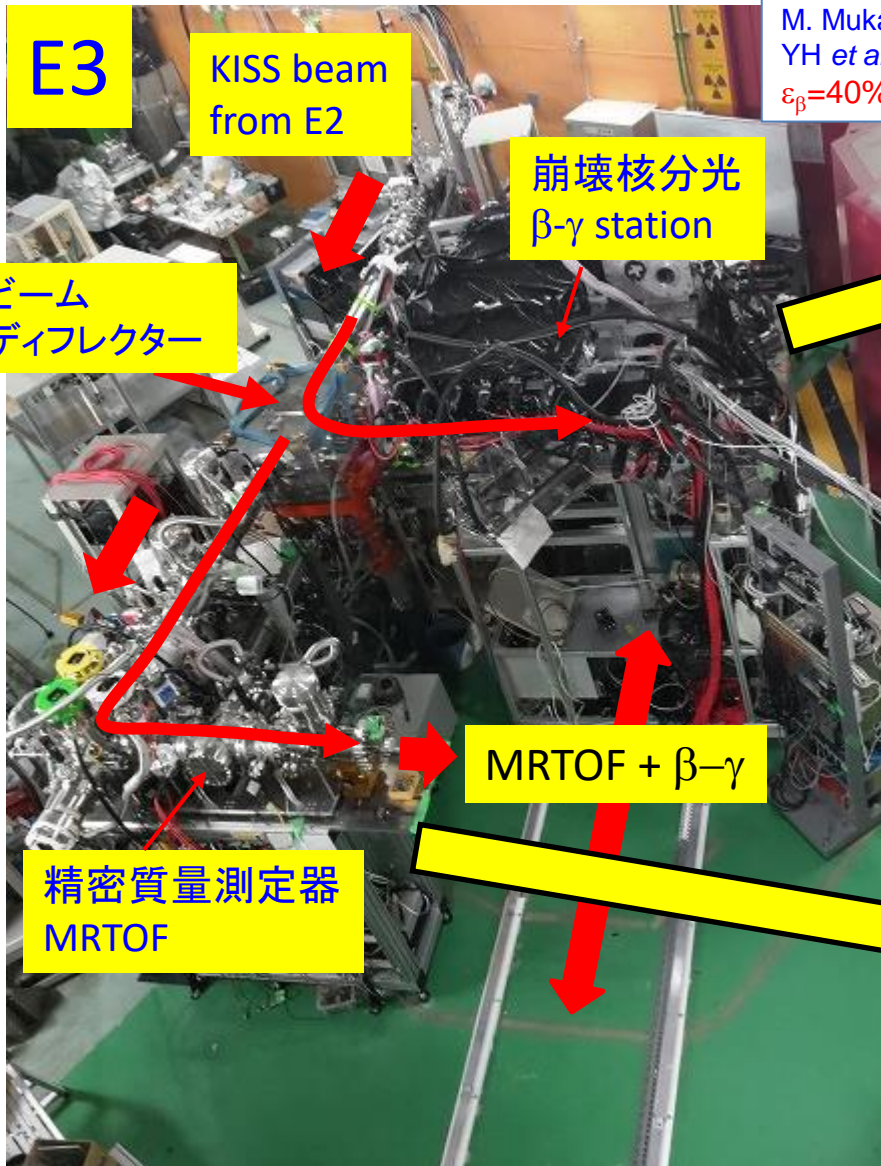
ガスセルシステム

元素選択Z
 →レーザー核分光

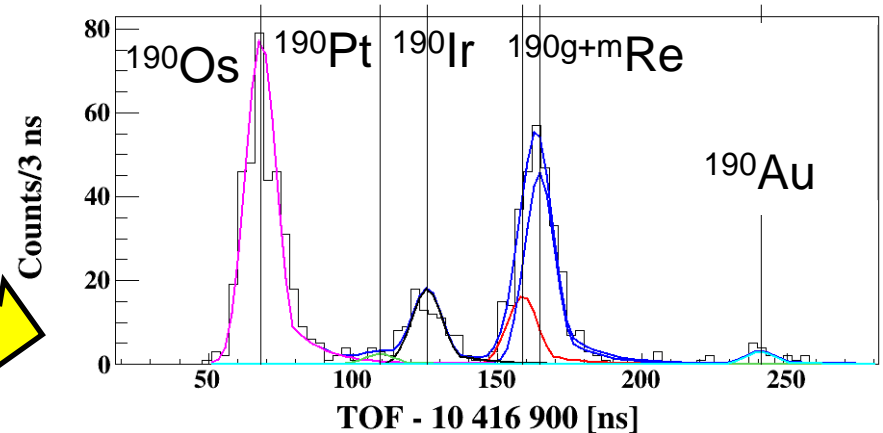
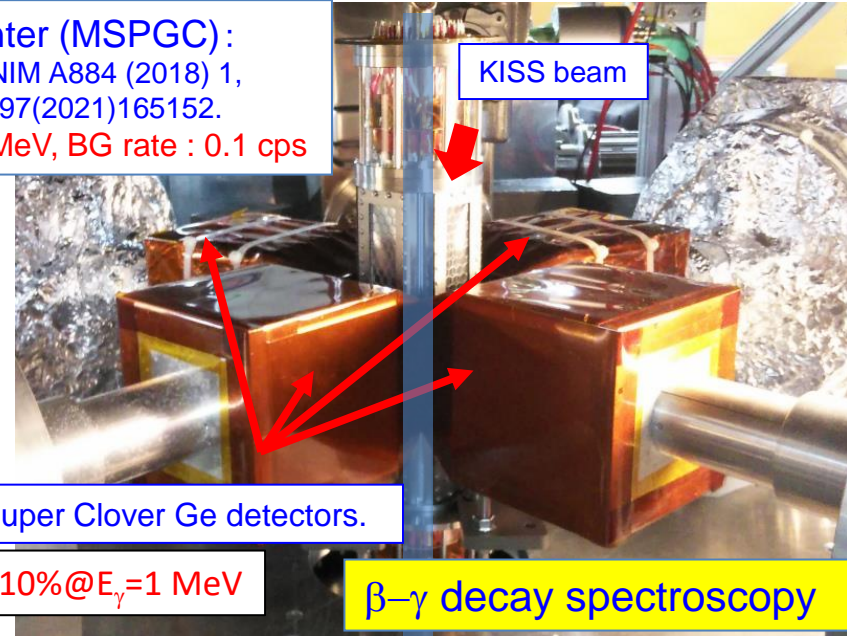
Y.Hirayama et al. NIMB353(2015)4



Detectors and MRTOF-MS at KISS



Beta-ray counter (MSPGC):
 M. Mukai *et al.*, NIM A884 (2018) 1,
 YH *et al.*, NIM A997(2021)165152.
 $\epsilon_{\beta}=40\% @ Q_{\beta}=1\text{MeV}$, BG rate : 0.1 cps



MRTOF-MS : $R_m > 400,000$, $\delta m \sim 100 \text{ keV}$
 25 イベント $\rightarrow \delta m/m = 1/(R_m \sqrt{25}) \sim 5 \times 10^{-7}$

Measured overall efficiency : $\sim 5\%$

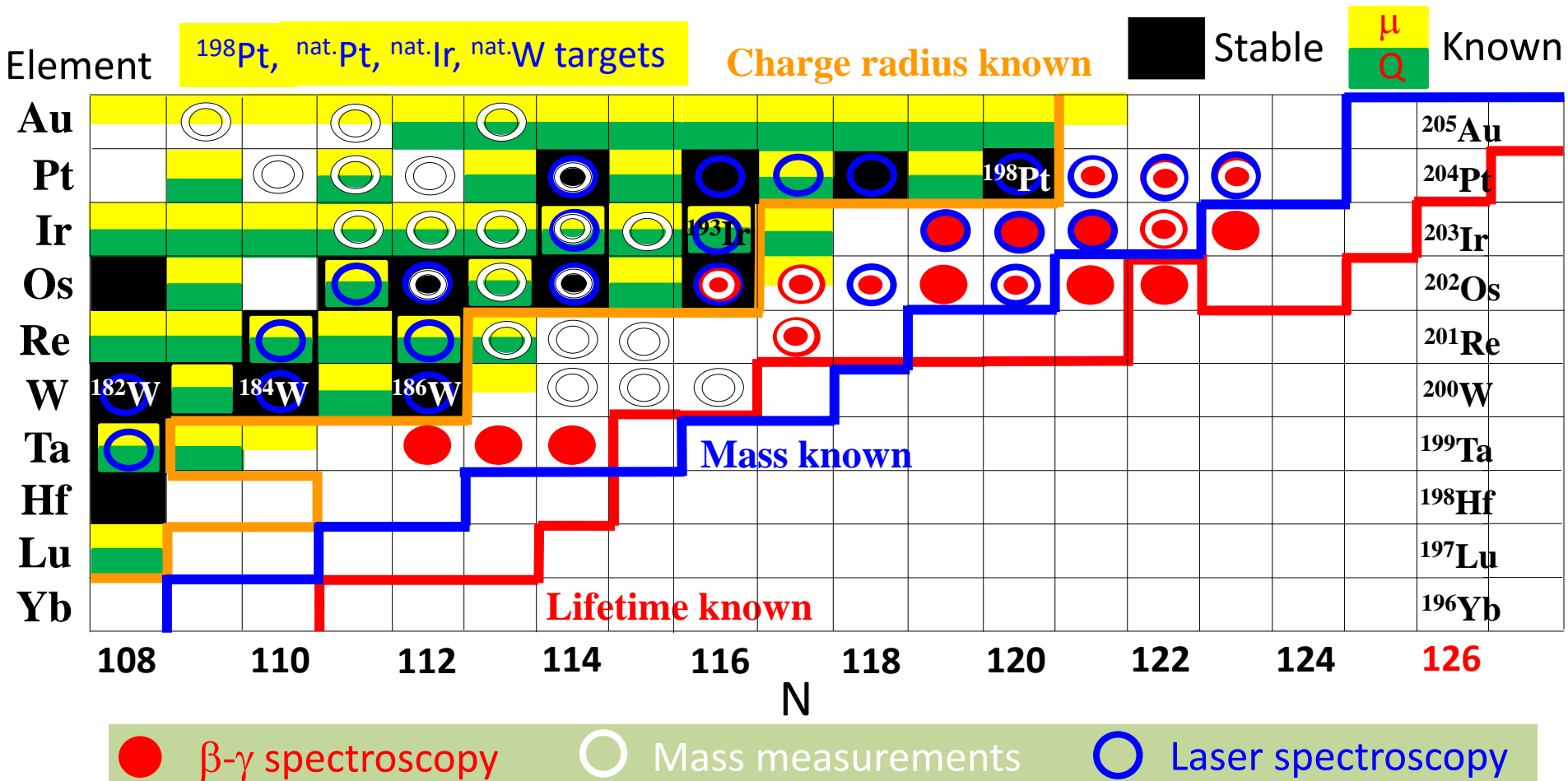
Experimental results

β - γ spectroscopy

Mass measurement

Laser spectroscopy

Nuclear spectroscopy around $N = 126$ at KISS



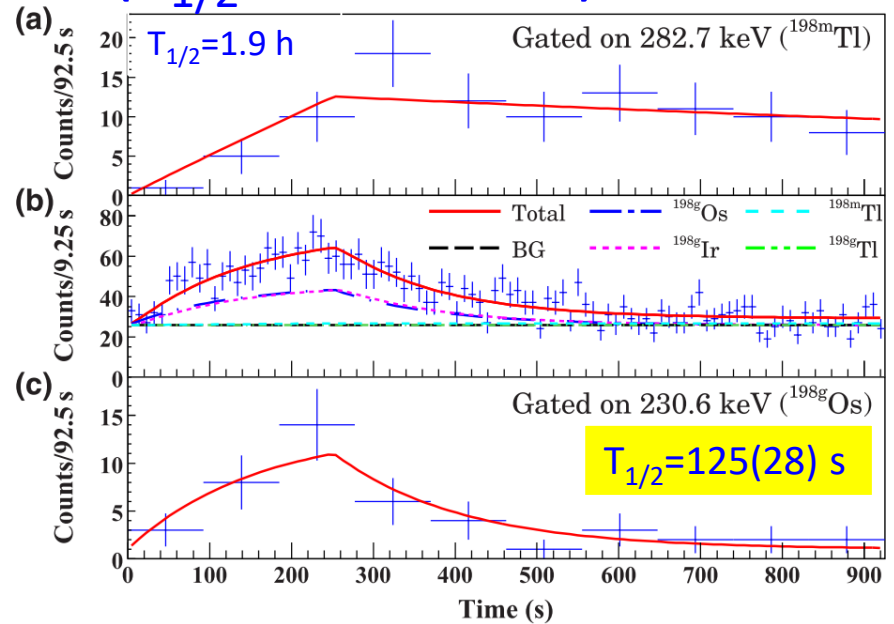
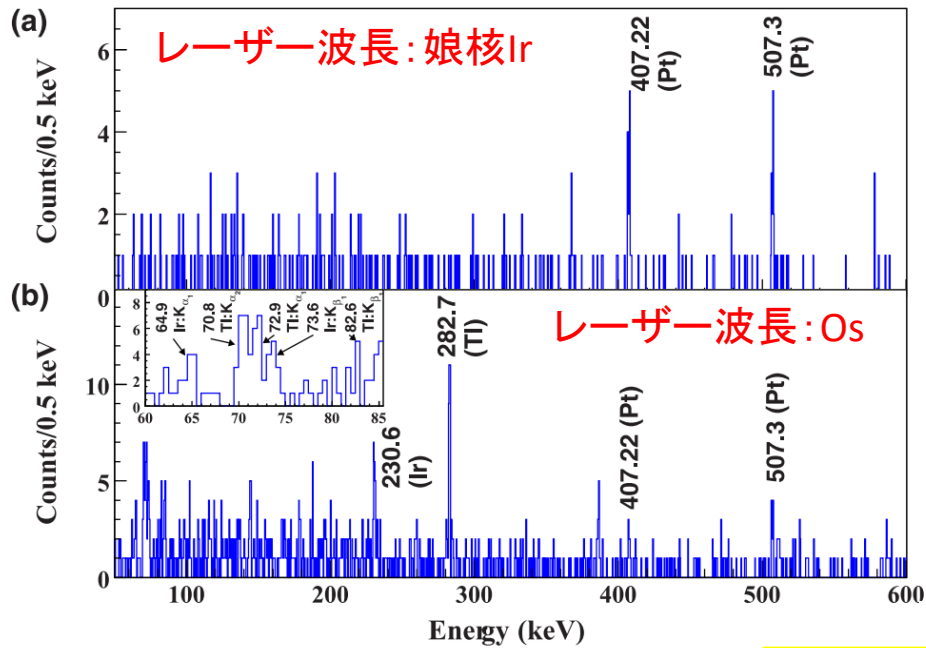
$^{197,198}\text{Os}$: Y.H. et al., PRC 98 (2018) 014321
 $^{195\text{m}}\text{Os}$: Y.X. Watanabe et al., PRC 101 (2020) 041305(R)
 $^{187\text{m}}\text{Ta}$: P. Walker et al., PRL 125 (2020) 192505
 $^{195\text{g}}\text{Os}$: M. Ahmed et al., PRC 103 (2021) 054312
 $^{192\text{g}}\text{Re}$: H. Watanabe et al., PLB 814 (2021) 136088
 $^{186\text{m}}\text{Ta}$: Y.X. Watanabe et al., PRC 104 (2021) 024330

$^{187\text{g}}\text{Ta}$: M. Mukai et al, PRC 105 (2022) 034331
 $^{199\text{g}}\text{Pt}$, $^{199\text{m}}\text{Pt}$: Y.H. et al, PRC 96 (2017) 014307
 $^{194,196}\text{Os}$: H. Choi et al, PRC 102 (2020) 034309
 $^{196-198}\text{Ir}$: M. Mukai et al, PRC 102 (2020) 054307
 $^{200-201}\text{Pt}$: Y.H. et al., PRC 106 (2022) 034326

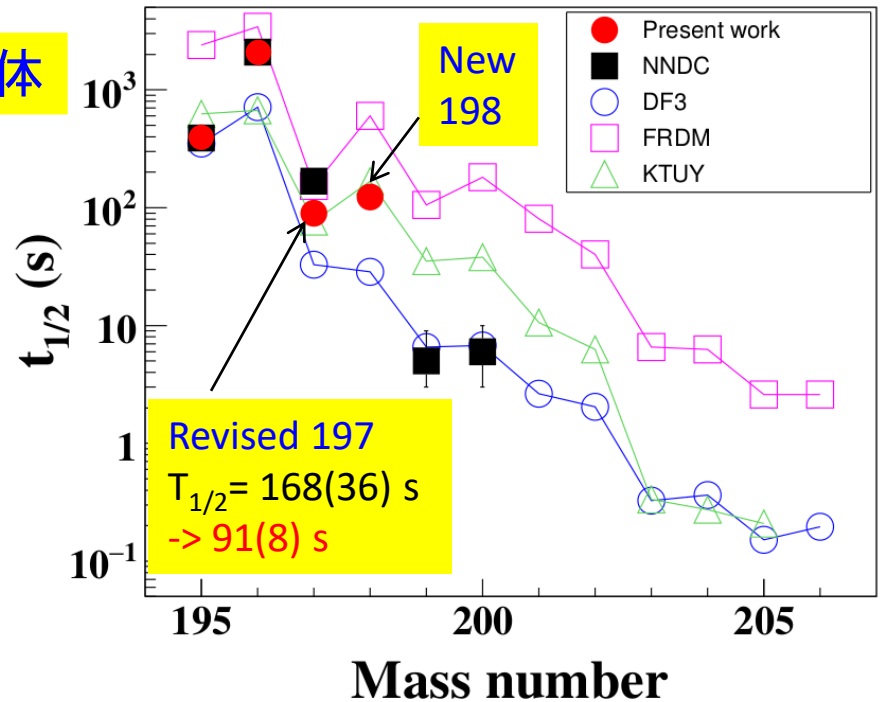
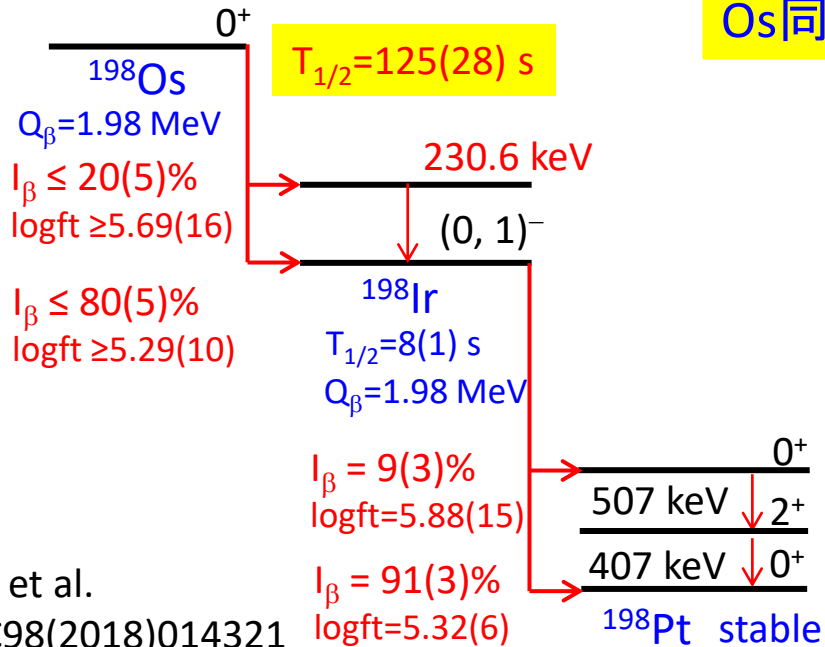
Experimental results

β - γ spectroscopy

β - γ spectroscopy of ^{198}Os ($T_{1/2}$ = unknown)



Os同位体

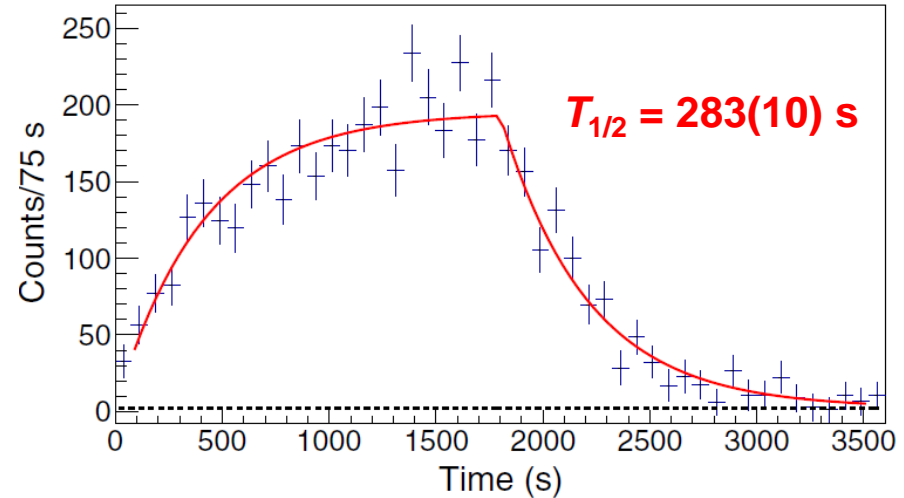
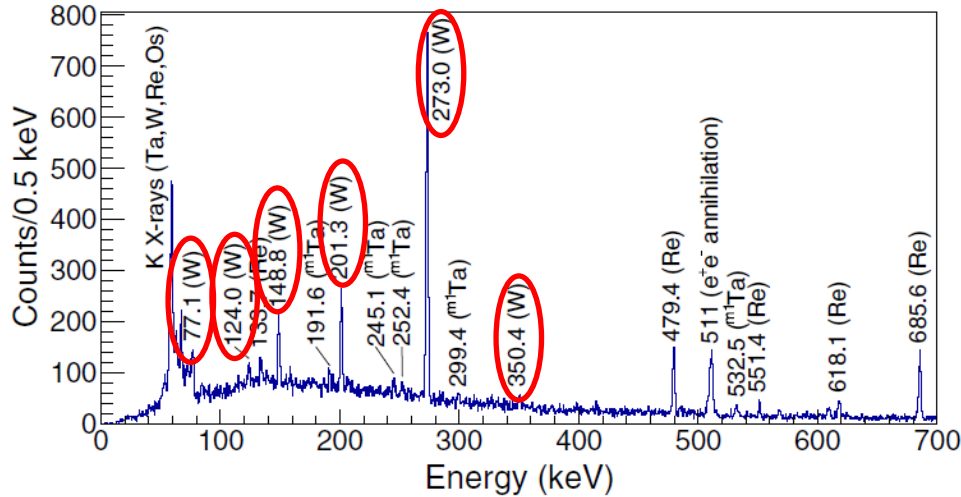


β - γ spectroscopy of ^{187g}Ta

M. Mukai et al., Phys. Rev. C 105, 034331 (2022).

γ -ray energy spectrum
in coincidence with MSPGC (M=2)

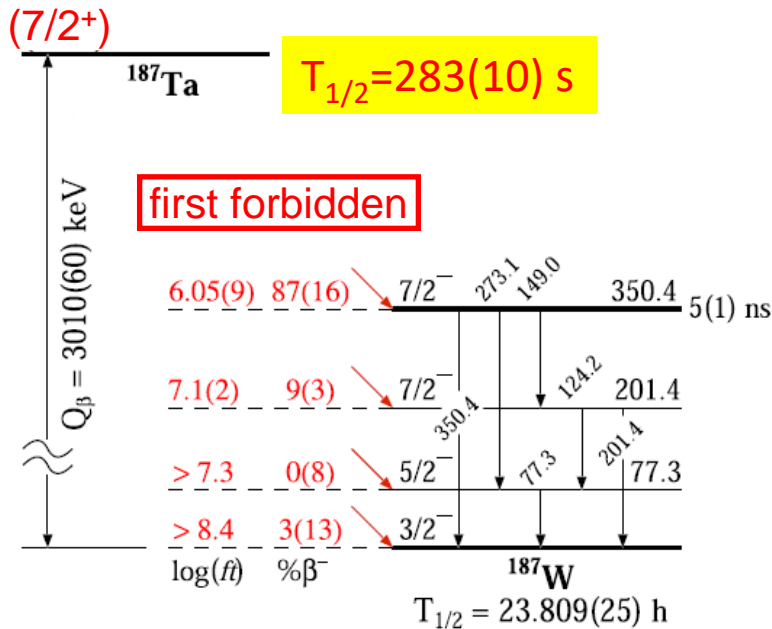
Growth-decay curve
of β -delayed γ -ray counts



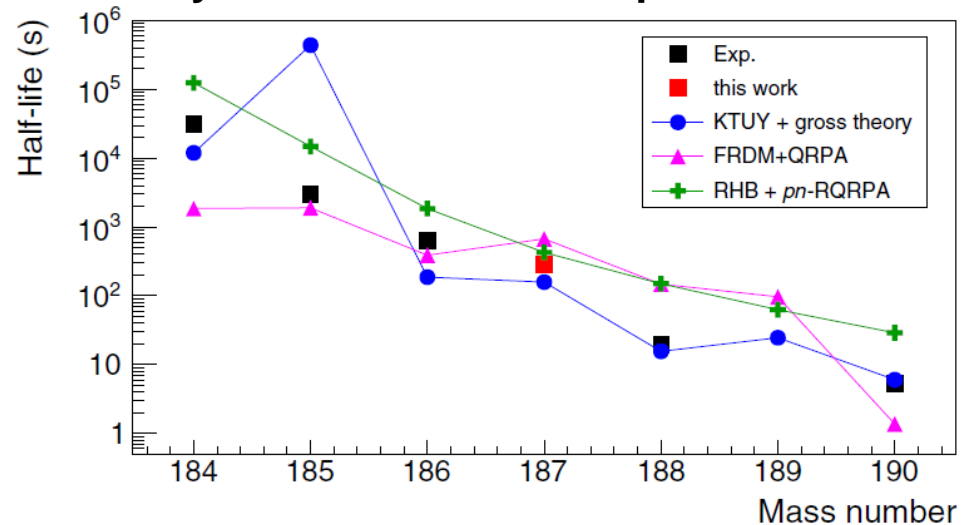
6 β -delayed transitions were observed

c.f. $T_{1/2} = 138(36)$ s for $^{187}\text{Ta}^{73+}$ at ESR GSI

M.W. Reed et al., Phys. Rev. Lett. 105, 172501 (2010).



Systematics of Ta isotope half-lives



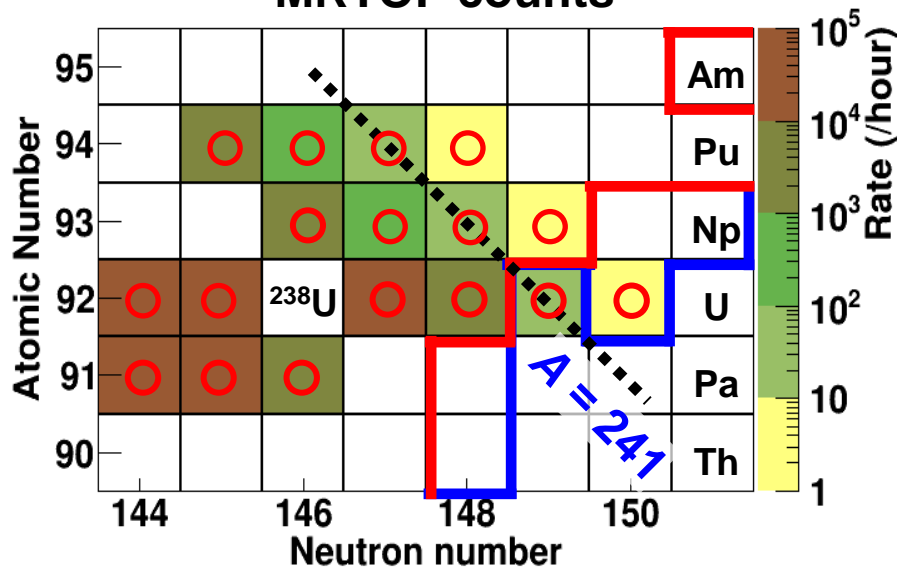
Experimental results

Mass measurement

中性子過剰なアクチノイド同位体の精密質量測定

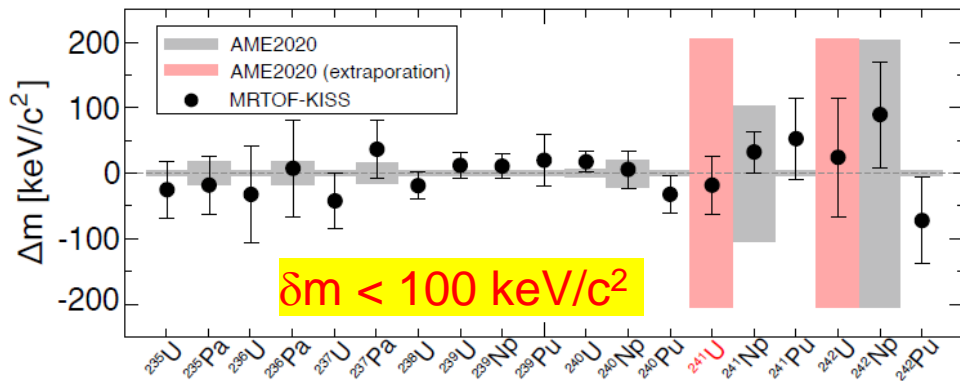
^{238}U ビーム + ^{198}Pt 標的

MRTOF counts

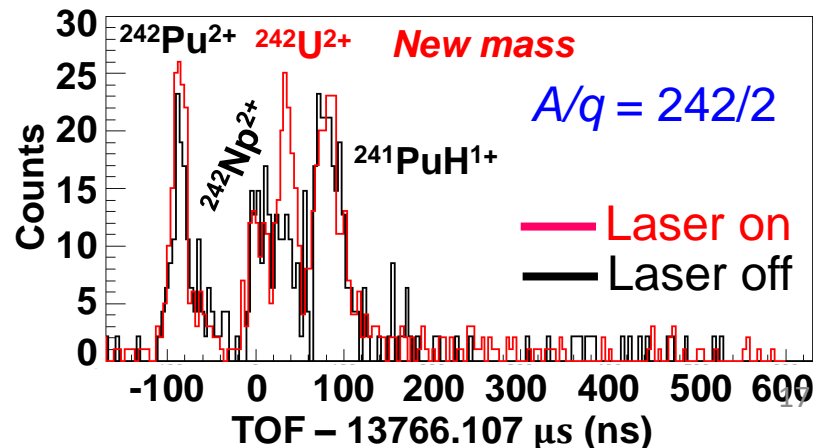
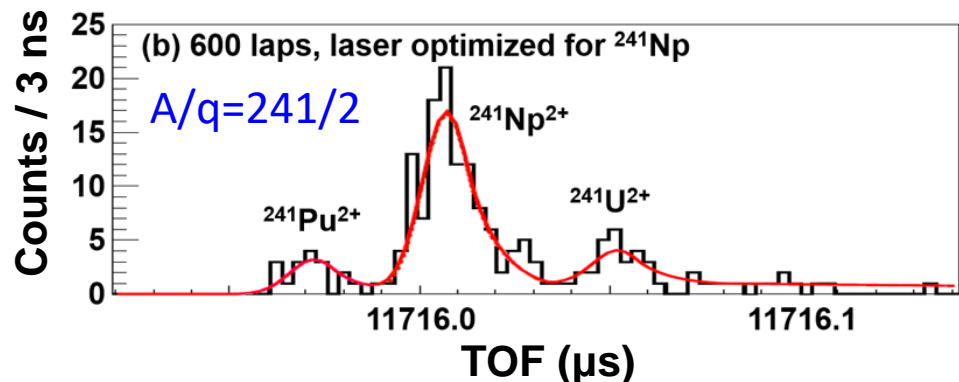
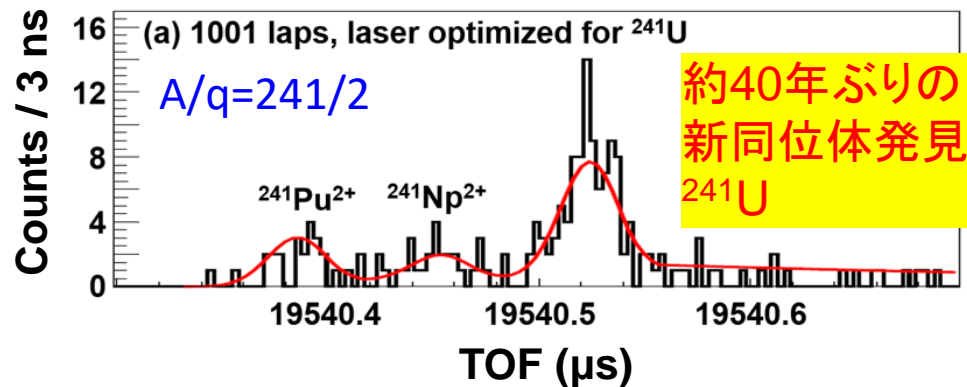


— Mass frontier — Lifetime frontier

Mass difference from AME2020



MRTOF-MSで測定した飛行時間スペクトル



Experimental results

Laser spectroscopy

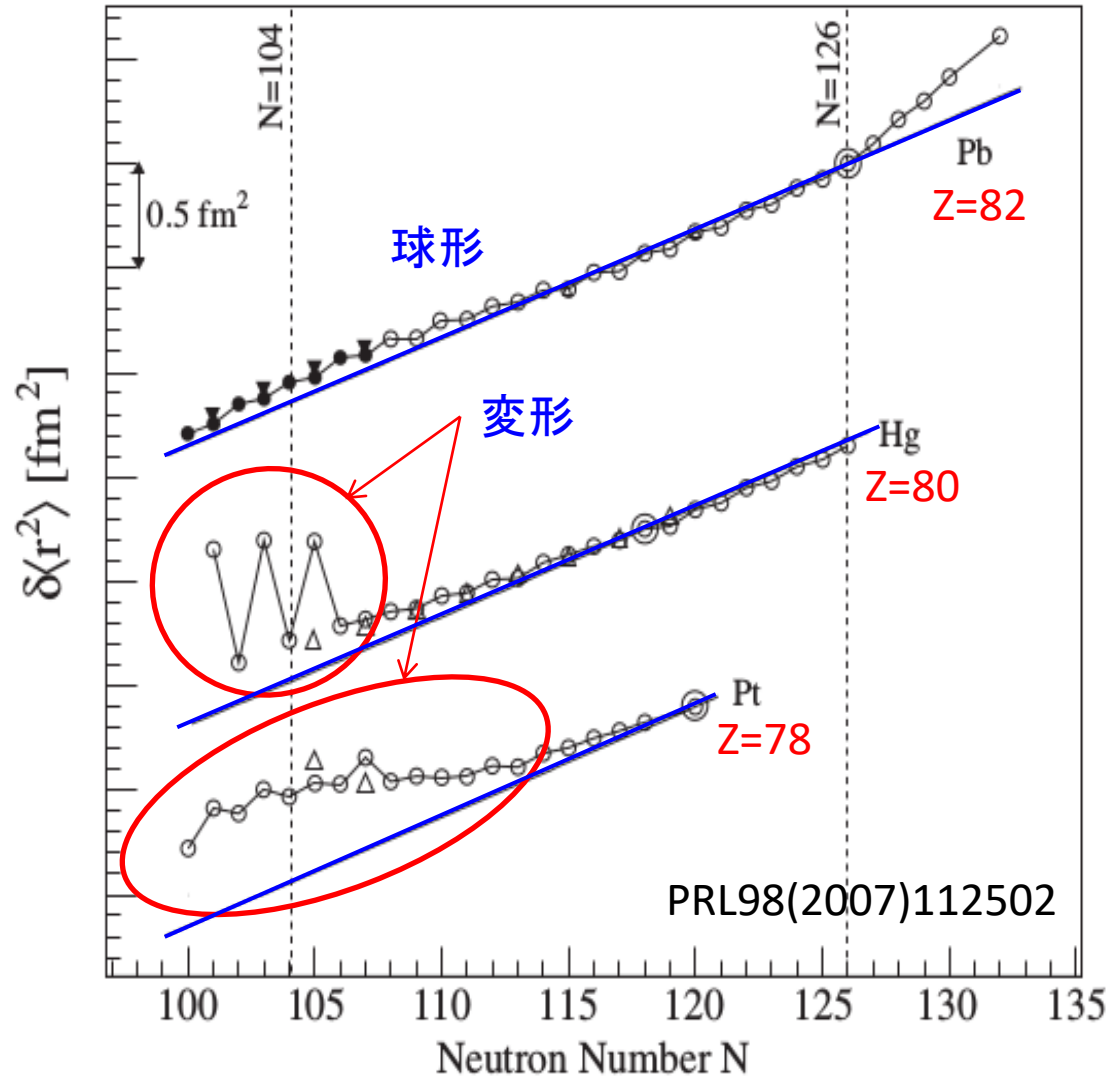
レーザー核分光

ベータ崩壊の寿命予測

- Q_β
→ 原子核質量
- 核行列要素
→ スピン・パリティ、波動関数

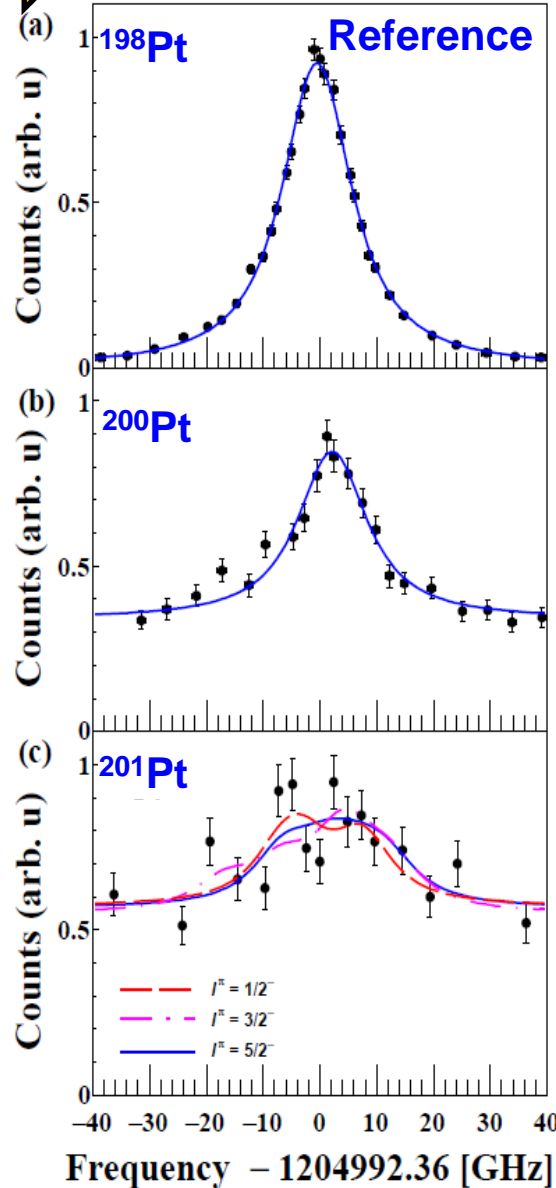
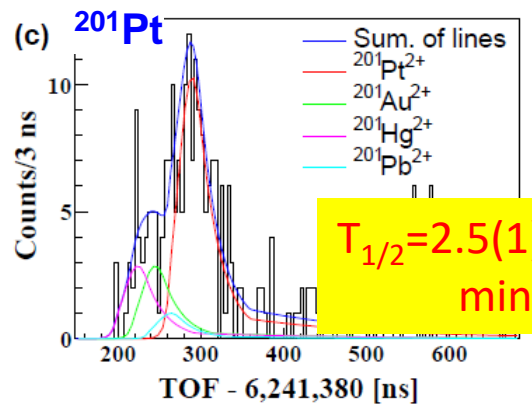
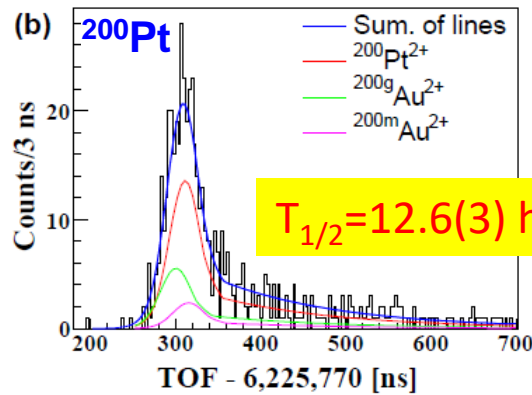
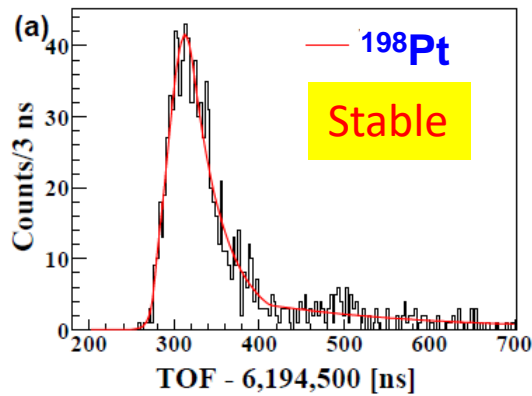
レーザー核分光

- 超微細相互作用分布の測定
→ 電磁気モーメント μ, Q
→ $I\pi$, 波動関数
- 同位体シフト
→ 荷電半径の変化
→ 核変形

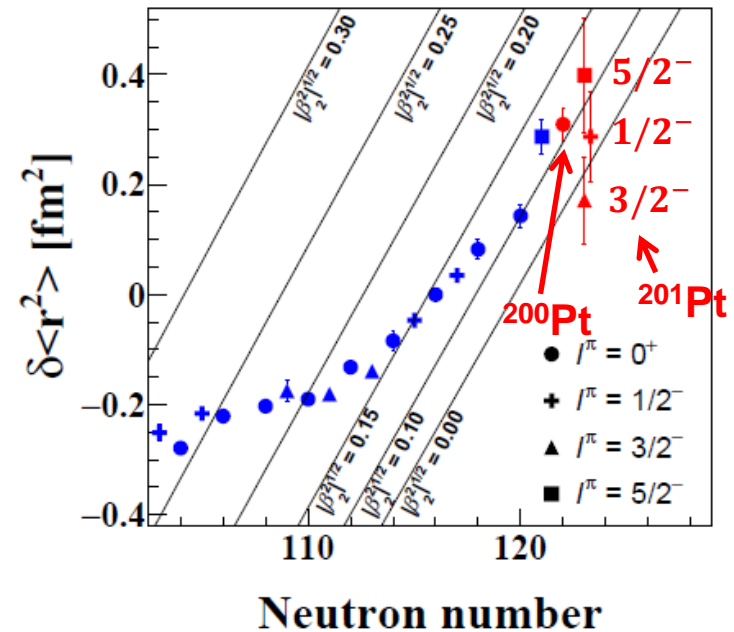


ガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光: $^{200,201}\text{Pt}$ ($Z=78$)

MRTOF-MSで粒子識別 \rightarrow レーザー共鳴スペクトル



同位体シフト $\delta\nu$ から原子核の荷電半径の変化量と変形度を導出



原子核の変形度と理論計算の比較から $^{201}\text{Pt}_{123}$ のスピンの磁気モーメントを示唆

$$I^\pi = 5/2^-, \mu = +0.86(21) \mu_N \rightarrow \nu f_{5/2}$$

$$^{203}\text{Hg}_{123}: I^\pi = 5/2^-, \mu = +0.84895(3) \mu_N \rightarrow \nu f_{5/2}$$

これからの展開

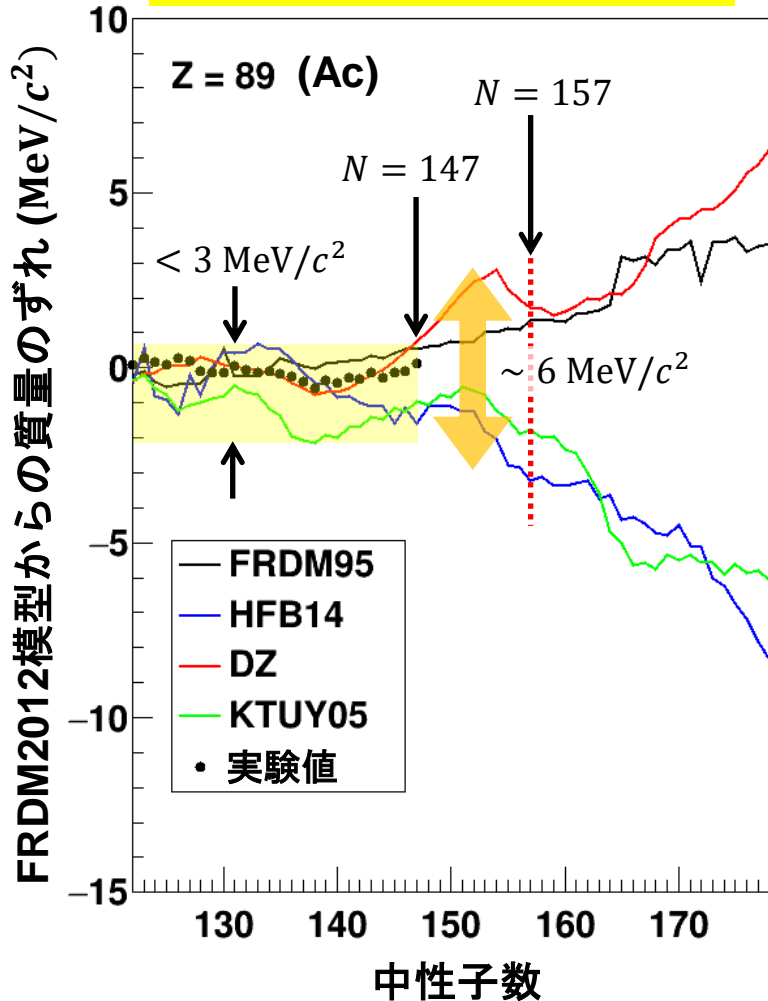
元素合成シミュレーションへのフィードバック

r過程経路上の中性子過剰核 → 生成困難 → 近傍核から理論予測

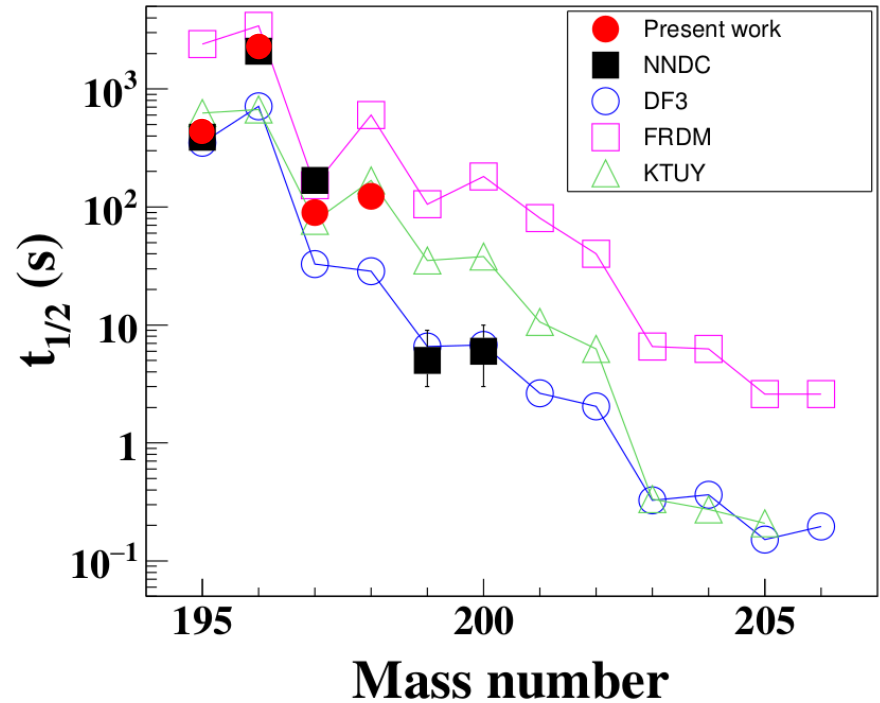


理論(核構造・ネットワーク計算)との連携が非常に重要

アクチニウム同位体の質量



Os($Z=76$)同位体の半減期



寿命測定・崩壊核分光・レーザー核分光から理論モデルへ具体的にどの様にフィードバック？

元素合成理解に向けて

将来計画 : KISS-II

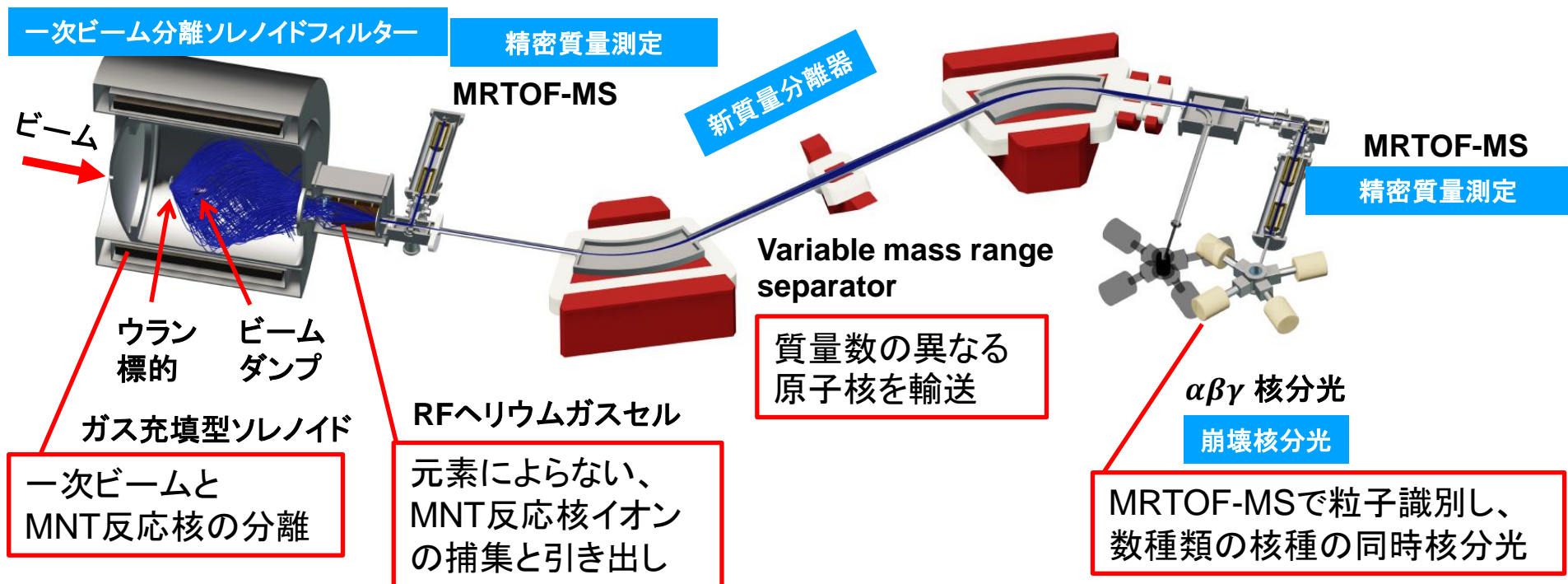
KEK Report 2022-2 (2022).

<https://arxiv.org/abs/2209.12649v2>

あえて「分離」しないで全部一度に測れるようにする！

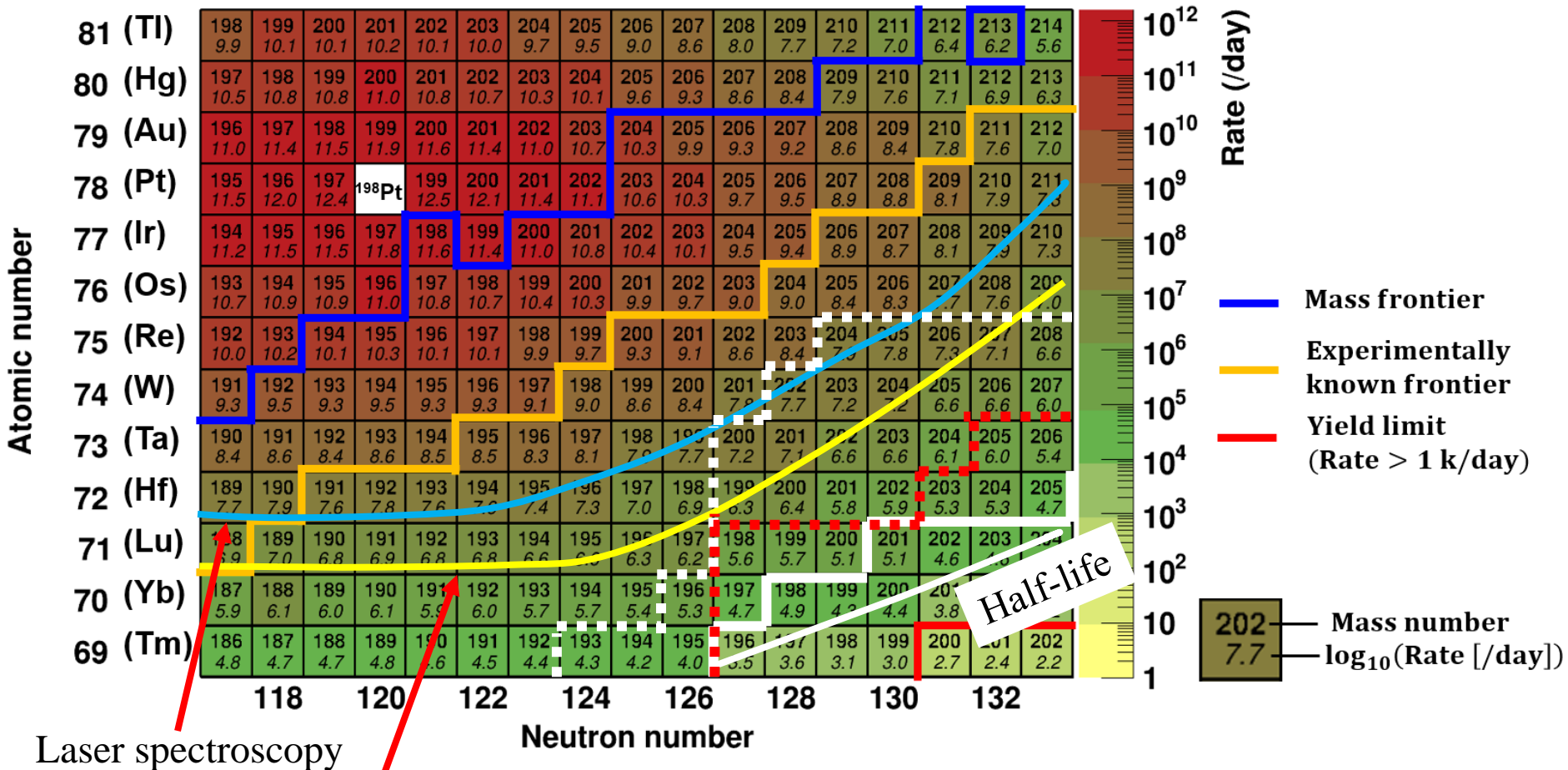
- 一次ビーム分離器導入：大強度一次ビーム使用を可能にする
- 高周波Heガスセル導入：効率よく捕集して、全ての元素をイオンとして引き出す
- MRTOF導入：同時に多数の原子核質量測定、粒子識別して崩壊核分光

	一次ビーム強度	引き出し効率	測定能率	総ゲイン
KISS	10 pnA	<0.1%	1	1
KISS-II	1000 pnA	>1%	> 10	> 10 000
	一次分離器	RFガスセル	MRTOF	



KISS-IIでのN=126周辺核の予測収量

^{238}U (9.0A MeV, 1 pμA) + ^{198}Pt (13 mg/cm²)

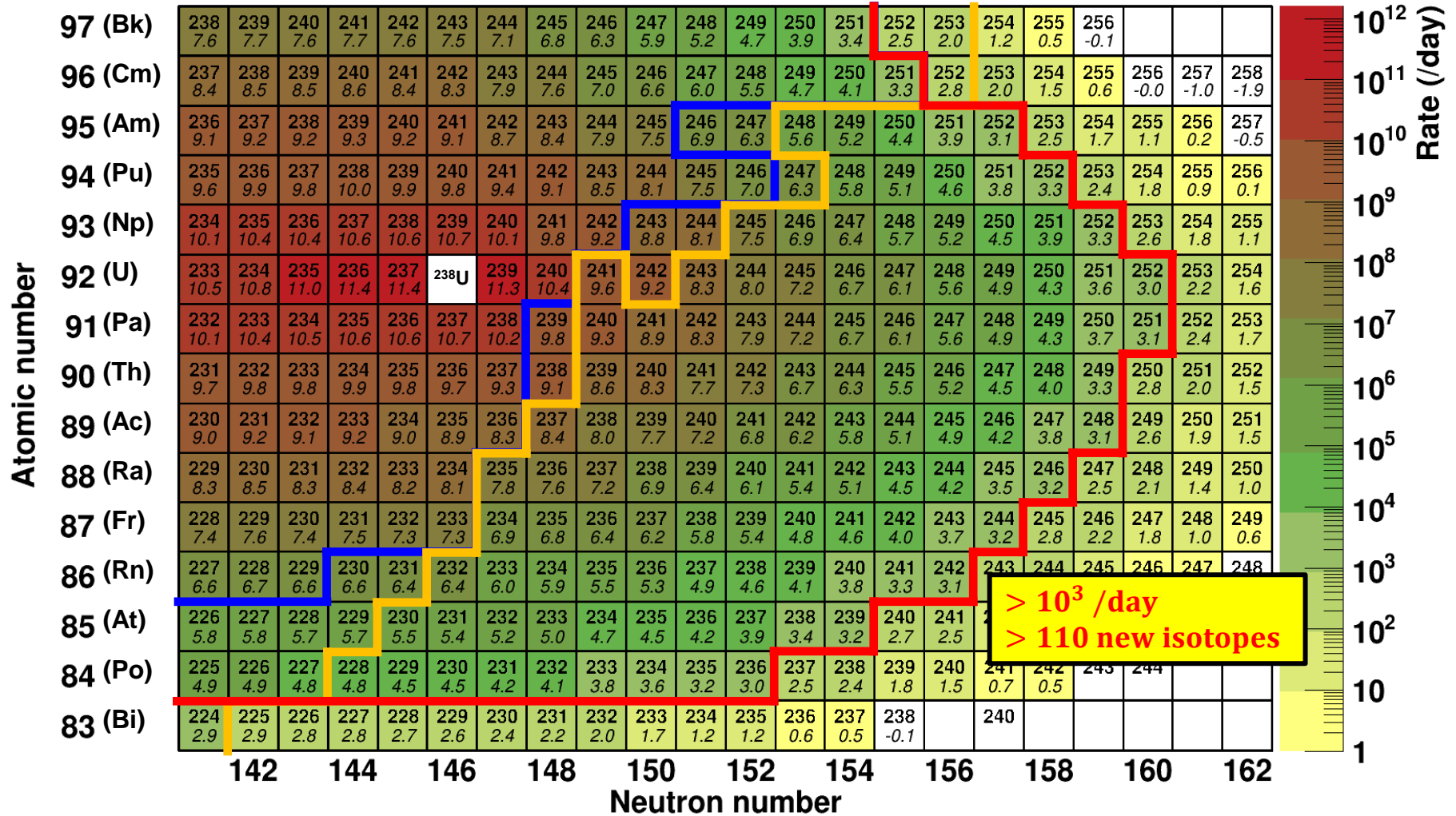


70種程度の新同位体の発見
Break-through pair (Yb) 近傍
Peak-progenitor ¹⁹⁵Tm

KUTY model 予測
白実線 : $T_{1/2} > 20\text{ms}$
赤点線 : $T_{1/2} > 30\text{ms}$
白点線 : $T_{1/2} > 100\text{ms}$

KISS-IIでのウラン周辺核の予測収量

^{238}U (9.4A MeV, 1 pμA) + ^{238}U (13 mg/cm²)



> 10³ /day
> 110 new isotopes

— Mass frontier

— Experimentally known frontier

— Yield limit (Rate > 1 k/day)

Fission probability of 90% was assumed.

248 — Mass number
5.7 — log₁₀(Rate [/day])

まとめ

KISS計画 : 金・白金、ウランをはじめとする重元素の起源となる天体やr過程の経路を原子核物理の視点から解明したい。

KISSでの核分光実験

- Lifetime measurements and β - γ spectroscopy
 $^{199-201}\text{Pt}$, $^{196-200}\text{Ir}$, $^{195-198}\text{Os}$, $^{185-187}\text{Ta}$, ^{192}Re
- Mass measurement by using MRTOF-MS
Pt, Ir, Os, Re, W isotopes and actinide elements
- Laser spectroscopy for g-factor and charge radius
 $^{199g, 199m, 200, 201}\text{Pt}$, $^{196-198}\text{Ir}$, $^{194, 196}\text{Os}$, Re, W, Ta...



Proceed further nuclear spectroscopy of nuclei around N=126 and around ^{238}U (n-rich actinide)
→ KISS-1.5 (x 100 ~ 1000) → KISS-II (x 10,000)