

宇宙元素合成と超重元素

Origin of heavy elements and superheavy elements

KEK 素核研・和光原子核科学センター 和田道治

筑波大学 客員 (2020年5月~)

元素の起源の解明

重力波
天体分光
隕石

観測

理論

実験

反応ネットワーク計算

関与する原子・**原子核**の測定

原子核実験研究の寄与

重元素合成に関与する未知の原子核を生成・分離して、その**特性**を網羅的に測定する

質量、半減期、崩壊様式、励起構造、遅発粒子..

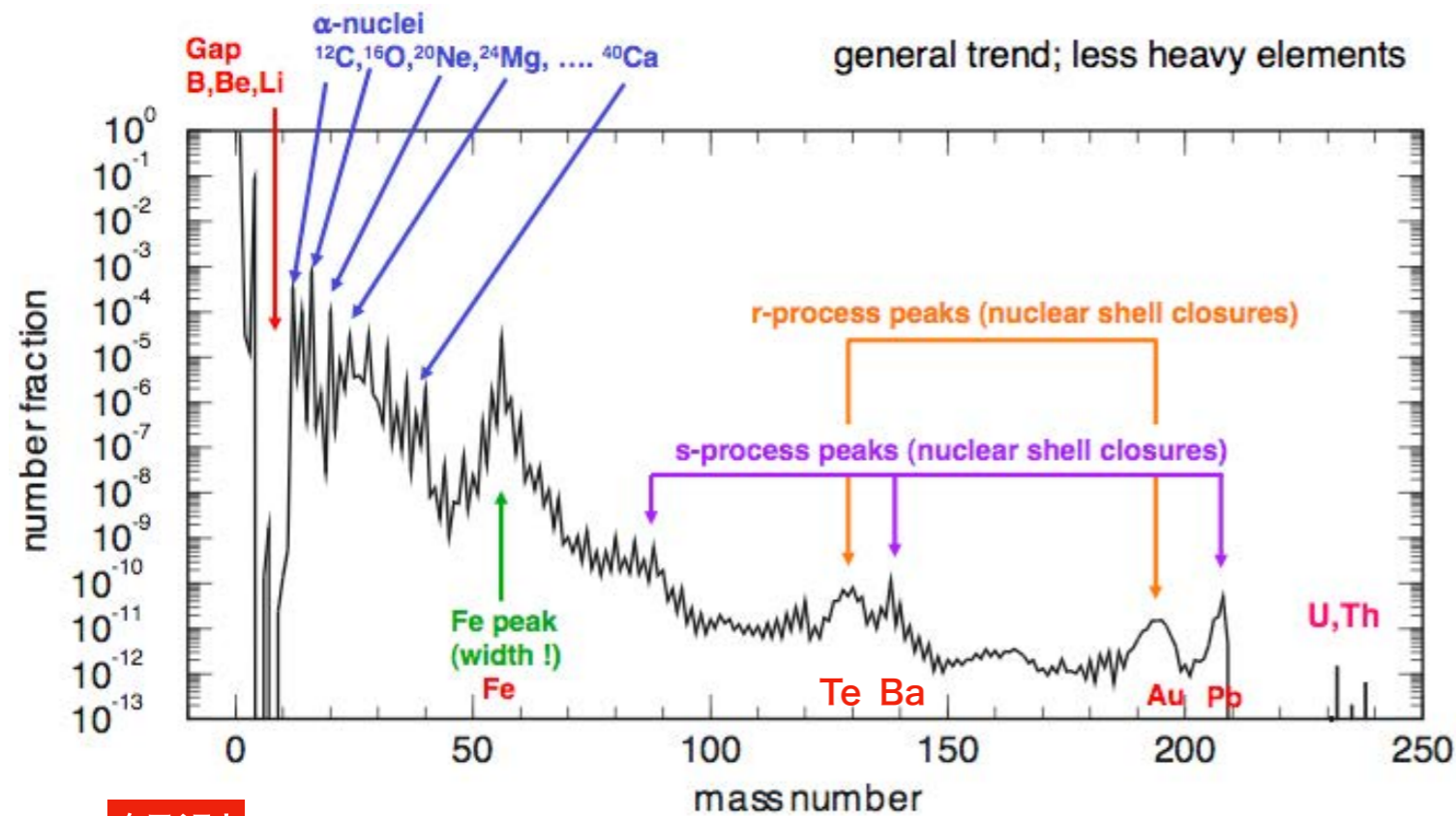
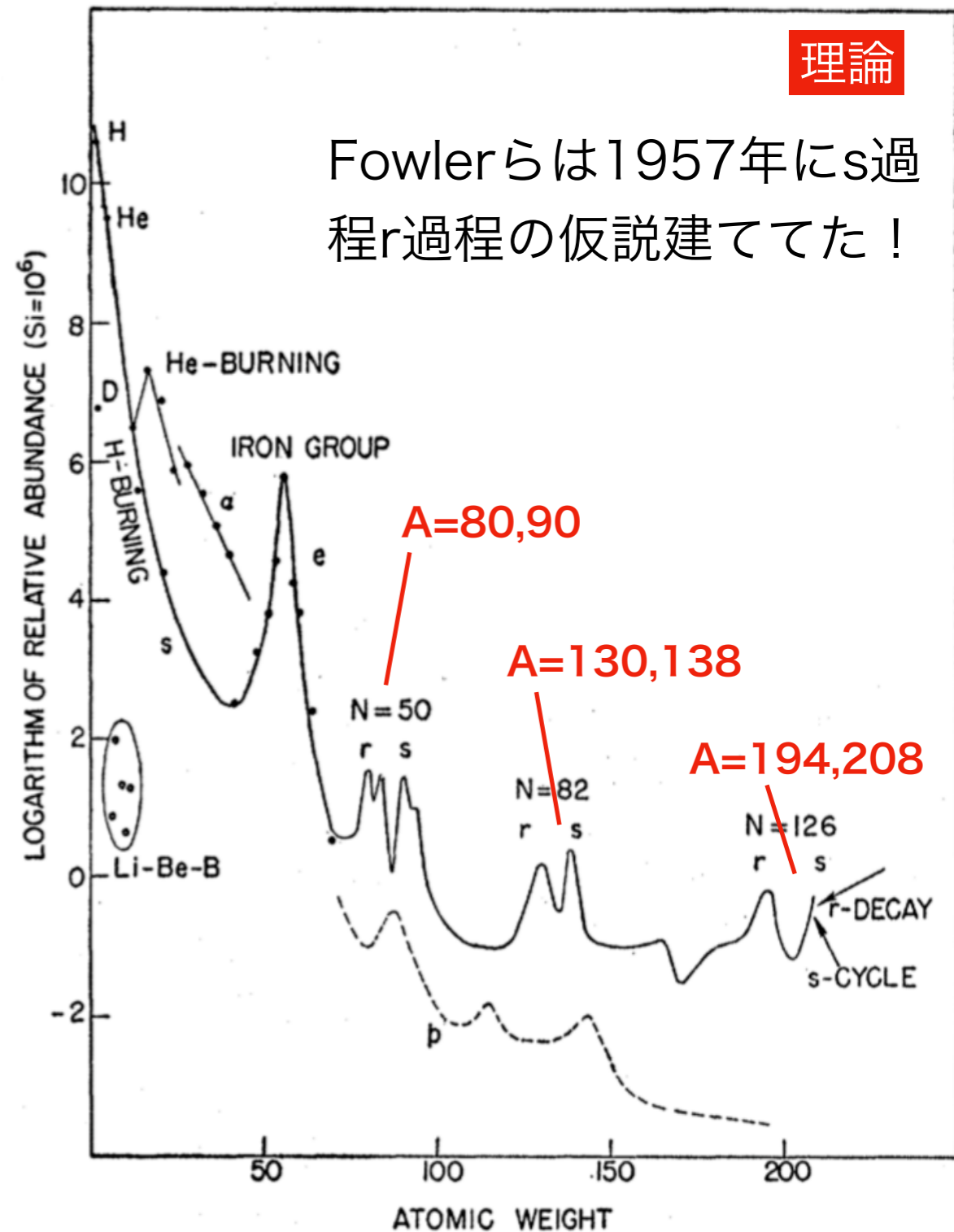
和光市の理化学研究所の加速器施設で実験的研究を実行中

- 自然界には金・鉛・ウラン等が微量存在
- 大きく偏った存在比（特徴的なピーク）

BBFH, Rev. Mod. Phys. 29(1957)

理論

Fowlerらは1957年にs過程r過程の仮説建ててた！

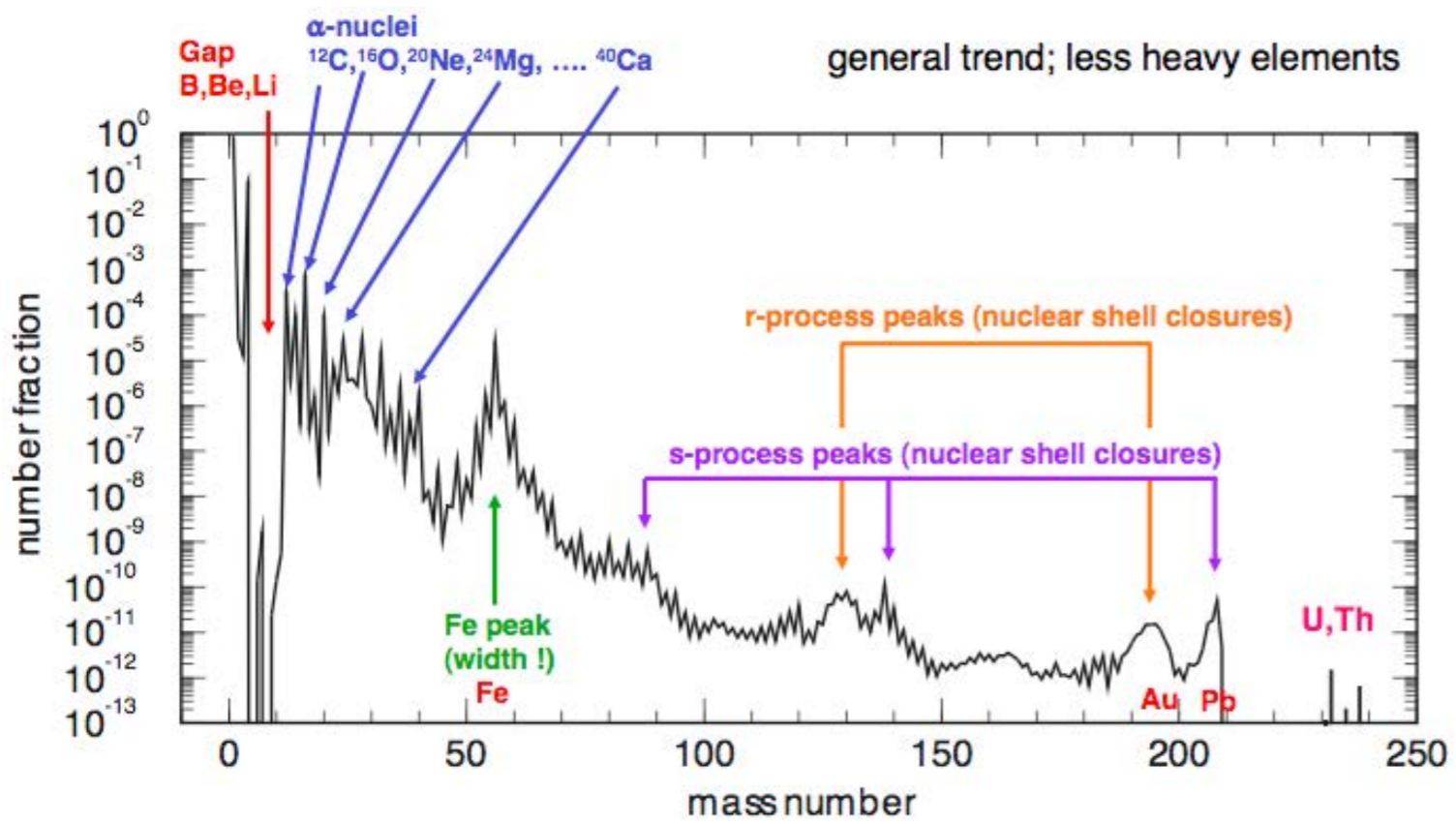


観測

隕石の成分分析、太陽大気分光観測(太陽系の場合)

他の星・銀河では大いに変わりうる

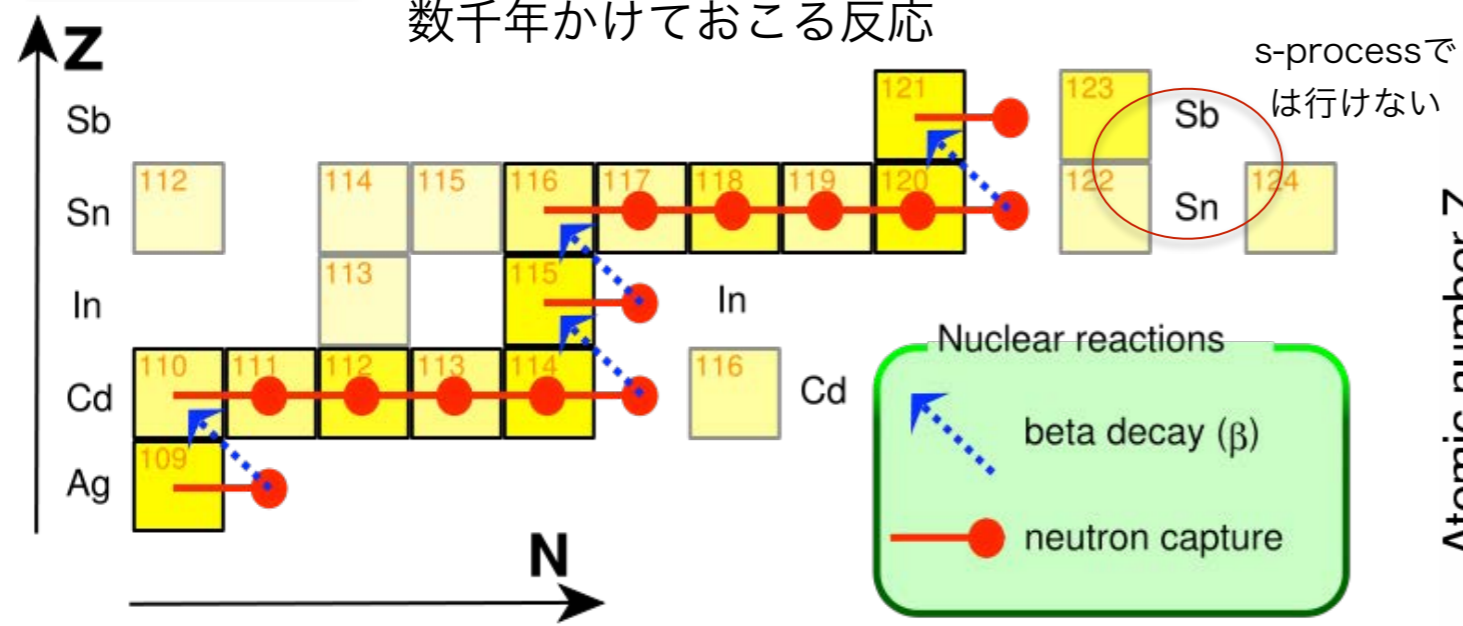
重い元素の起源



- 自然界には金・鉛・ウラン等が微量存在
- 大きく偏った存在比（特徴的なピーク）

s-process

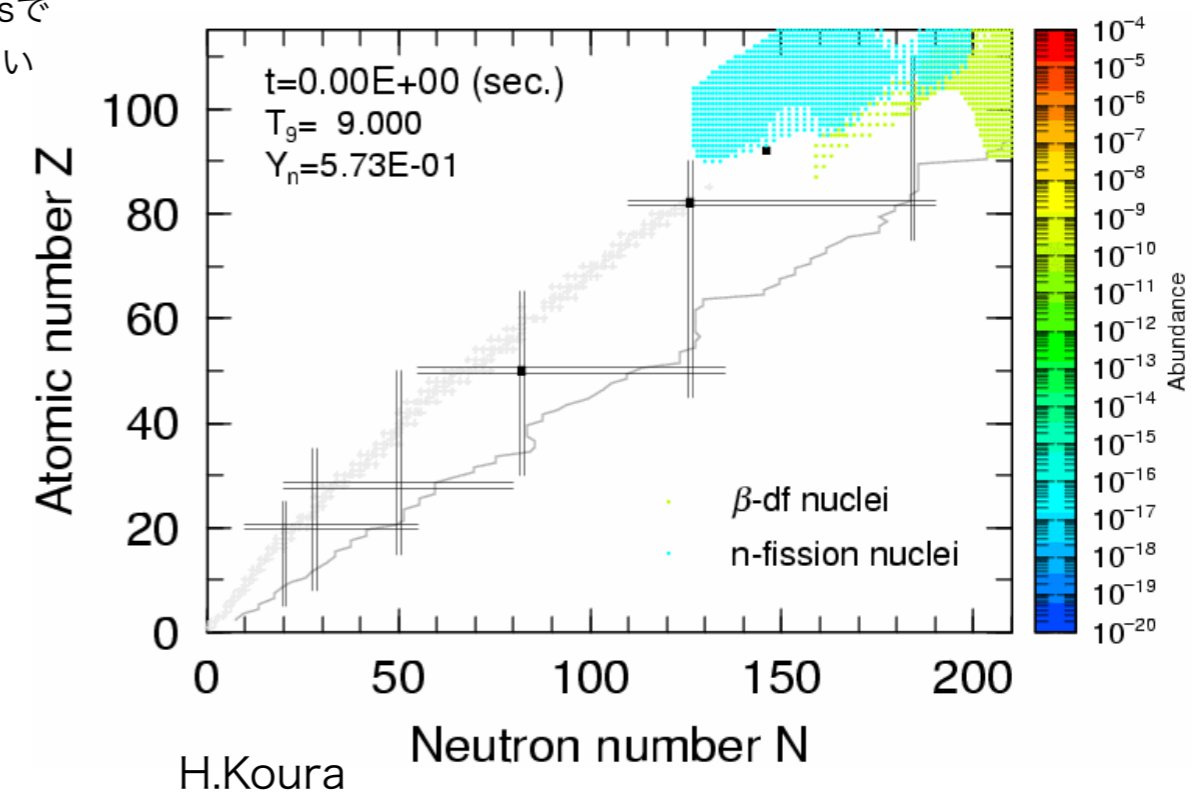
0.6~10太陽くらいの軽一中星の最後
数千年かけておこる反応



r-process

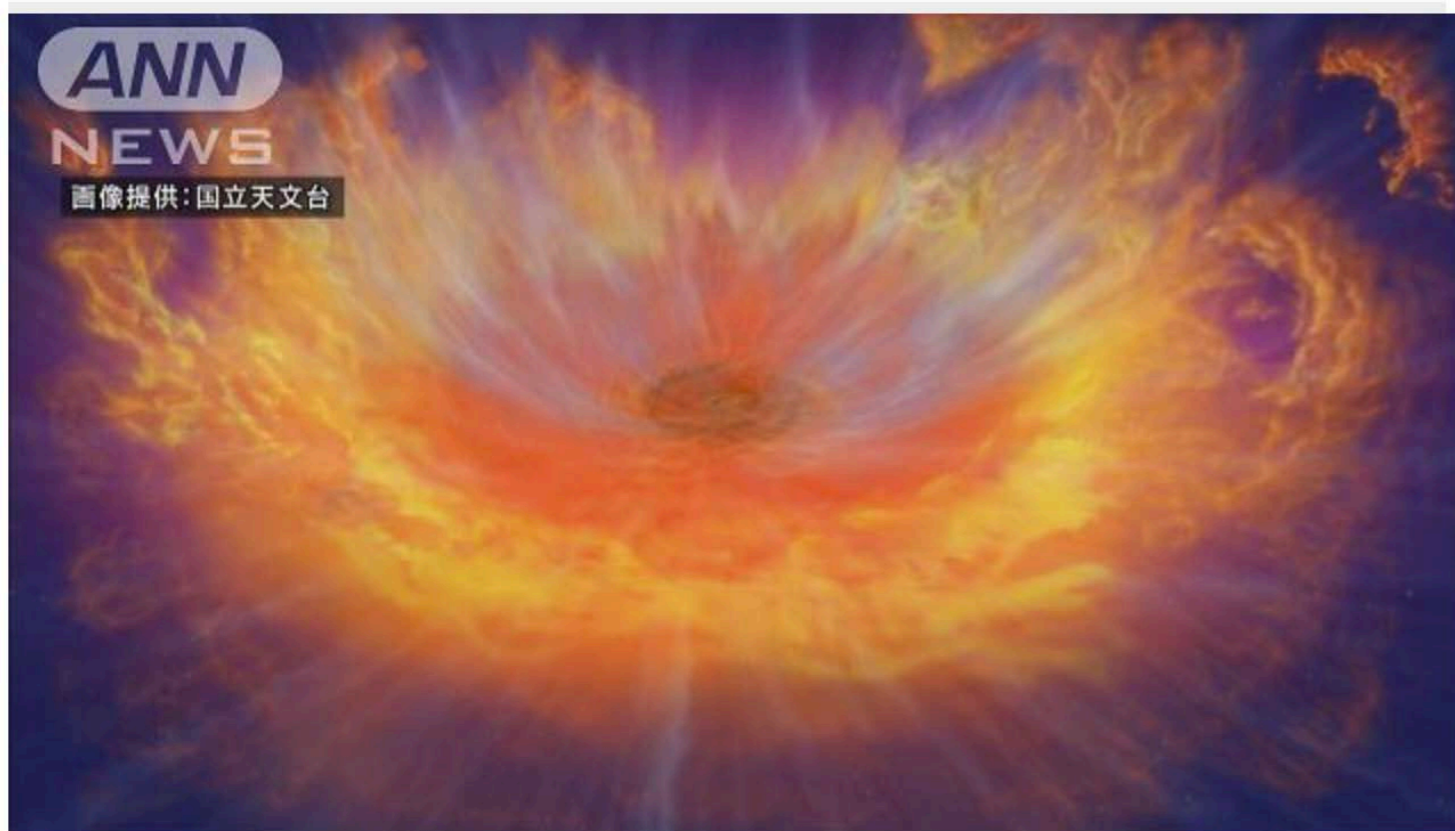
理論

爆発的に発生（超新星爆発？中性子星融合？）
数秒間の反応で超重元素まで達しゆっくり安定核生成



存在比は中性子捕獲断面積に反比例
(魔法数でピーク形成)

金やプラチナ大量生成 中性子星合体の重力波観測で (2017/10/17 11:55)



ツイート mixi チェック シェア B! 使い方は?

「中性子星」と呼ばれる重力の強い星と星が衝突して合体したことを重力波と光で観測することに成功したとアメリカなどの研究チームが発表しました。世界初の快挙です。

アメリカなどの研究チームは今年8月、地球から1億3000万光年離れた宇宙で、2つの中性子星が衝突して合体した際に生じた重力波を観測しました。この観測を受け、国立天文台など日本の研究チームは衝撃で生じた光を半月にわたって観測しました。この光を分析した結果、中性子星の合体により、金やプラチナなどの重元素が大量に作られたことが分かったということです。

「金が生まれる瞬間を見た！」？

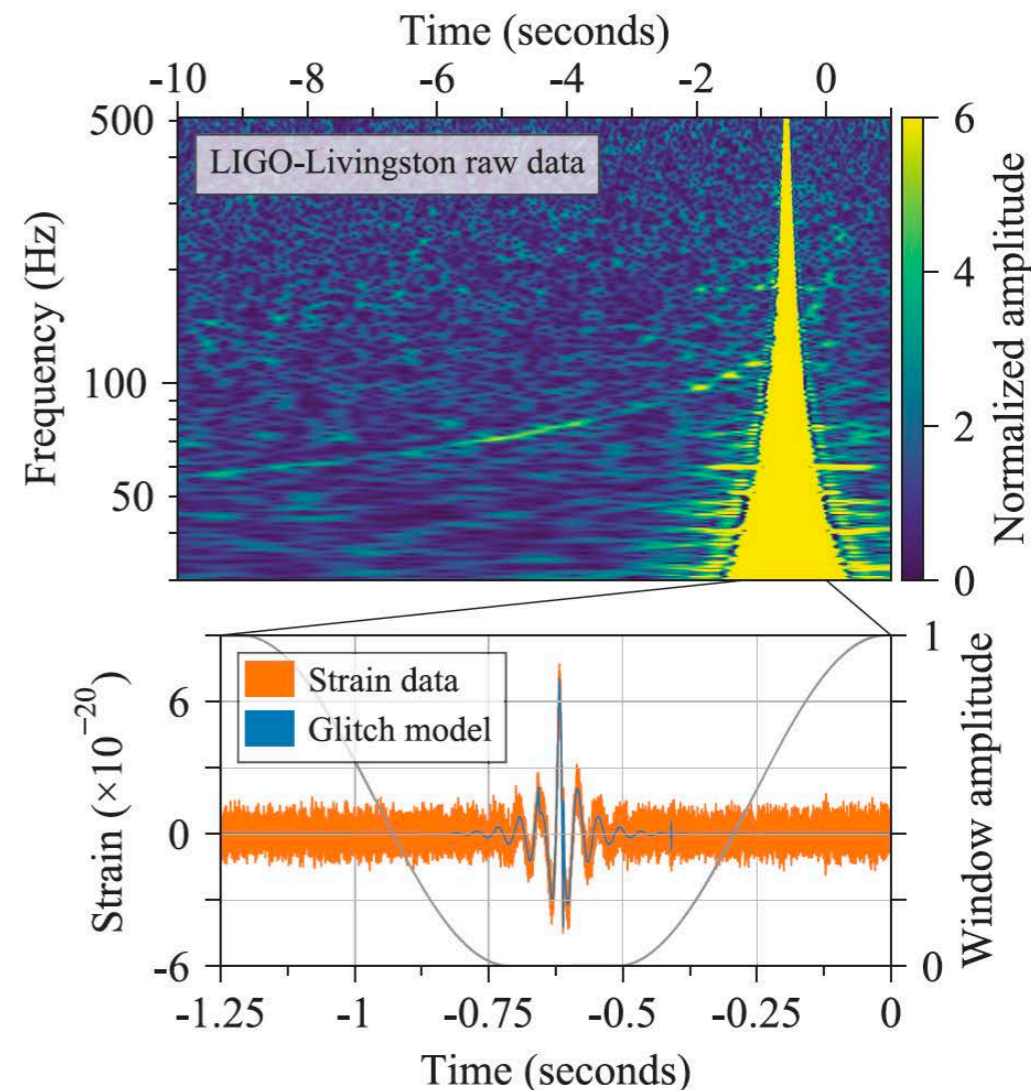
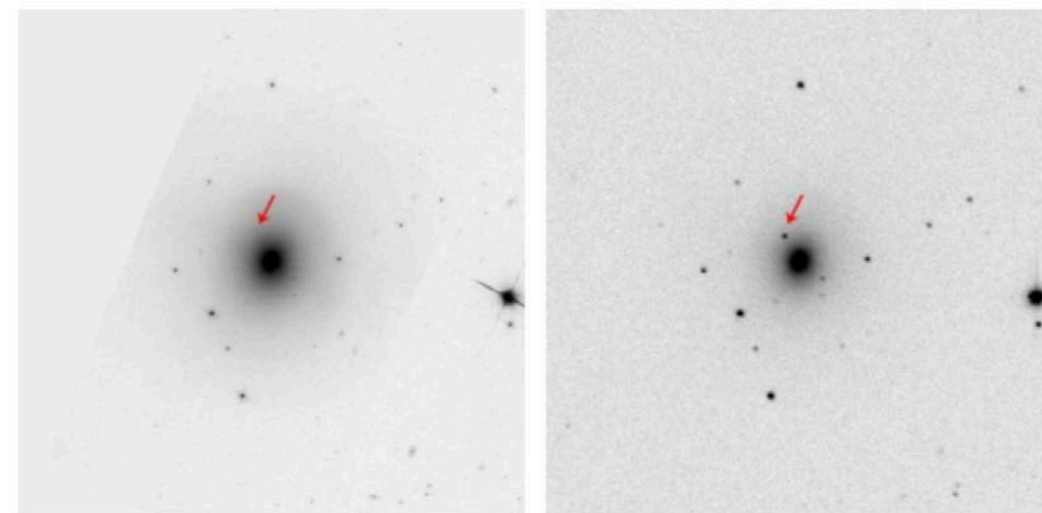


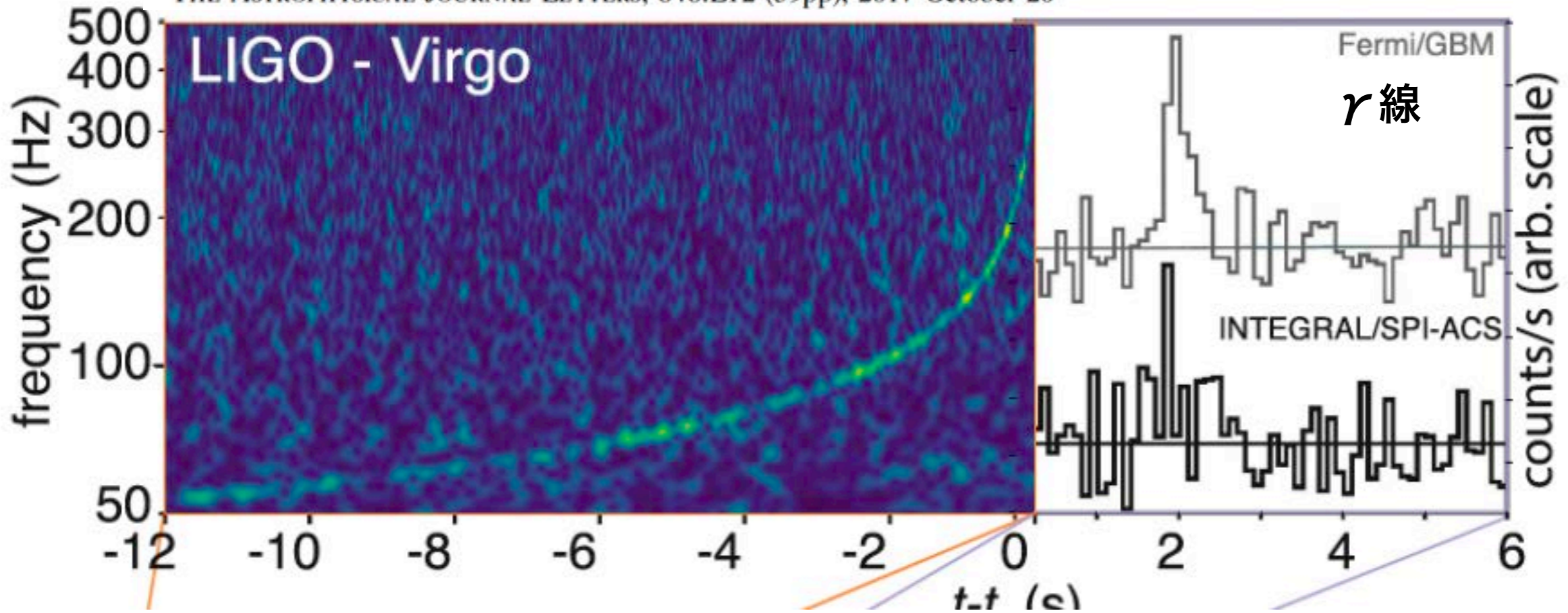
FIG. 2. Mitigation of the glitch in LIGO-Livingston data. Times are shown relative to August 17, 2017 10:41:04 UTC. The glitch is the sharp peak in the spectrogram at approximately -0.2 seconds.



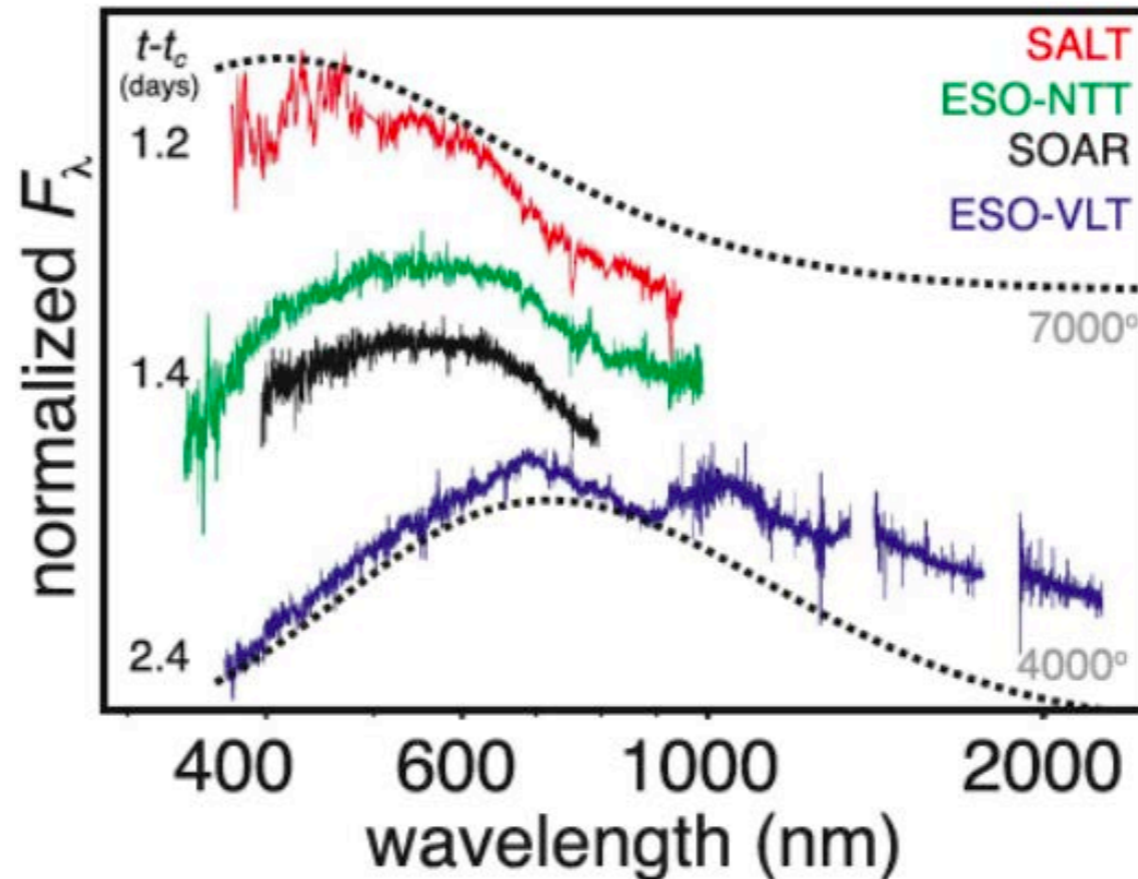
[画像のクリックで拡大表示]

[画像のクリックで拡大表示]

新たな重力波が検出される4カ月前にハッブル宇宙望遠鏡がとらえた楕円形の銀河「NGC4993」(左)。一方、チリのスウォープ望遠鏡の画像(右)には、2017年8月に現れた明るい点が見える。(PHOTOGRAPH BY HUBBLE/STSCI (LEFT) AND



観測 紫外・可視・赤外



理論

分光測定による波長分布の日変化がr過程の事前予測とよく合っていた！！

(この中性子星合体では希土類まで達していたらしい)

実験

原子物理実験 (多価イオン分光) の寄与

重力波観測直後、世界中の観測機関で光学的観測に成功！

γ線・X線
紫外・可視・赤外

2018年センター試験 地学の問題

第6問 宇宙

A 宇宙の構成要素

問1

- ① 炭素、酸素はすべて恒星の中心部での核融合によってつくられたものである。誤。
- ② 鉄より重い元素は核融合によってはつくられない。超新星爆発の際につくられたものである。
正。
- ③ 種族Ⅱの星は種族Ⅰの星より老齢で重い元素の割合が少ない。誤。
- ④ ヘリウムの大部分はビッグバンから約数分後までに生成した。誤。

(答) …②

一部の研究者間で物議をかもしたが、まだ中性子星合体と決まったわけではない

爆発的元素合成過程 (r-process)

高温高密度時

中性子晴れ上がり期

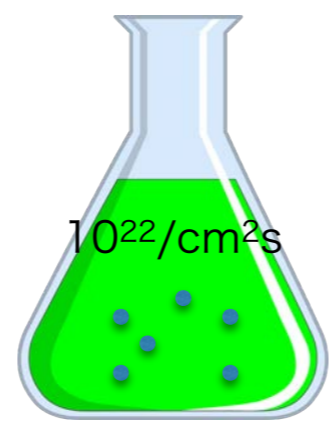
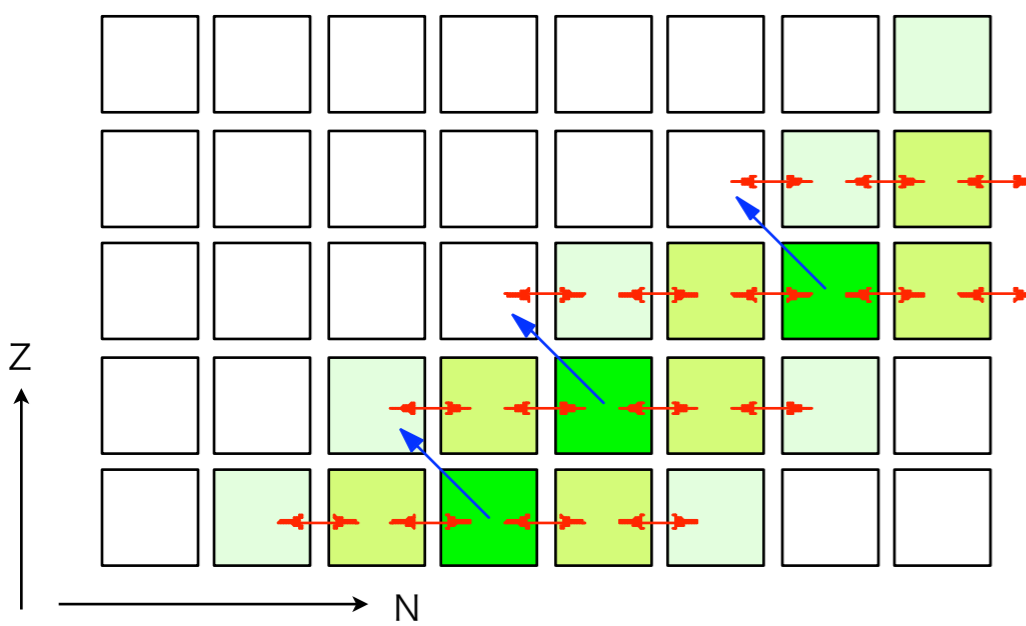
冷却期

1) $(n, \gamma) \leftrightarrow (\gamma, n)$ 平衡状態
 $\frac{Y(Z, A+1)}{Y(Z, A)} \propto \rho_n \exp \frac{S_n(Z, A+1)}{kT}$
 質量が決定的要素

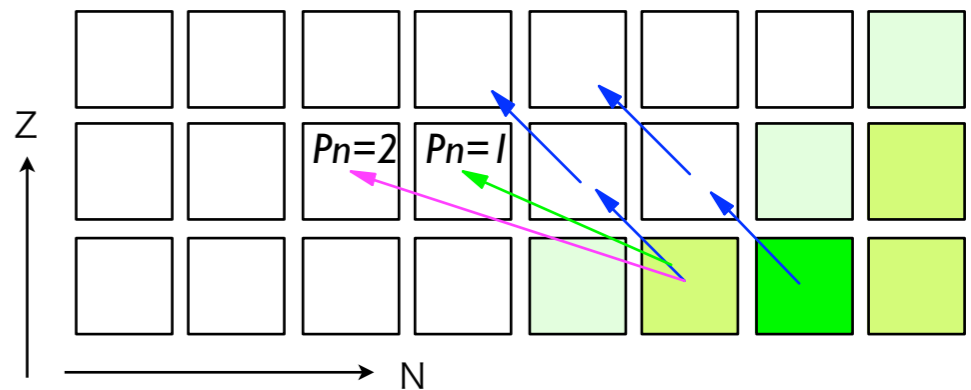
2) β -崩壊 ($Z=Z+1$) 半減期が重要

非平衡中性子捕獲・光分解
 ($A=A+1, A-1$)
 S_n, σ_n
 質量・中性子捕獲断面積が寄与

β -崩壊 ($Z=Z+1$)
 ($A=A, A-1, A-2$)
 β 遅発中性子放出
 遅発中性子分岐比が寄与 P_n



中性子吸収・光分解の平衡状態は S_n と温度で決まる (溶媒が中性子の化学反応と等価)
 $\exp \frac{\mu}{kT}$



冷却期にAを保ち β -崩壊して安定核に達する (遅発中性子を出すとA-1, A-2...にズれる)

$M, T_{1/2}, \sigma_n, P_n$

- 全ての原子核の全ての量の測定は不可能
- できるだけ網羅的測定をして理論予測確度高める
- 質量(反応、崩壊のQ値) が決定できると他の要素は比較的高確度で予測可能

爆発的元素合成過程 (r-process)

高温時

中性子晴れ上がり期

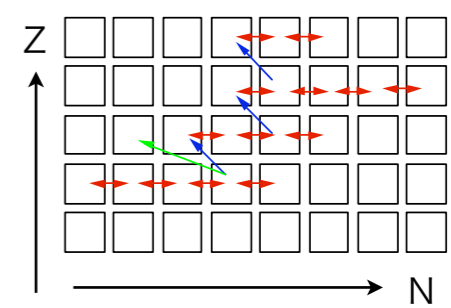
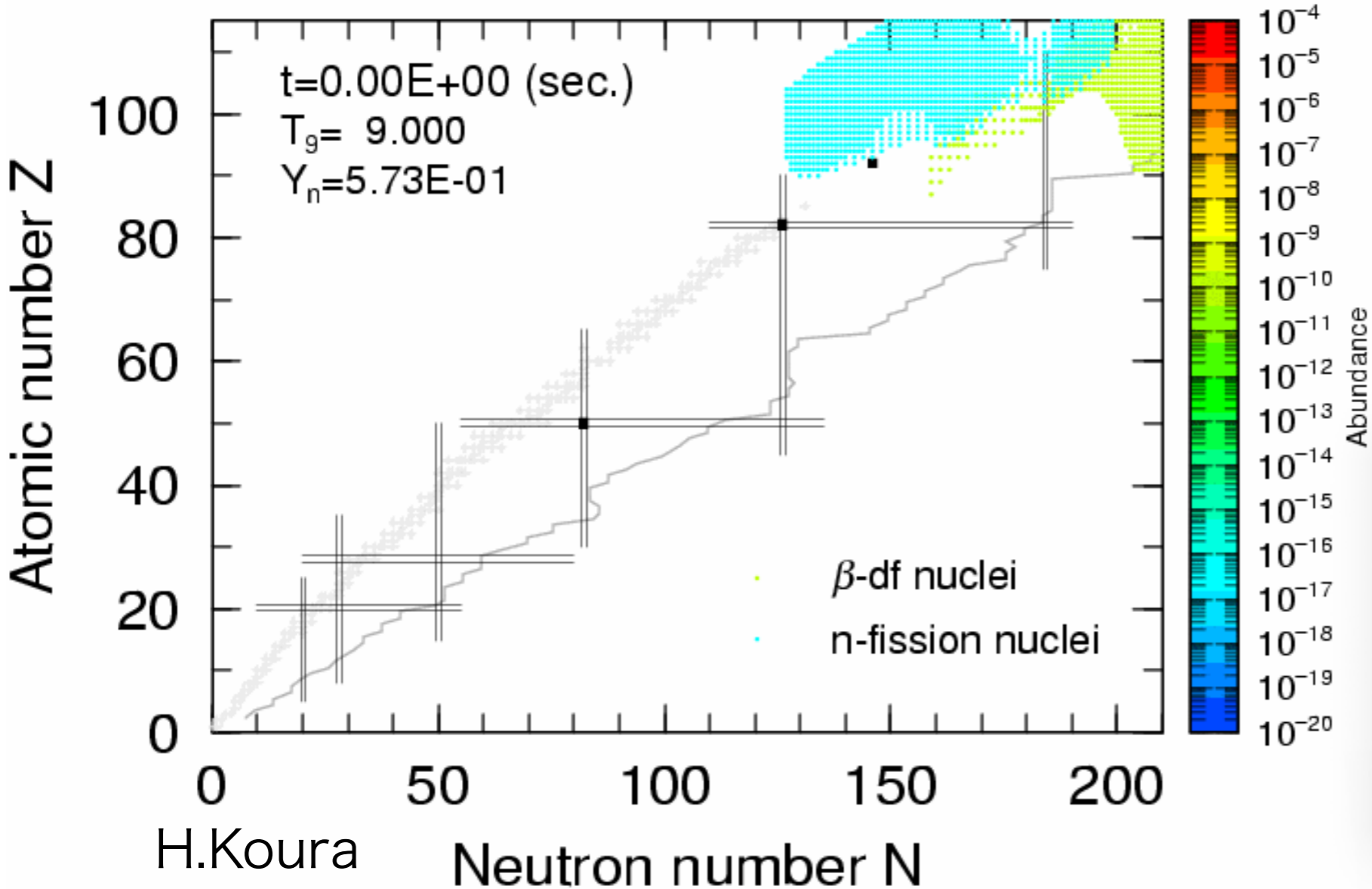
冷却期

1) $(n, \gamma) \leftrightarrow (\gamma, n)$ 平衡状態
 $\frac{Y(Z, A+1)}{Y(Z, A)} \propto \rho_n \exp \frac{S_n(Z, A+1)}{kT}$
 質量が決定的要素

2) β -崩壊 ($Z=Z+1$) 半減期が重要

非平衡中性子捕獲・光分解
 $(A=A+1, A-1)$
 S_n, σ_n
 質量・中性子捕獲断面積が寄与

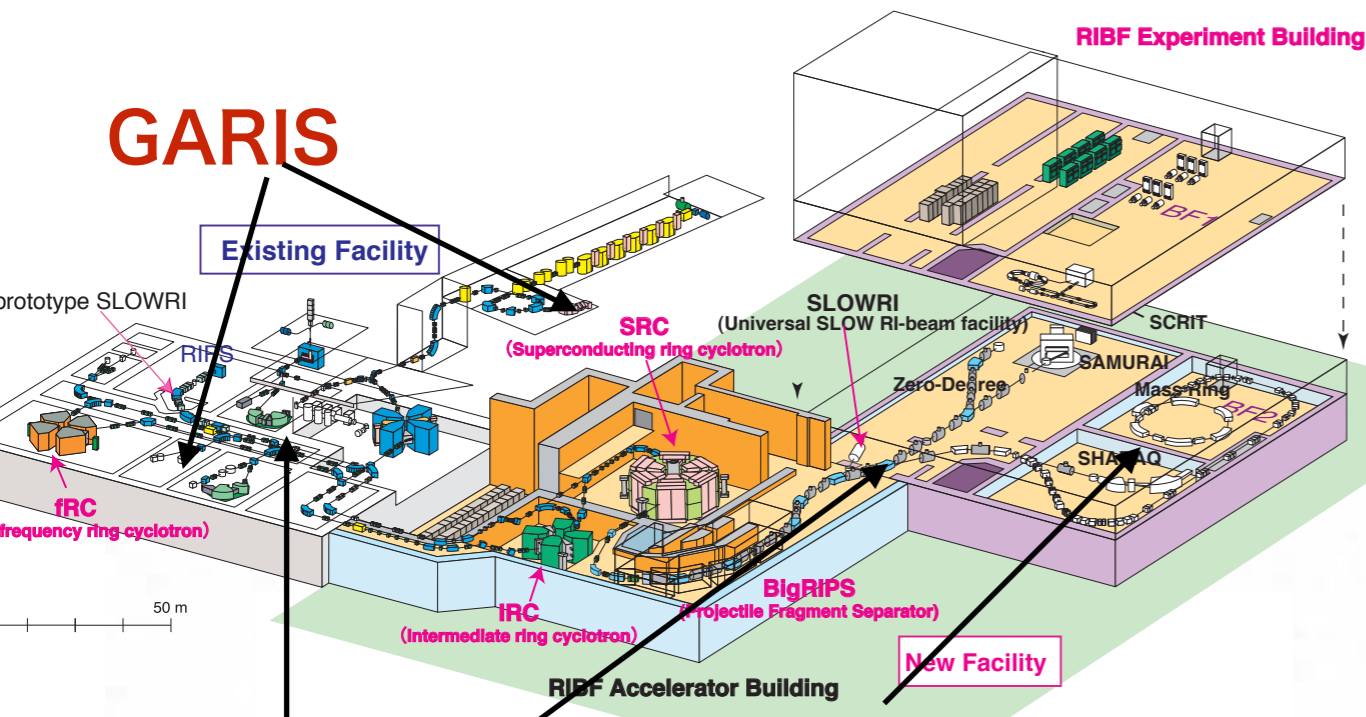
β -崩壊 ($Z=Z+1$)
 $(A=A, A-1, A-2)$
 β 遅発中性子放出
 遅発中性子分岐比が寄与 ρ_n



$M, T_{1/2}, \sigma_n, \rho_n$

- 全ての原子核の全ての量の測定は不可能
- できるだけ網羅的測定をして理論予測確度高める
- 質量(反応、崩壊のQ値)が決定できると他の要素は比較的高確度で予測可能

原子核全体の網羅的測定のための戦略

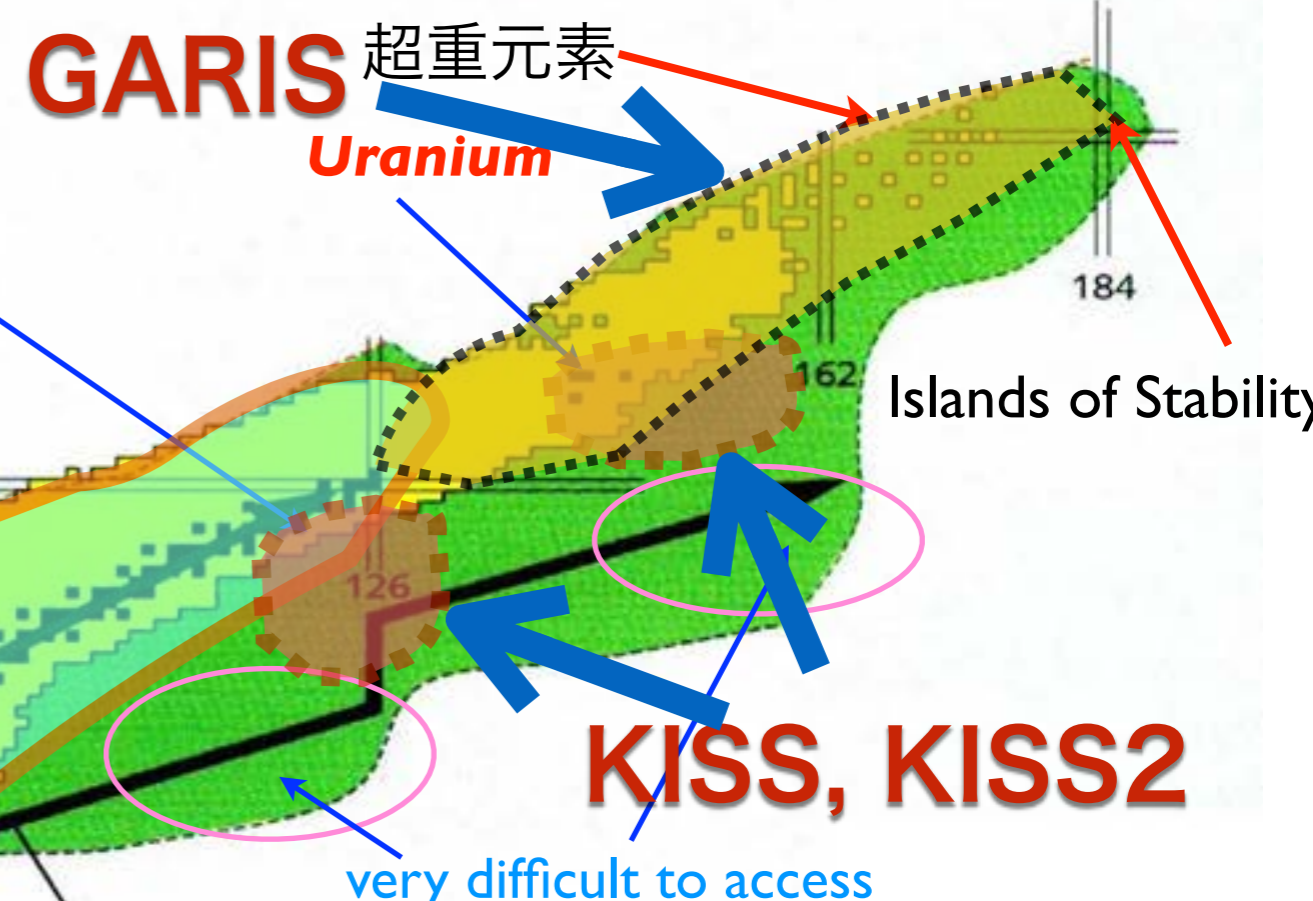


KISS

BigRIPS + SLOWRI

RRR

Gold

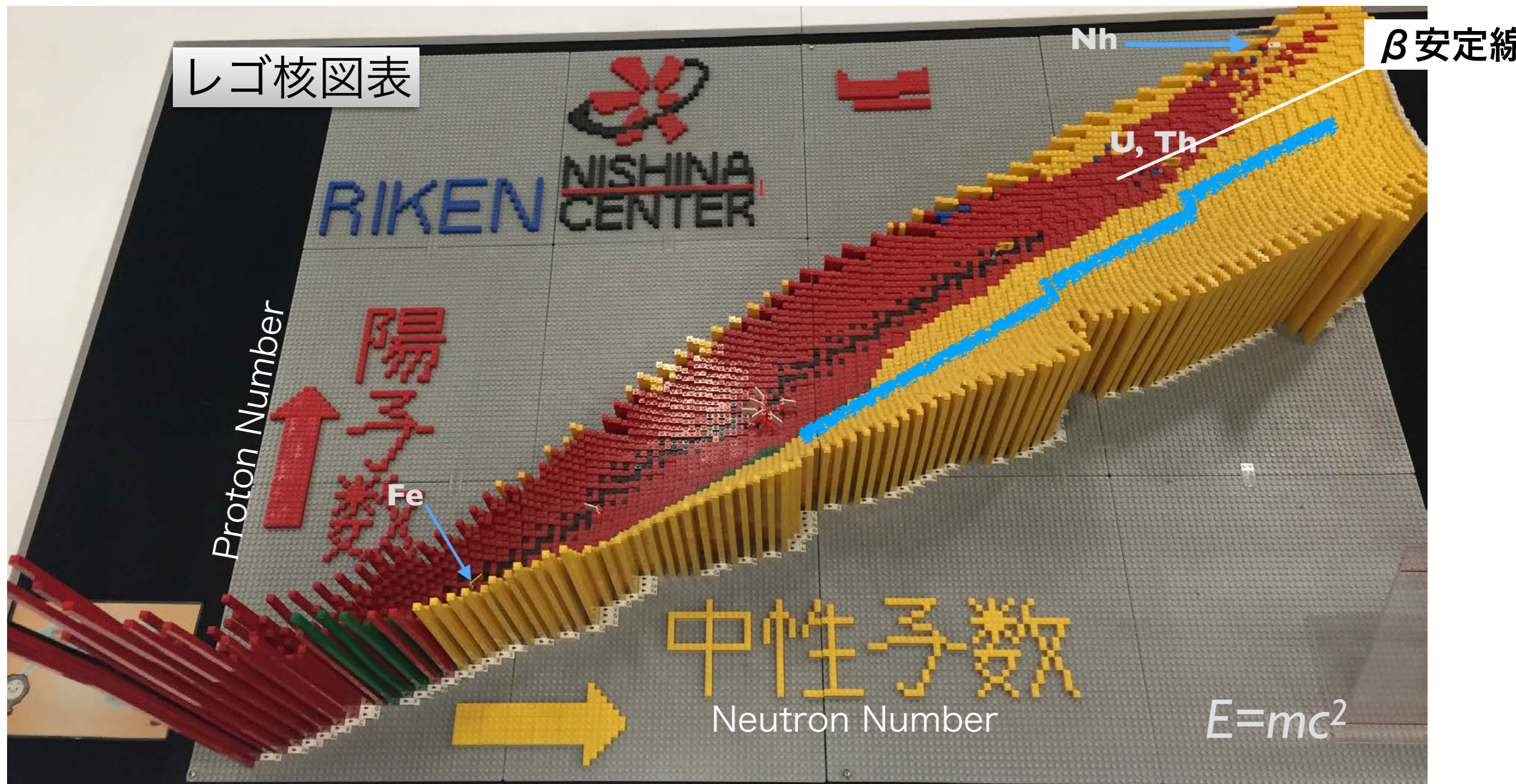


GARIS

KISS, KISS2

BigRIPS + SLOWRI & RRRing

理研RIBFの3箇所 RI源で
>1000核種の精密質量測定

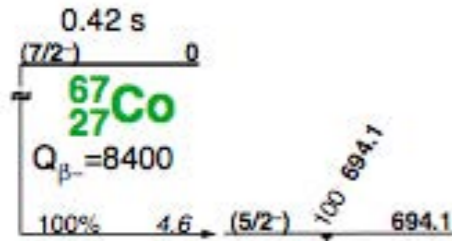


棒の高さ：質量（核子あたり）

我々は棒の高さを精密に万遍なく測ることを目指しています

短寿命核の質量測定法

Q値($\alpha\beta$ 崩壊、反応)

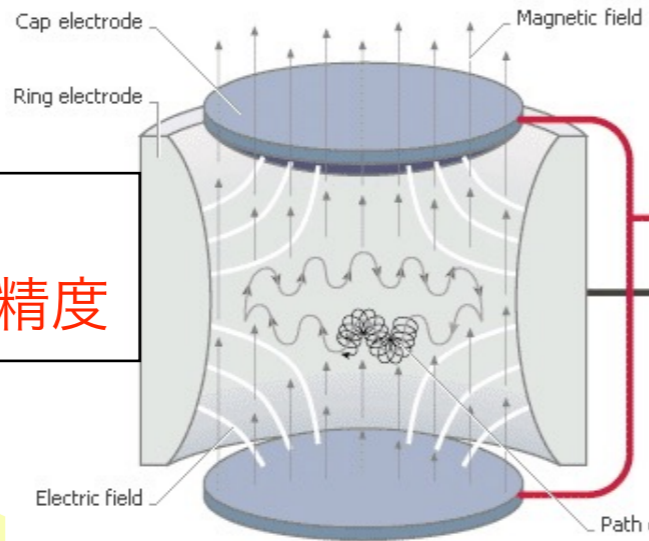


間接法

直接法

汎用
準位構造の不定性

ペニングトラップ

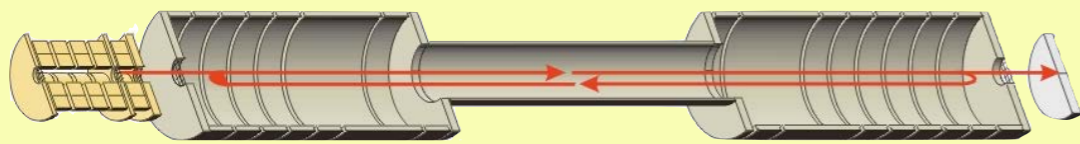


低速
超高精度

ISOLDE, JYFL...

新方式

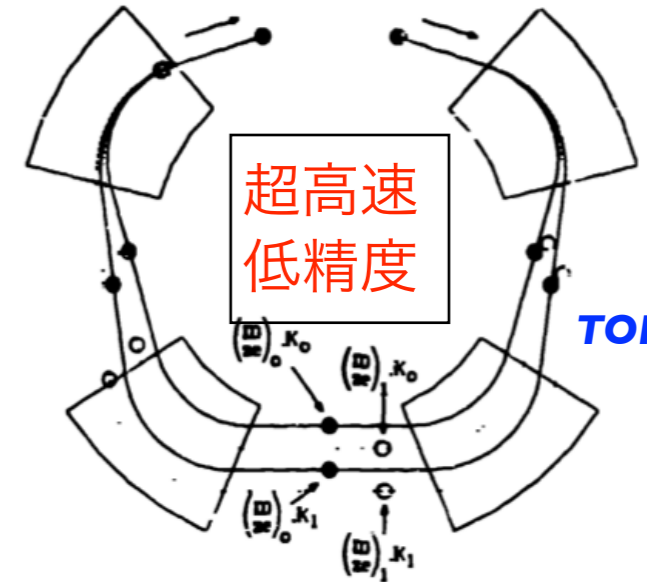
MRTOF (多重反射型TOF)



RIKEN-KEK

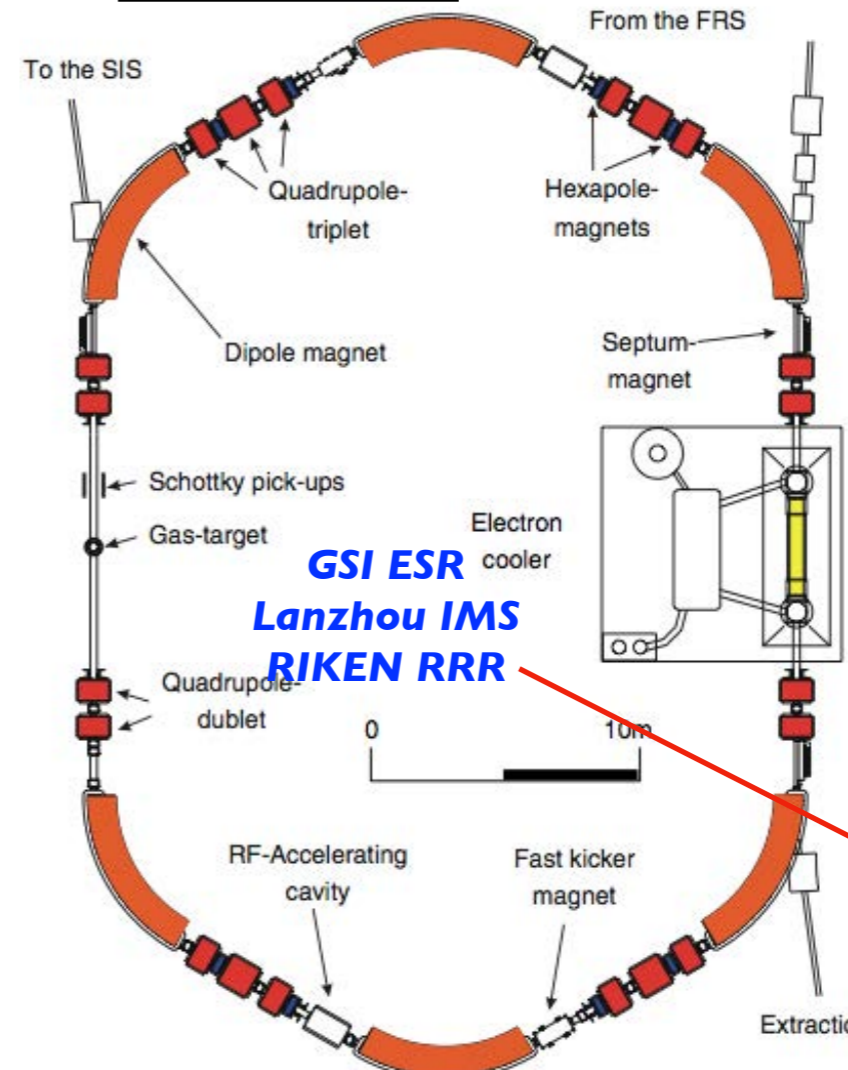
高速
高精度

インフライト分析器



TOFI, SPEG..

蓄積リング



電子冷却型

超低速
高精度

等時性型

高速
低精度

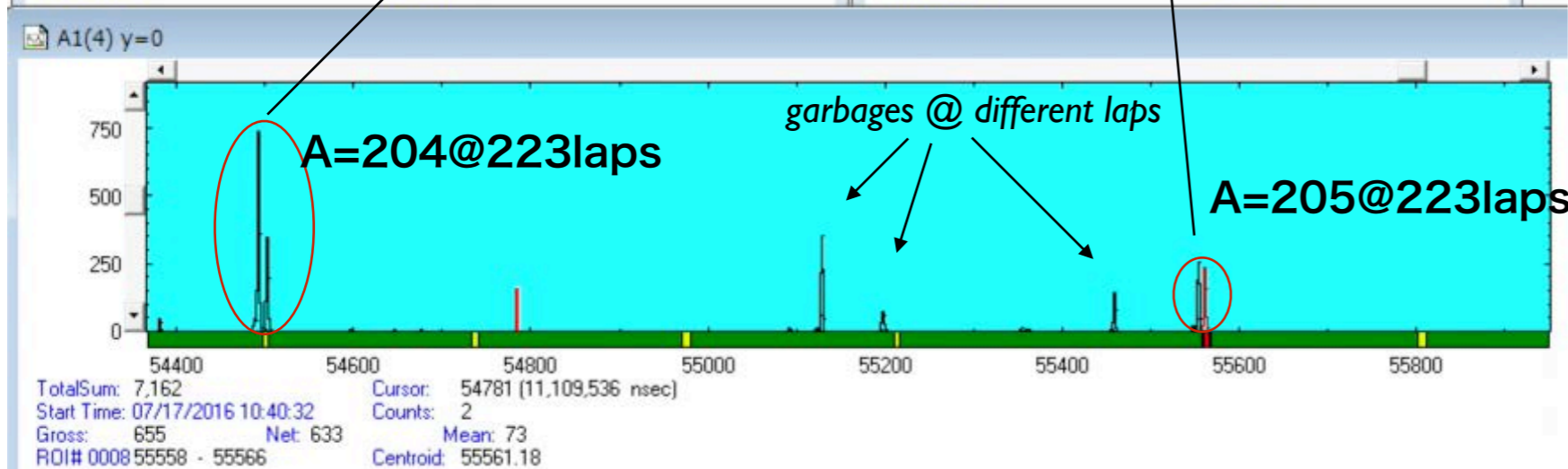
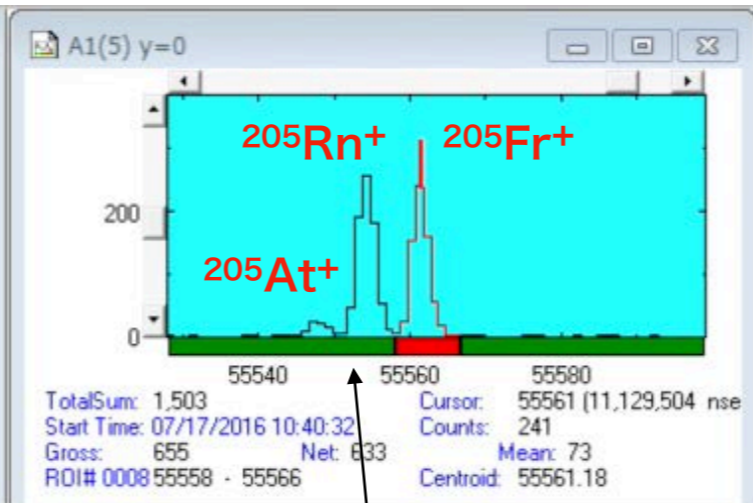
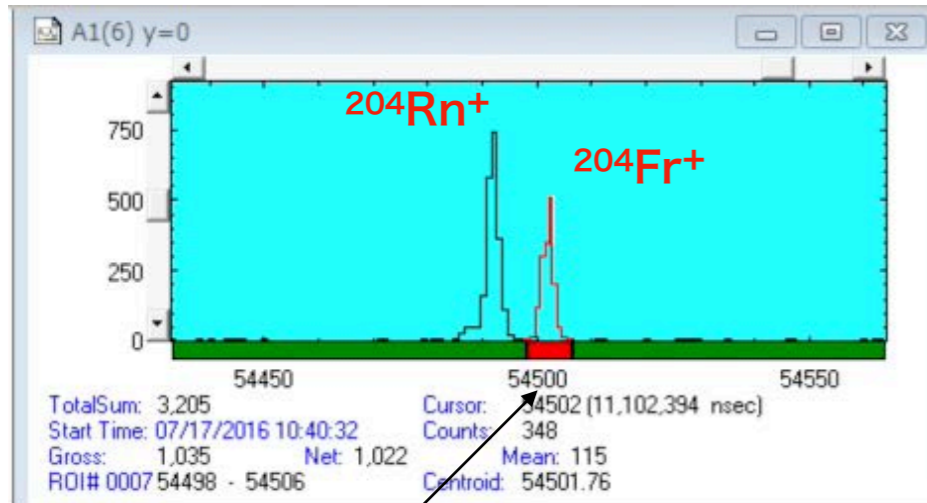
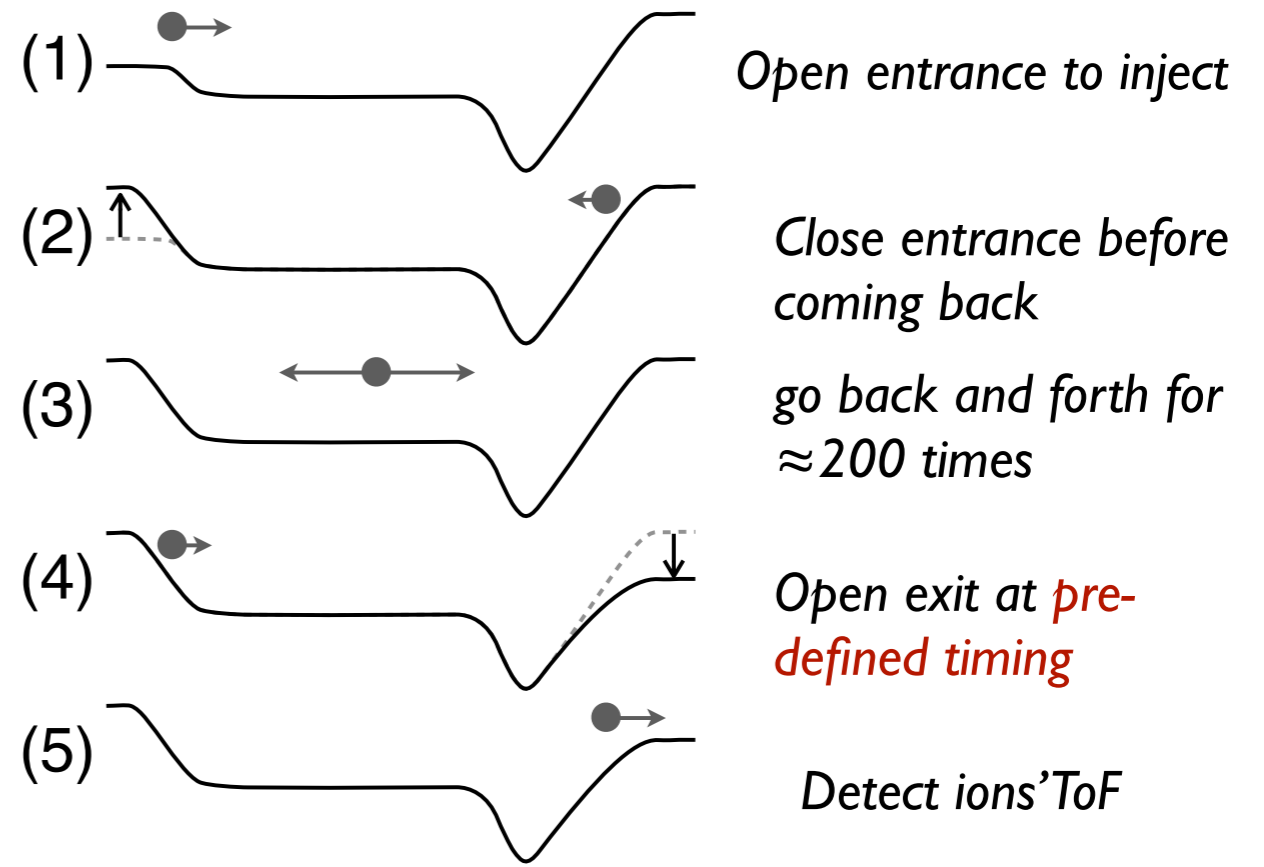
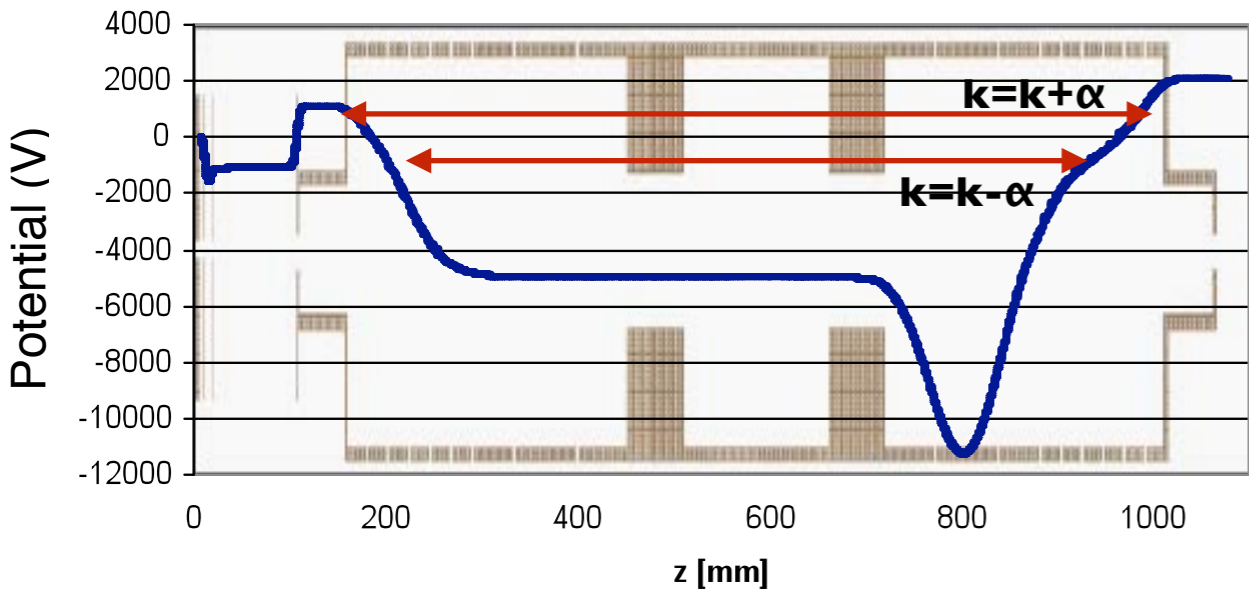
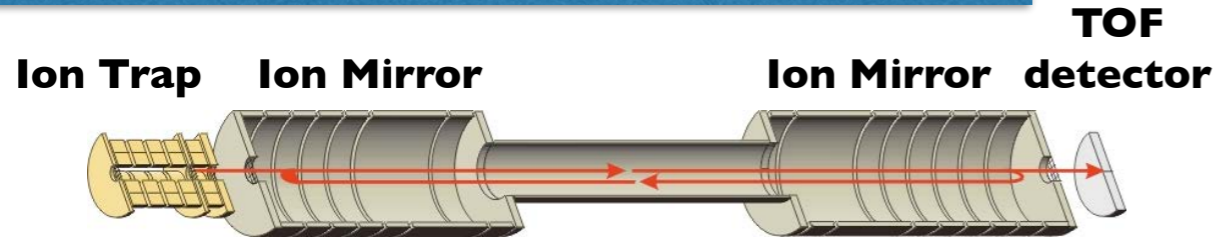
日本からも阪大・
埼玉大など

筑波大・小沢G

$T_{1/2} < 1\text{ms}$ 可
1個/日 可

MRTOF Mass Spectrograph

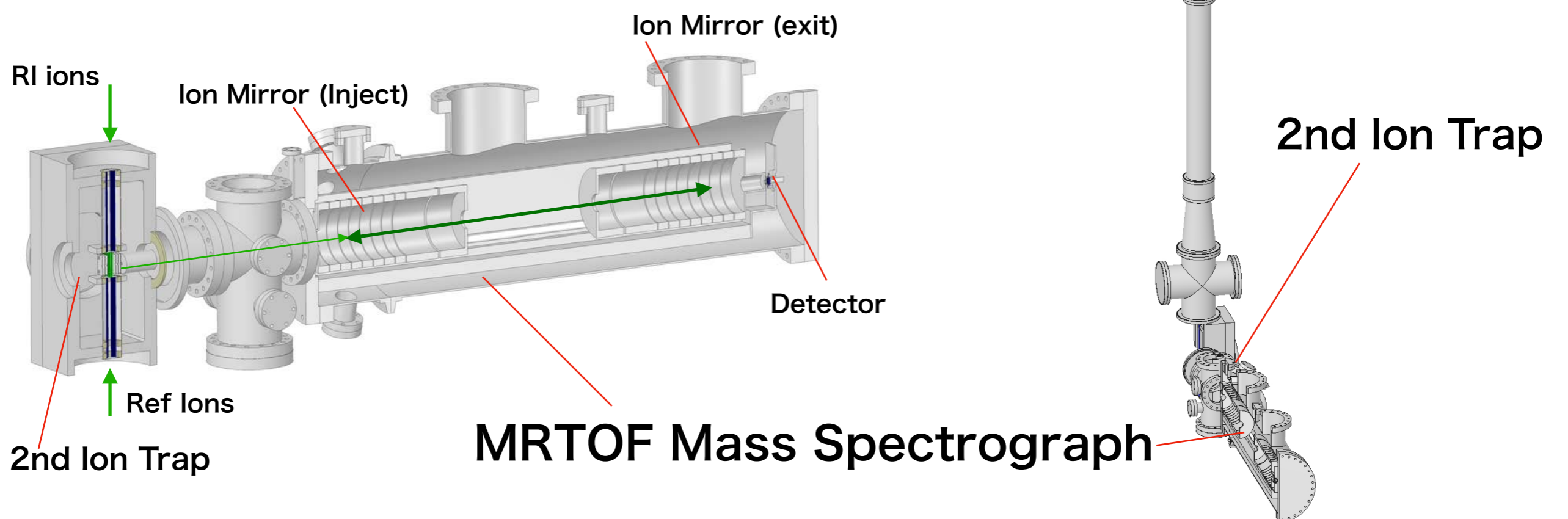
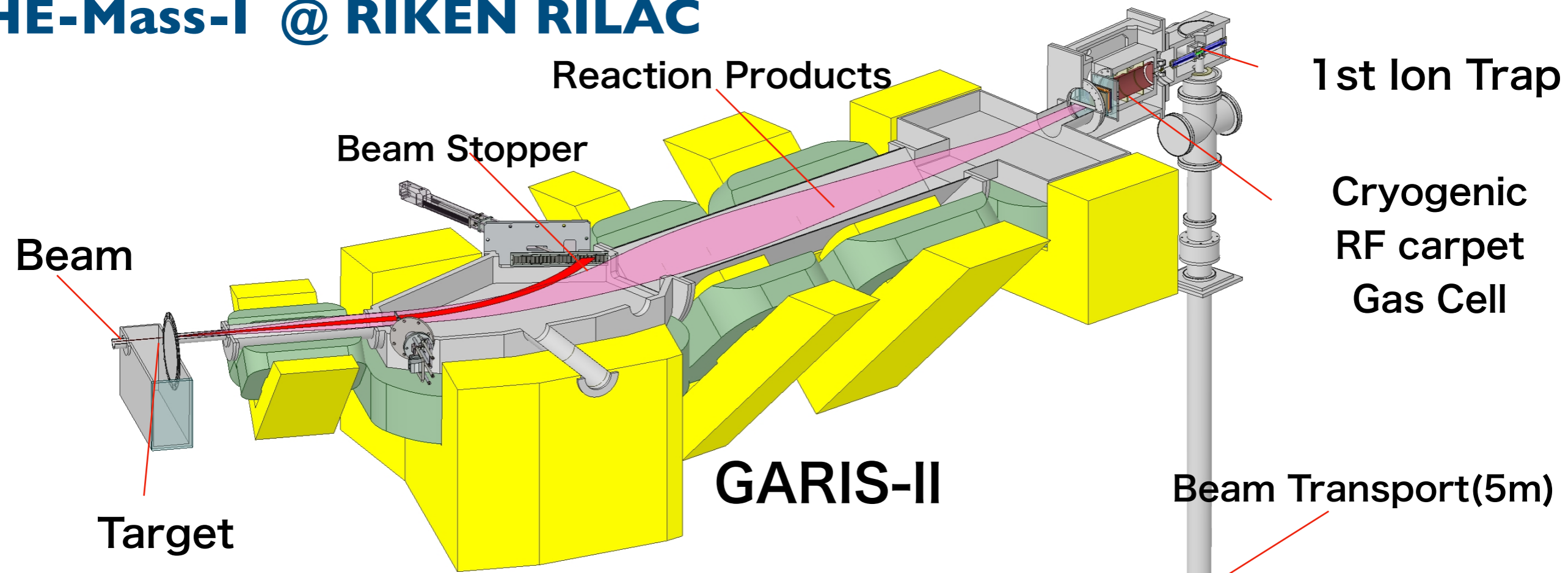
(Multi Reflection Time of Flight...)



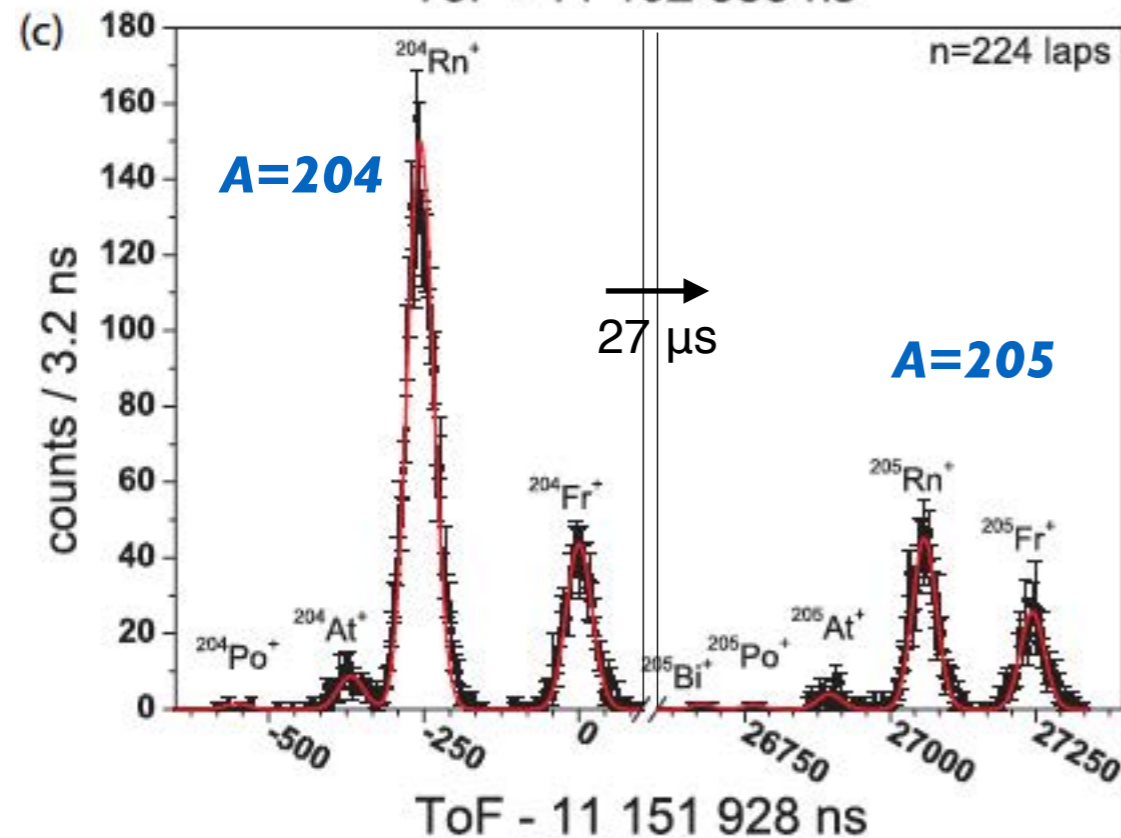
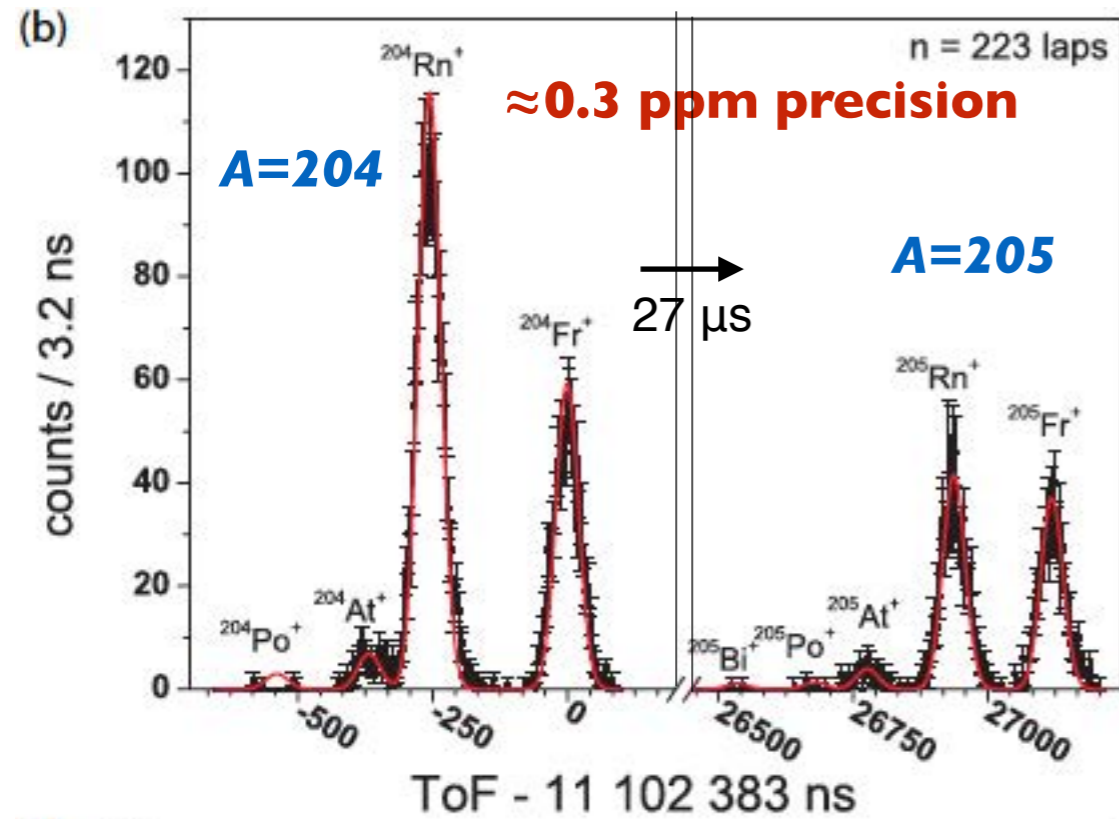
$$m_x = \left(\frac{\text{ToF}_x}{\text{ToF}_r} \right)^2 m_r$$

garbage ions can be discriminated by different number of laps

SHE-Mass-I @ RIKEN RILAC



Typical Mass Measurement Results

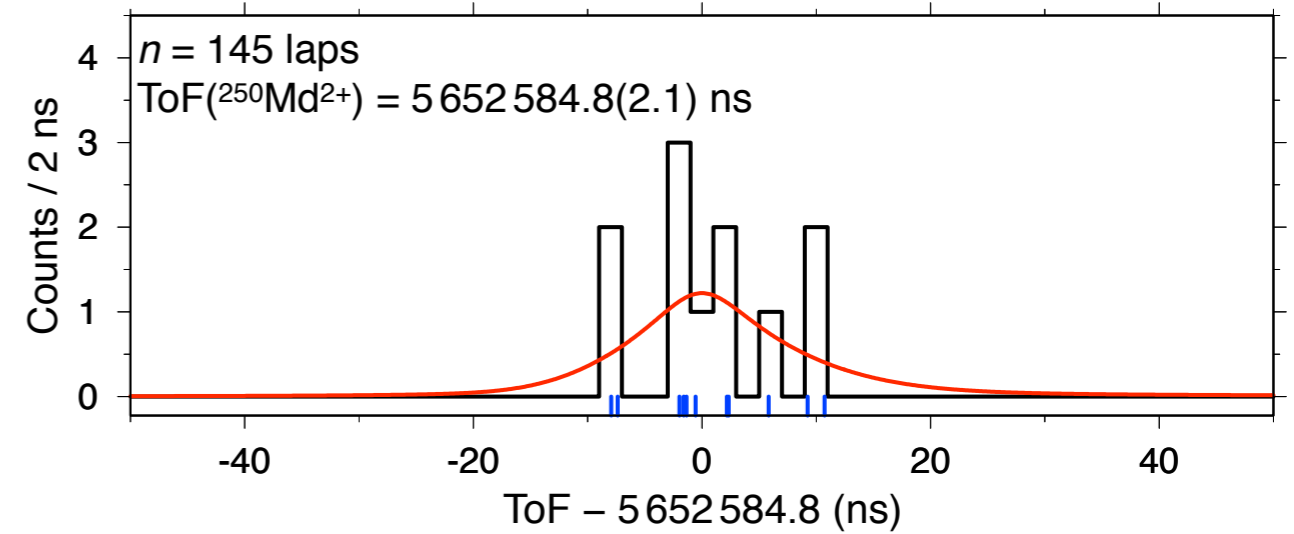


P. Schury et al, PRC 95(2017)011305(R)

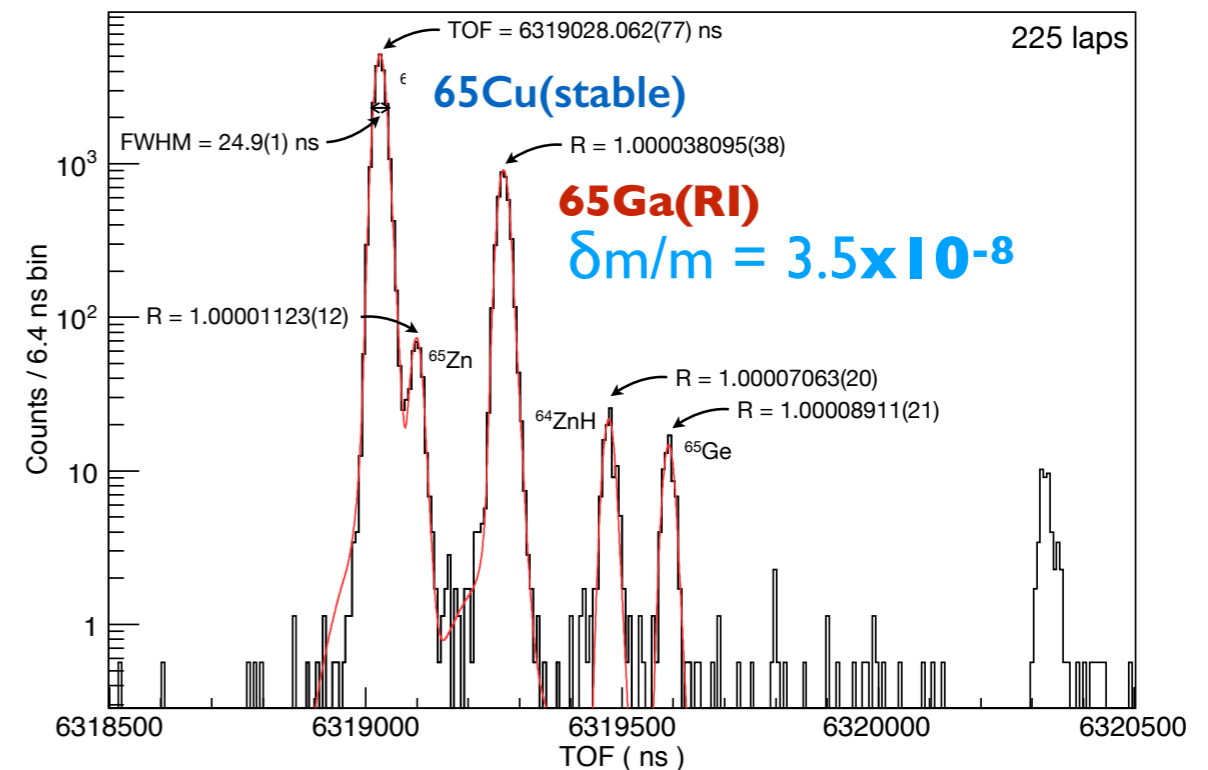
$^{250}\text{Md}^{++}$ measurement

≈ 1 event / 1000 s

Mass determined with $\delta m/m = 6 \times 10^{-7}$

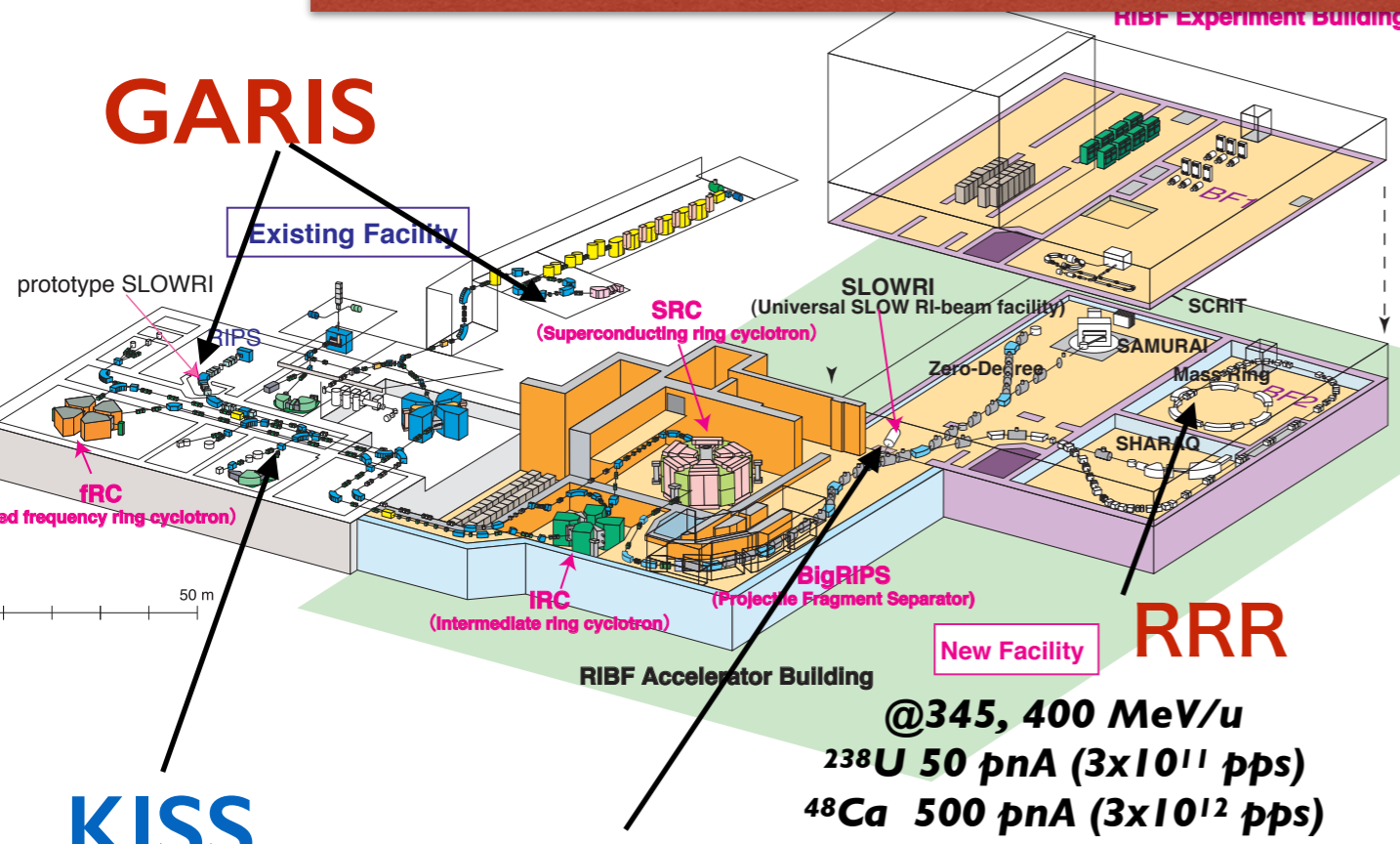


Y. Ito et al, PRL 120 (2018)0102501

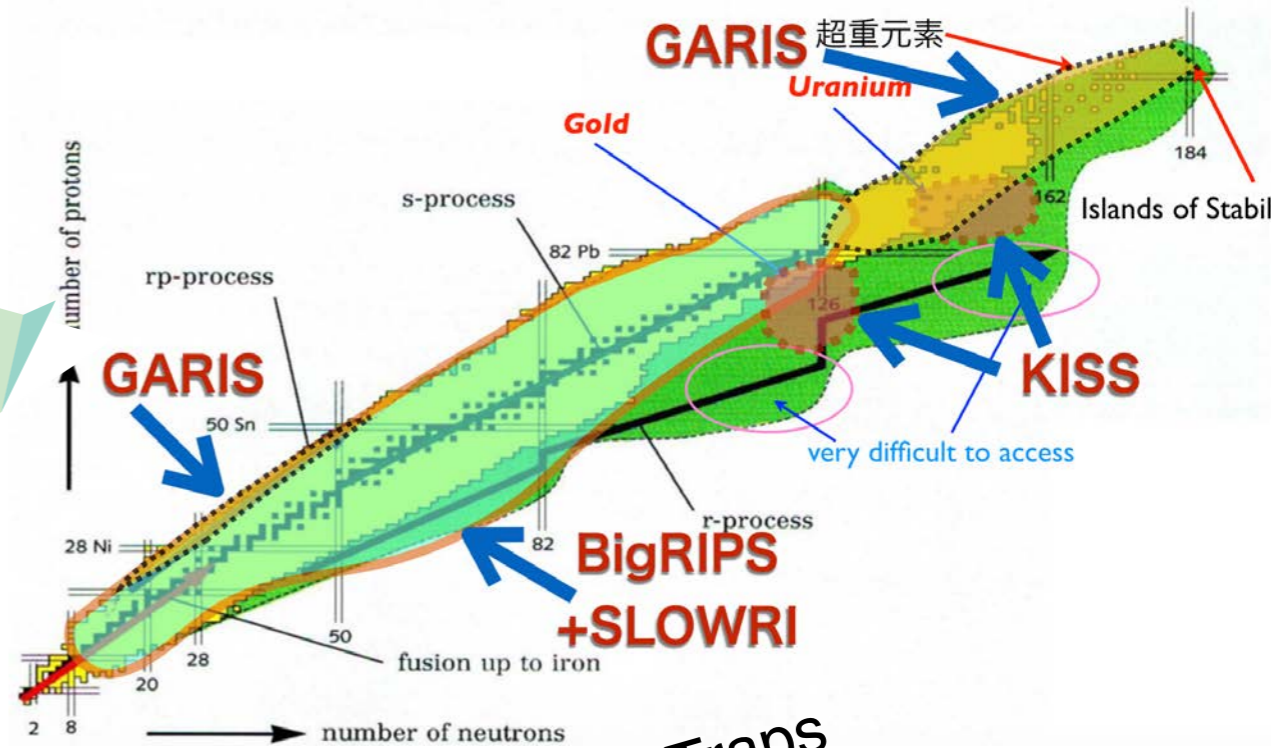


S. Kimura et al, IJMS 430, 134-142 (2018)

Parallel Measurements @ 3 facilities of RIKEN RIBF

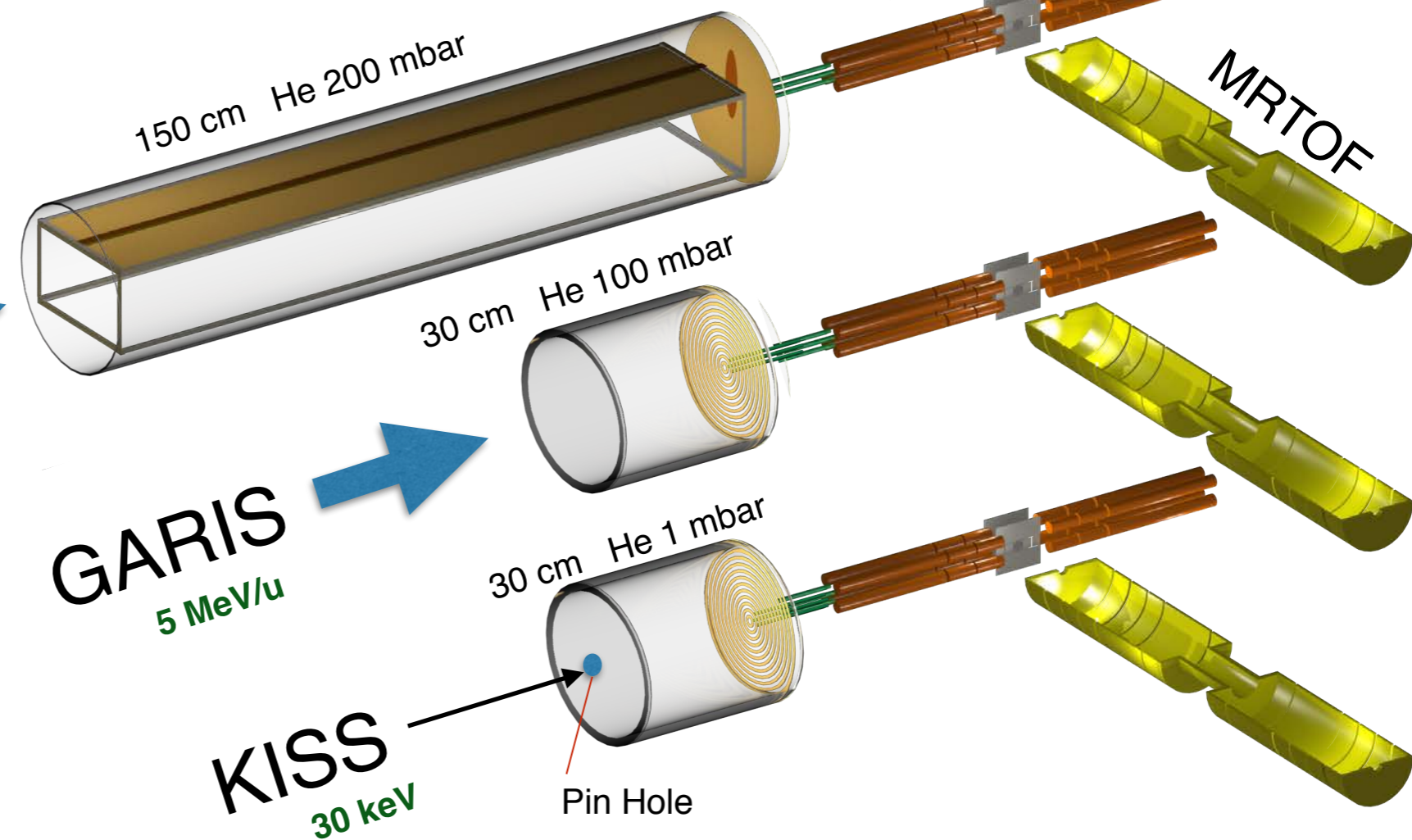


@345, 400 MeV/u
 ^{238}U 50 pA (3×10^{11} pps)
 ^{48}Ca 500 pA (3×10^{12} pps)



BigRIPS + SLOWRI

BigRIPS
200 MeV/u



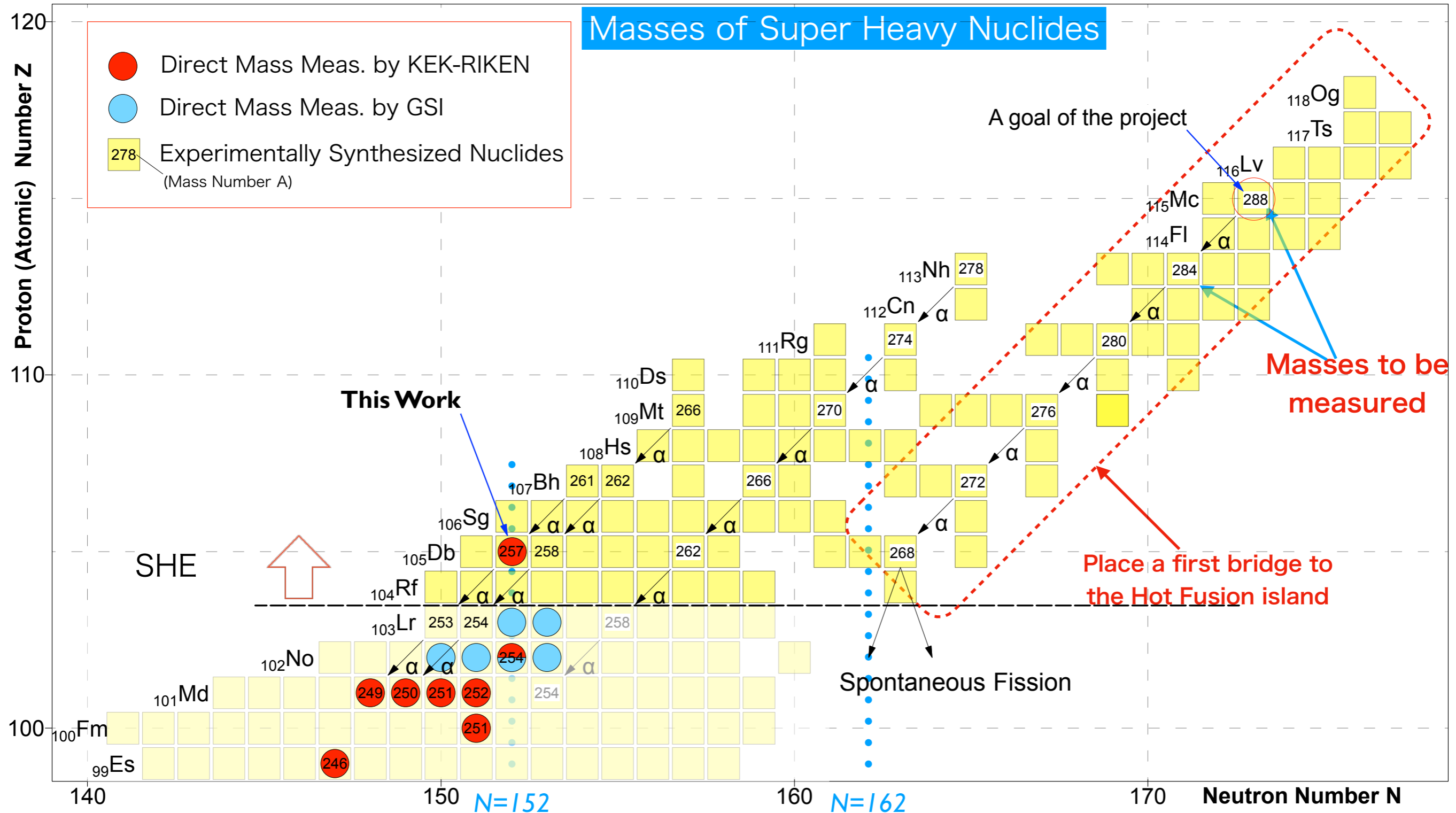
GARIS
5 MeV/u

KISS
30 keV

1. Thermalize in He gas
2. Extraction by RF-carpet
3. Trap in Ion-Traps
4. Mass measurements with MRTOF

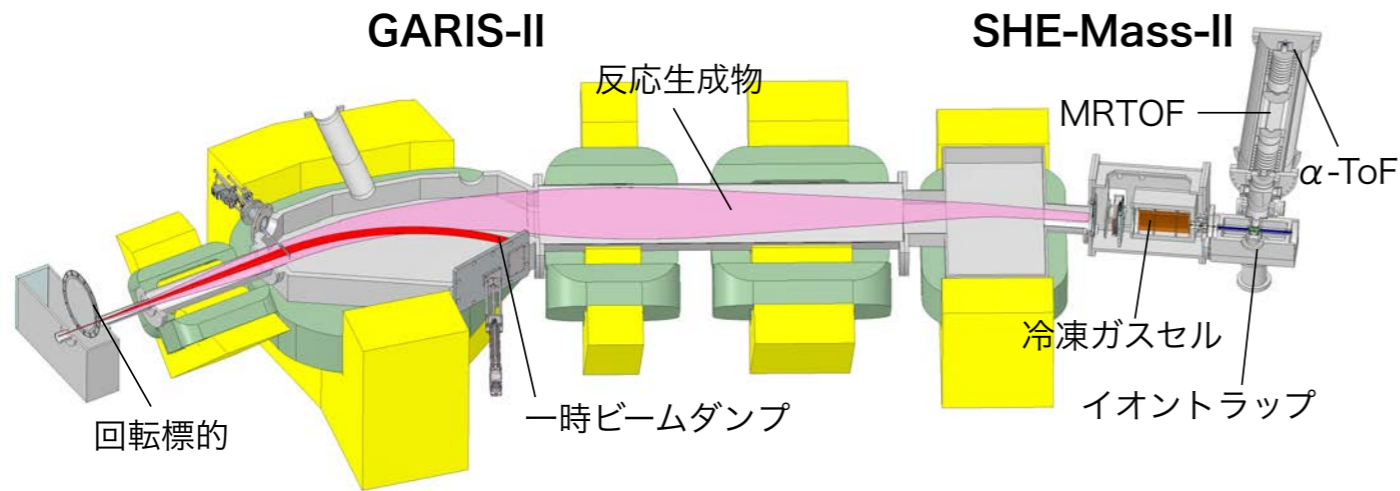
超重元素同位体の精密質量測定

- **Mass: first bridge to the Hot Fusion Island**
- **Direct Identification of Z and A**
 - **Prediction and identification of Islands of Stability**
 - **(semi-)Magic numbers in SHN region**

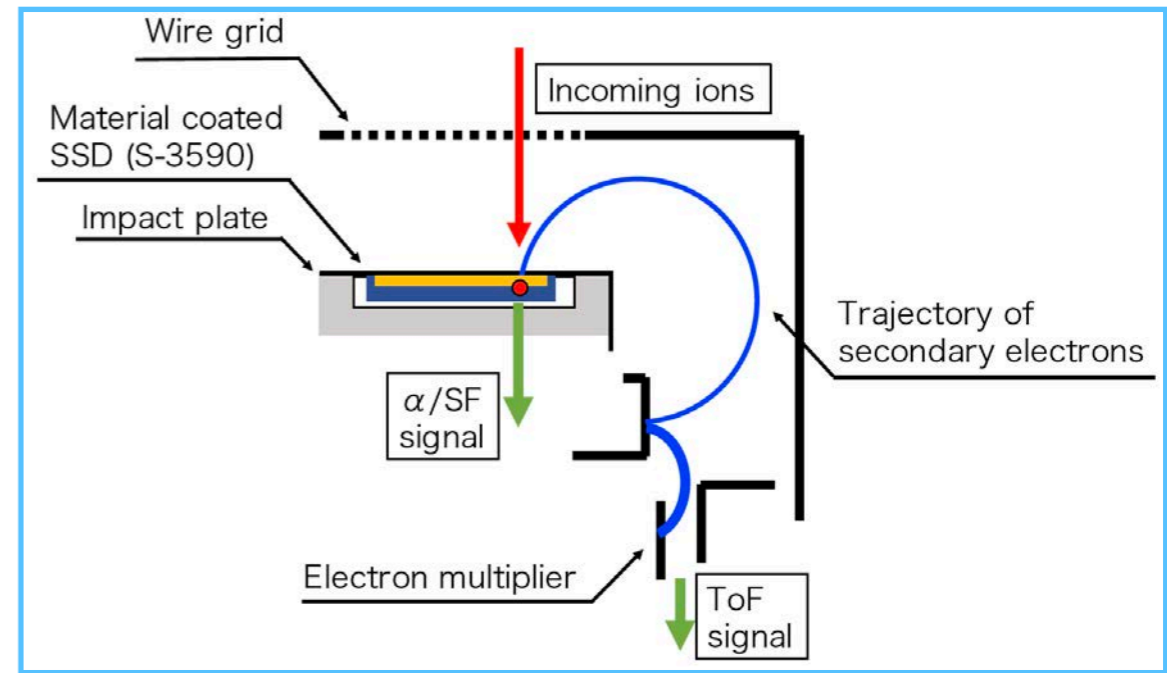


First Superheavy Nuclide @ SHE-Mass-II

$^{208}\text{Pb}(^{51}\text{V},2n)^{257}\text{Db}$

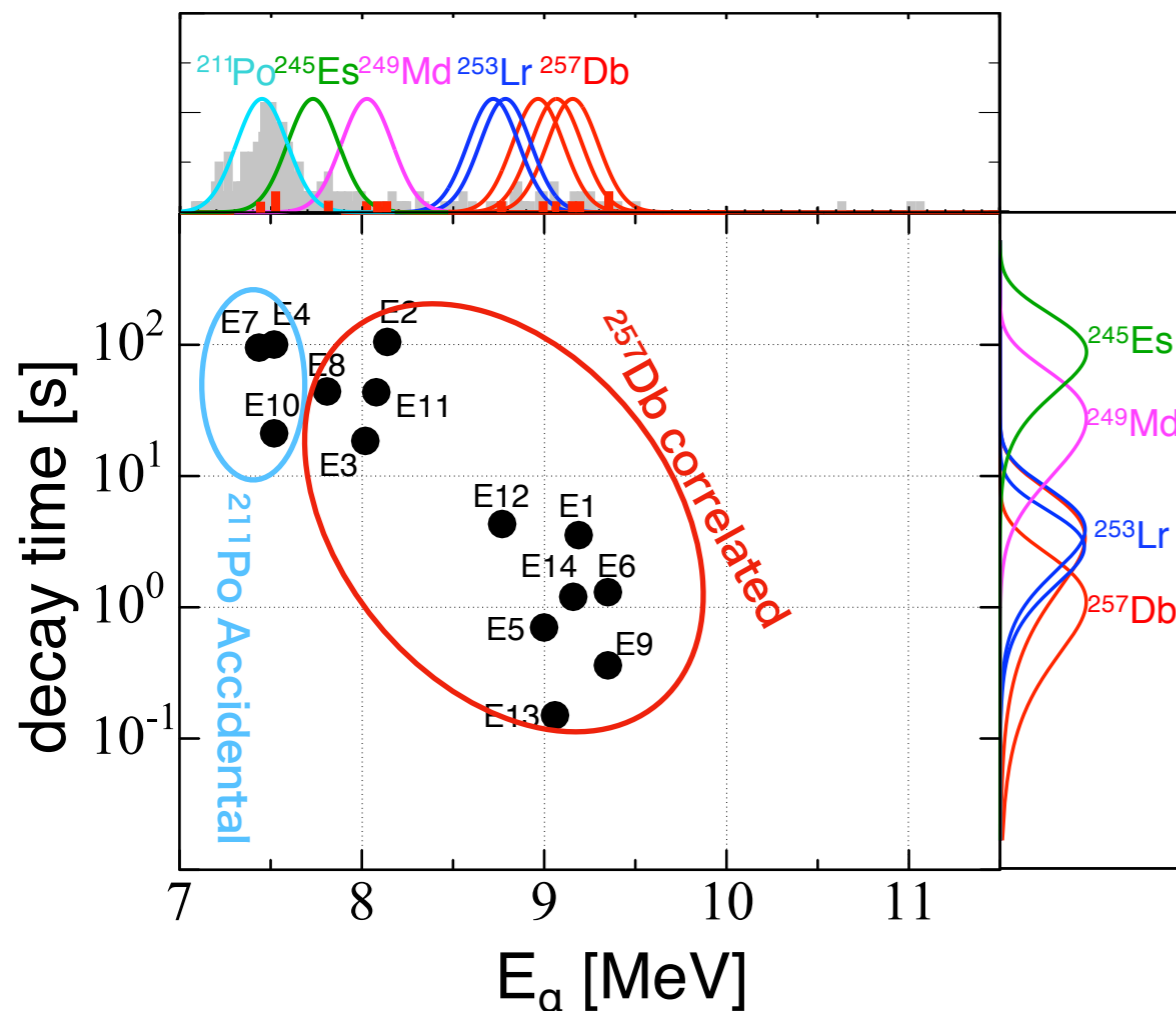


α -TOF Detector



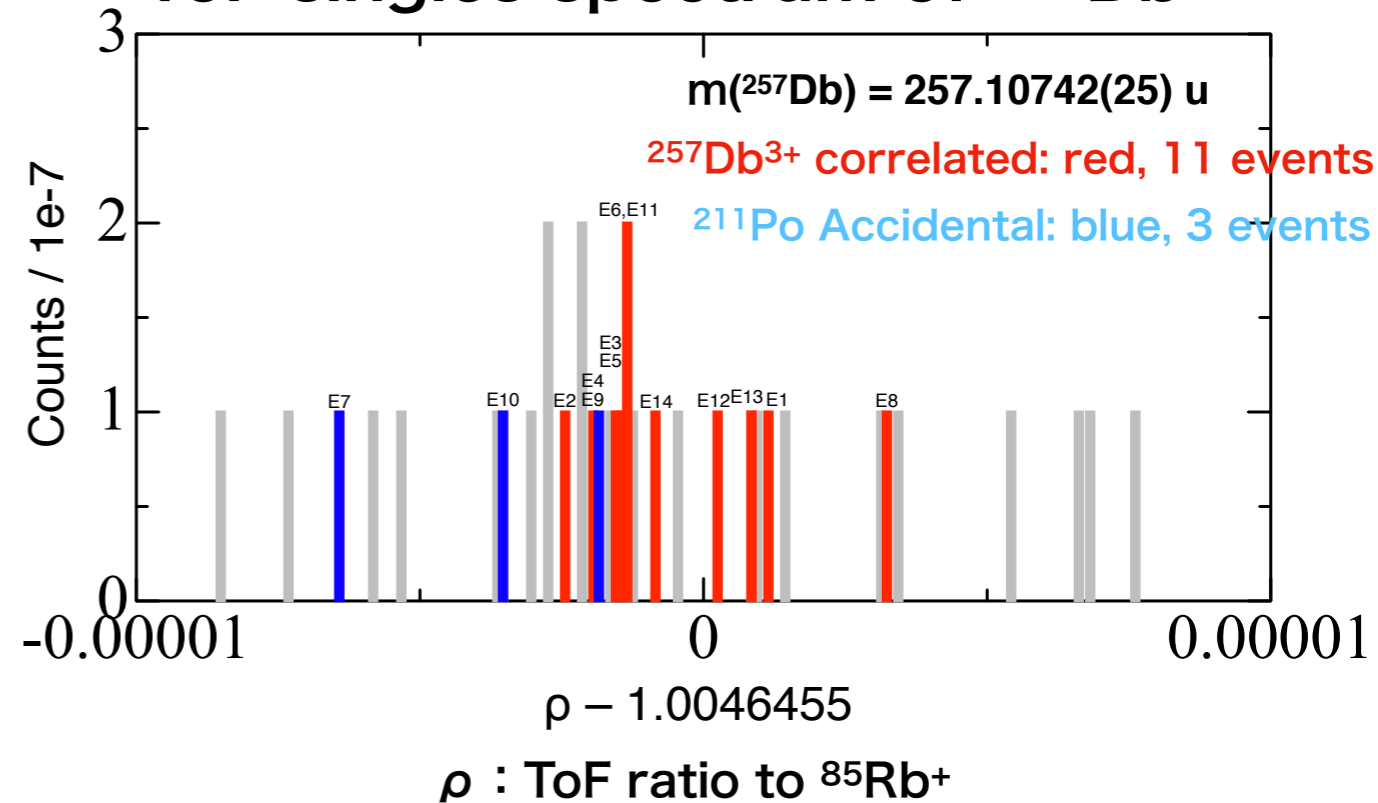
T. Niwase et al, NIMA953(2020)163198

ToF Correlated α events



P. Schury et al, PRL submitted (arXiv: 2006.02605)

ToF singles spectrum of $^{257}\text{Db}^{3+}$



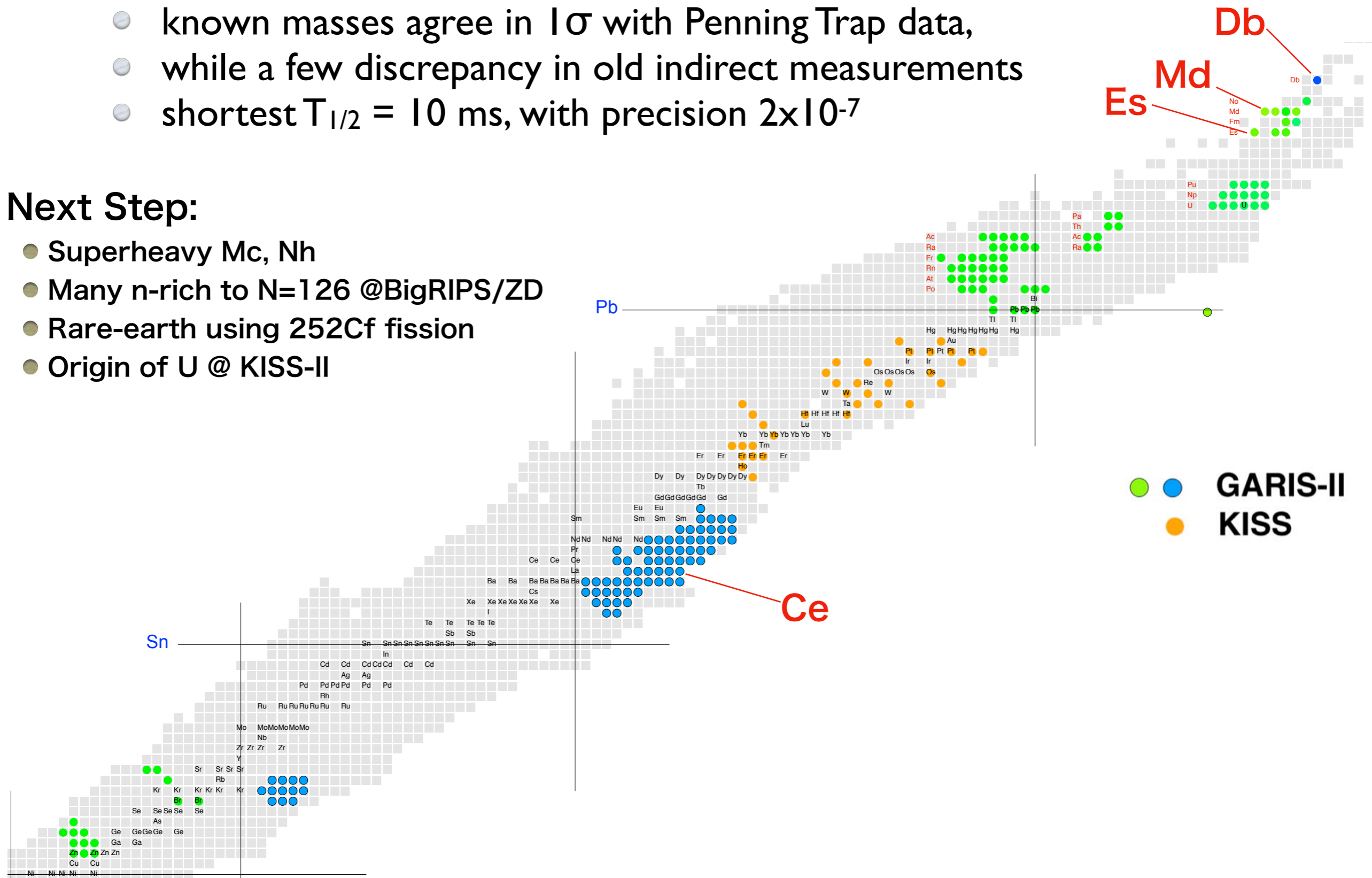
$$m(^{257}\text{Db}^{3+})/q = \rho^2 m(^{85}\text{Rb}+)/q_r$$

Masses Measured KEK-RIKEN MRTOF setups

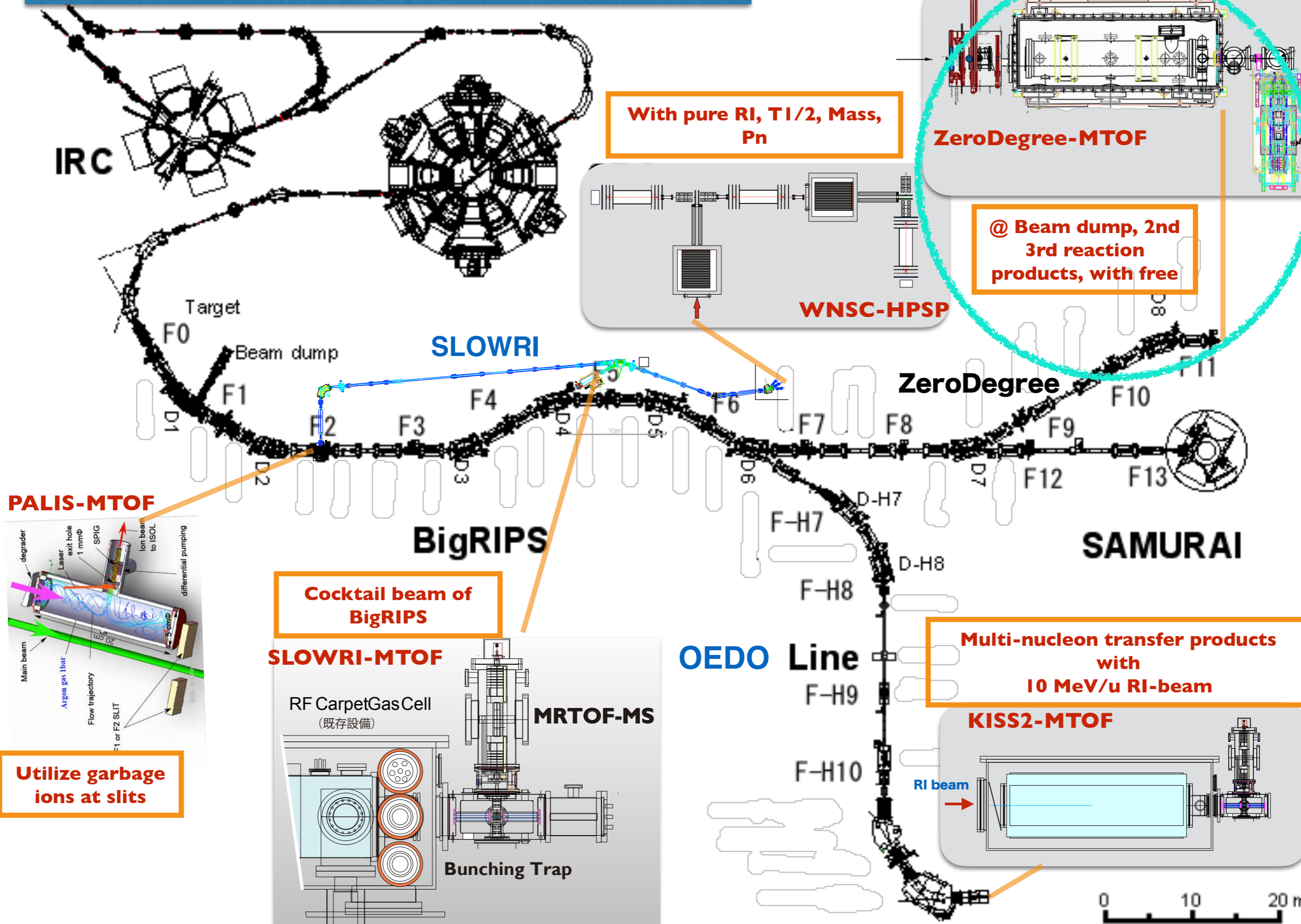
- ≈ 220 nuclides were measured by 2019
- 8 first masses in trans-uranium elements and SHE (Es, Md, Db isotopes)
- > 40 first direct mass measurements
- known masses agree in 1σ with Penning Trap data,
- while a few discrepancy in old indirect measurements
- shortest $T_{1/2} = 10$ ms, with precision 2×10^{-7}

Next Step:

- Superheavy Mc, Nh
- Many n-rich to $N=126$ @BigRIPS/ZD
- Rare-earth using ^{252}Cf fission
- Origin of U @ KISS-II



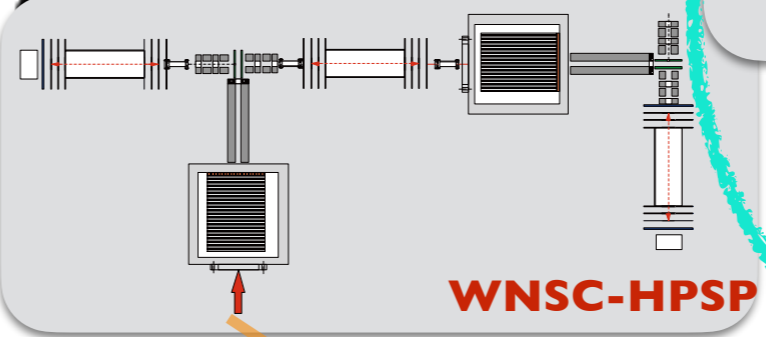
5 MRTOF plans@ BigRIPS of RIBF



With pure RI, T1/2, Mass, Pn

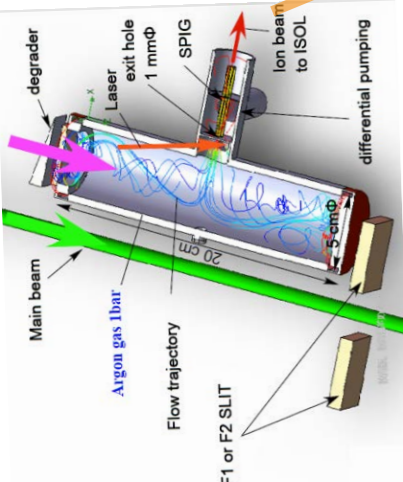
ZeroDegree-MTOF

@ Beam dump, 2nd 3rd reaction products, with free



ZeroDegree

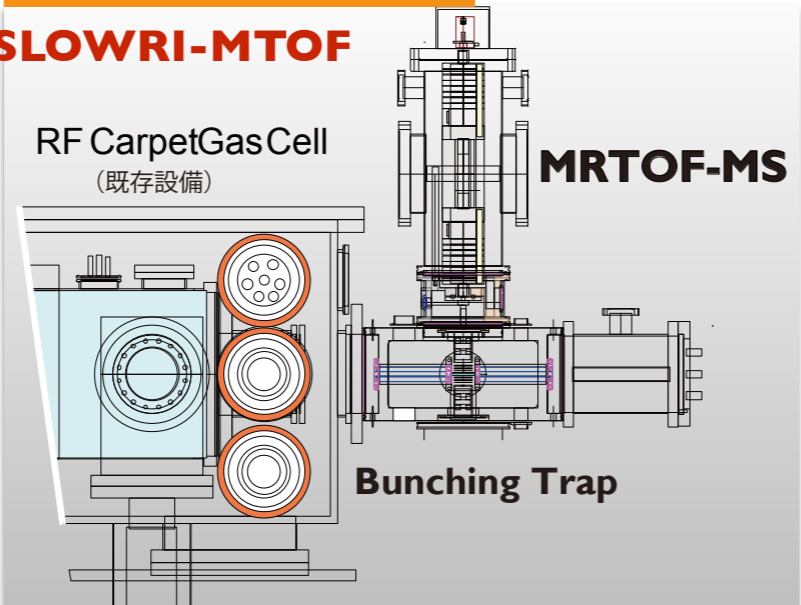
PALIS-MTOF



Utilize garbage ions at slits

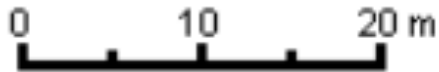
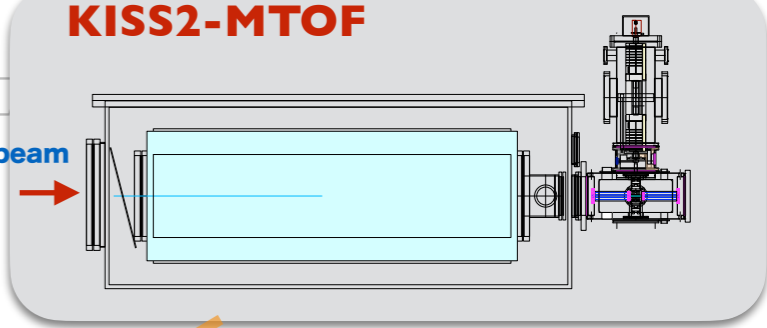
Cocktail beam of BigRIPS

SLOWRI-MTOF



OEDO Line

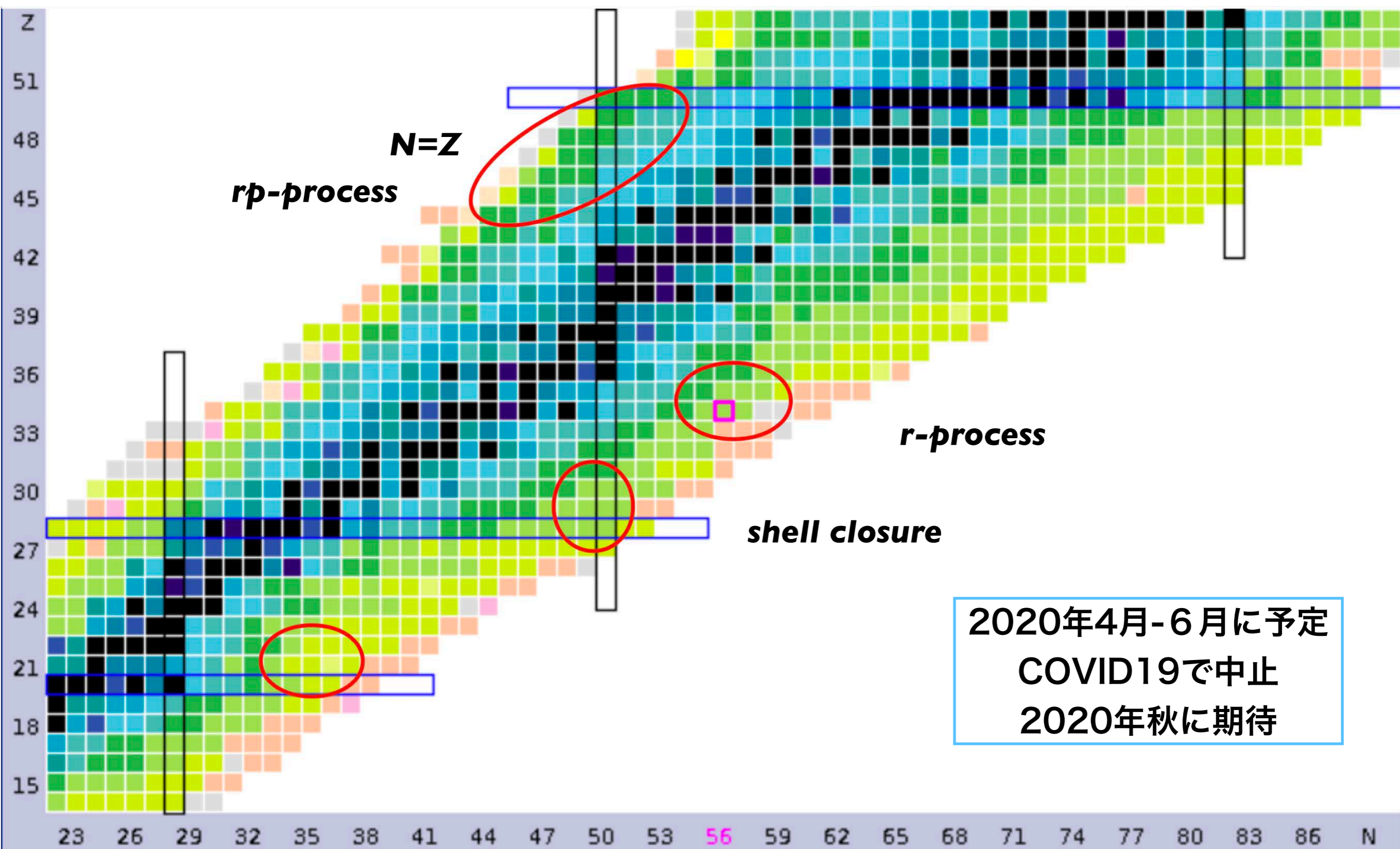
Multi-nucleon transfer products with 10 MeV/u RI-beam



BigRIPS+ZeroDegree experiments provide many exotic nuclides @F11

with free

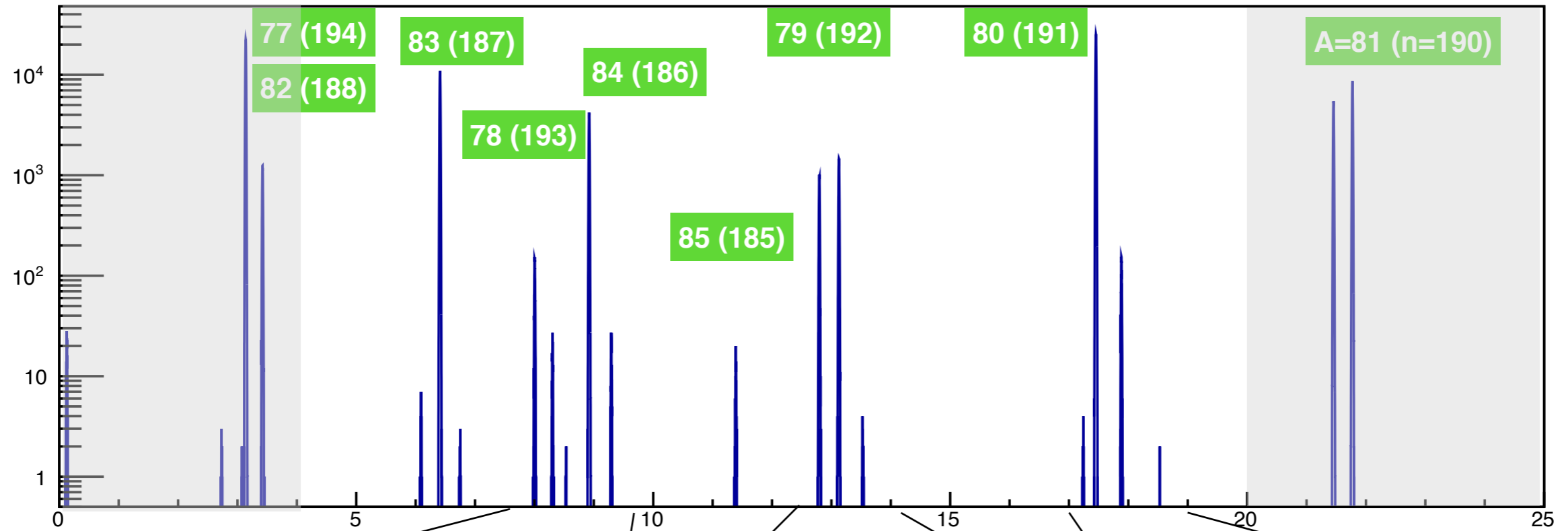
- β - γ -n spectroscopy (EURICA, BRIKEN)
- Mass measurements, delayed-n probability (ZD-MRTOF)



Expected TOF Spectrum (simulation)

By changing the degrader angle in a few different settings, various nuclides can be measured

TOF-all

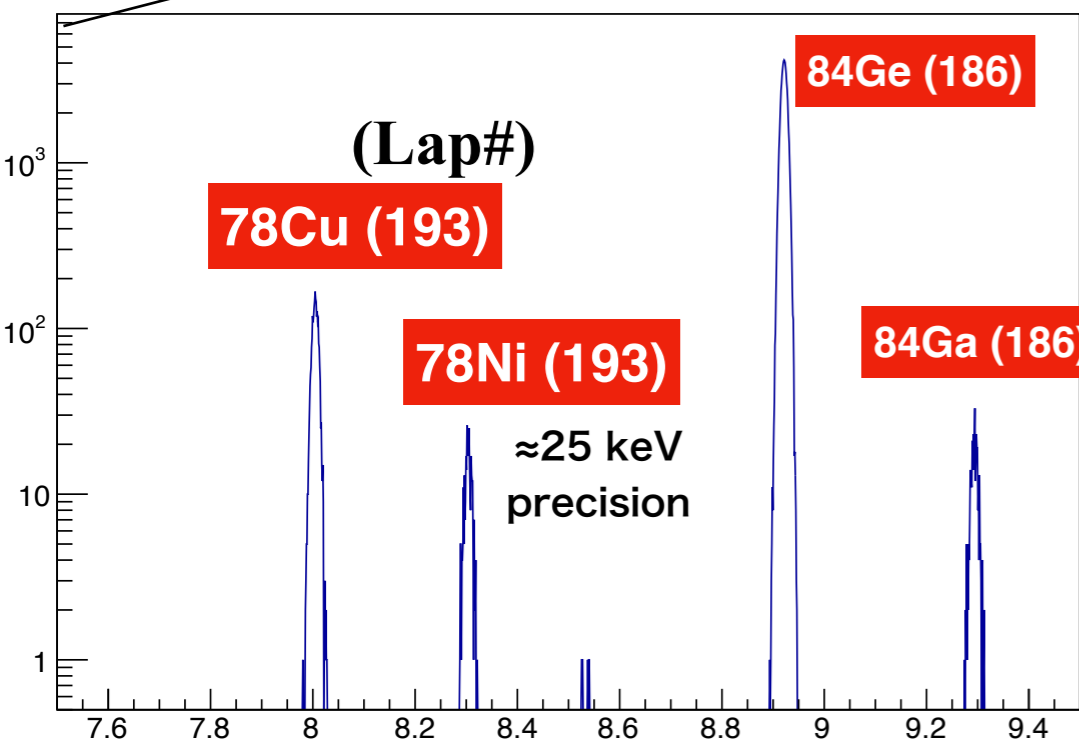


TOF - 4186.72 us

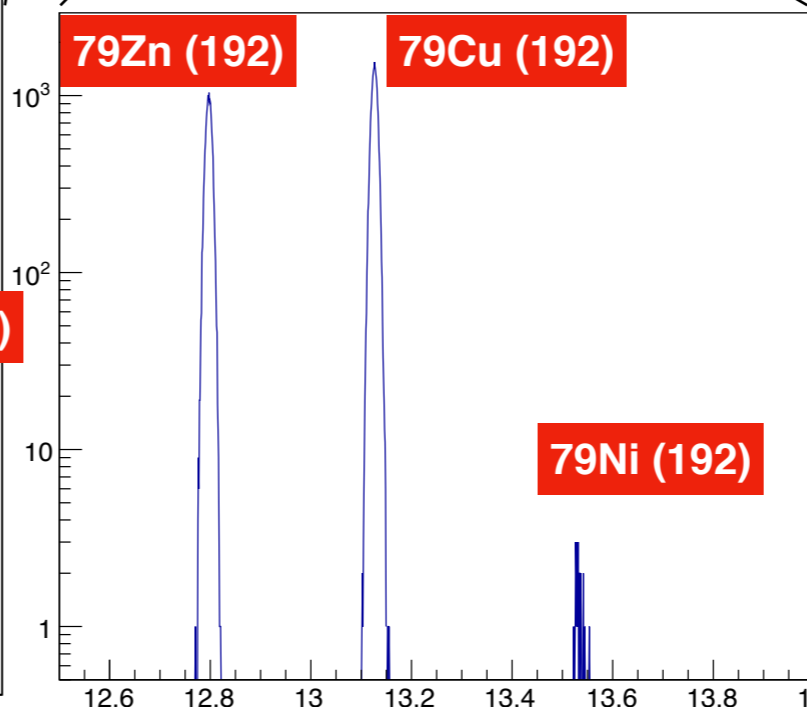
TOF A=78

TOF A=79

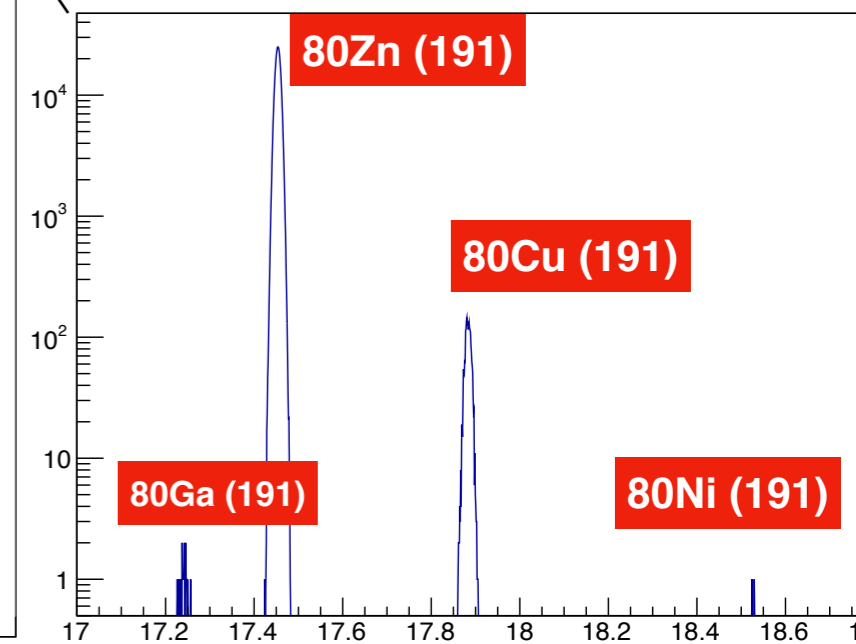
TOF A=80



TOF - 4186.72 us



TOF - 4186.72 us



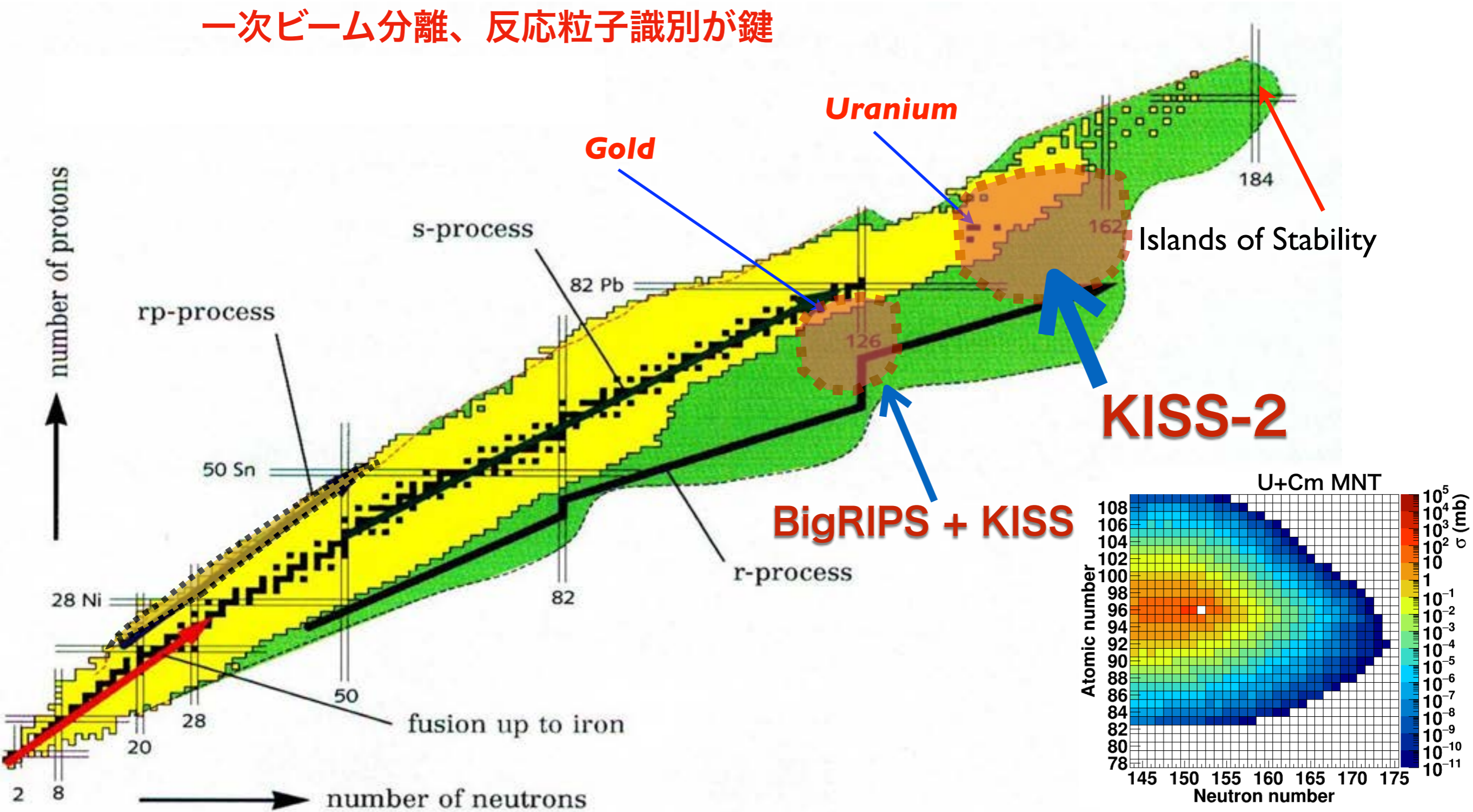
TOF - 4186.72 us

KISS-2 計画：ウランの起源

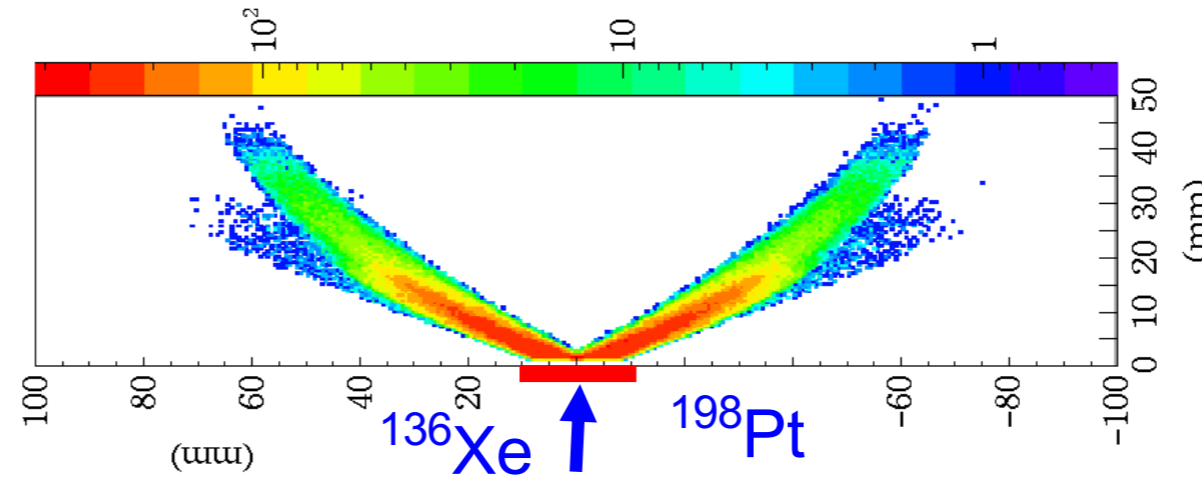
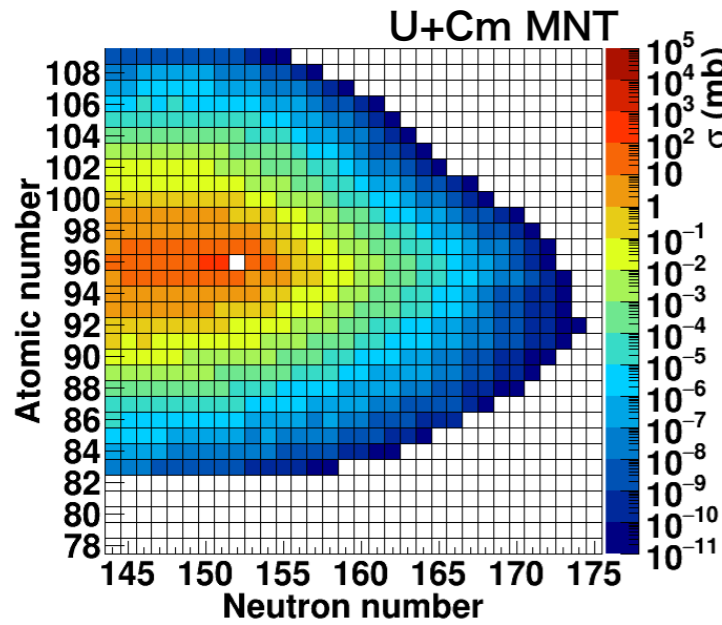
(r過程終端、希土類や白金の起源の精密化)

- ・ 宇宙における重元素合成過程に於けるウランに至る道筋の実験的研究はこれまで不可能であった
- ・ 多核子移行反応 (U+U, U+Am or Cm, RI-beam + U etc)が唯一の可能性
- ・ 多核子移行反応は、低エネルギー、大散乱角、高エミッタンス、高多重度等の困難

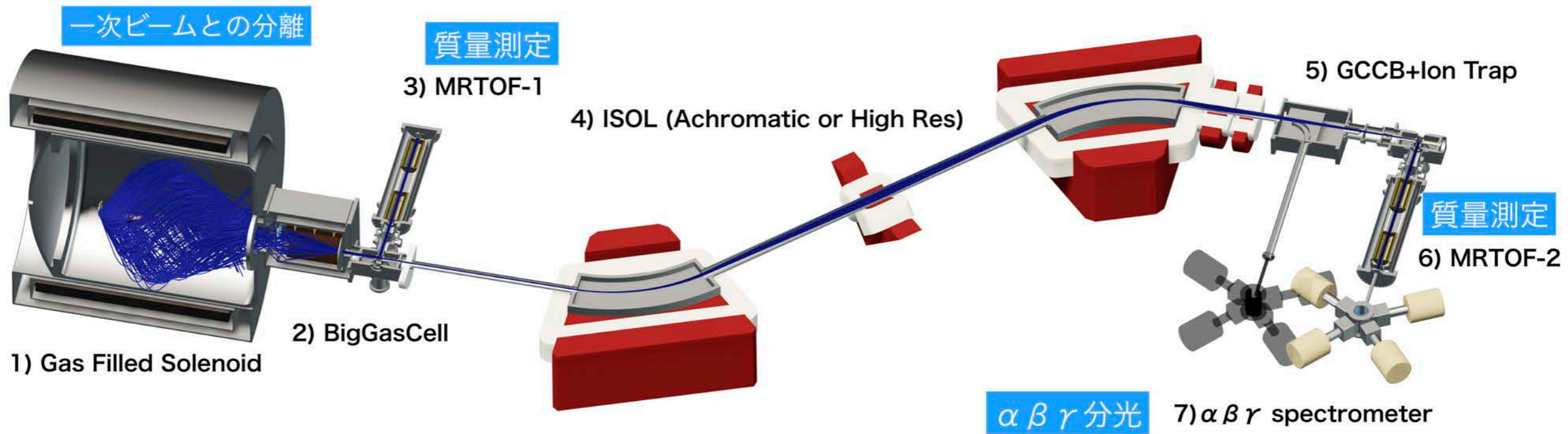
一次ビーム分離、反応粒子識別が鍵



KISS-2 for the origin of uranium study



	一次ビーム	効率	測定能率	総ゲイン
KISS	10 pA	0.1%	1	1
KISS2	1 pA	1%	10x	>10000
	一次ビーム分離	共鳴イオン化→RFガスセル	MRTOF	



Mass, $T_{1/2}$, P_n , $\beta\gamma$, spin, radii, moments ~10億 ~10年

まとめ

- 重元素の起源研究への実験的寄与の戦略が整いつつある
 - ・ GARIS-II, KISS, BigRIPS/Zerodegree の3箇所のMRTOF装置稼働
 - ・ Riken Rate-isotope Ring (筑波大・小沢G) と相補的戦略
- 超重元素同位体の新しい同定法確立
 - ・ 初めての超重核 ^{257}Db の精密直接質量測定
 - ・ Ca48入手でき次第 ^{288}Mc , ^{284}Nh の質量測定実行可
 - Z=114-118の同定の再確認、Z=119,120のアンカー**
- ウランの起源の研究のためのKISS-II計画準備
 - ・ KISSにおける多核子移行反応(MNT)の有効性確証
 - ・ MNTの困難（高多重度、低エネルギー、大角度分布、大速度分布）克服法発見
 - 高周波Heガスセル、MRTOF + 一次ビーム分離器**
- 核構造研究のための新しい実験基盤の提供 (SLOWRI, KISS)
 - ・ 困難元素同位体の高純度低エネルギービーム： β γ α 分光