

RIビームファクトリーにおける 超新星爆発下の核反応研究

鈴木 大介
理研仁科センター

daisuke.suzuki@ribf.riken.jp

- RIビームファクトリーについて
- SAKURAプロジェクト概要
- 2022年春キャンペーンの初期解析

2023年2月9-10日 東京大学本郷キャンパス・理学部小柴ホール
中性子捕獲反応で迫る宇宙の元素合成

RIビームファクトリー (RIBF)概要

低速施設

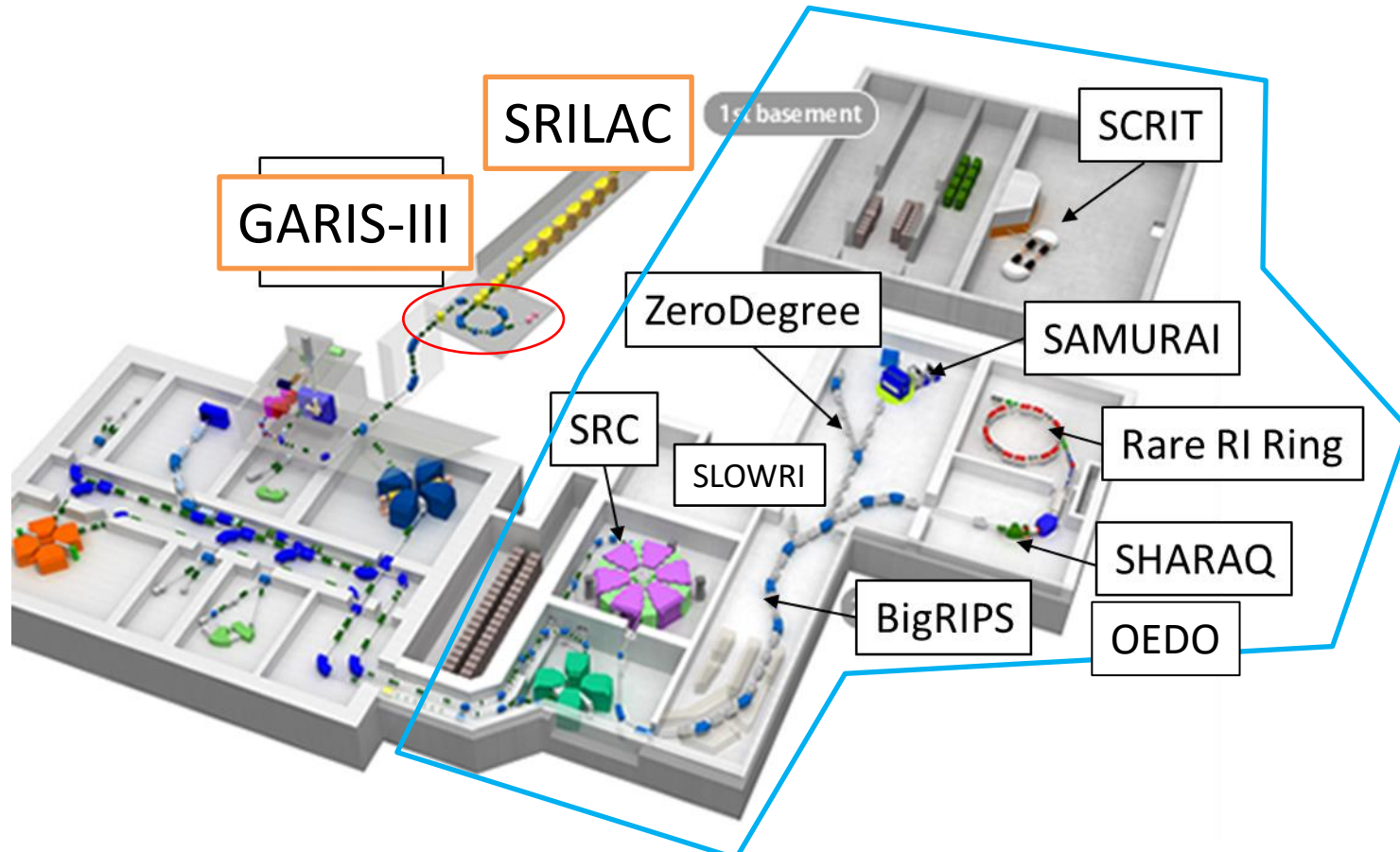
超重元素

核融合反応による超重元素の生成

高速ビーム施設

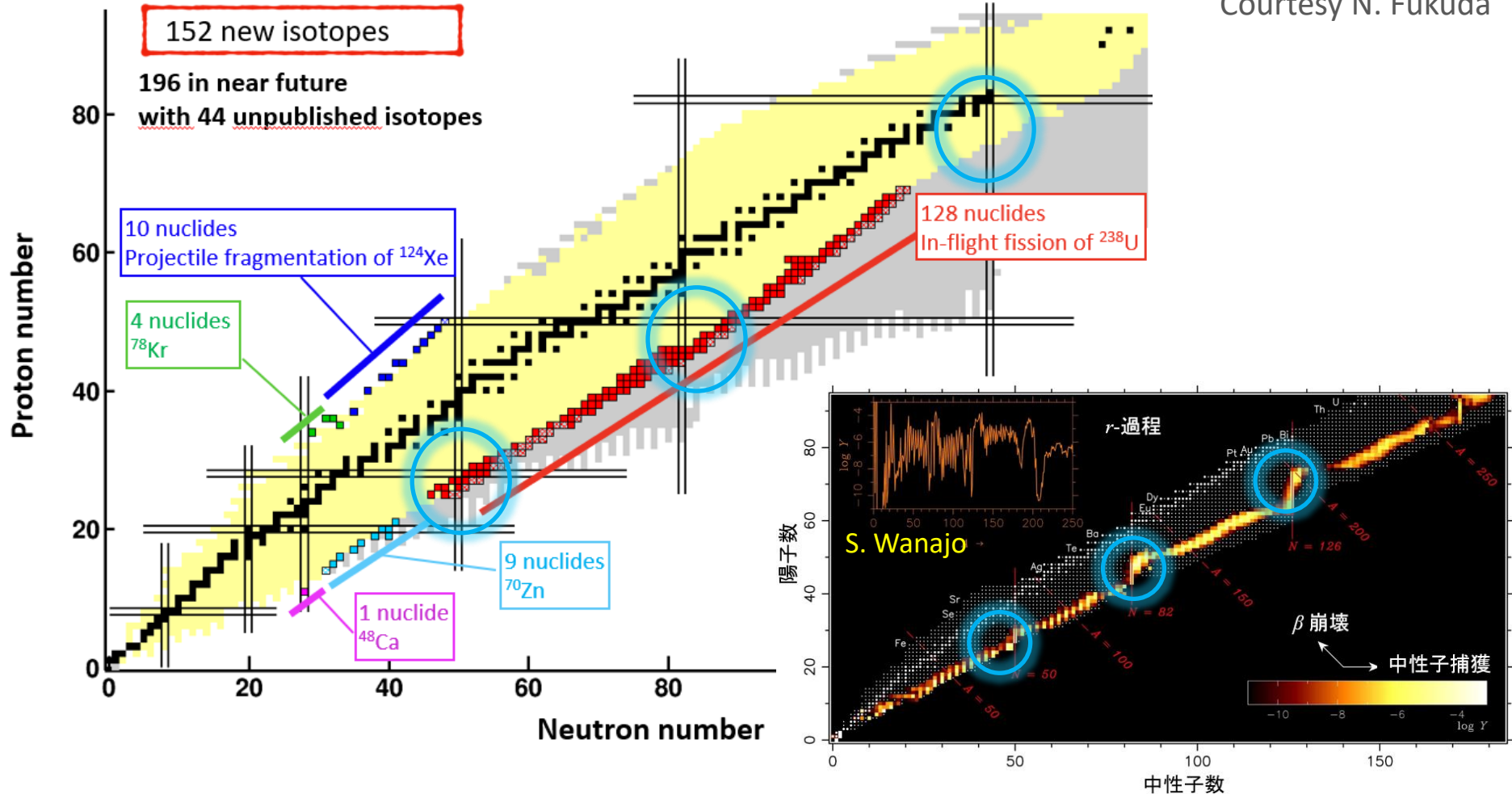
放射性同位体 (RI)

重イオンを光速の約70% (核子あたり 345 MeV) まで加速。ウラン238の核分裂反応によりRIを生成可能



RIBFにおける核図表の拡大

Courtesy N. Fukuda



- ウラン238の核分裂反応により、R過程に関わる中性子過剰同位体がアクセス可能に
- 第一ピーク (^{78}Ni 近傍) では、ドリップライン近傍まで生成可能に
- 第二ピーク (^{132}Sn 近傍) では、二重魔法数近傍一帯を幅広く生成できるようになった。
- 第三ピーク (^{208}Pb 南) 領域の開拓を、KEK KISSプロジェクトが推進 → 平山さん

RIBFにおける元素合成研究

核構造・核物性

- 結合エネルギーの獲得機構
 - 殻構造、変形構造、ペアリング、クラスター... etc
 - 魔法数 e.g. $Z = 28/N = 50$ における魔法数消失の予兆の発見(2019)
- 核物質の状態方程式(非飽和密度、非対称性)

静的な核データ

- ベータ崩壊半減期・中性子放出確率
→ 西村俊二さん
- 質量測定(MR-TOF、R3、SHARAQ)

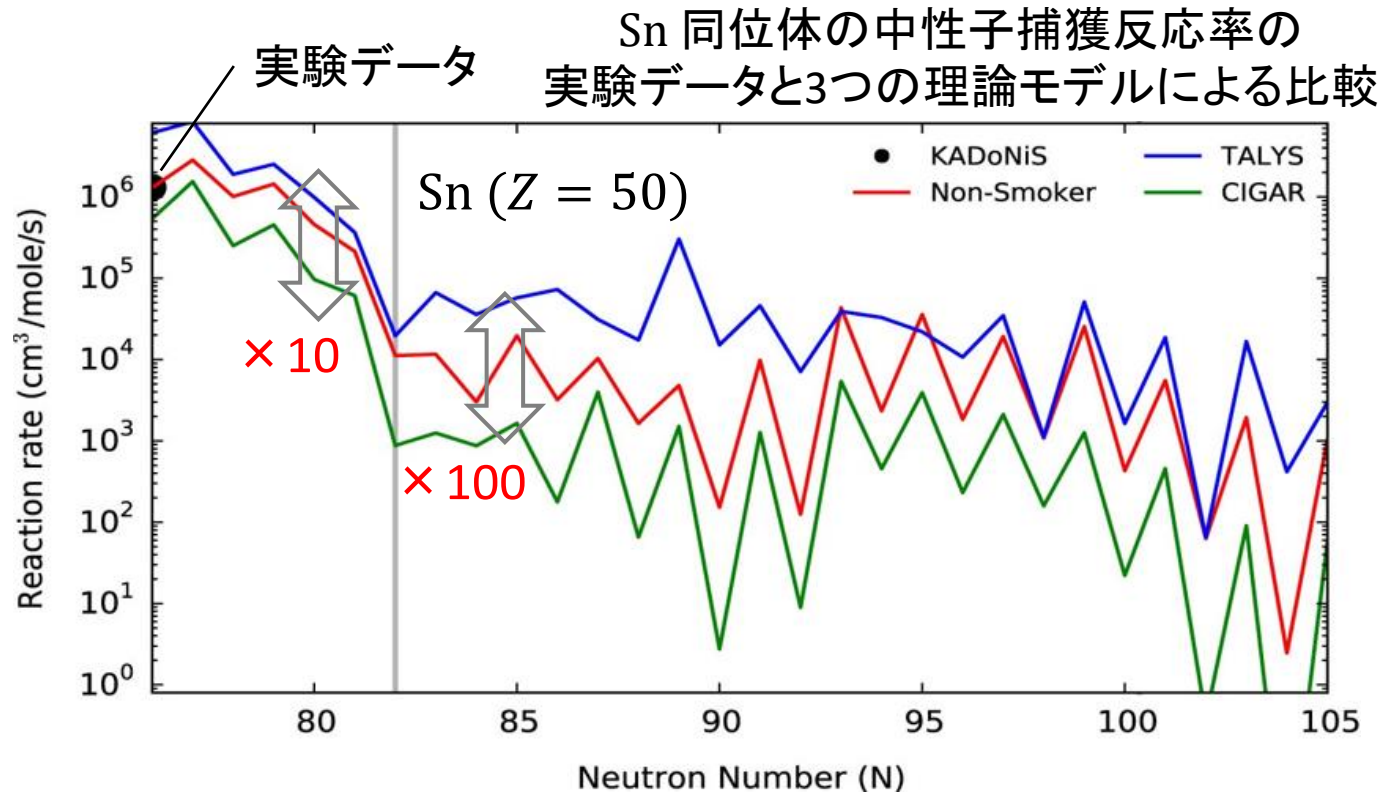
動的な核データ(天体核反応)

- 天体環境とのインターフェース
- 軽い質量領域における測定(90年代~)
- サロゲート法による重元素同位体の中性子捕獲断面積
→ 今井さん・本講演



中性子捕獲断面積の測定

シミュレーション用核データとしては、最も実験的な不定性が大きい

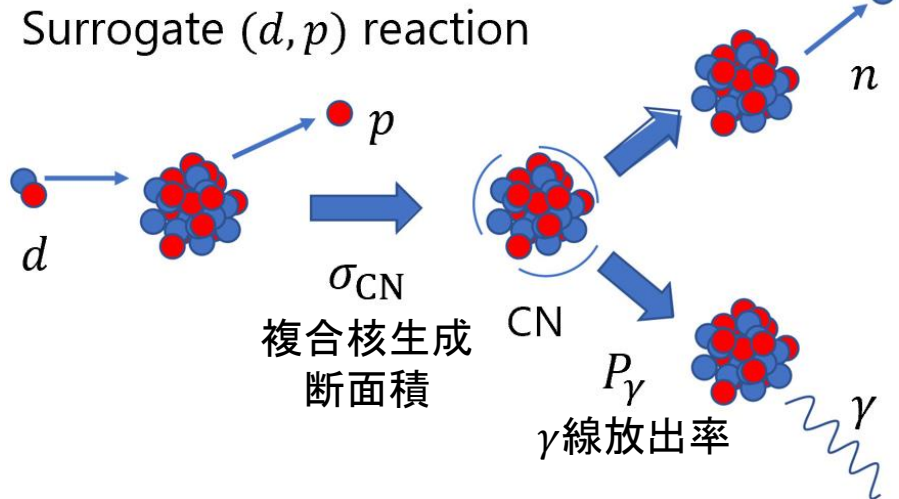
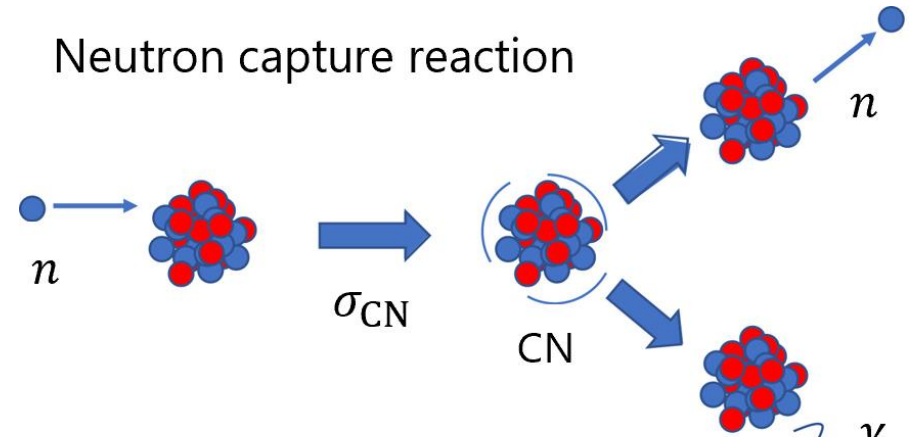


本質的な測定上の問題

- 現状の技術では、中性子・RIどちらか一方が「標的」でないといけない
- 中性子・RIともに短寿命
- 実用にたる中性子標的・RI標的が存在しない

サロゲート法

- 代理反応 (surrogate method)
- 重陽子を標的とする。
- 陽子と中性子が非常に緩く束縛した粒子。陽子を「傍観者」として近似的に取り扱うことができる。
- (1) 複合核状態の条件をできる限り一致させ、(2) 崩壊分岐確率を決定する。



$$\sigma_{^{130}\text{Sn}(n,\gamma)} = \sigma_{^{130}\text{Te}(n,\gamma)} \times \frac{\sigma_{\text{CN}}^{^{131}\text{Sn}}}{\sigma_{\text{CN}}^{^{131}\text{Te}}} \times \frac{P_{\gamma}^{^{131}\text{Sn}}}{P_{\gamma}^{^{131}\text{Te}}}$$

目的の断面面積

理論値 (光学模型)

既知のデータ

本実験で測定

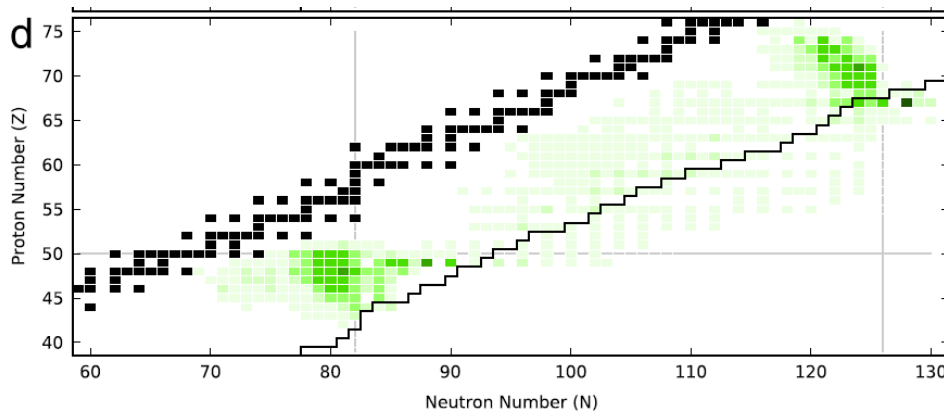
SAKURAプロジェクト

- RIビームファクトリーの大強度ビームにより、希少核の中性子捕獲断面積を測定する試みを本格化
- 「重元素合成の起源」
- 2022年4月ー5月にデータ収集を初めて実施

SHARAQ18

R過程第2ピーク近傍のフリーズアウト現象の解明

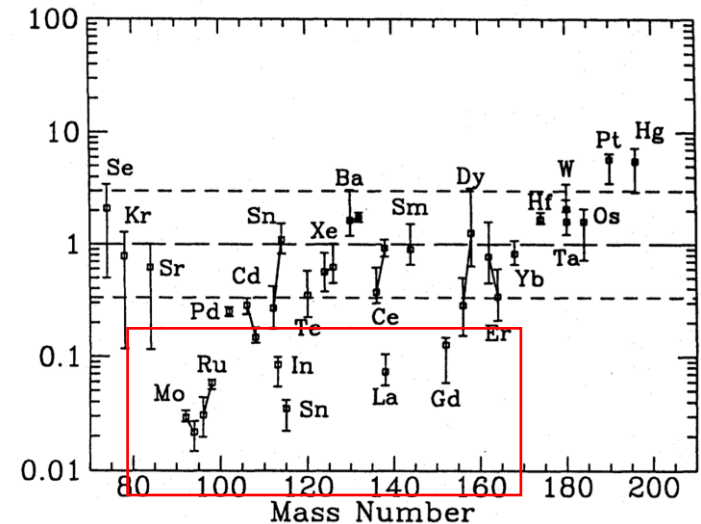
→ $^{130}\text{Sn}(n,\gamma)$ 断面積



SHARAQ19

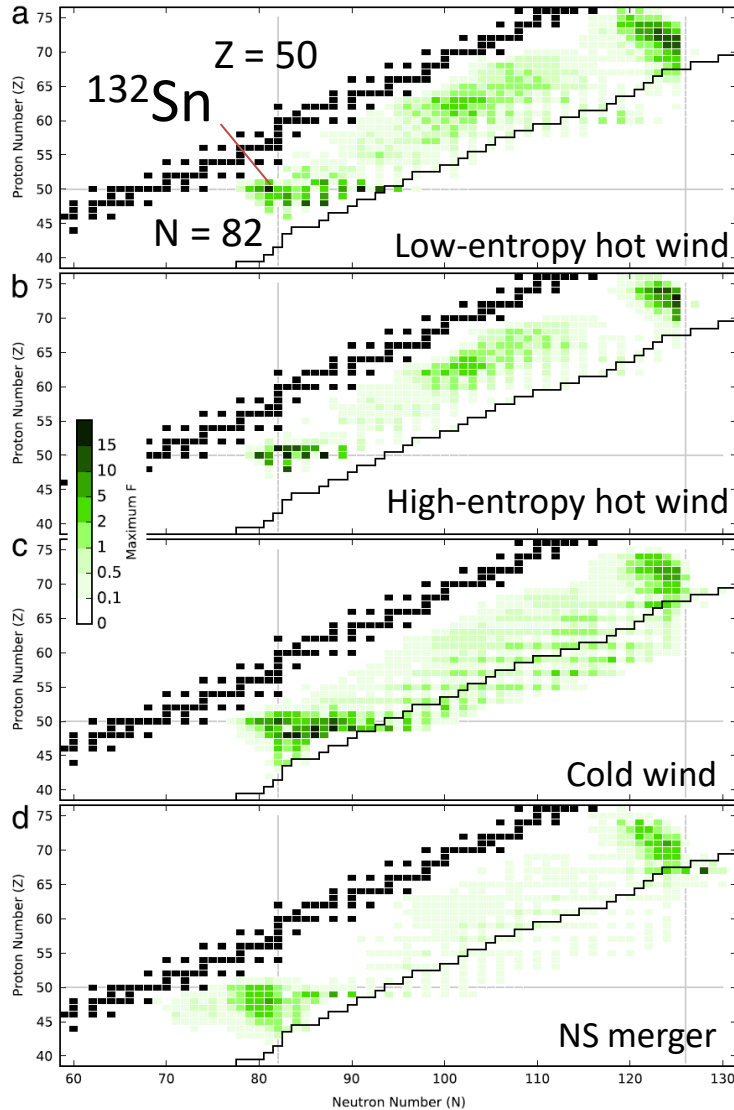
vp過程によるP核の合成現象

→ $^{56}\text{Ni}(n,p)$ 断面積

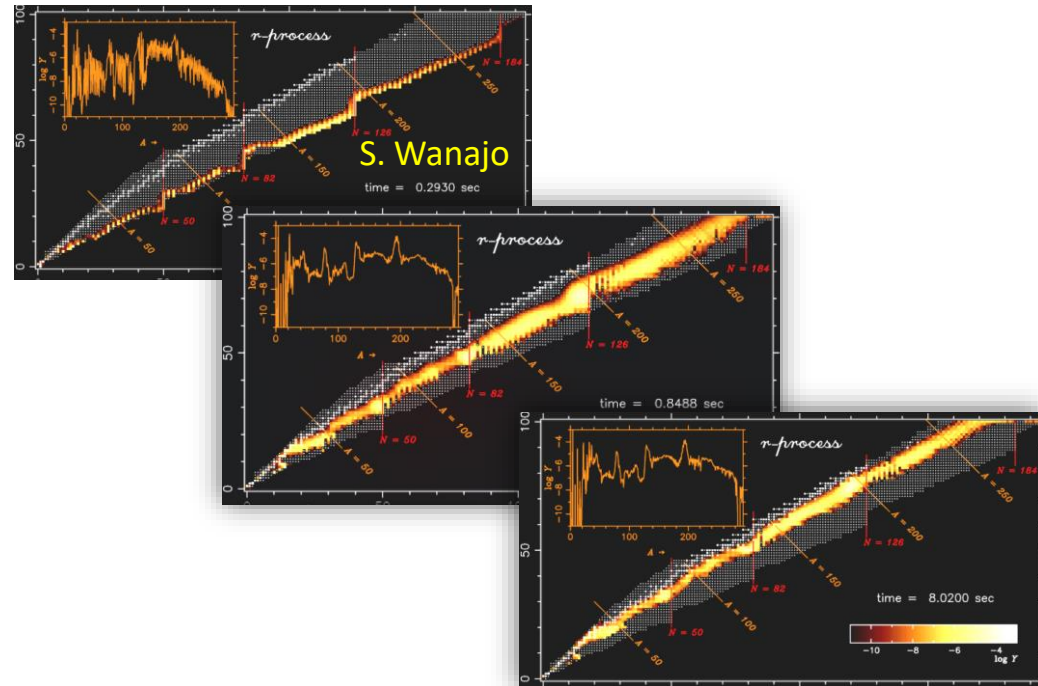


R過程における中性子捕獲断面積の感度分析

最終組成に対する感度分析(4つのシナリオ)

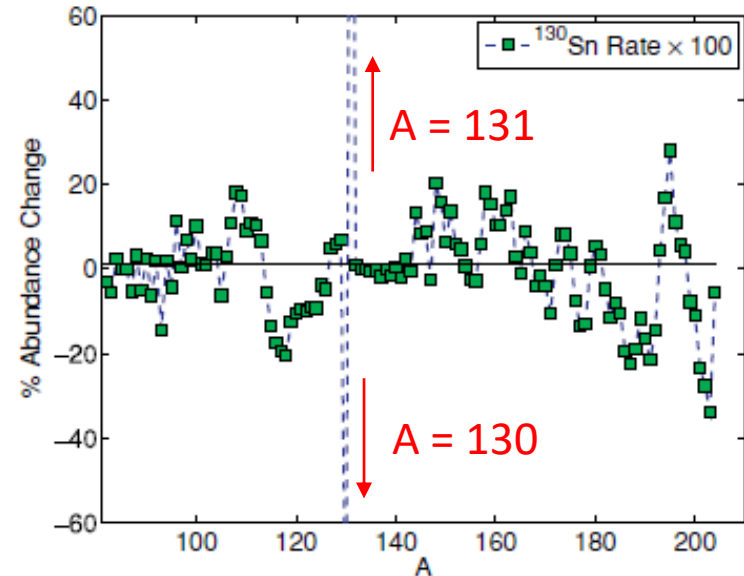
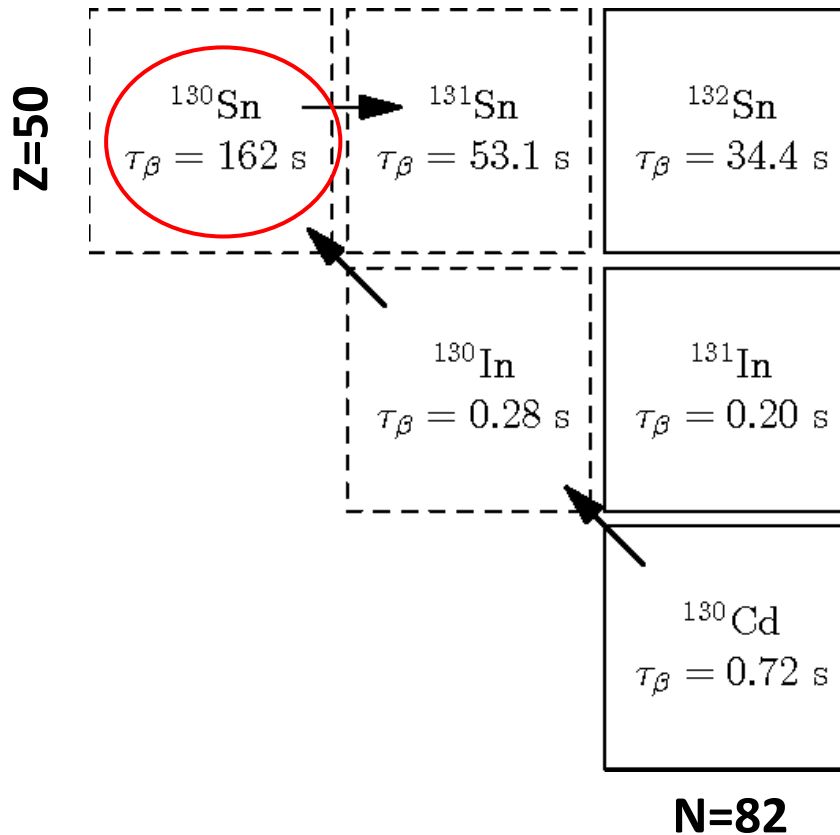


- 高温時の $(n,\gamma) \leftrightarrow (\gamma,n)$ の平衡状態には影響なし
- フリーズアウト時の分布変化に影響
→R過程経路に対して安定核側の領域がカギとなる
- 二重魔法核 ^{132}Sn 領域のデータが重要領域



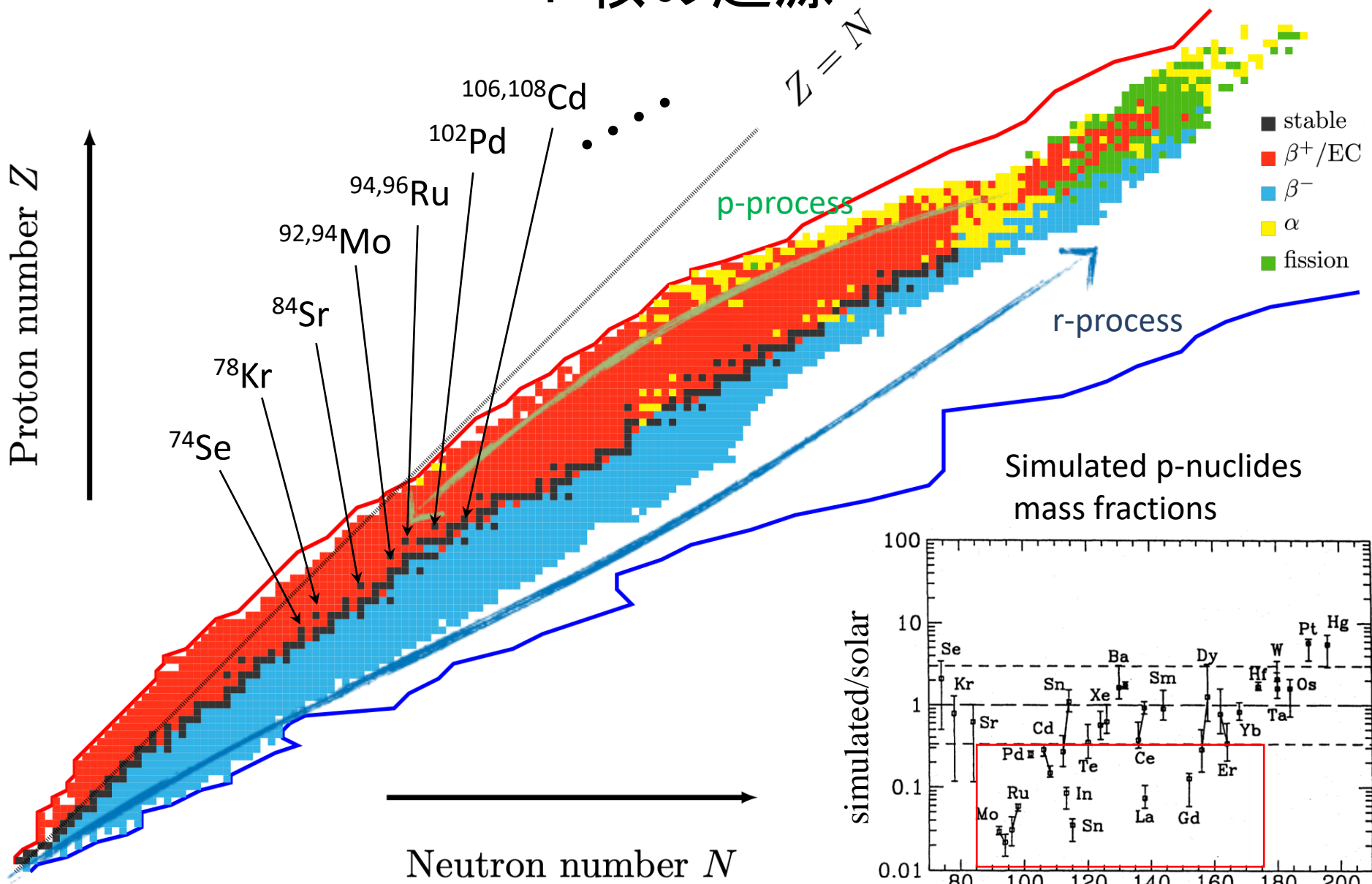
$^{130}\text{Sn}(n,\gamma)$ 反応

J. Beun et al., J. Phys. G 36 (2009)



- ^{130}Sn は寿命が長い。フリーズアウトの際に、 $A = 130$ 系列のベータ崩壊の流れが滞留する。
- 中性子捕獲は $A = 131$ へと流れを分岐させる。断面積は $A = 130$ と 131 の存在比に大きな影響を与える。

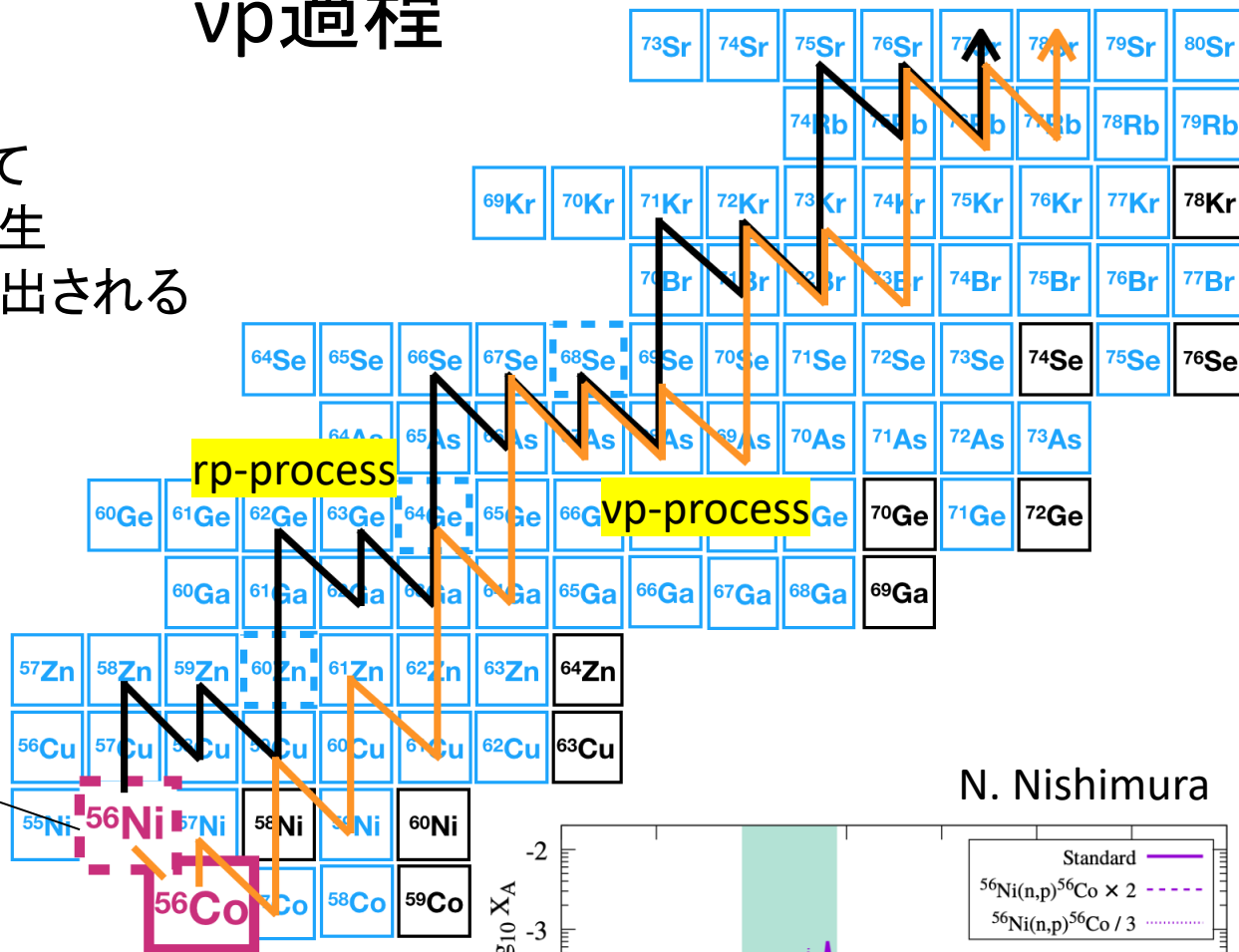
P核の起源



35種のP核のうち、軽い領域はP過程（光分解）では存在比を説明できない。

vp過程

- 高速陽子捕獲過程
- X線バースターとは違って
 - 超新星爆発下で発生
 - 生成物が外部に放出される
 - 中性子が存在する



二重魔法核 ^{56}Ni で
合成が滞留する

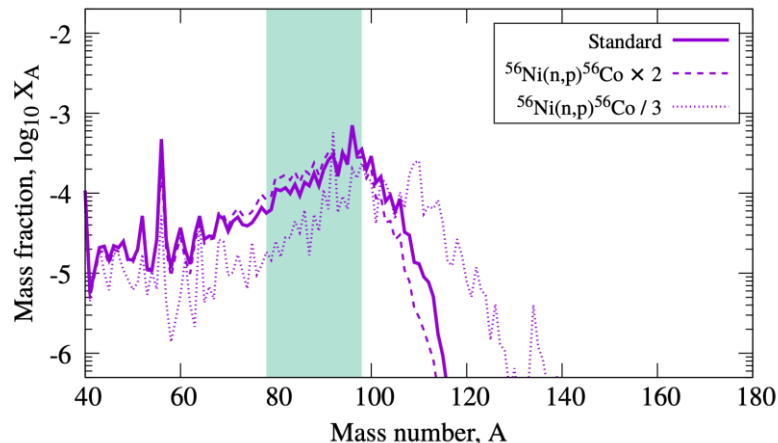
半減期 6日

c.f. S.N. ~ 10 s

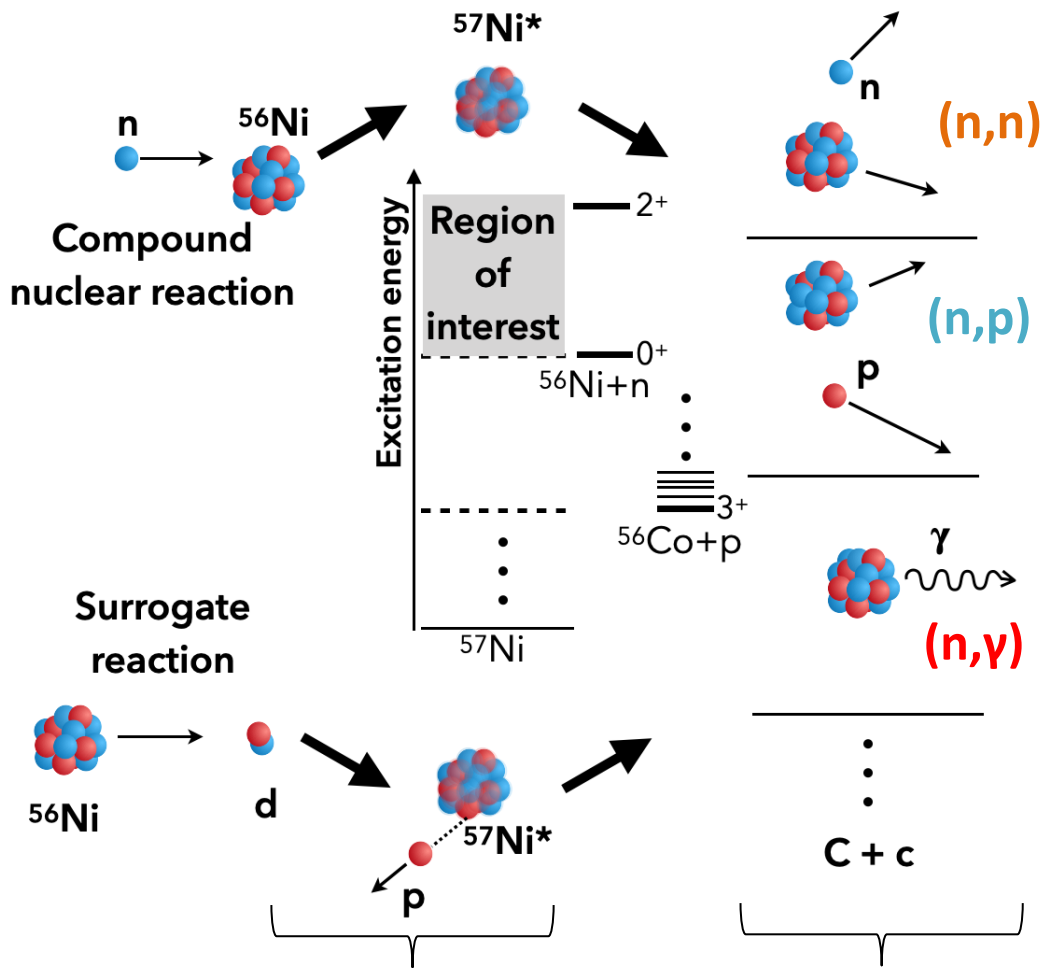
$^{56}\text{Ni} + n \rightarrow ^{56}\text{Co} + p$ 型の反応によって
 ^{56}Co へのバイパスが開く

^{56}Ni の中性子捕獲断面積と崩壊分岐比が、
P核の合成量に大きな影響を与える。

N. Nishimura



$^{56}\text{Ni}(d,p)$ 反応を用いたサロゲート法

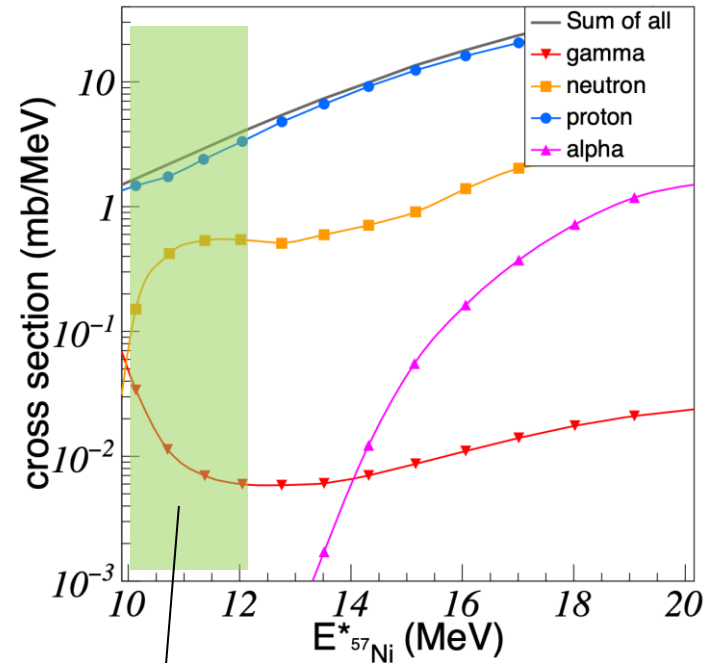


複合核状態を生成し、励起エネルギーを測定する

終状態を識別することで、崩壊分岐比を測定する

$^{56}\text{Ni}(d,p)^{57}\text{Ni}^*$ at 15 MeV/u

TALYS simulation



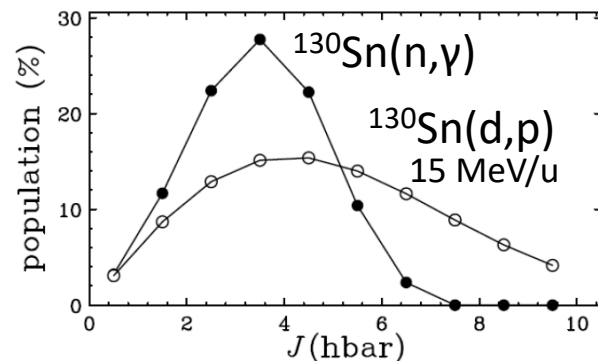
Important region for vp-process

実現するためには技術的なポイントが3つ

(1) OEDOによる複合核状態の制御

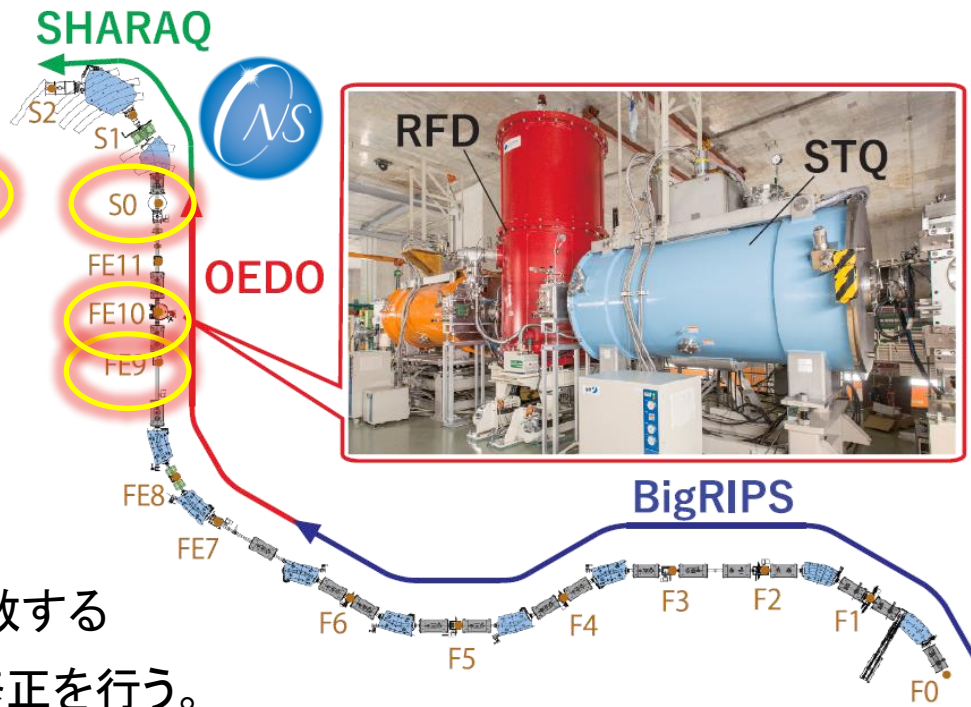
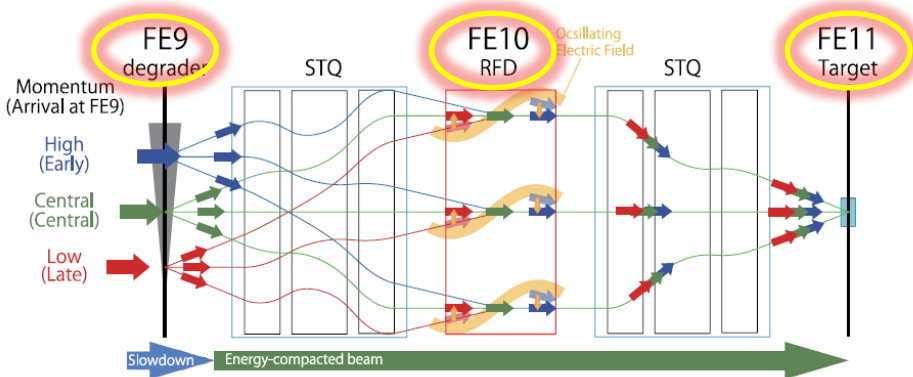
共鳴状態のspin分布を、実際の中性子捕獲の分布に近い条件にしたい

- RIBF標準RIエネルギー約200 MeV/uでは高すぎる
- OEDOビームラインによる低速化 (~15 MeV/u までは実現)



J.W. Hwang et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 53, 16 ('20)

エネルギー減衰



エネルギー減衰により横方向の軌道が拡散する

RF deflector: 横方向のRF電場により軌道修正を行う。

標的へのトランスミッションを向上

S. Michimasa et al., NIM B 463, 143 ('20)

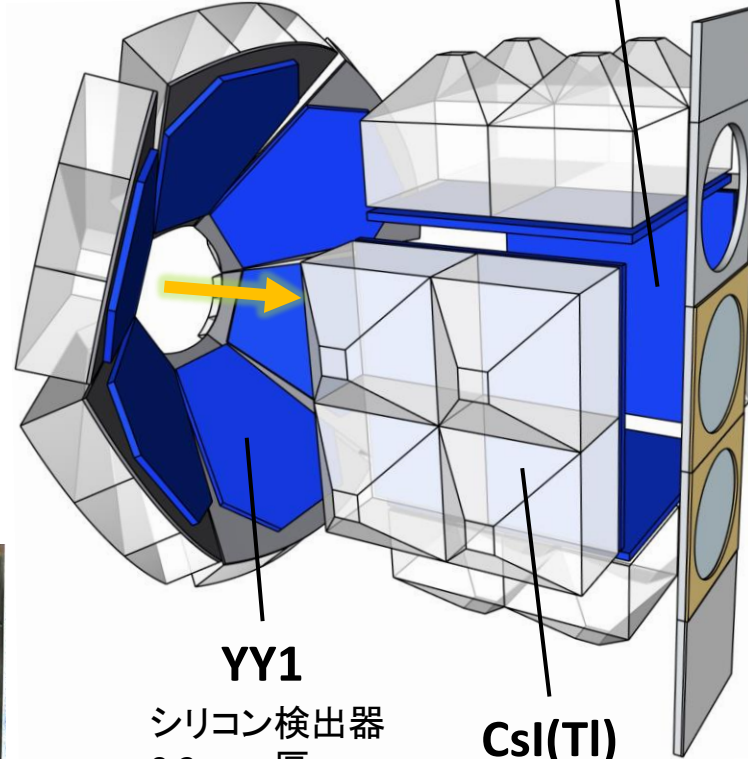
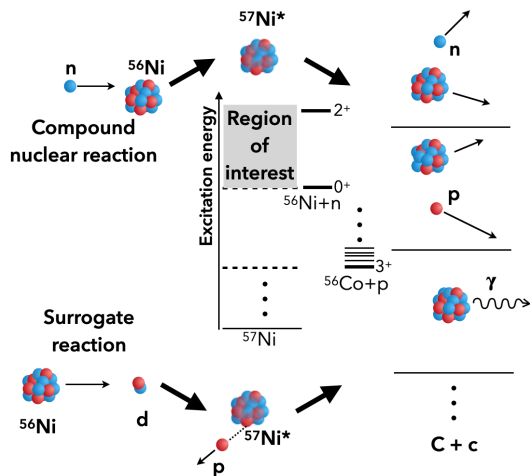
(2) TiNAによる励起関数の導出

中性子捕獲直後の共鳴状態の励起エネルギー

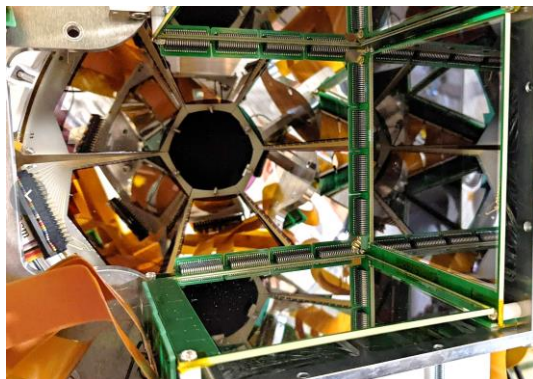
- 崩壊後の粒子(複数)から再構築するのは難度が高い
- 反跳陽子の運動量(エネルギーと角度)から再現する(欠損質量分光法)
- 位置感応型シリコン・CsI検出器アレイ(TiNA)
- CD₂薄膜標的(エネルギー損失による分解能劣化を抑止)

TiNA 理研・CNS・RCNP
 B. Mauss et al.
 RIKEN Accel. Prog. Rep. 54, 114 ('21)

TTT 0.3 mm 厚
 128 x 128 ストリップ



INFN
CD₂標的
 0.3 μm



YY1
 シリコン検出器
 0.3 mm 厚
 16ストリップ

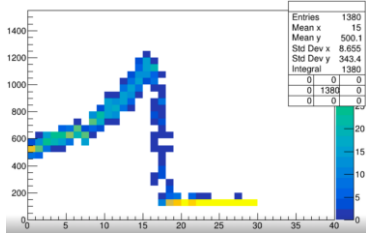
CsI(Tl)

実験室系100° ~170° をカバー

(3) QQDスペクトロメータによる崩壊チャンネル同定

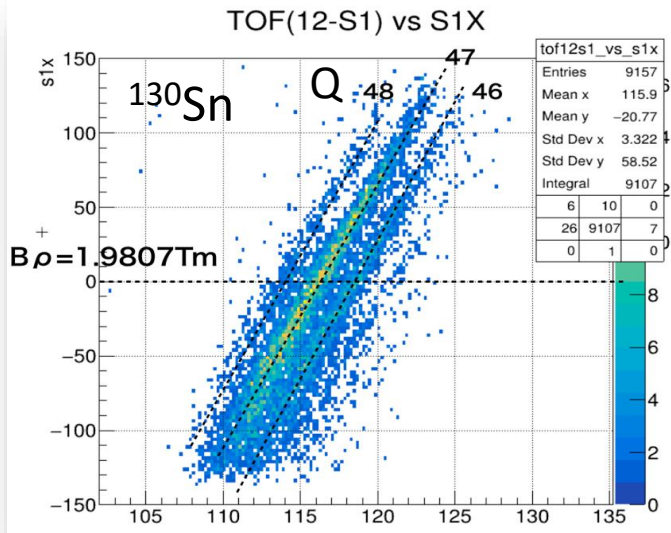
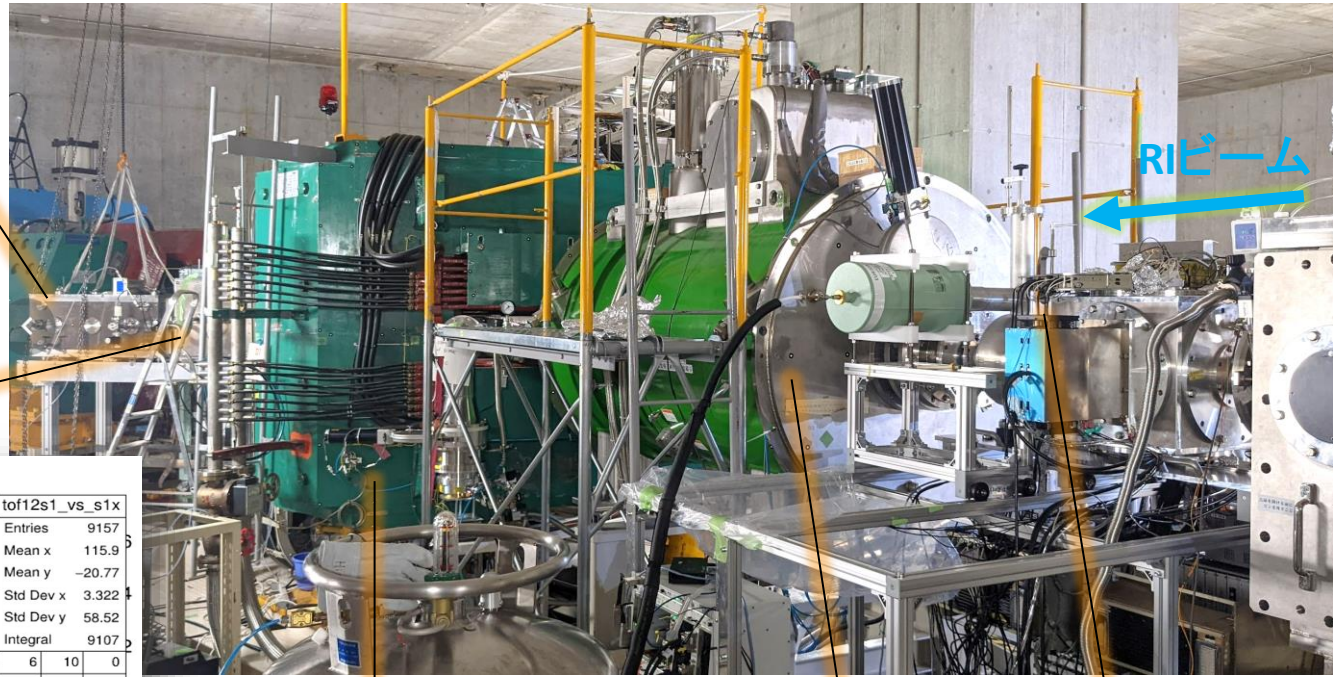
粒子・ガンマ線放出が終わった後の散乱核を、スペクトロメータで分析
→崩壊チャンネルをイベント毎に決定する

イオン・チェンバー



ブラッグ曲線 → Z

PPAC



双極磁石

標的とTiNAアレイ

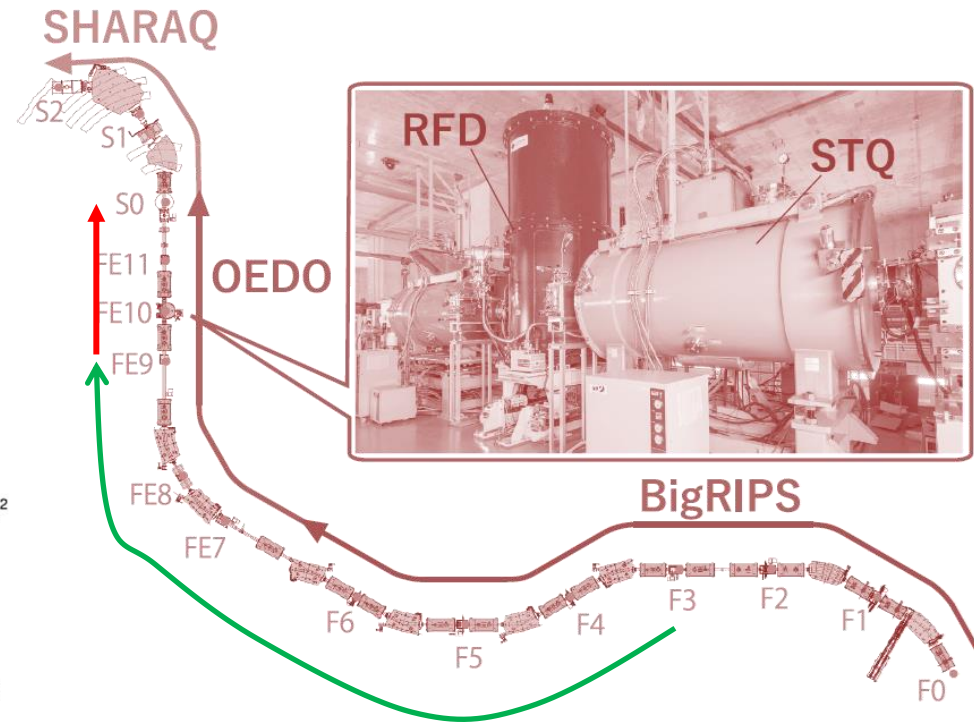
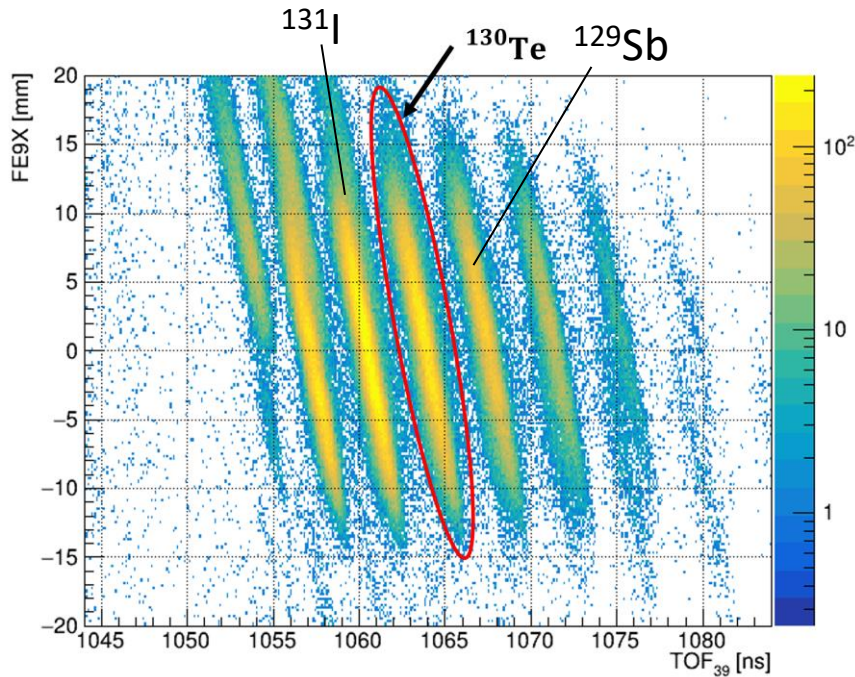
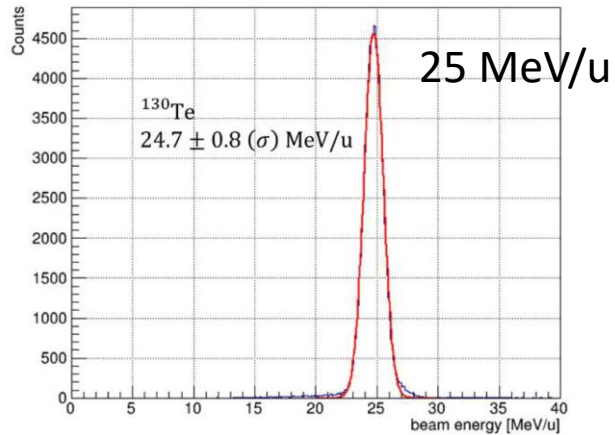
二連四重極磁石

TOFと $B\rho$ の相関から A/Qを決定

レファレンス用ビーム ^{130}Te の生成

FE9から反応焦点面までのTOFから減速後のエネルギーを決定

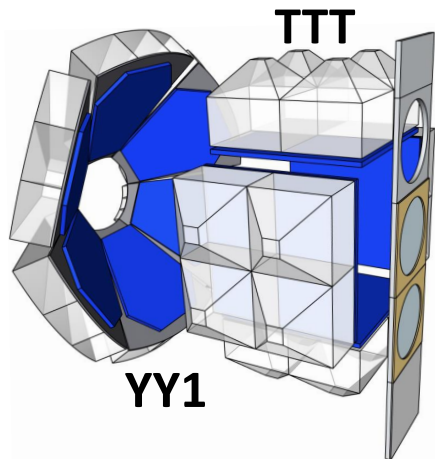
萩之内大雅、修士論文、東北大学(2023年)



TOFと位置 (= Bρ磁気剛性)の相関から、
A/Q値に基づき粒子を識別する

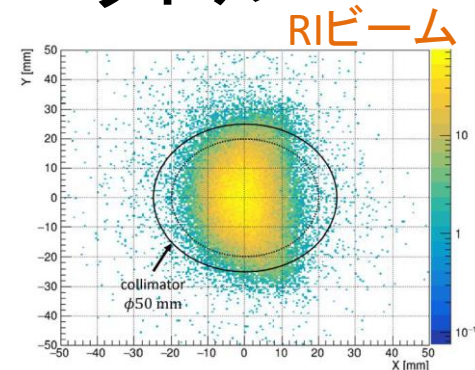
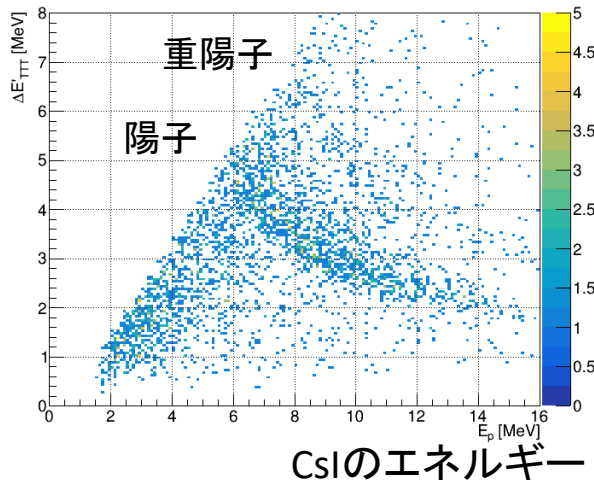
強度40 kpps / 純度20%

$^{130}\text{Te}(d,p)$ 反応による ^{131}Te の励起スペクトル



TTTのエネルギー

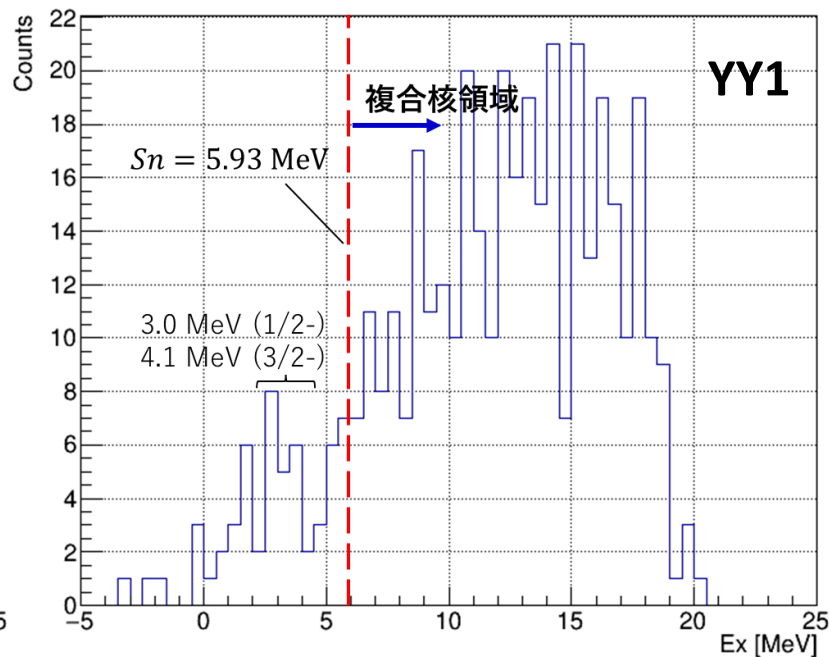
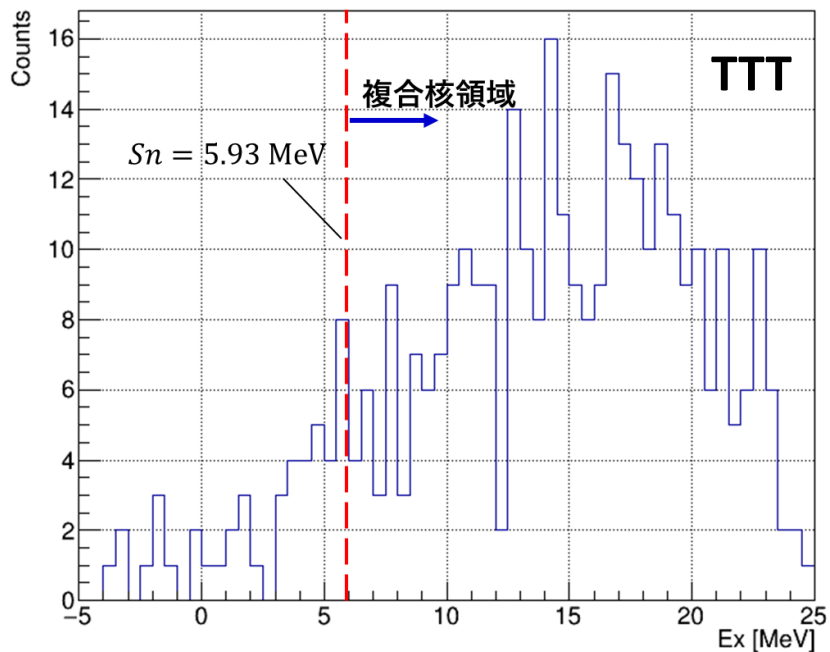
反跳粒子



E_p, θ_p $E, (x, \theta_x), (y, \theta_y)$

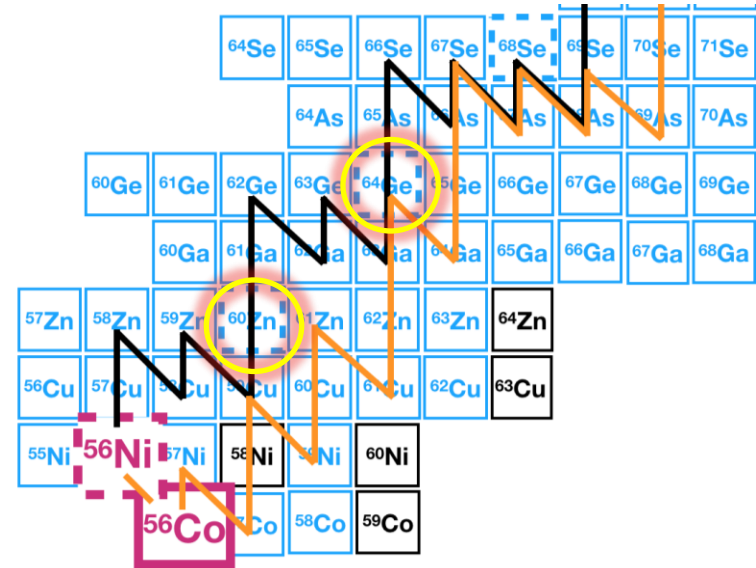
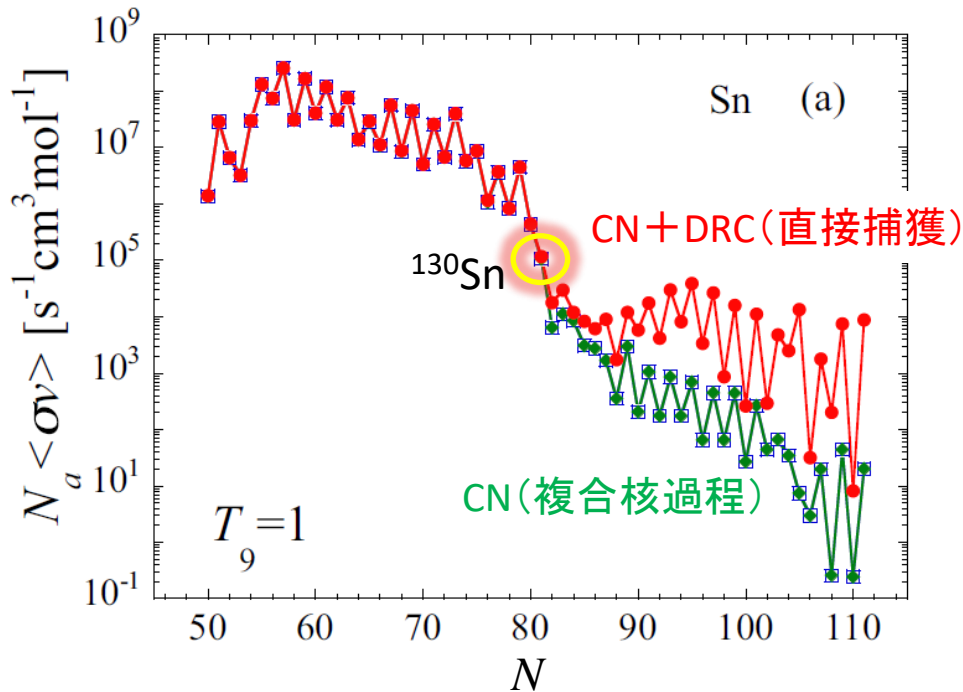
Green arrow pointing down from E_p, θ_p to the TTT plot.
Orange arrow pointing down from $E, (x, \theta_x), (y, \theta_y)$ to the YY1 plot.

preliminary



今後の展望

- R過程におけるCN(複合核過程)とDRC(直接捕獲)のクロスオーバー現象を明らかにする。 ^{130}Sn より重い領域では、中性子数が増えるに従って、CNの断面積は低下すると予想されている。
- vp過程の経路上に現れる次の滞留点(^{60}Zn , ^{64}Ge ...)の断面積を測定する。



結語

- 理研仁科センターのRビームファクトリーにおいて、サロゲート法による放射性同位体の中性子捕獲断面積の測定プロジェクトSAKURAを開始した。
- OEDOビームラインの低速Rビームにより複合核状態のスピン分布を制御。
- 位置感応型シリコン・CsIアレイTiNAとQQDスペクトロメータにより、崩壊分岐比の励起関数を取得。
- 2022年春にキャンペーン実験を実施した。R過程第二ピークのフリーズアウト現象とP核の起源をめぐる研究を展開。現在データ解析を進めている。

SAKURA2022 collaboration

N. Imai,^{*1} D. Suzuki,^{*2} S. Michimasa,^{*1} T. Chillery,^{*1} B. Mauss,^{*3,*2} D.S. Ahn,^{*4} D. Beaumel,^{*5,*2}
K.Y. Chae,^{*6} S. Cherubini,^{*7} M. Dozono,^{*8,*2} M. Egeta,^{*9,*2} F. Endo,^{*9,*2} N. Fukuda,^{*2} T. Haginouchi,^{*9,*2}
S. Hanai,^{*1} S. Hayakawa,^{*1} Y. Hijikata,^{*8,*2} J.W. Hwang,^{*4} S. Ishio,^{*9,*2} N. Iwasa,^{*9,*2} S. Kawase,^{*10,*1}
K. Kawata,^{*1} R. Kojima,^{*1} S. Kubono,^{*2} M. La Cognata,^{*7} L. Lamia,^{*7} J. Li,^{*1} N. Nishimura,^{*2} K. Okawa,^{*1}
M. Oishi,^{*10,*2} H.J. Ong,^{*11,*2,*12} S. Ota,^{*12} S. Palmerini,^{*13,*14} R. Pizzone,^{*7} T. Saito,^{*1} H. Sakurai,^{*2}
S. Shimoura,^{*1,*2} Y. Shimizu,^{*2} T. Sumikama,^{*2} H. Suzuki,^{*2} H. Takeda,^{*2} H. Tanaka,^{*15,*2} M. Tanaka,^{*2}
X. Tang,^{*12} T. Teranishi,^{*15,*2} Y. Togano,^{*2} A. Tunimo,^{*7} Y. Wang,^{*16} K. Yako,^{*1} K. Yahiro,^{*8,*2}
H. Yamaguchi,^{*1} R. Yokoyama,^{*1} K. Yoshida,^{*2} R. Yoshida,^{*8,*2} M. Yoshimoto,^{*2} and Z. Xiao,^{*16}

^{*1} CNS, University of Tokyo

^{*2} RIKEN Nishina Center

^{*3} CEA-DAM

^{*4} CENS, Institute for Basic Science

^{*5} IJClab, IN2P3, CNRS

^{*6} Department of Physics, Sungkyunkwan University

^{*7} INFN Laboratori Nazionali del Sud

^{*8} Department of Physics, Kyoto University

^{*9} Department of Physics, Tohoku University

^{*10} IGSES, Kyushu University

^{*11} RCNP, Osaka University

^{*12} Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

^{*13} INFN Sezione di Perugia

^{*14} Department of Physics, University of Perugia

^{*15} Department of Physics, Kyushu University

^{*16} Tsinghua University