



ERATOプロジェクト

酒井聖矢 (理研)

2024年8月23日

第二回瀬戸内ニュートリノ研究会

本研究はJST ERATO(課題番号JPMJER2304)の助成を受けたものである。

自己紹介

- 名前 : 酒井聖矢 (さかいせいや)
- 生年月日 : 1996年12月29日 (27歳)
- 出身 : 岡山県岡山市
- 趣味 : ゲーム・音楽鑑賞・SNS
- 特技 : 書道・硬筆・縄跳び・
バスケットボール・社交ダンス

- 略歴

2019年 岡山大学 理学部 物理学科 卒業

2021年 岡山大学大学院 自然科学研究科 数理物理学専攻 修士課程 修了

2024年 岡山大学大学院 自然科学研究科 数理物理学専攻 博士課程 修了

岡山大学 博士研究員 (4月)

理化学研究所 特別研究員 (5月 -)



目次

- イントロダクション
- 三体核力
 - 三体核力へのアプローチ
 - 束縛系での三体核力
- 関口三体核力プロジェクト
 - 目標・各班の役割
 - 応用科学への展開：オージェ電子放出核種
 - 核種生成断面積
 - Thick Target Yield
 - 今後の予定

ERATOプロジェクトとは？



- **ERATO**(Exploratory Research for Advanced Technology) :
科学技術振興機構(JST, Japan Science and Technology Agency)
が実施する戦略的創造研究推進事業におけるプログラムの1つ
※「ERATO」はギリシャ神話に登場する女神の名でもある
- 1981年：創造科学技術推進事業(ERATO)が発足
- 2002年：戦略的創造研究推進事業の下に再編
- 1プロジェクトあたりの予算：総額上限12億円(直接経費)
- 研究期間：原則5年半以内
(環境整備期間：半年、プロジェクト実施期間：5年)

現在進行中のプロジェクト

ERATO

- ・ ライフイノベーション : 8つ
- ・ 情報通信技術 : 2つ
- ・ ナノテクノロジー・材料 : 8つ

→ うち1つが**関口三体核力(TOMOE)プロジェクト**(2023/10 - 2029/3)

The screenshot shows the ERATO website interface. At the top, there's a red header with the ERATO logo, navigation links like 'プログラムの概要', '研究領域の紹介', and a search bar. Below the header, a breadcrumb trail leads to '関口三体核力プロジェクト'. The main content area features a profile of Dr. Tomoe (関口 仁子), her research period (2023/10 - 2029/3), and grant number (JPMJER2304). A detailed text block explains the project's goal: to understand the three-nucleon force (TOMOE) by combining experimental data with theoretical simulations. To the right, a 'プログラム' (Program) section lists various research programs like CREST, PRESTO, ACT-X, ERATO, ALCA-NoXi, and CRONOS. At the bottom right, there's a banner for '終了事業アーカイブズ' (Completed Projects Archives) and a link to '戦略的創造研究推進事業に関するご意見・ご要望'.

https://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/jpmjer2304.html

三体核力

三体核力

- 3つの核子が同時に作用することで引き起こされる核力
- 三体核力の存在は1930年代に示唆されていた*
 - 三体核力が「全ての原子核で必要である」という認識は2000年代以降
 - なぜ三体核力へのアプローチに時間がかかった？

三体核力にアプローチするための3条件

1. 二体核力が確立していること
2. 二体核力を用いて3核子系を厳密に記述する理論とそれに基づく計算があること
3. 三体核力の効果を抽出できる高精度の実験データがあること

* E. Wigner, Phys. Rev. **43**, 252 (1933)

三体核力へのアプローチ

1. 二体核力の確立

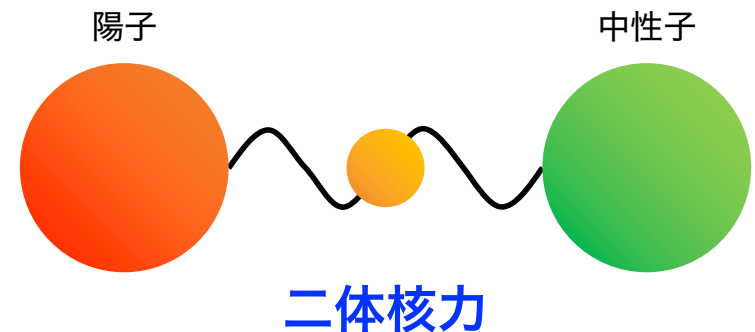
- 湯川の中間子交換理論(1935年)^[1]

陽子-中性子間にはたらく力(二体核力)は
電子の約200倍の質量を持つ量子(π 中間子)の
交換によって生じる



<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~yhal.oj/archive.html>

- 1947年：
パウエル等が宇宙線中で π 中間子を発見^[2]
- 1949年：
湯川秀樹がノーベル物理学賞受賞^[3]
- 1950年：
パウエルがノーベル物理学賞受賞^[3]



[1] H. Yukawa, Proc. Phys. Math. Soc. Jpn. **17**, 48 (1935)

[2] G. P. S. Occhialini and C. F. Powell, nature **159**, 186 (1947)

[3] <https://www.kahaku.go.jp/special/past/nobel/plus/physics/index.html>

三体核力へのアプローチ

その後...

- 理論： π 中間子より重い中間子(ρ , η , ω など)を考慮
- 実験：陽子-陽子(pp)散乱や中性子-陽子(np)散乱の実験データ
(微分断面積、スピン観測量など)の蓄積
→ 核力の状態(距離、運動量、スピン、アイソスピン)依存性を検証
- 1993年：
二体核力ポテンシャルが
(1955年 - 1992年に公表された)4,301個の実験データ
($T_{\text{lab}} < 350$ MeV、pp散乱データ1,787個、np散乱データ2,514個)を
 $\chi^2/\text{degrees of freedom} = 4,263.8/3,945 \sim 1.08$
という精度で再現！*

* V. G. J. Stoks *et al.*, Phys. Rev. C **48**, 792 (1993)

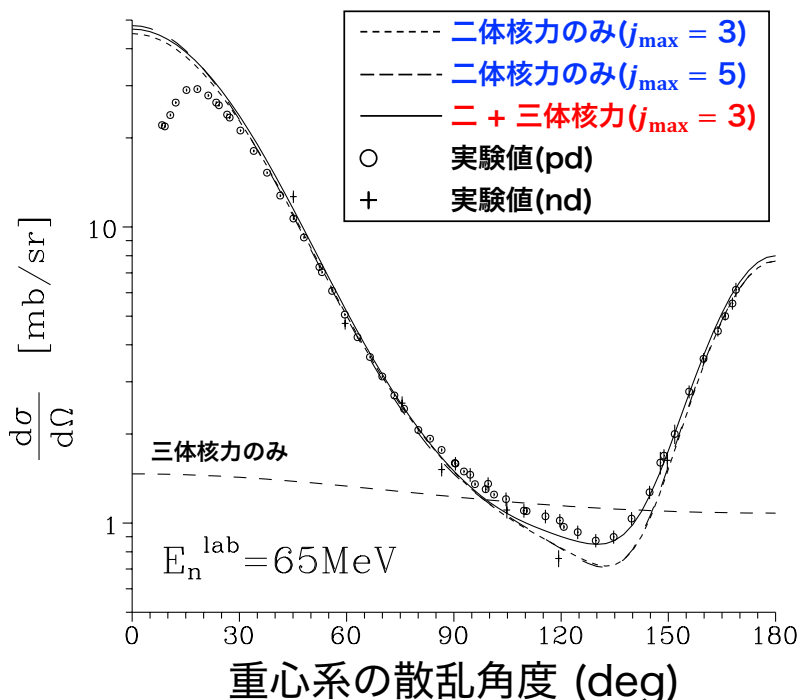
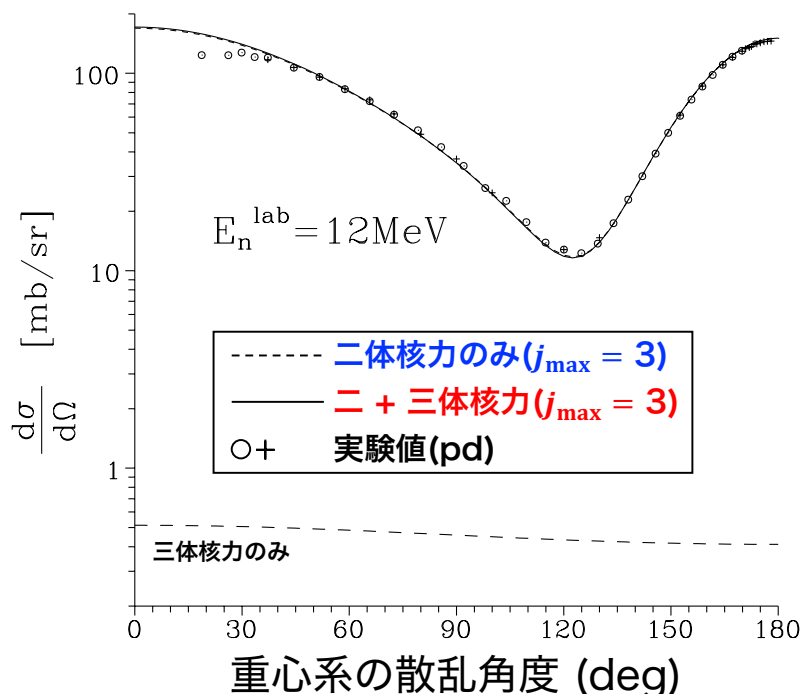
三体核力へのアプローチ

[1] L. D. Faddeev, Sov. Phys. JETP **12**, 1014 (1961)

[2] H. Witała *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**, 1183 (1998)

2. 二体核力を用いて3核子系を厳密に記述する理論およびそれに基づく計算

- 1961年：ファデーエフが3核子系を厳密に記述する理論を提唱^[1]
 - この理論を用いて高精度の計算をするにはコンピュータの高速化が必要
- 1998年：ヴィタラ等が $T_{\text{lab}} = 12, 65, 140, 200$ MeVでファデーエフ計算に成功^[2]
 - **核子-重陽子(Nd)弾性散乱の微分断面積の最小値付近に決定的証拠あり？**



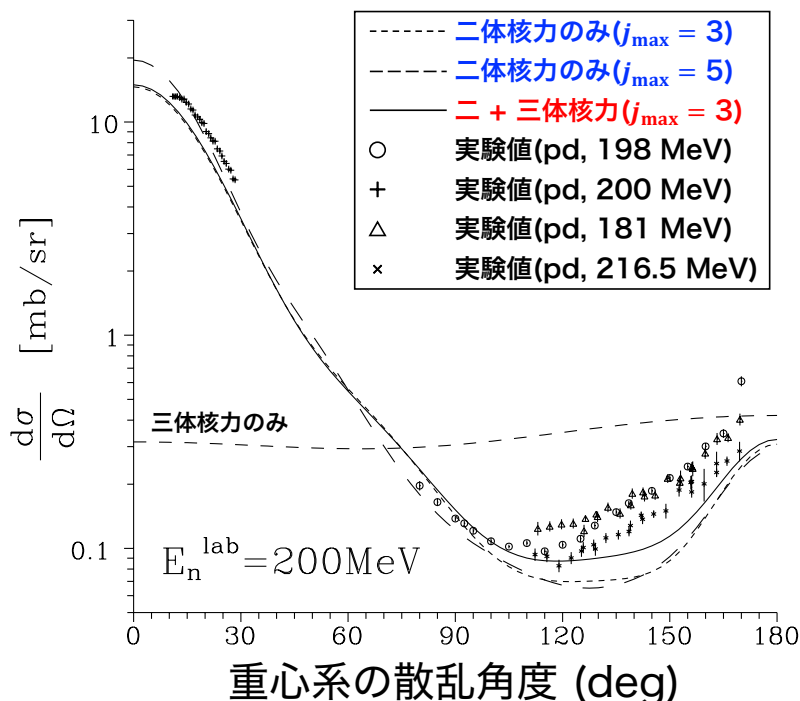
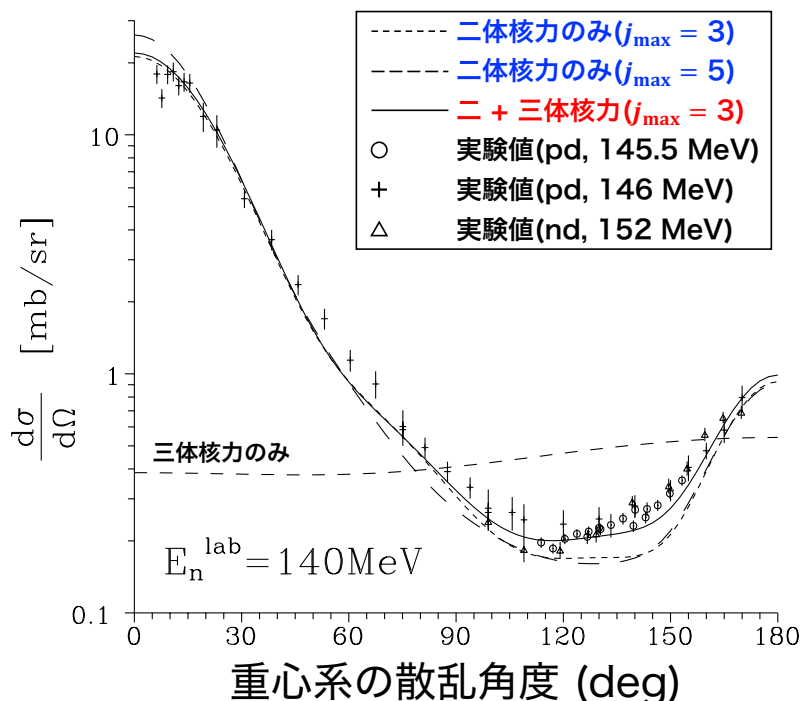
三体核力へのアプローチ

[1] L. D. Faddeev, Sov. Phys. JETP **12**, 1014 (1961)

[2] H. Witała *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**, 1183 (1998)

2. 二体核力を用いて3核子系を厳密に記述する理論およびそれに基づく計算

- 1961年：ファデーエフが3核子系を厳密に記述する理論を提唱^[1]
 - この理論を用いて高精度の計算をするにはコンピュータの高速化が必要
- 1998年：ヴィタラ等が $T_{\text{lab}} = 12, 65, 140, 200$ MeVでファデーエフ計算に成功^[2]
 - **核子-重陽子(Nd)弾性散乱の微分断面積の最小値付近に決定的証拠あり？**



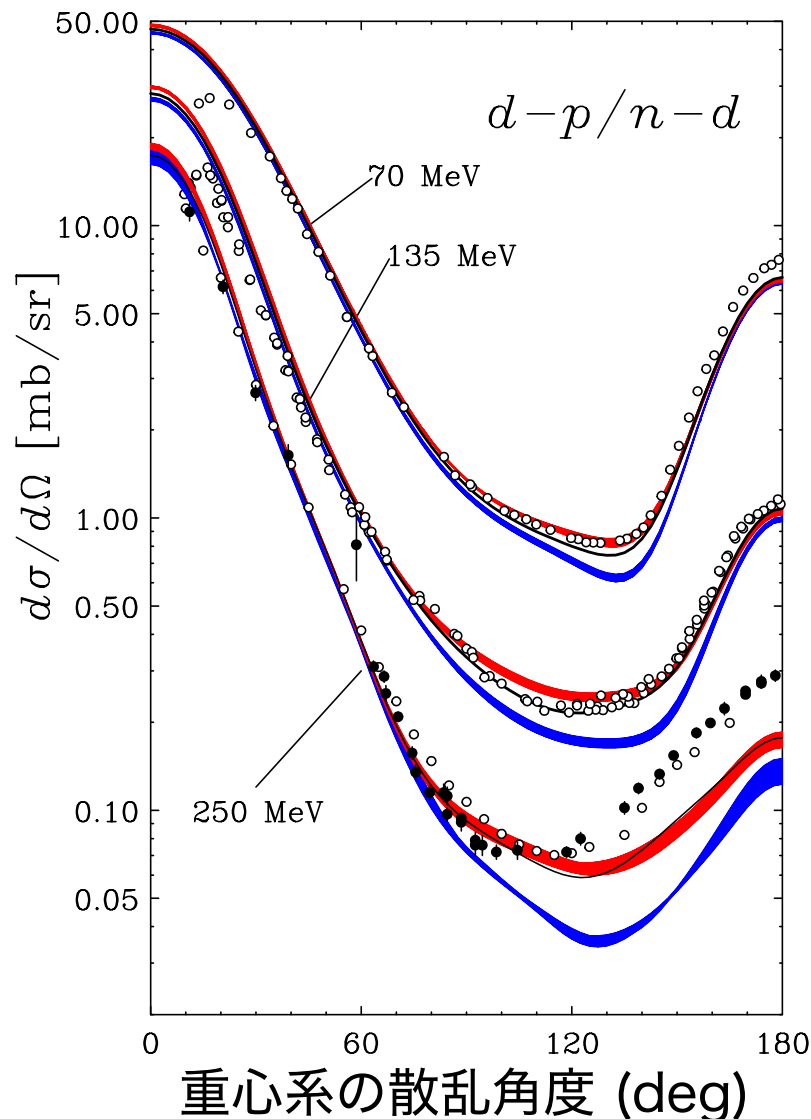
三体核力へのアプローチ

3. 三体核力の効果を抽出できる高精度の実験データ

- 理研で偏極重陽子ビームによる重陽子-陽子(dp)弾性散乱測定^[1,2,3]
 - 70, 135 MeVでは三体核力の導入で見事に説明できている！
 - **散乱系で初の三体核力の証拠**



- [1] K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. C **65**, 034003 (2002)
[2] K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 162301 (2005)
[3] K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. C **89**, 064007 (2014)



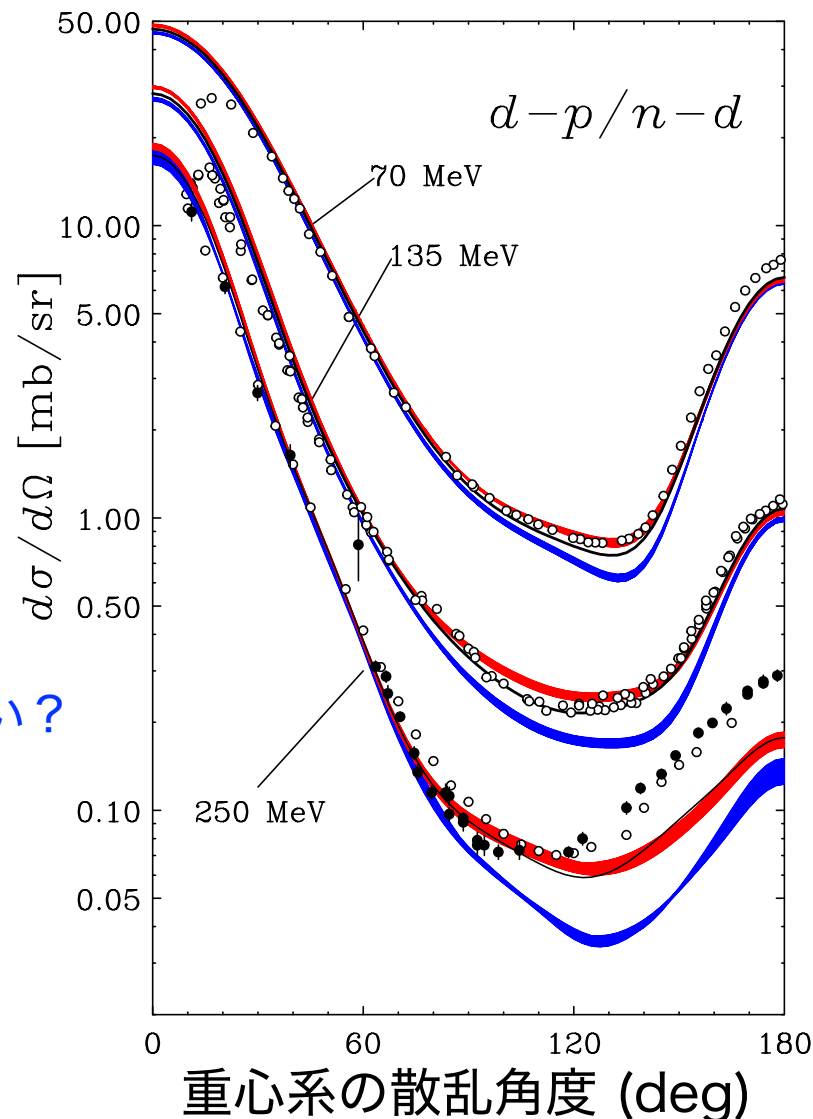
三体核力へのアプローチ

3. 三体核力の効果を抽出できる高精度の実験データ

- 理研で偏極重陽子ビームによる重陽子-陽子(dp)弾性散乱測定^[1,2,3]
 - 250 MeVでは後方角度(> 120 deg)において三体核力を導入しても実験値を説明できていない
 - 高運動量で効いてくる短距離型の三体核力が理論計算で考慮されていない？



- [1] K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. C **65**, 034003 (2002)
[2] K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 162301 (2005)
[3] K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. C **89**, 064007 (2014)



三体核力へのアプローチ

* K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. C **83**, 061001(R) (2011)

- dp弾性散乱の偏極微分断面積*

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \sqrt{3}iT_{11}(\theta)p_Z \sin \beta \cos \phi + \frac{1}{\sqrt{8}}T_{20}(\theta)p_{ZZ}(3\cos^2 \beta - 1) \right. \\ \left. + \sqrt{3}T_{21}(\theta)p_{ZZ} \cos \beta \sin \beta \sin \phi - \frac{\sqrt{3}}{2}T_{22}(\theta)p_{ZZ}\sin^2 \beta \cos 2\phi \right]$$

σ_0 : 無偏極微分断面積

θ, ϕ : 散乱角

p_Z : ベクトル偏極

p_{ZZ} : テンソル偏極

β : スピン方向とビーム方向のなす角度

$iT_{11}(\theta), T_{20}(\theta), T_{21}(\theta), T_{22}(\theta)$: 偏極分解能

- 偏極重陽子ビームの性質が既知

→ 偏極分解能が得られる

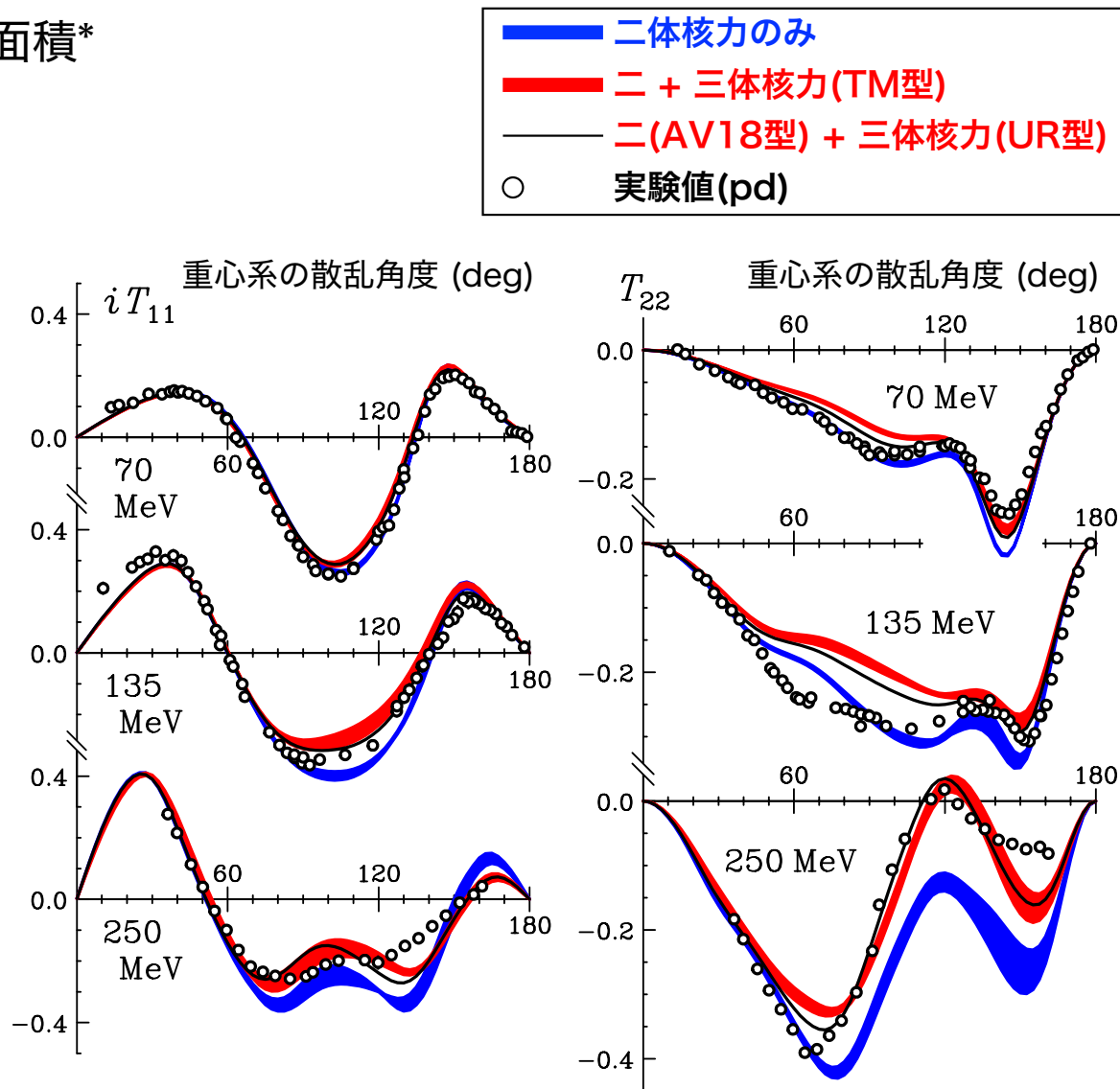
三体核力へのアプローチ

* K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. C **83**, 061001(R) (2011)

- dp弾性散乱の偏極微分断面積*

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \sqrt{3} i T_{11}(\theta) p_z \sin \beta \cos \phi \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{8}} T_{20}(\theta) p_{zz} (3 \cos^2 \beta - 1) \right. \\ \left. + \sqrt{3} T_{21}(\theta) p_{zz} \cos \beta \sin \beta \sin \phi \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{3}}{2} T_{22}(\theta) p_{zz} \sin^2 \beta \cos 2\phi \right]$$

- 偏極分解能(スピン観測量)
を正しく理解できたとはいえない

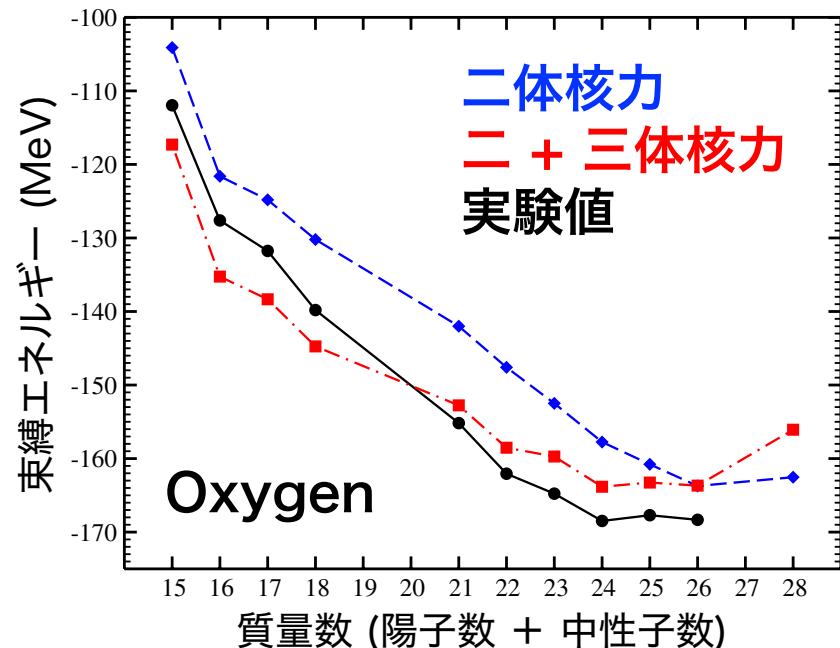
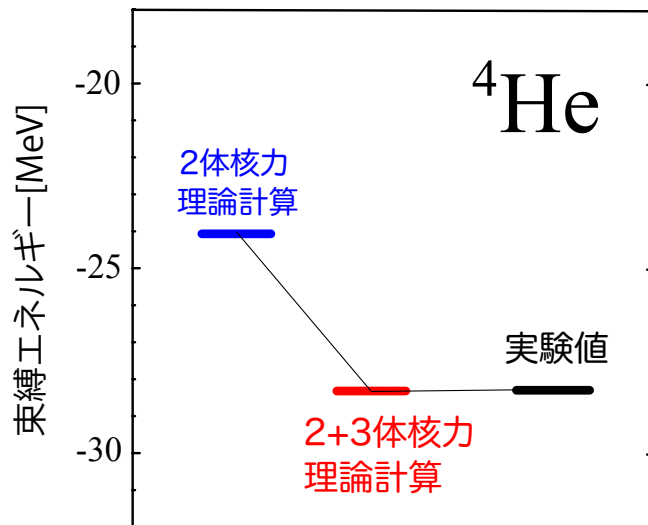


束縛系での三体核力

- [1] C. R. Chen *et al.*, Phys. Rev. C **33**, 1740 (1986)
[2] T. Sasakawa and S. Ishikawa, Few-Body Syst. **1**, 3 (1986)
[3] S. C. Pieper *et al.*, Phys. Rev. C **64**, 014001 (2001)
[4] G. Hagen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 242501 (2012)

軽核の束縛エネルギー

- **束縛系で初の三体核力の証拠**： ${}^3\text{H}$ (3核子系)の束縛エネルギー^[1,2]
- コンピュータの高速化 → 軽核($4 \leq A \leq 12$)の束縛エネルギーを記述可能に^[3]
- 酸素原子核の束縛エネルギー^[4]
 - $A \geq 21$ では実験値を再現する方向に
 - $A \leq 18$ では実験値を下回る



束縛系での三体核力

中性子星の質量

- 1998年：アクマル、パンドハリパンデ、ラベンハールの理論計算*

中性子星の質量上限値

$1.67M_{\odot}$ (二体核力)

$1.80M_{\odot}$ (二体核力 + 相対論効果)

$2.20M_{\odot}$ (二 + 三体核力 + 相対論効果)

$\sim 1.9M_{\odot} - \sim 2.0M_{\odot}$ (二 + 三体核力 + 相対論効果 + クォーク物質混合)

- 高密度領域では斥力として働く短距離型の三体核力が有効な役割を果たすことを示唆
- $\sim 2.0M_{\odot}$ の質量を持つ中性子星の存在を予言

* A. Akmal *et al.*, Phys. Rev. C **58**, 1804 (1998)

束縛系での三体核力

中性子星の質量

- 2010年： $(1.97 \pm 0.04)M_{\odot}$ の質量を持つ連星系ミリ秒パルサー
J1614-2230を発見^[1]

核物質

核物質 + K 中間子 or ハイペロン(Λ , Σ , Ξ , Ω など)

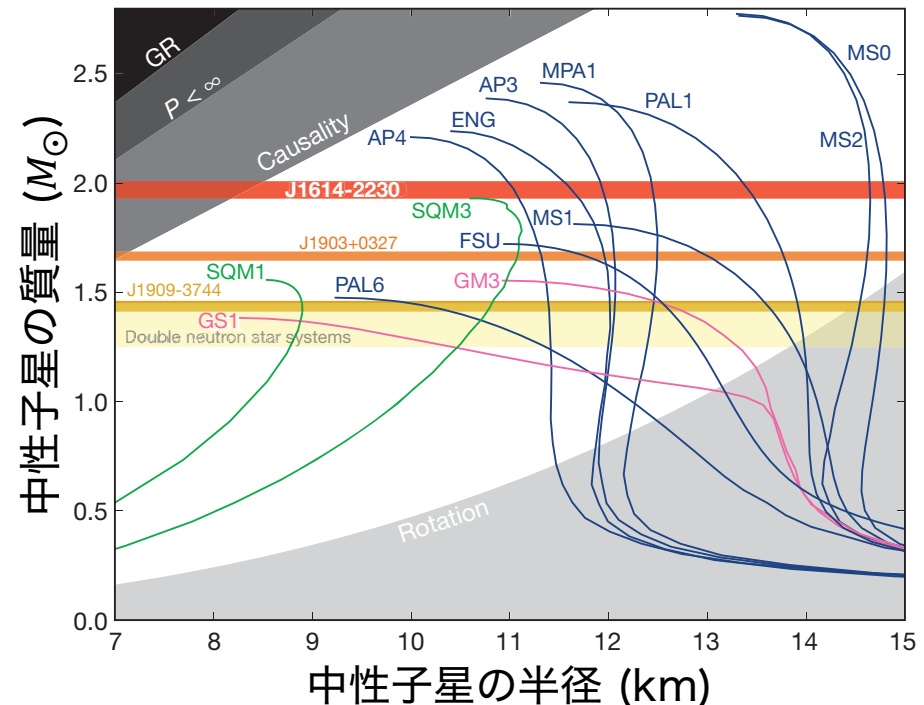
クォーク物質

GR(一般相対性理論)： $R > 2GM/c^2$ ^[2]

$P < \infty$ (有限圧力)： $R > (9/4)GM/c^2$ ^[2]

Causality(因果関係)： $R > 2.9GM/c^2$ ^[2]

Rotation： 716 HzパルサーJ1748-2446adの
潮汐破壊によって制限される領域^[2,3]



[1] P. B. Demorest *et al.*, *nature* **467**, 1081 (2010)

[2] J. M. Lattimer and M. Prakash, *Phys. Rep.* **442**, 109 (2007)

[3] 三輪祐也, 修士論文, 埼玉大学 (2020)

ここまでのまとめ

- 三体核力：3つの核子が同時に作用することで引き起こされる核力
- 1990年代：理論の発展、実験データの蓄積、コンピュータの高速化などによって三体核力にアプローチする条件が整い始める
- 理研で偏極重陽子ビームによる重陽子-陽子弾性散乱測定
→ 散乱系で初の三体核力の証拠を得る
- 三体核力の確立には課題が残る
 - 短距離型の三体核力
 - 偏極分解能(スピン観測量)
 - 原子核($A \geq 12$)の束縛エネルギー など

関口三体核力(TOMOE) プロジェクト

TOMOEプロジェクト



https://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/jpmjer2304.html

TOMOEプロジェクトの目標

～精緻な実験に基づく核力から新しい科学の展開を目指して～

原子核を第一原理的に記述する基礎科学研究

- 少数核子系偏極実験から「**三体核力を決定**」し「**核力の完成**」を目指す
- 核子100体系までの「**量子多体精密計算**」を実現
 - 予言能の高い原子核の物性値(質量、半減期など)と核反応断面積を創出
- 冷却原子系による量子多体精密計算の精度検証

応用科学への展開

- 量子多体精密計算を基礎と応用の架け橋となる「核データ」のリソースとして供与し「**核データの革新**」をはかる
 - 革新された核データに基づき新たな科学技術の創発に資することをねらう

TOMOEプロジェクト各班の役割

A班：三体核力の決定

三体核力を含む高精度な核力を完成

- 少数核子系偏極実験
(関口(東京工業大))
- カイラル有効場核力理論
(E. Epelbaum(ルール大))

B班：量子多体精密計算

核子100体系の原子核構造・反応計算の確立

- 無限小変位ガウス・ローブ関数展開法
(肥山(東北大))
- 密度汎関数法(中務(筑波大))
- 原子核反応計算(緒方(九州大))

C班：冷却原子実験(堀越(大阪公立大))

計算手法の精度検証のための
ベンチマークデータ

D班：応用科学への展開(大津(理研))

量子多体精密計算を基礎と応用の橋渡しの
役割を担う「核データ」のリソースとする

→ 核データの革新

- 核データ(岩本(JAEA))
- 医療用RI製造(菊永(東北大))
- RIの医療応用・薬剤開発(小川(北海道大))
- 総括補佐(深堀(JAEA))

核力(相互作用)を
インプット

リクエスト
検証と妥当性確認
(Verification & Validation)

計算手法

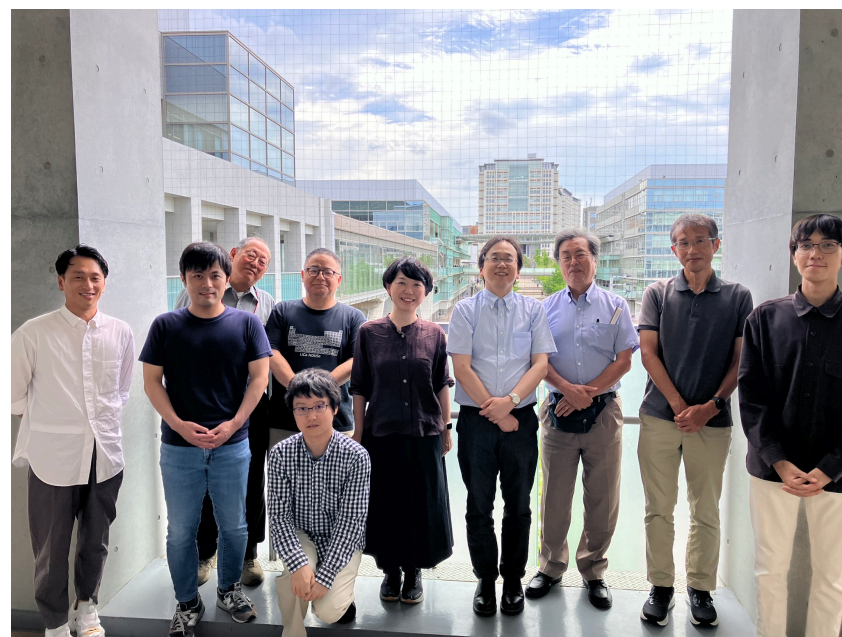
酒井はD班に所属

※ 青字は各班のリーダー



(左上、右上)
TOMOEプロジェクト 全体会議
2024年6月20日
@東京工業大 大岡山キャンパス

(右下)
TOMOEプロジェクト D班-九州大Gr合同会議
2024年7月18日
@九州大 伊都キャンパス

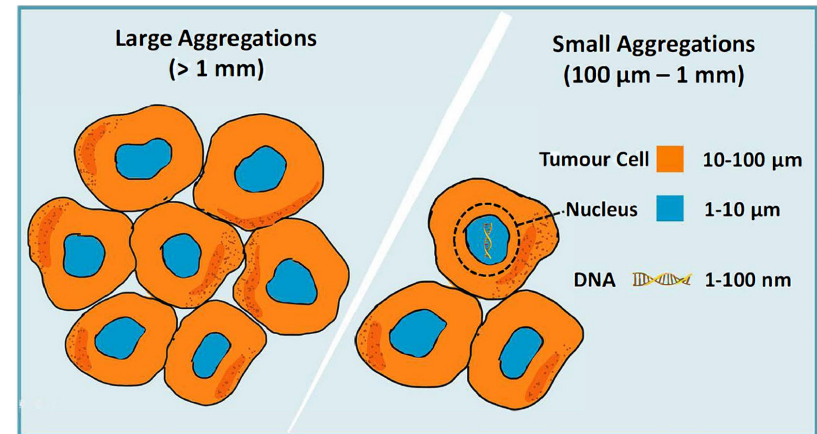


応用科学への展開：オージェ電子放出核種

- (特性X線と同等のエネルギーを持つ)オージェ電子放出核種を用いた核医学治療が注目されている*

なぜ？

- β 線と比べて線エネルギー付与が大きい
→ 腫瘍周りの正常細胞をほとんど傷つけない治療を可能にすると期待
- 娘核がさらに崩壊することが少ない
- オージェ電子放出核種は数多く存在し、生成反応・経路も多様
→ 実用上最適な核種やその生成法が確立されていない



* D. Filosofov *et al.*, Nucl. Med. Biol. 94-95, 1-19 (2021)

核種生成断面積

- オージェ電子放出核種について核種生成断面積をCCONE*
(Comprehensive COde for Nuclear data Evaluation、
JAEAで開発されている核反応モデル計算コード)で計算
→ 核種生成断面積が最大となる反応を確認

入射粒子：n, p, d, α , γ

- ^3He , t → 実用上難しいと思われる
- α より大きいイオンはCCONE適用外

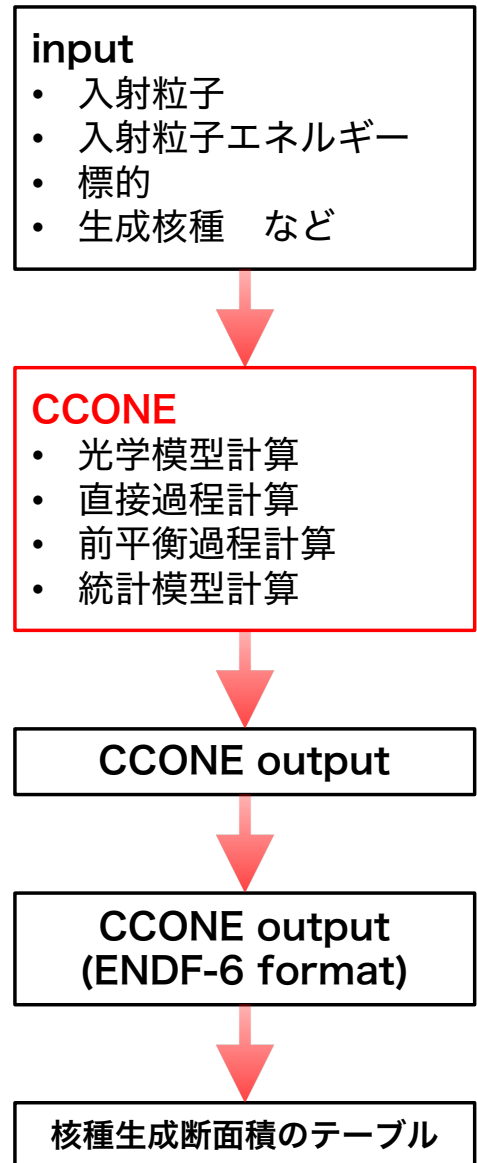
入射粒子エネルギー：1 - 50 MeV

標的：天然元素

生成核種： ^{77}Br

※ ENDF-6フォーマット：核データの標準的な編集フォーマット

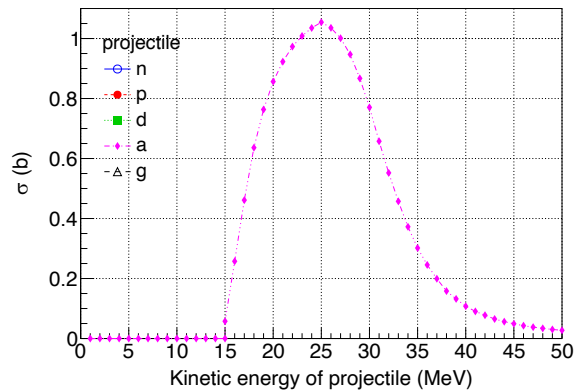
※ 今回の結果はCCONEのデフォルト計算によるもの



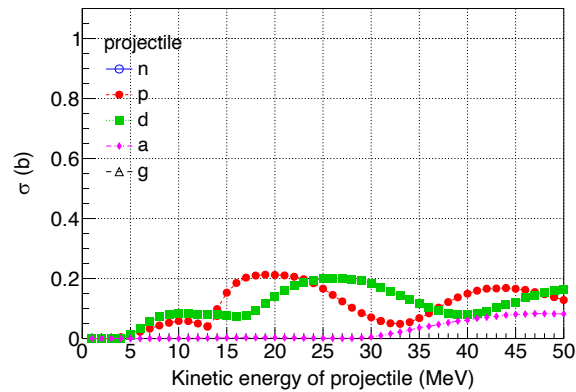
* O. Iwamoto *et al.*, Nucl. Data Sheets **131**, 259 (2016)

^{77}Br 生成

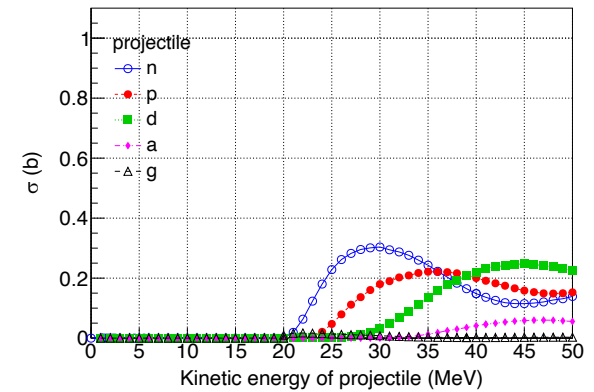
residual: 35-Br-77, target: 33-As-75



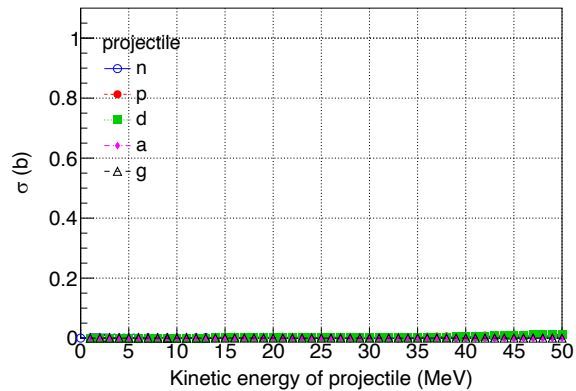
residual: 35-Br-77, target: 34-Se-0



residual: 35-Br-77, target: 35-Br-0

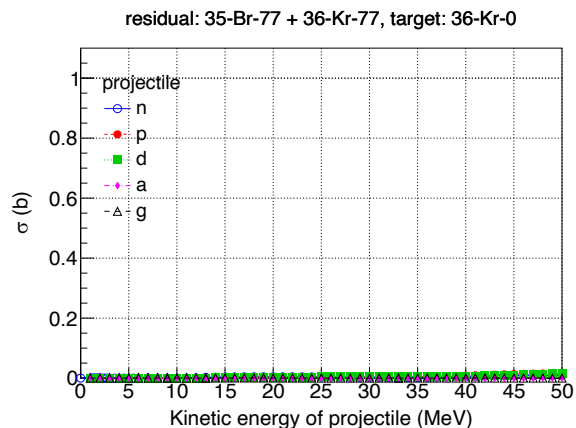
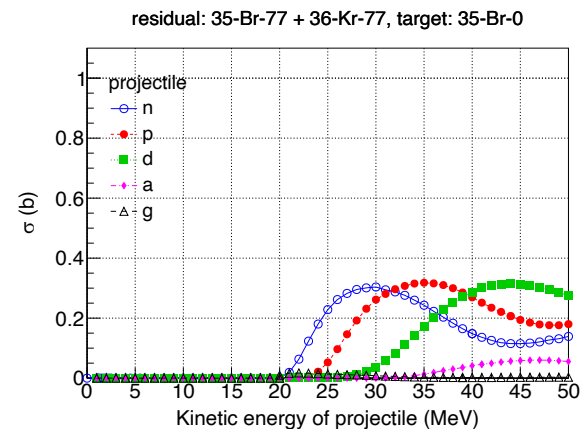
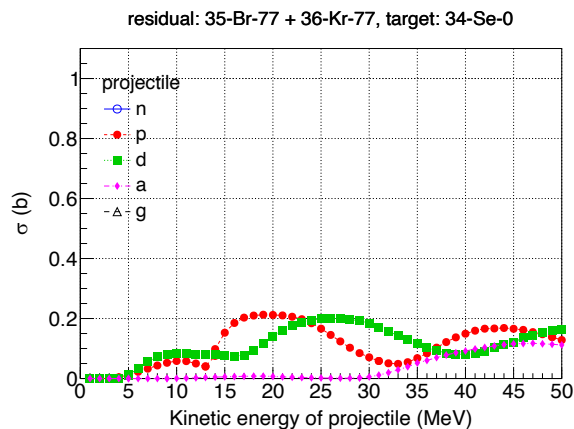
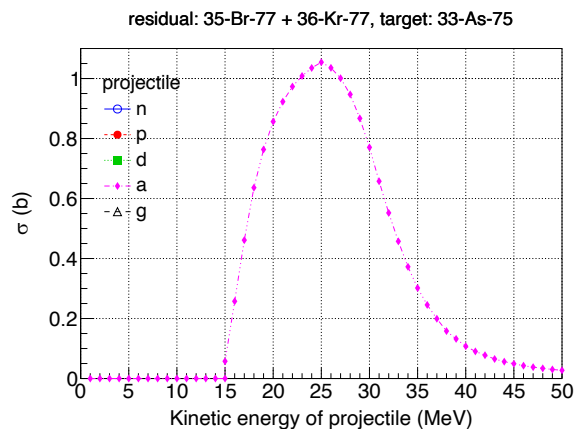


residual: 35-Br-77, target: 36-Kr-0



- 1 mb以上に絞る
→ ^{75}As , $^{\text{nat}}\text{Se}$, $^{\text{nat}}\text{Br}$, $^{\text{nat}}\text{Kr}$ が残った
- $\alpha + ^{75}\text{As} > n(\text{d or p}) + ^{\text{nat}}\text{Br}$
 $> p(\text{d}) + ^{\text{nat}}\text{Se}$
 → $\alpha + ^{75}\text{As}$ が良い？

$^{77}\text{Br} + ^{77}\text{Kr}$ (半減期1.24時間)

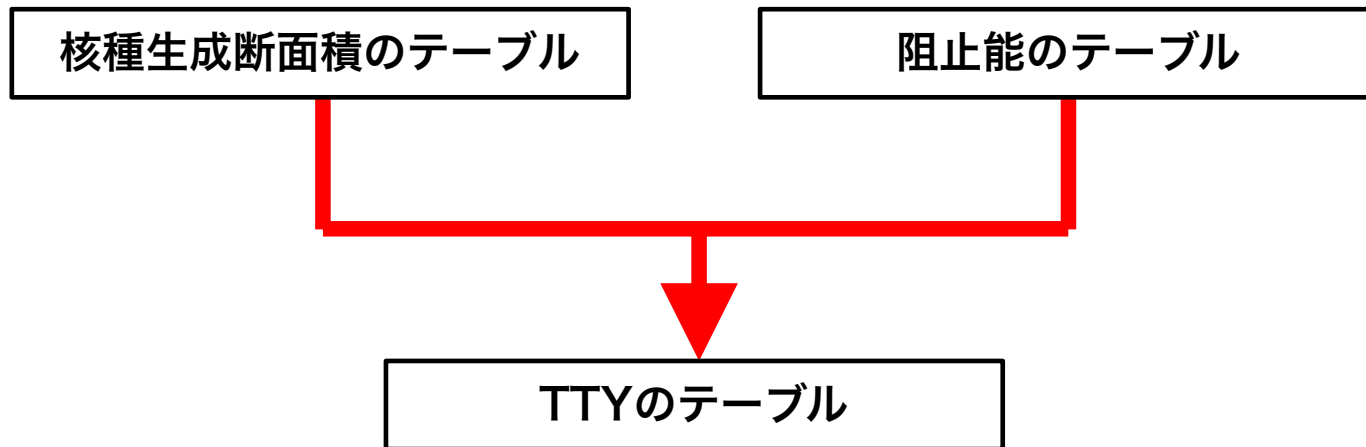


- $\alpha + ^{\text{nat}}\text{Se}$, $p(d) + ^{\text{nat}}\text{Br}$, $^{\text{nat}}\text{Kr}$ 関連の
 反応断面積が増加
 → $\alpha + ^{75}\text{As}$ には及ばない
 → 結局 $\alpha + ^{75}\text{As}$ が良い？

Thick Target Yield

- SRIM^[1](The **S**topping and **R**ange of **I**ons in **M**atter)を用いて
p, d, α の阻止能を計算
→ p, d, α に関してThick Target Yield^[2](TTY)を計算
→ **TTYが最大となる反応を確認**

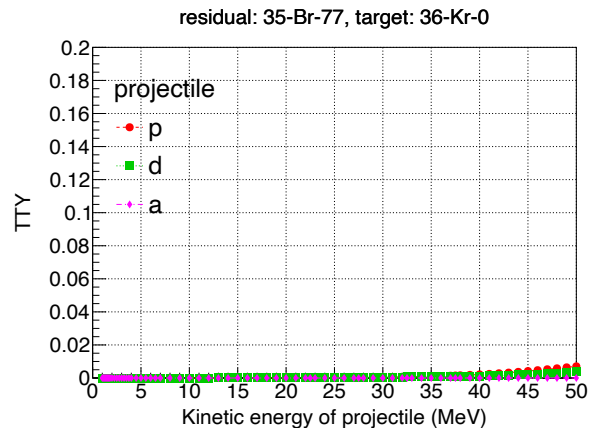
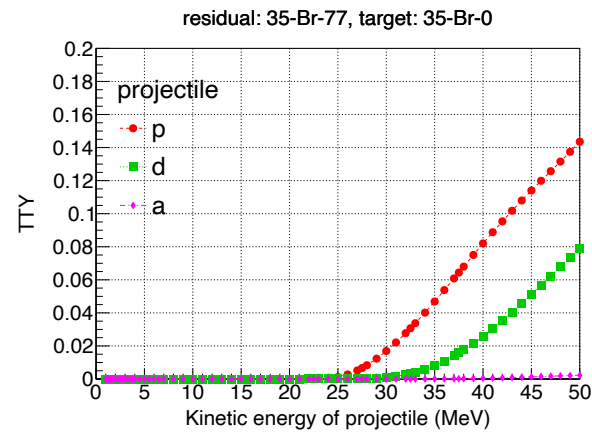
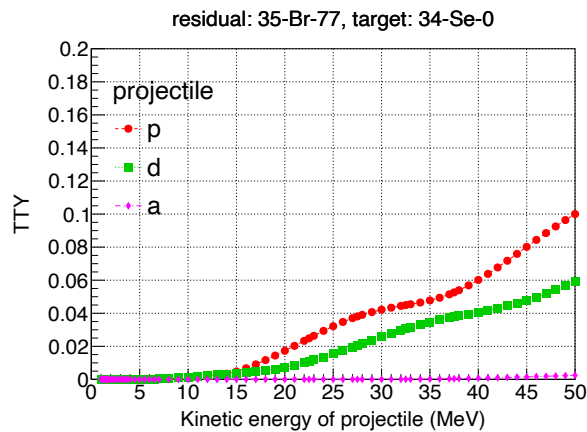
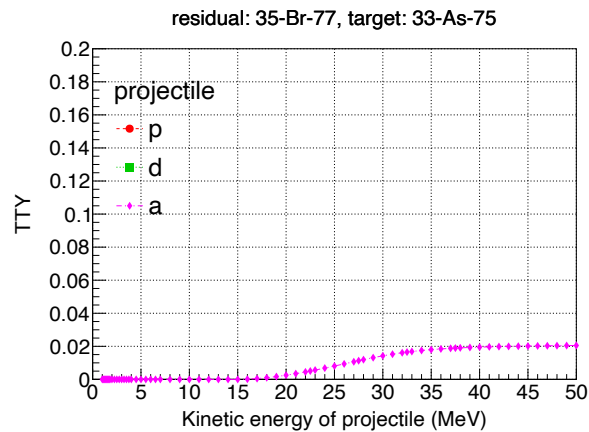
$$\text{TTY} = \int_{E_L}^{E_0} dE \left(-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right)^{-1} \sigma(E)/(Ze)$$



[1] J. F. Ziegler *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **268**, 1818 (2010)

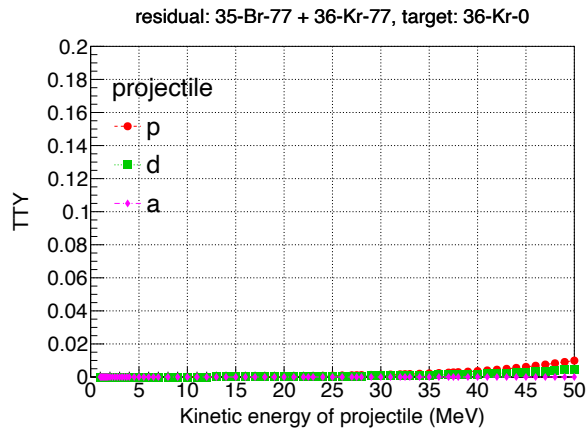
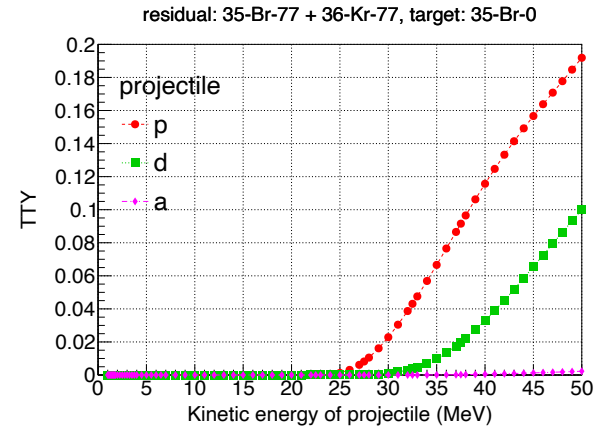
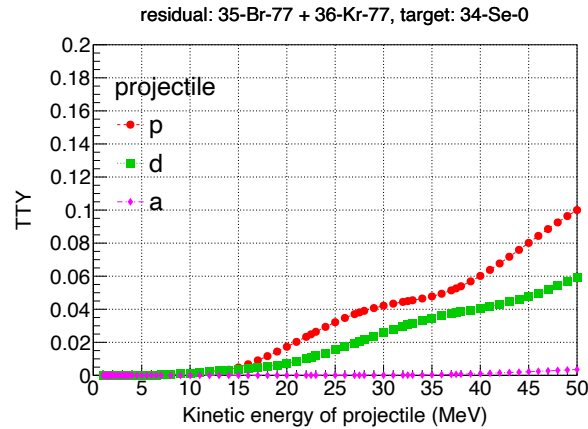
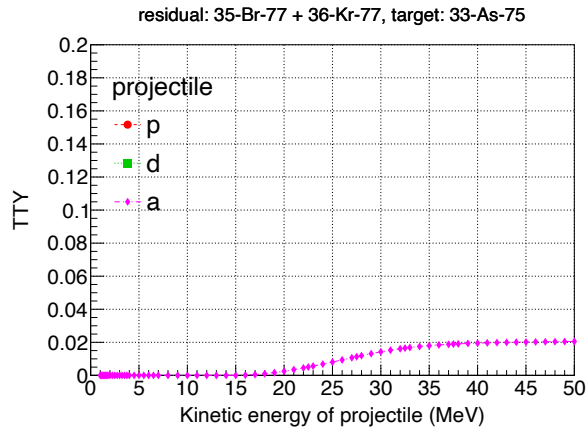
[2] N. Otuka and S. Takács, Radiochim. Acta **103**, 1 (2015)

^{77}Br 生成



- $p + {}^{\text{nat}}\text{Br} > p + {}^{\text{nat}}\text{Se}$
 $> d + {}^{\text{nat}}\text{Br}$
- ${}^{\text{nat}}\text{Br}$ 標的の場合は同位体分離が必要
 $\rightarrow$ (n, γ を除くと) $p + {}^{\text{nat}}\text{Se}$ が良い?

$^{77}\text{Br} + ^{77}\text{Kr}$ (半減期1.24時間)



- $\alpha + ^{\text{nat}}\text{Se}$, $p(d) + ^{\text{nat}}\text{Br}$, $^{\text{nat}}\text{Kr}$ 関連のTTYが増加
 - $p + ^{\text{nat}}\text{Br} > p + ^{\text{nat}}\text{Se}$
 $\sim d + ^{\text{nat}}\text{Br}$
- 結局 $p + ^{\text{nat}}\text{Se}$ が良い？

核種生成断面積とTTY

核種	核種生成断面積	TTY(n, γ を除く)
^{77}Br	$\alpha + ^{75}\text{As}$	$p + ^{\text{nat}}\text{Se}$
$^{77}\text{Br} + ^{77}\text{Kr}$	$\alpha + ^{75}\text{As}$	$p + ^{\text{nat}}\text{Se}$
^{71}Ge	$d + ^{\text{nat}}\text{Ga}$	$d + ^{\text{nat}}\text{Ga}$
^{97}Ru	$\alpha + ^{\text{nat}}\text{Mo}$	$\alpha + ^{\text{nat}}\text{Mo}, p + ^{103}\text{Rh}$
$^{97}\text{Ru} + ^{97}\text{Rh}$	$\alpha + ^{\text{nat}}\text{Mo}$	$\alpha + ^{\text{nat}}\text{Mo}, p + ^{103}\text{Rh}$
^{67}Ga	$\alpha + ^{\text{nat}}\text{Cu}, \alpha + ^{\text{nat}}\text{Zn}$	$p + ^{\text{nat}}\text{Zn}$
$^{67}\text{Ga} + ^{67}\text{Ge}$	$\alpha + ^{\text{nat}}\text{Zn}$	$p + ^{\text{nat}}\text{Zn}$
^{64}Cu	$n + ^{\text{nat}}\text{Zn}$	$d + ^{\text{nat}}\text{Zn}$
^{99}Mo	$n + ^{\text{nat}}\text{Mo}$	$p + ^{\text{nat}}\text{Mo}$
^{119}Sb	$d + ^{\text{nat}}\text{Sn}$	$p + ^{\text{nat}}\text{Sn}$

核種生成断面積とTTY

核種	核種生成断面積	TTY(n, γ を除く)
^{77}Br	$\alpha + ^{75}\text{As}$	$p + ^{\text{nat}}\text{Se}$
$^{77}\text{Br} + ^{77}\text{Kr}$	$\alpha + ^{75}\text{As}$	$p + ^{\text{nat}}\text{Se}$

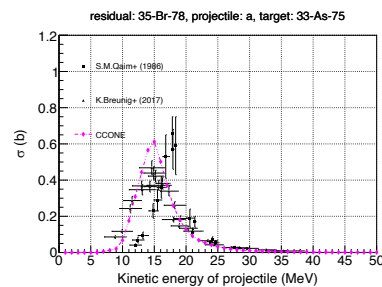
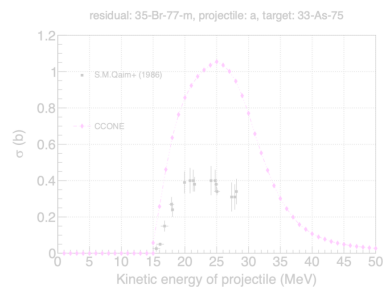
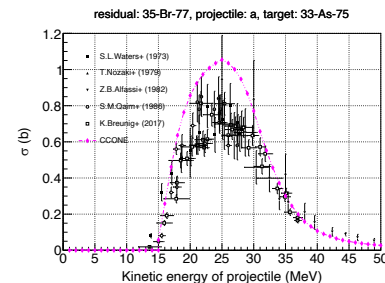
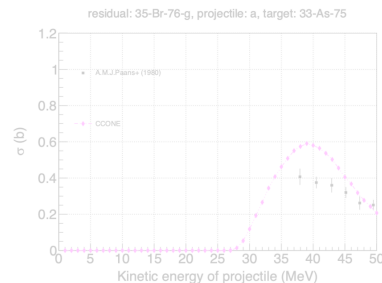
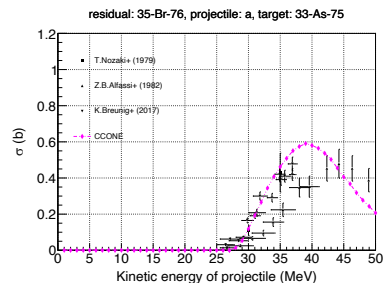
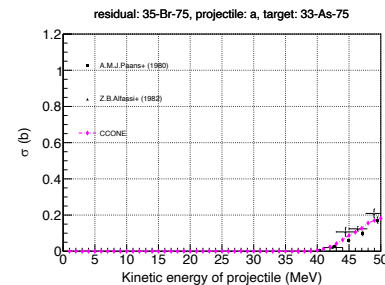
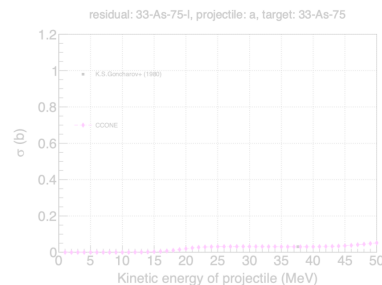
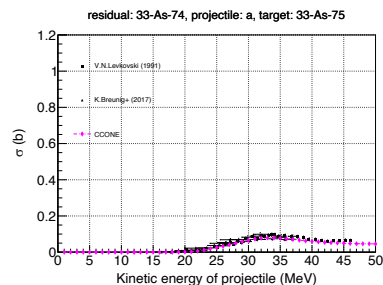
- ^{77}Br 以外の(欲しくない)核種はどれだけ混ざる？
- 核種生成断面積は実験値をどれだけ再現している？
 - $\alpha + ^{75}\text{As}$ と $p + ^{78}\text{Se}$ で生成されうる核種の生成断面積について
存在する実験値を全て(CCONEの計算結果と共に)確認
 - ※ 実験値はEXFOR*(核反応実験データベース)から取得

^{99}Mo	$n + ^{\text{nat}}\text{Mo}$	$p + ^{\text{nat}}\text{Mo}$
^{119}Sb	$d + ^{\text{nat}}\text{Sn}$	$p + ^{\text{nat}}\text{Sn}$

* <https://www-nds.iaea.org/cdroms/>

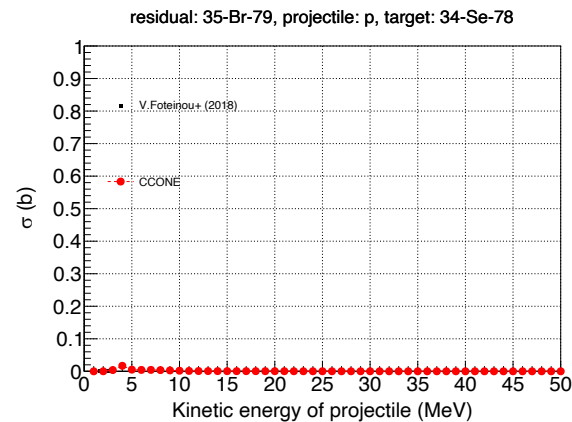
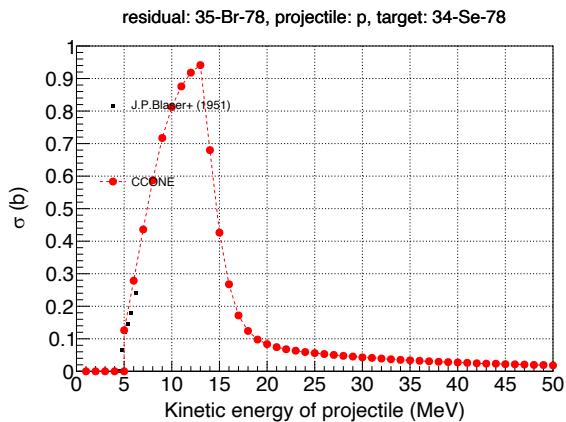
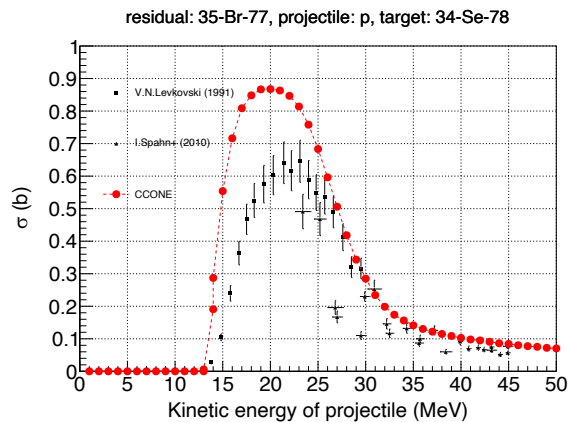
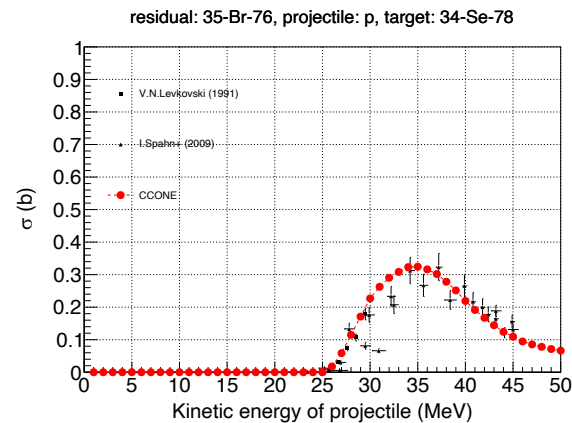
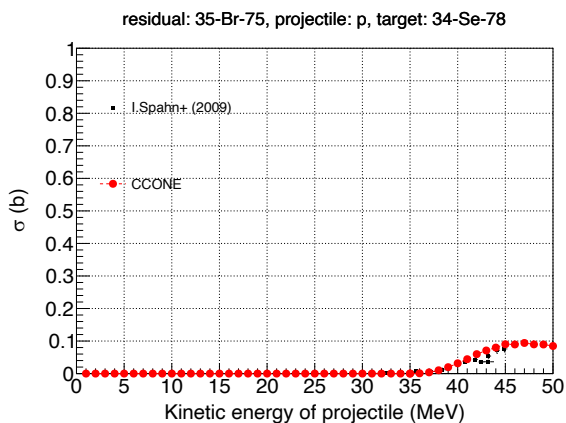
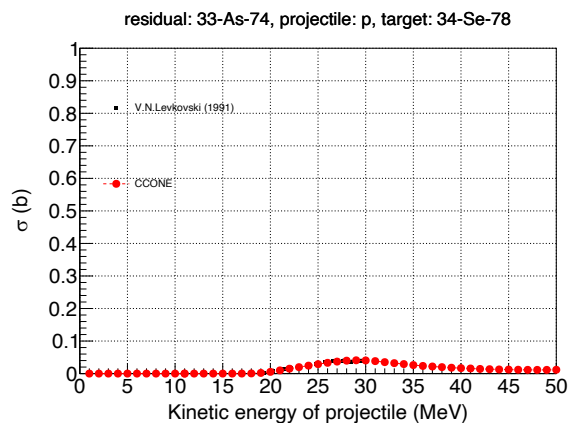
$\alpha + {}^{75}\text{As}$

- < 50 MeVで実験値が存在する核種は8個
(薄い図はCCONEの計算結果を正しく図示できていない → 要確認)
- 入射粒子エネルギーが25 MeVだと ${}^{78}\text{Br}$ (半減期6.45分)もある程度生成？



$p + {}^{78}\text{Se}$

- < 50 MeVで実験値が存在する核種は6個
- 入射粒子エネルギーが20 MeVだと ${}^{78}\text{Br}$ (半減期6.45分)もある程度生成？



今後の予定

- カイ二乗の計算
 - 実験値との整合性の定量的な評価
- 他ライブラリ(JENDL, TENDL, ENDF, JEFFなど)との比較
 - どの物理モデルが実験値をより再現するか確認
- TTYの時間変化
 - ビーム照射時間の最適化
- 入射粒子が n, γ の時のTTY
- CCONEのパラメータ調整

まとめ

- TOMOEプロジェクト：
精緻な実験に基づく核力から新しい科学の展開を目指すプロジェクト
- オージェ電子放出核種の中で実用上最適な核種やその生成法が未確立
→ CCONEベースで核種生成断面積やTTYが最大となる反応を確認
(e.g.) ^{77}Br 生成
核種生成断面積： $\alpha + ^{75}\text{As}$
TTY： $p + ^{\text{nat}}\text{Se}$
- 生成されうる核種の生成断面積について存在する実験値を全て
(CCONEの計算結果と共に)確認
(e.g.) ^{77}Br 生成
 $\alpha(25 \text{ MeV}) + ^{75}\text{As} \rightarrow ^{78}\text{Br}$ もある程度生成？
 $p(20 \text{ MeV}) + ^{78}\text{Se} \rightarrow ^{78}\text{Br}$ もある程度生成？

バックアップ

核力ポテンシャルの種類

二体核力ポテンシャル

- アルゴンヌ v_{18} 型 (AV18 型)
- CD Bonn 型
- ナイメヘン I, II 型

三体核力ポテンシャル

- 藤田・宮沢 型
- ツーソン・メルボルン (カレント代数 + PCAC) 型 (TM 型)
- アルバナ IX (藤田・宮沢 + 現象論的短距離力) 型 (UR 型)
- ブラジル (カイラル対称性 + current algebra) 型
- テキサス (カイラル対称性) 型
- ルール (非カイラル対称性) 型
- イリノイ 型

束縛系での三体核力

軽核の束縛エネルギー

- ハミルトニアン
= 運動エネルギー + 二体核力ポテンシャル + 三体核力ポテンシャル

$$H = \sum_i -\frac{\hbar^2}{2m_i} \nabla_i^2 + \sum_{i<j} v_{ij} + \sum_{i<j<k} V_{ijk}$$

- アルゴンヌ v_{18} 型二体核力ポテンシャル
= 1π 交換項(v_{ij}^π) + その他全ての強い相互作用項(v_{ij}^R) + 電磁相互作用項(v_{ij}^γ)

$$v_{ij} = v_{ij}^\pi + v_{ij}^R + v_{ij}^\gamma$$

- v_{ij} を18個の演算子の和で表す

$$v_{ij} = \sum_{p=1}^{18} v_p(r_{ij}) O_{ij}^p$$

S. C. Pieper *et al.*, Phys. Rev. C **64**, 014001 (2001)

束縛系での三体核力

$$v_{ij} = \sum_{p=1}^{18} v_p(r_{ij}) O_{ij}^p$$

$v_p(r_{ij})$: 演算子ポテンシャル項 (核子間距離のみに依存)

$O_{ij}^{p=1,6} = (1, \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j, S_{ij}) \otimes (1, \boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j)$ (核子速度に依存しない)

$O_{ij}^{p=7,8} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} \otimes (1, \boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j)$ (核子速度に線形に依存)

$O_{ij}^{p=9,14} = [L^2, L^2 \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j, (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})^2] \otimes (1, \boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j)$ (核子速度に二次関数的に依存)

$O_{ij}^{p=15,18} = T_{ij}, (\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j) T_{ij}, S_{ij} T_{ij}, \boldsymbol{\tau}_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_{ij} + \boldsymbol{\tau}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}_{ij}$

$\boldsymbol{\sigma}$: スピン $\boldsymbol{\tau}$: アイソスピン

$\mathbf{L}$: 相対軌道角運動量 $\mathbf{S}$: 全スピン

$\hat{\mathbf{r}}_{ij}$: 核子間の単位距離ベクトル

$S_{ij} = 3(\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_{ij})(\boldsymbol{\sigma}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}_{ij}) - \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j$: テンソル演算子

$T_{ij} = 3(\boldsymbol{\tau}_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_{ij})(\boldsymbol{\tau}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}_{ij}) - \boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j$: アイソテンソル演算子

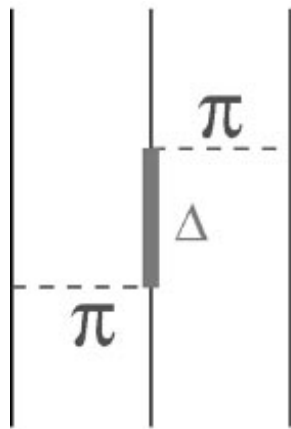
S. C. Pieper *et al.*, Phys. Rev. C **64**, 014001 (2001)

束縛系での三体核力

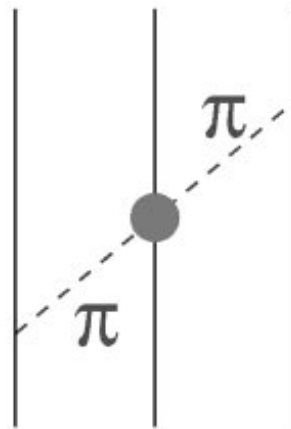
- イリノイ型三体核力ポテンシャル

= 藤田・宮沢項($V^{2\pi, PW}$) + S波(相対軌道角運動量0)型 2π 交換項($V^{2\pi, SW}$)
+ 3π 交換項($V^{3\pi, \Delta R}$) + その他全ての三体核力項(V^R)

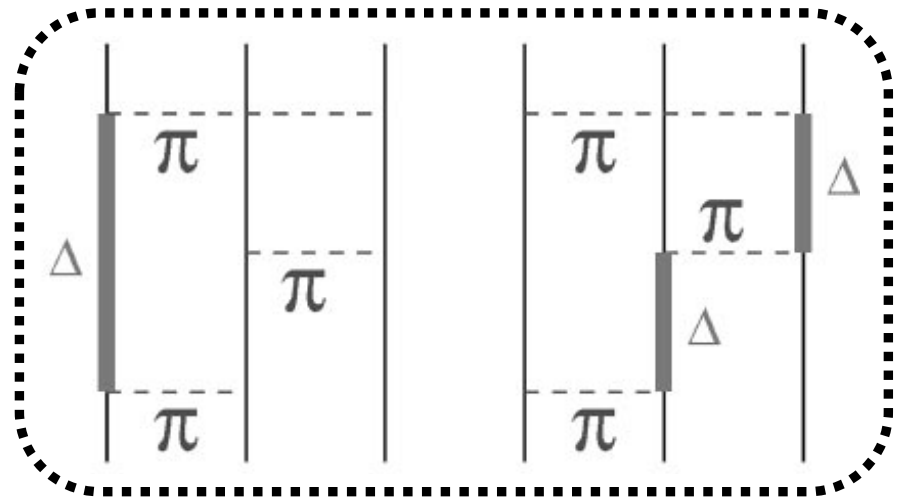
$$V_{ijk} = V^{2\pi, PW} + V^{2\pi, SW} + V^{3\pi, \Delta R} + V^R$$



$V^{2\pi, PW}$



$V^{2\pi, SW}$



$V^{3\pi, \Delta R}$

S. C. Pieper *et al.*, Phys. Rev. C **64**, 014001 (2001)

束縛系での三体核力

中性子星の質量

- 状態方程式の種類

TABLE 1
EQUATIONS OF STATE

Symbol	Reference	Approach	Composition
FP	Friedman & Pandharipande (1981)	Variational	np
PS	Pandharipande & Smith (1975)	Potential	$n\pi^0$
WFF(1-3)	Wiringa, Fiks & Fabrocine (1988)	Variational	np
AP(1-4)	Akmal & Pandharipande (1997)	Variational	np
MS(1-3)	Müller & Serot (1996)	Field theoretical	np
MPA(1-2)	Müther, Prakash, & Ainsworth (1987)	Dirac-Brueckner HF	np
ENG	Engvik et al. (1996)	Dirac-Brueckner HF	np
PAL(1-6)	Prakash et al. (1988)	Schematic potential	np
GM(1-3)	Glendenning & Moszkowski (1991)	Field theoretical	npH
GS(1-2)	Glendenning & Schaffner-Bielich (1999)	Field theoretical	npK
PCL(1-2)	Prakash, Cooke, & Lattimer (1995)	Field theoretical	$npHQ$
SQM(1-3)	Prakash et al. (1995)	Quark matter	$Q(u, d, s)$

NOTE.—“Approach” refers to the underlying theoretical technique. “Composition” refers to strongly interacting components (n = neutron, p = proton, H = hyperon, K = kaon, Q = quark); all models include leptonic contributions.

J. M. Lattimer and M. Prakash, *Astrophys. J.* **550**, 426 (2001)

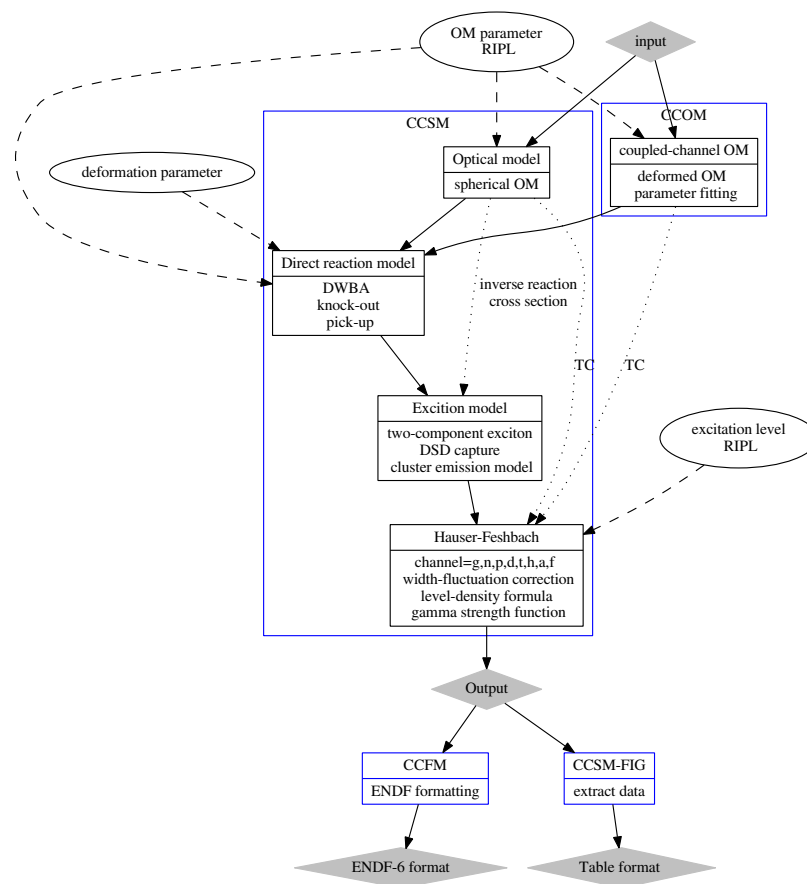
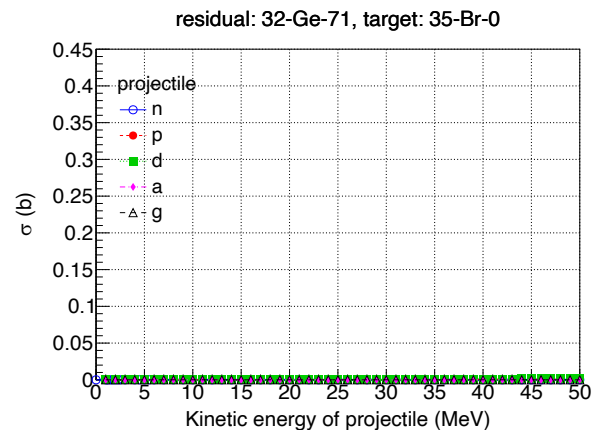
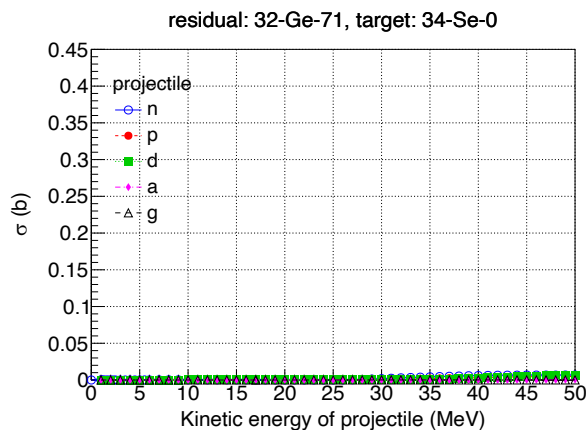
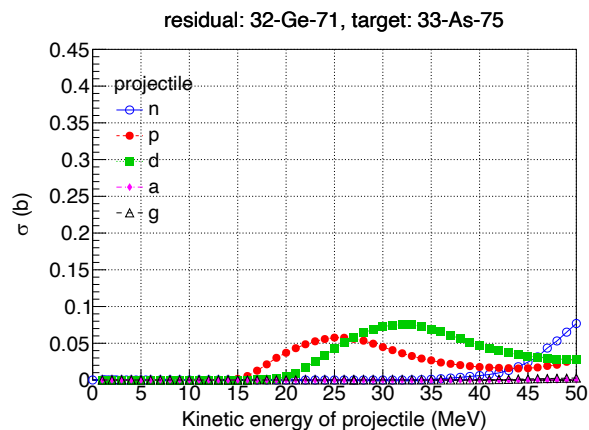
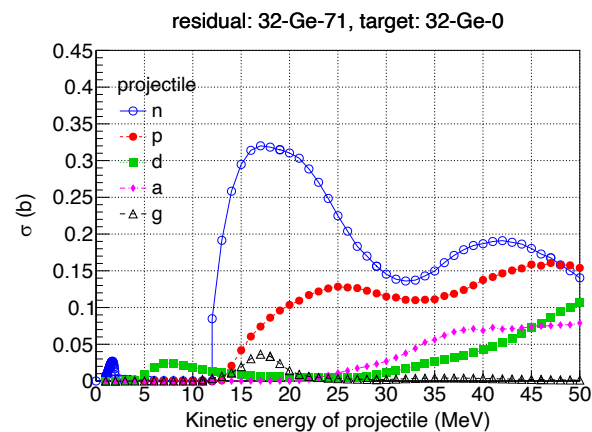
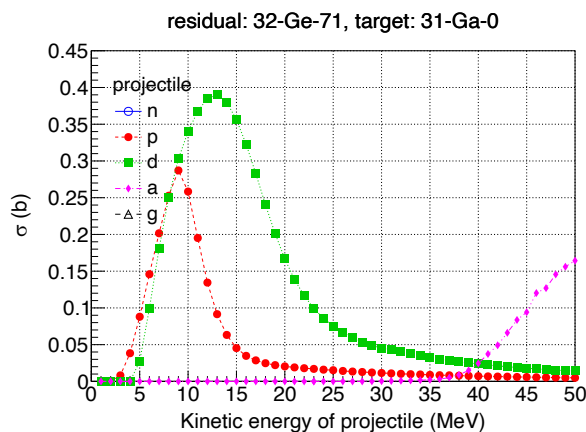
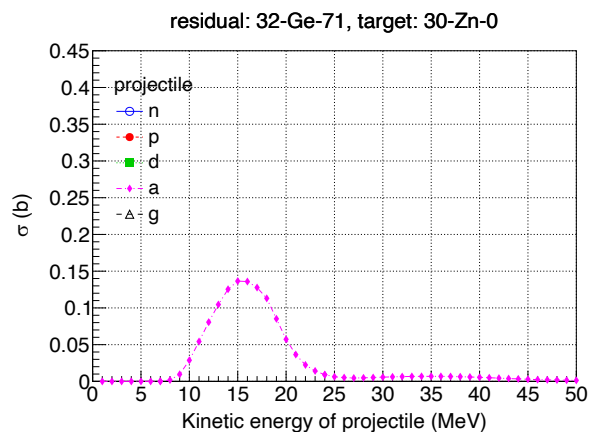


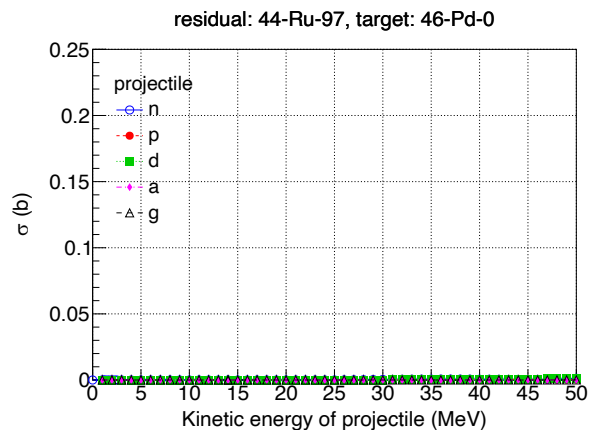
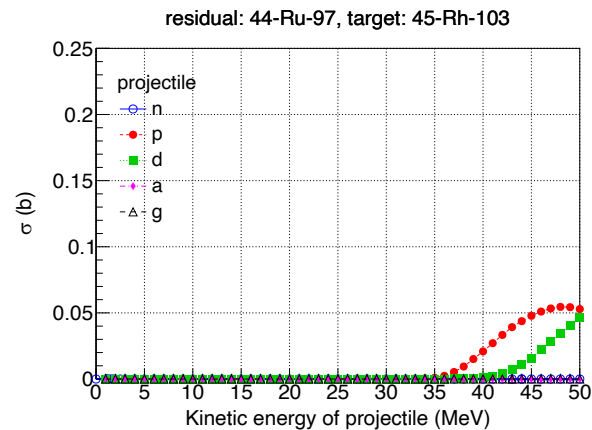
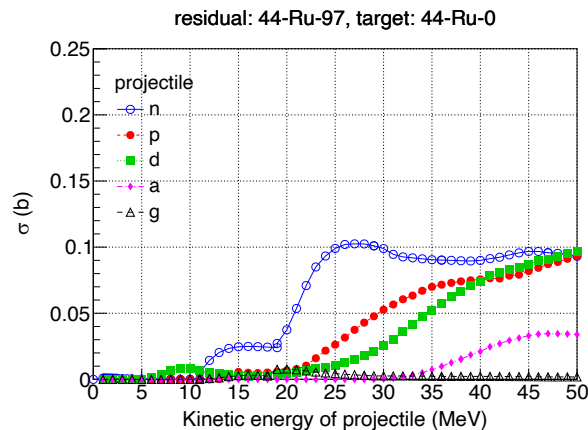
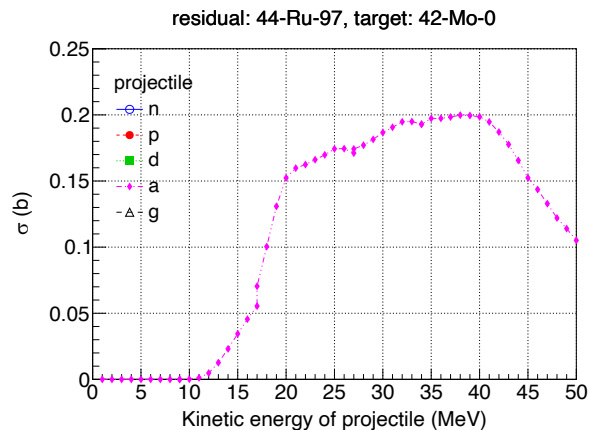
FIG. 1. (Color online) Flow of calculation in the CCONE code system. Blue boxes show the independent programs including the modules (black boxes) of the reaction modelings. Their calculation flows are indicated by arrows with solid lines. Circles mean databases. Arrows with dashed and dotted lines represent the flows of the data which come from the databases and the calculations, respectively. TC stands for transmission coefficient.

^{71}Ge 生成



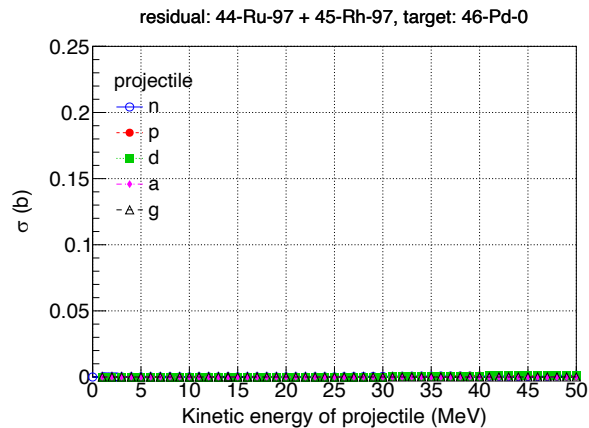
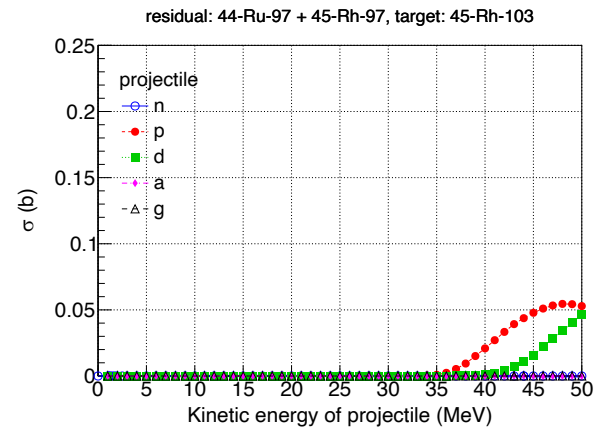
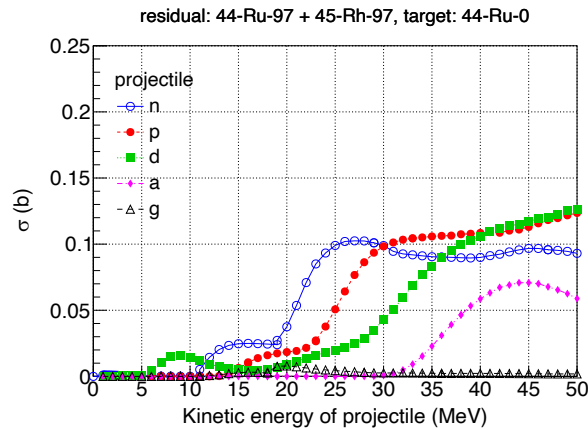
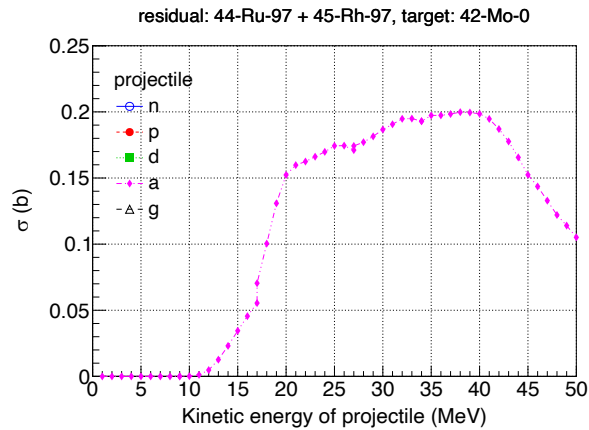
- 1 mb以上に絞る $\rightarrow$ $^{\text{nat}}\text{Zn}$, $^{\text{nat}}\text{Ga}$, $^{\text{nat}}\text{Ge}$, ^{75}As , $^{\text{nat}}\text{Se}$, $^{\text{nat}}\text{Br}$ が残った
- $d + ^{\text{nat}}\text{Ga} > n + ^{\text{nat}}\text{Ge} > p + ^{\text{nat}}\text{Ga}$
 $\rightarrow$ $d + ^{\text{nat}}\text{Ga}$ が良い？

^{97}Ru 生成



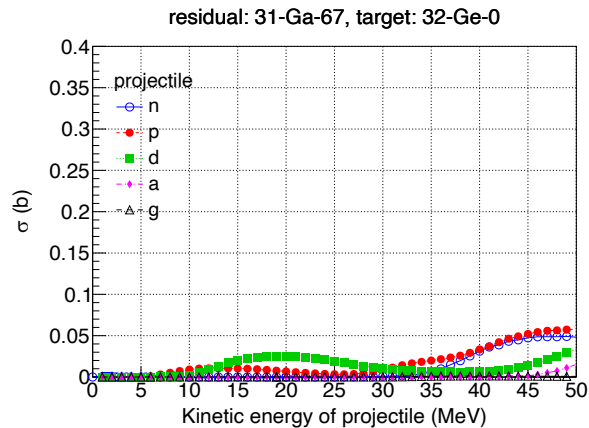
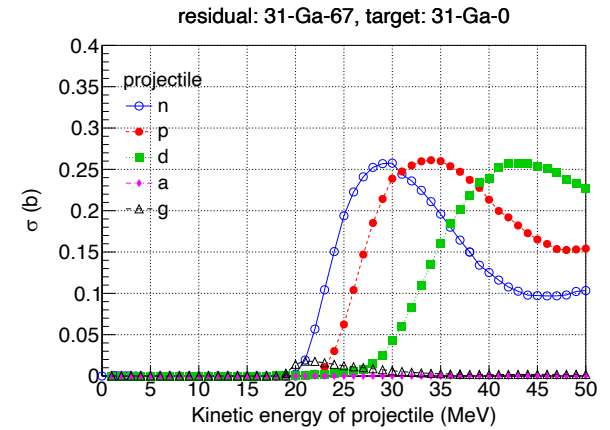
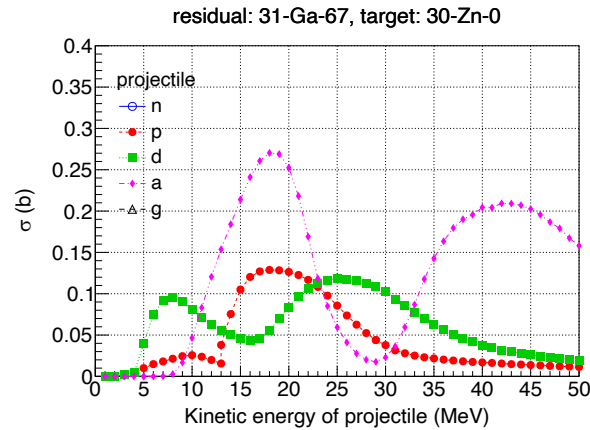
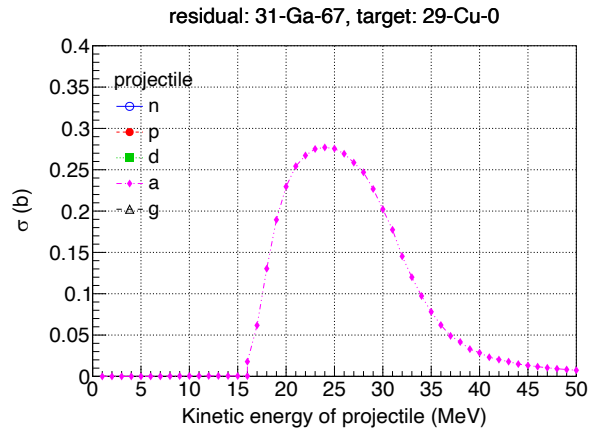
- 1 mb以上に絞る
→ $^{\text{nat}}\text{Mo}$, $^{\text{nat}}\text{Ru}$, ^{103}Rh , $^{\text{nat}}\text{Pd}$ が残った
- $\alpha + ^{\text{nat}}\text{Mo} > n(d \text{ or } p) + ^{\text{nat}}\text{Ru}$
→ $\alpha + ^{\text{nat}}\text{Mo}$ が良い？

$^{97}\text{Ru} + ^{97}\text{Rh}$



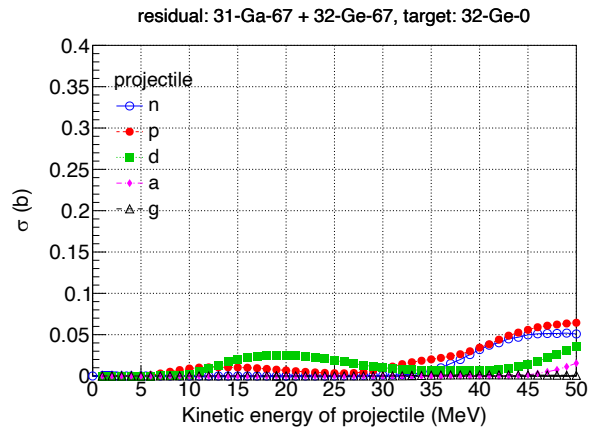
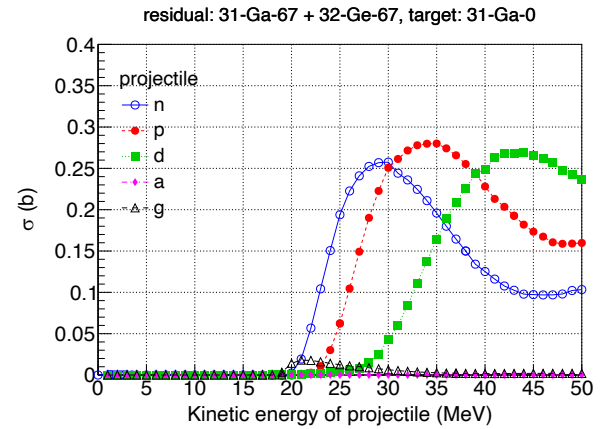
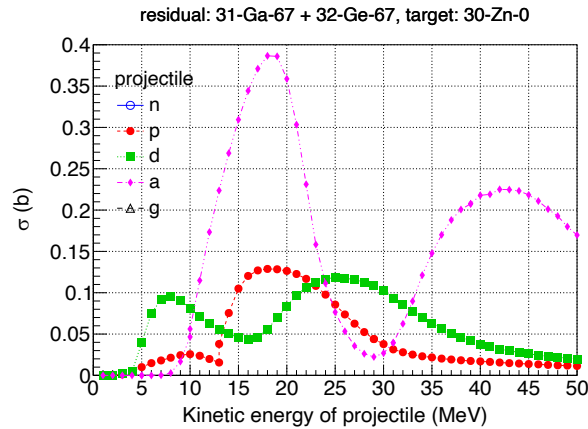
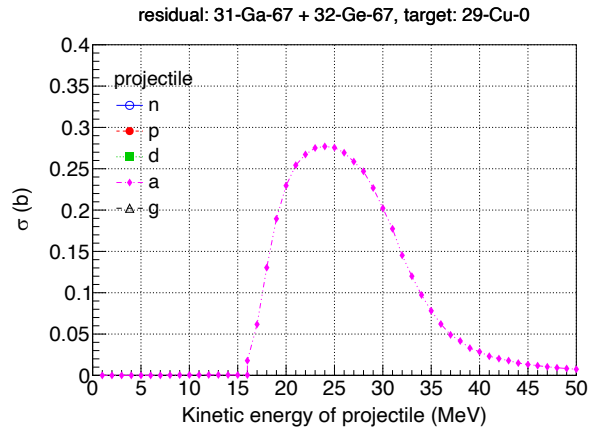
- $^{97\text{m}}\text{Rh}$ (半減期46.2分)
- $^{97\text{g}}\text{Rh}$ (半減期30.7分)
- $p(d \text{ or } \alpha) + ^{\text{nat}}\text{Ru}$, $p(d) + ^{\text{nat}}\text{Pd}$ の
反応断面積が増加
- $\alpha + ^{\text{nat}}\text{Mo} > d(p \text{ or } n) + ^{\text{nat}}\text{Ru}$
→ 結局 $\alpha + ^{\text{nat}}\text{Mo}$ が良い？

^{67}Ga 生成



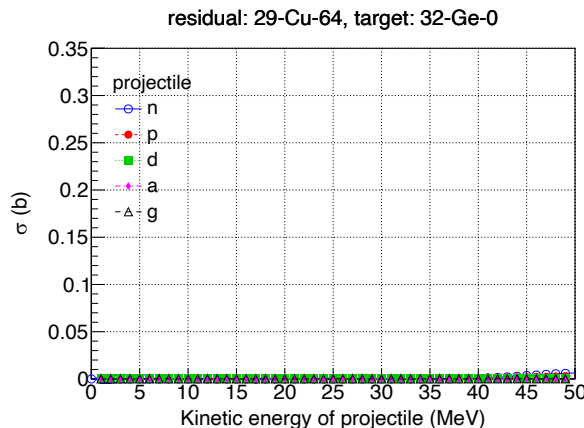
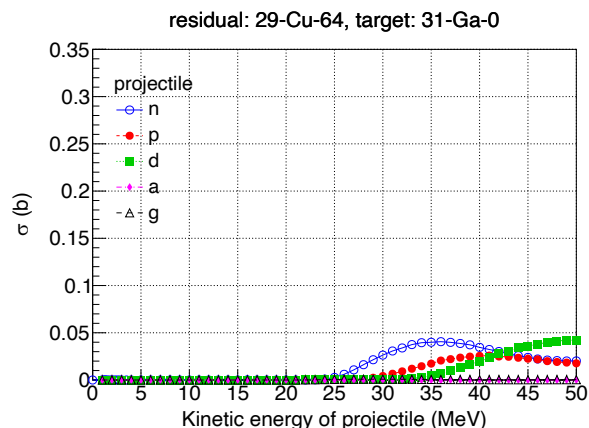
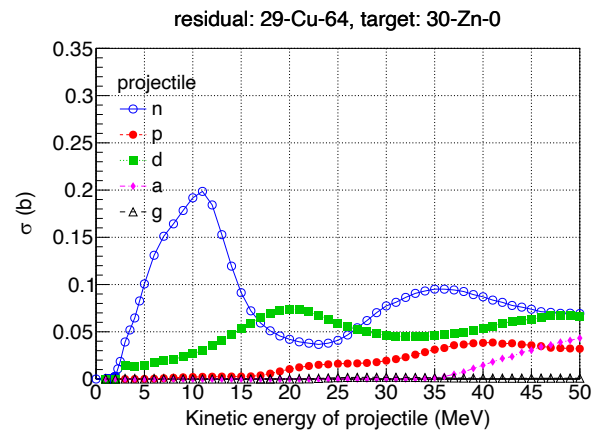
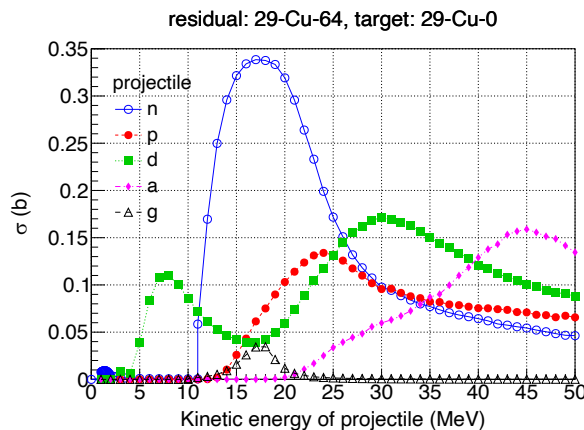
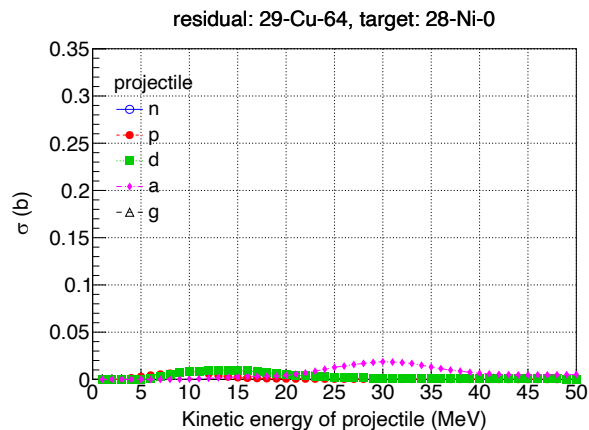
- 1 mb以上に絞る
→ natCu, natZn, natGa, natGeが残った
- $\alpha + \text{natCu} \gtrsim \alpha + \text{natZn}$
 $\gtrsim p(\text{n or d}) + \text{natGa}$
- natGa標的の場合は同位体分離が必要
→ $\alpha + \text{natCu}$, $\alpha + \text{natZn}$ が良い?

$^{67}\text{Ga} + ^{67}\text{Ge}$ (半減期18.9分)



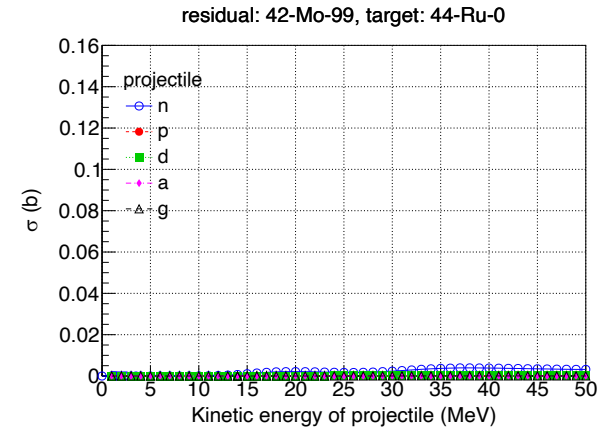
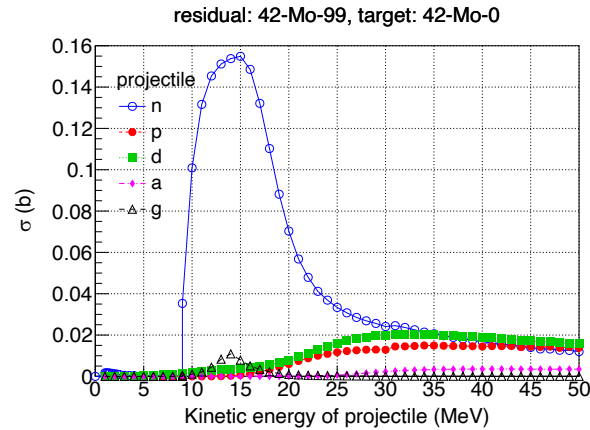
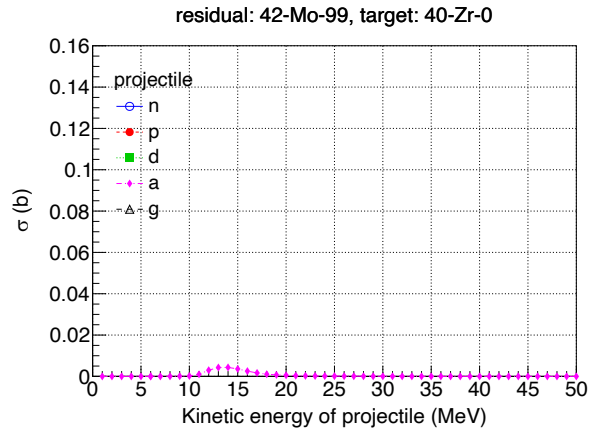
- $\alpha + {}^{\text{nat}}\text{Zn}$, $p(d) + {}^{\text{nat}}\text{Ga}$, $p(n \text{ or } d) + {}^{\text{nat}}\text{Ge}$ の
反応断面積が増加
- $\alpha + {}^{\text{nat}}\text{Zn} > \alpha + {}^{\text{nat}}\text{Cu}$
 $\sim p(d \text{ or } n) + {}^{\text{nat}}\text{Ga}$
 $\rightarrow \alpha + {}^{\text{nat}}\text{Zn}$ が良い？

^{64}Cu 生成



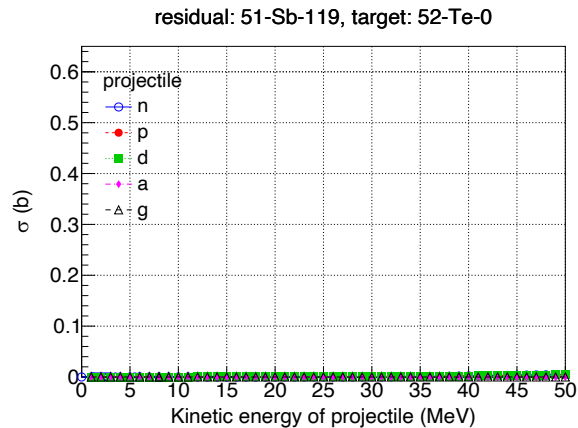
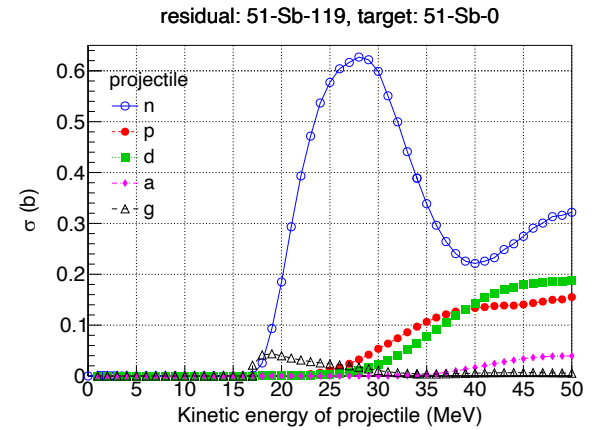
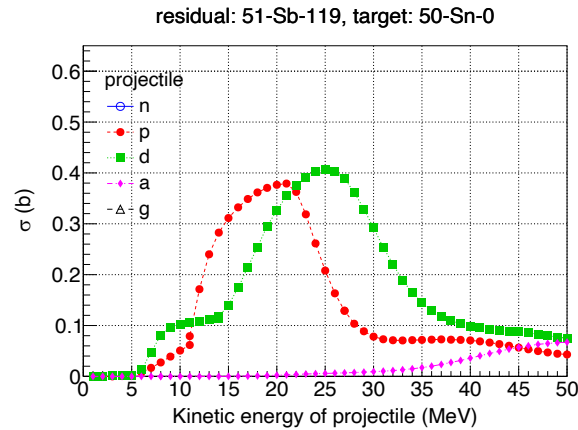
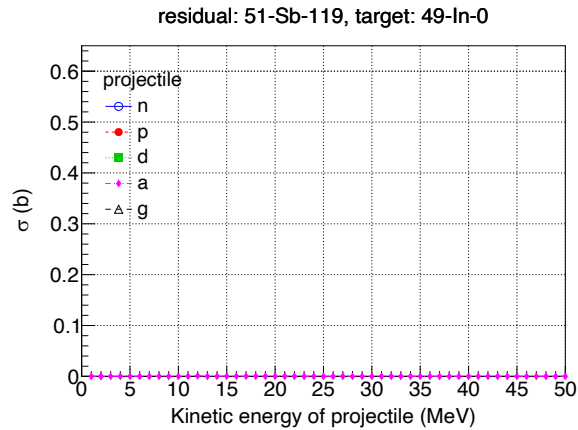
- 1 mb以上に絞る $\rightarrow$ $^{\text{nat}}\text{Ni}$, $^{\text{nat}}\text{Cu}$, $^{\text{nat}}\text{Zn}$, $^{\text{nat}}\text{Ga}$, $^{\text{nat}}\text{Ge}$ が残った
- $n + ^{\text{nat}}\text{Cu} > n + ^{\text{nat}}\text{Zn}$
 $> d + ^{\text{nat}}\text{Cu}$
- $^{\text{nat}}\text{Cu}$ 標的の場合は同位体分離が必要
 $\rightarrow$ $n + ^{\text{nat}}\text{Zn}$ が良い?

^{99}Mo 生成



- 1 mb以上に絞る
→ natZr , natMo , natRu が残った
- $n + \text{natMo} > d(\text{p or } \gamma) + \text{natMo}$
 $> \alpha + \text{natZr}$
 → $n + \text{natMo}$ が良い？

^{119}Sb 生成



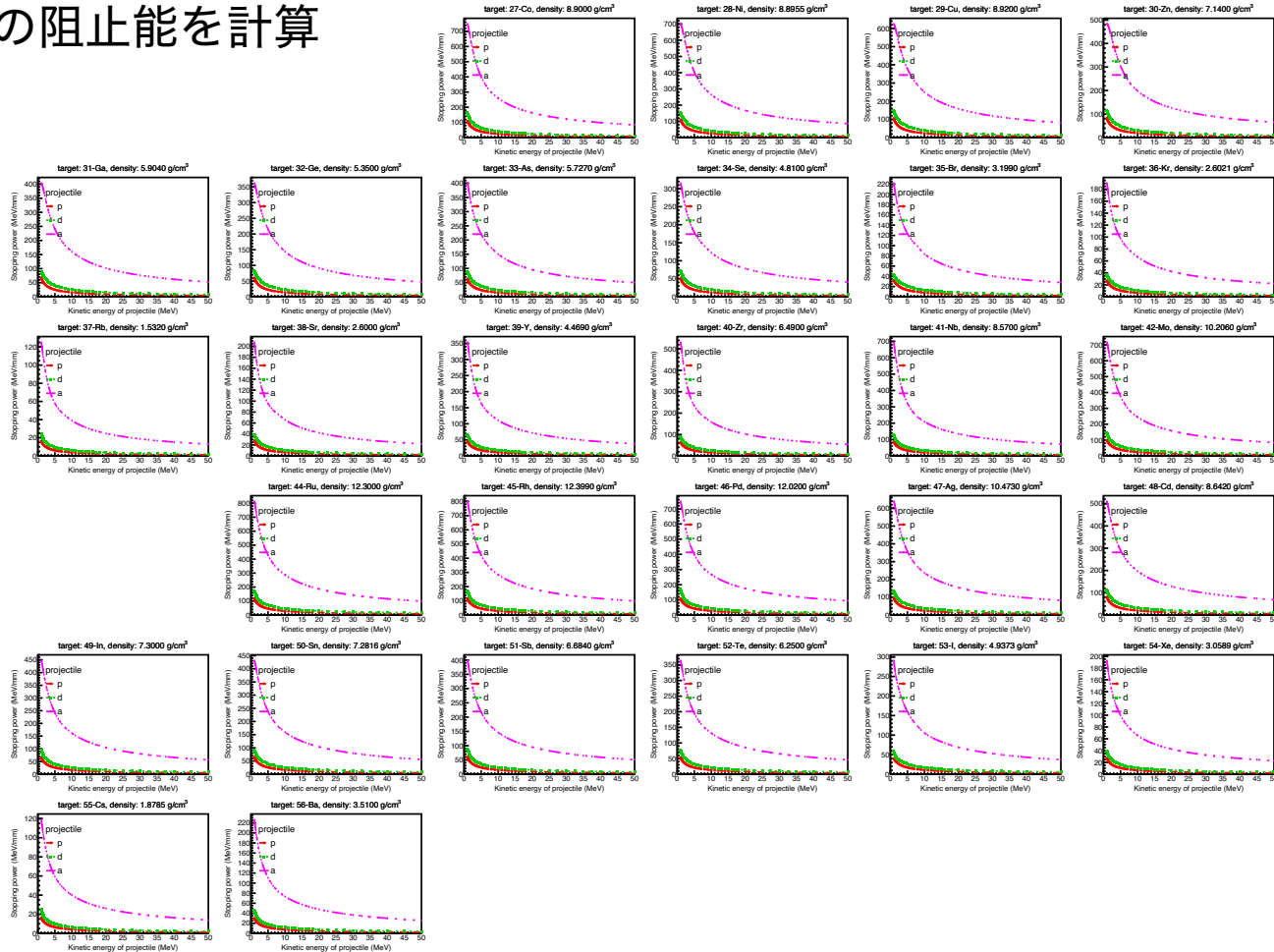
- 1 mb以上に絞る
→ natIn , natSn , natSb , natTe が残った
- $n + \text{natSb} > d + \text{natSn}$
 $> p + \text{natSn}$
- natSb 標的の場合は同位体分離が必要
→ $d + \text{natSn}$ が良い？

阻止能

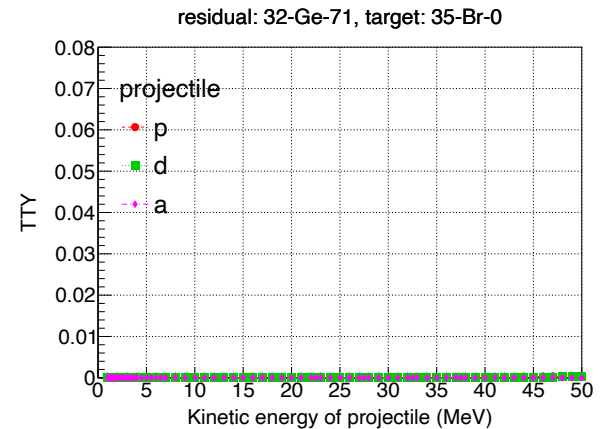
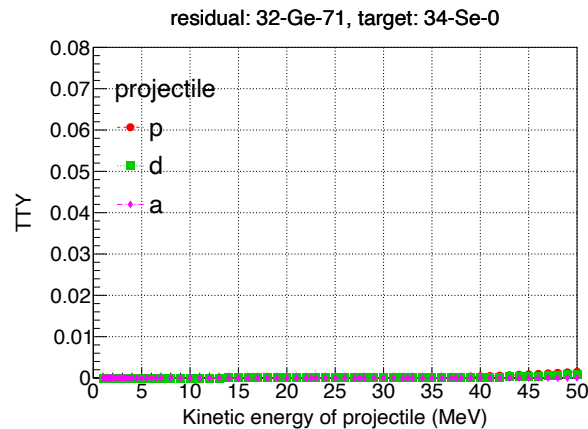
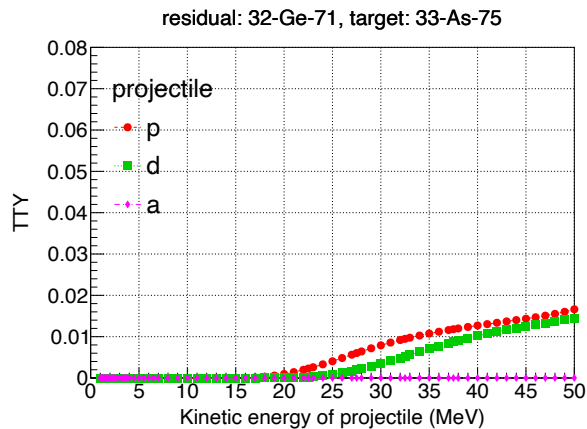
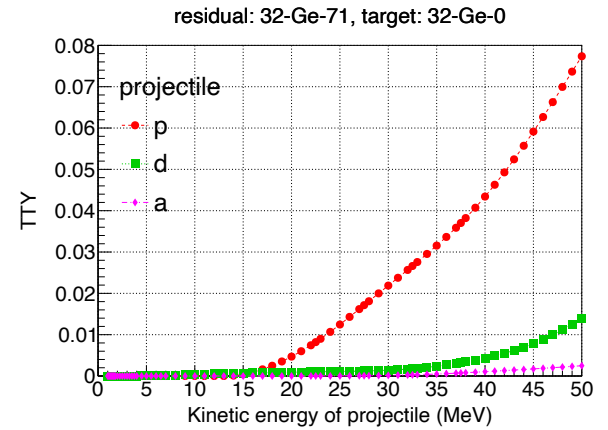
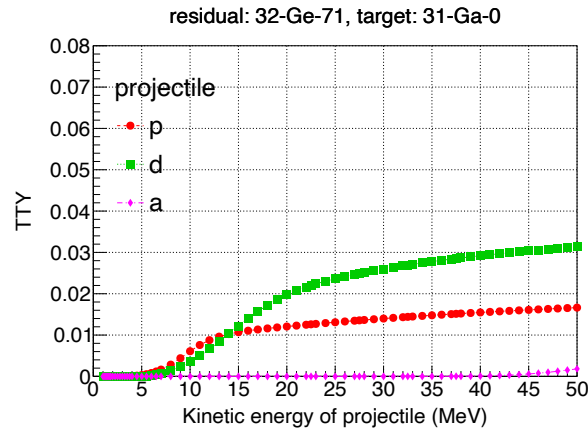
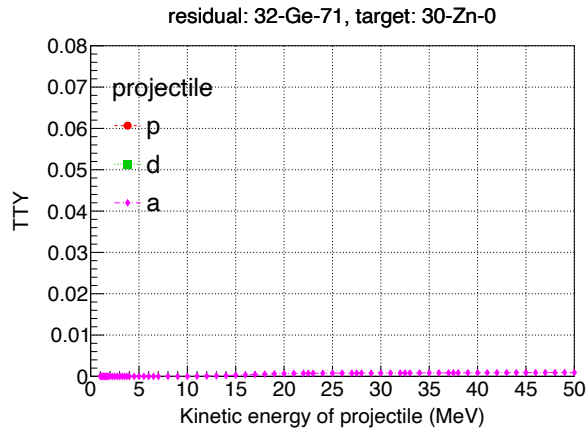
- SRIM(The **S**topping and **R**ange of **I**ons in **M**atter)を用いて

p, d, α の阻止能を計算

projectile	mass [amu]
p	1.008
d	2.014
α	4.003



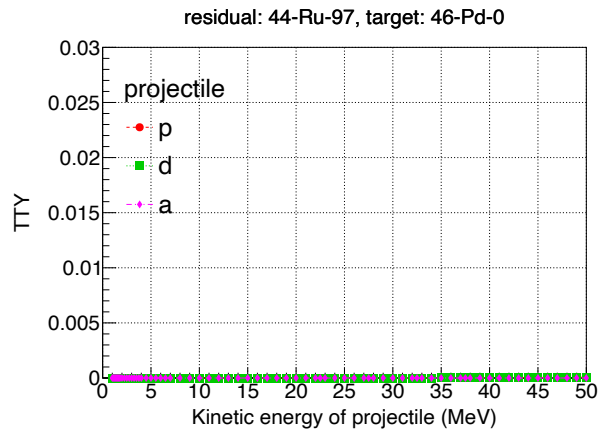
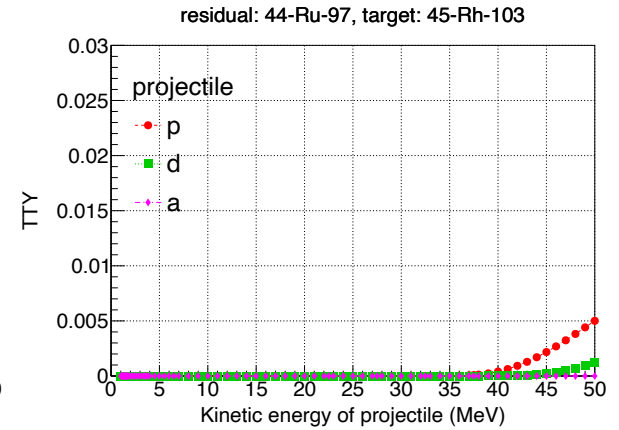
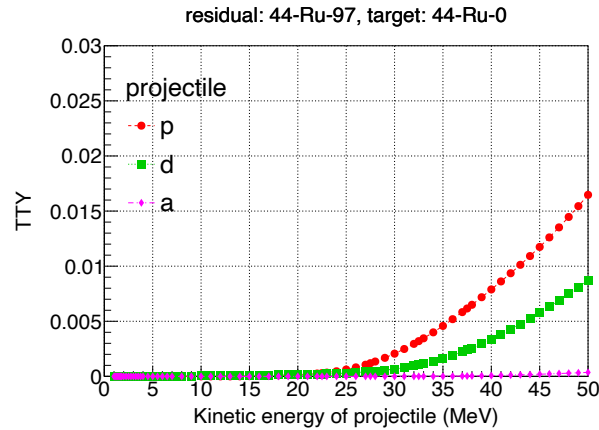
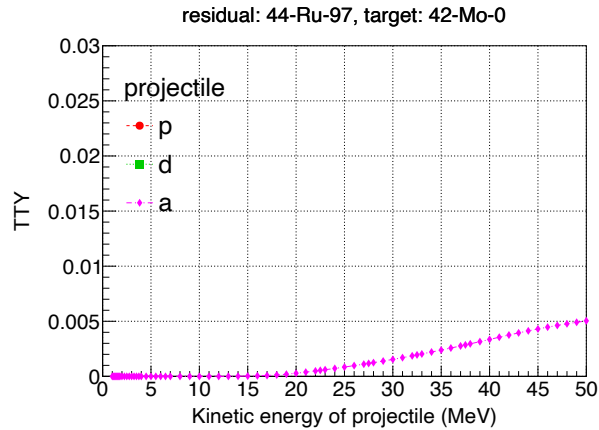
71Ge生成



- $p + {}^{\text{nat}}\text{Ge} > d + {}^{\text{nat}}\text{Ga}$
 $> p + {}^{\text{nat}}\text{Ga}$

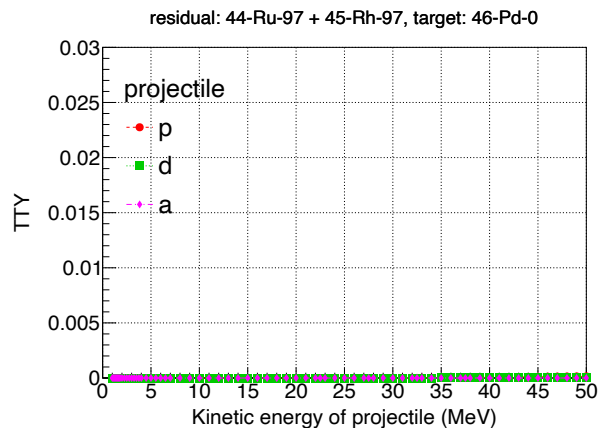
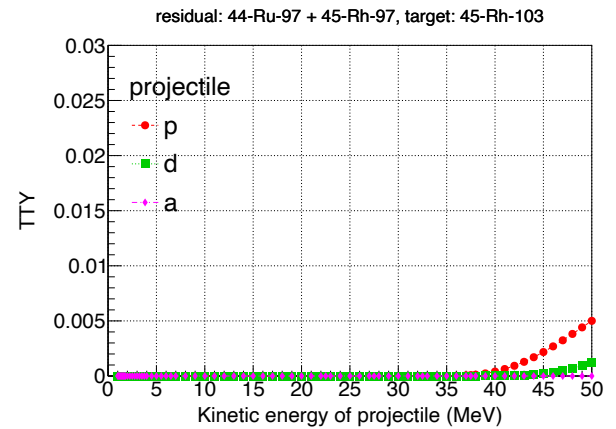
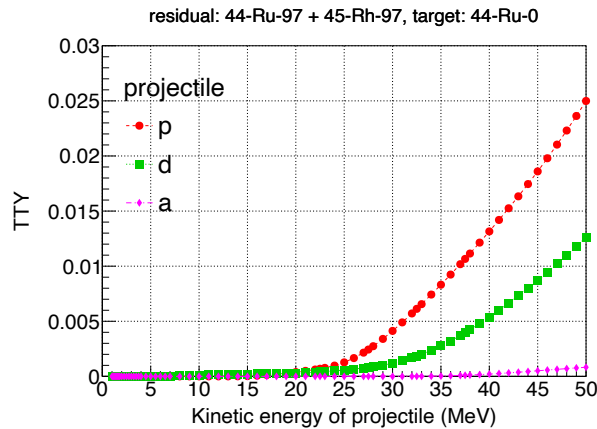
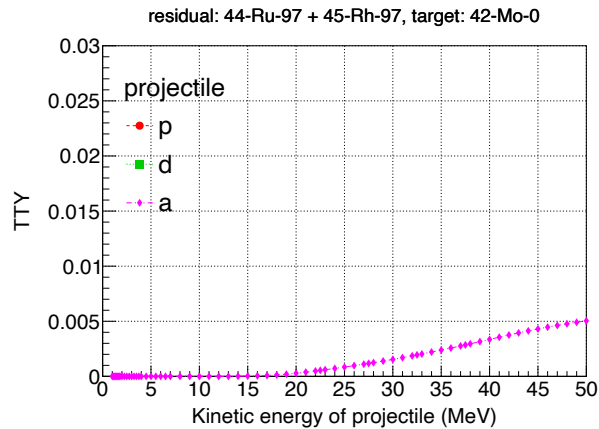
- ${}^{\text{nat}}\text{Ge}$ 標的の場合は同位体分離が必要
 $\rightarrow (n, \gamma \text{を除くと}) d + {}^{\text{nat}}\text{Ga}$ が良い?

^{97}Ru 生成



- $p + {}^{\text{nat}}\text{Ru} > d + {}^{\text{nat}}\text{Ru}$
 $> \alpha + {}^{\text{nat}}\text{Mo}$
 $\sim p + {}^{103}\text{Rh}$
- ${}^{\text{nat}}\text{Ru}$ 標的の場合は同位体分離が必要
 $\rightarrow (n, \gamma \text{を除くと}) \alpha + {}^{\text{nat}}\text{Mo}, p + {}^{103}\text{Rh}$ が良い?

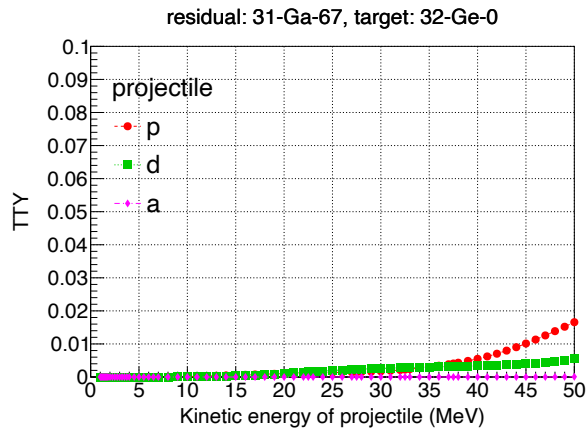
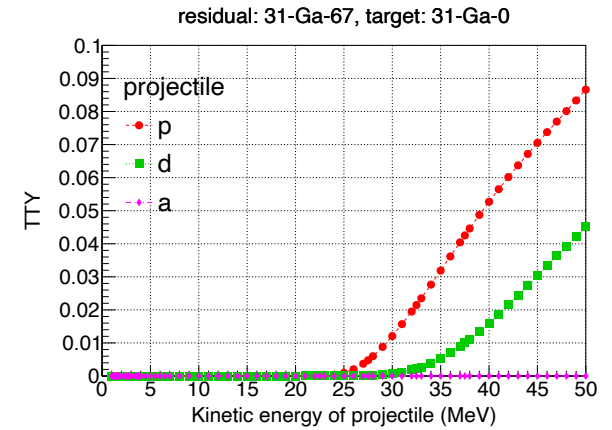
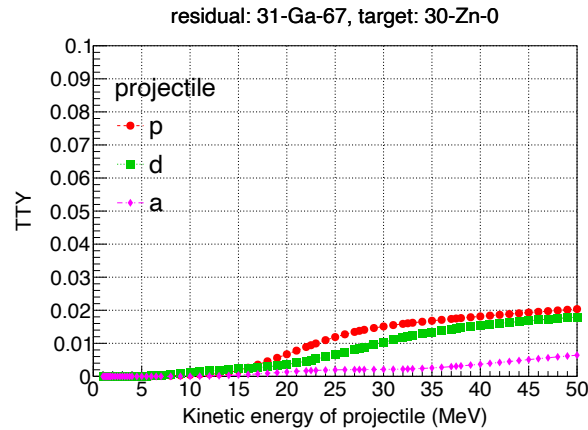
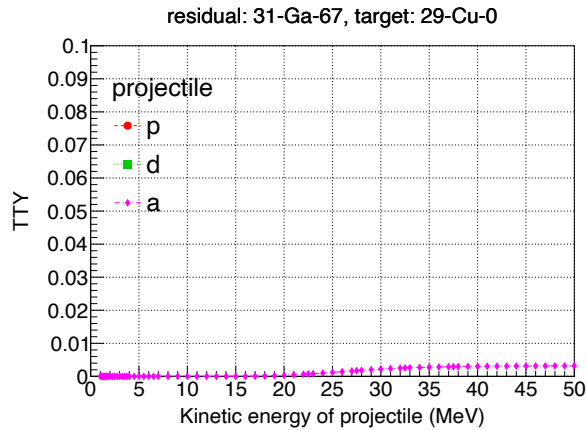
$^{97}\text{Ru} + ^{97}\text{Rh}$



- $^{97\text{m}}\text{Rh}$ (半減期46.2分)
- $^{97\text{g}}\text{Rh}$ (半減期30.7分)
- natRu , natPd 関連のTTYが増加
- $\text{p} + \text{natRu} > \text{d} + \text{natRu}$
 $> \alpha + \text{natMo}$
 $\sim \text{p} + ^{103}\text{Rh}$

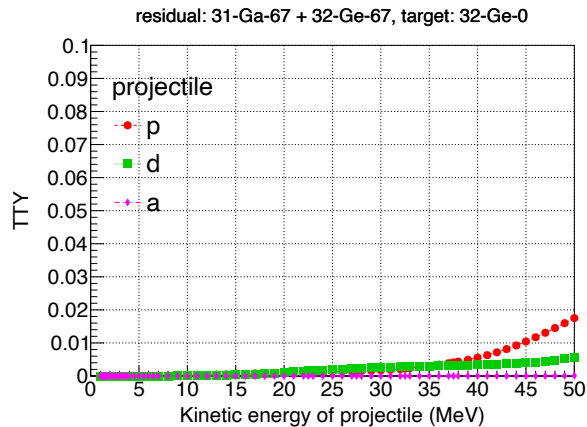
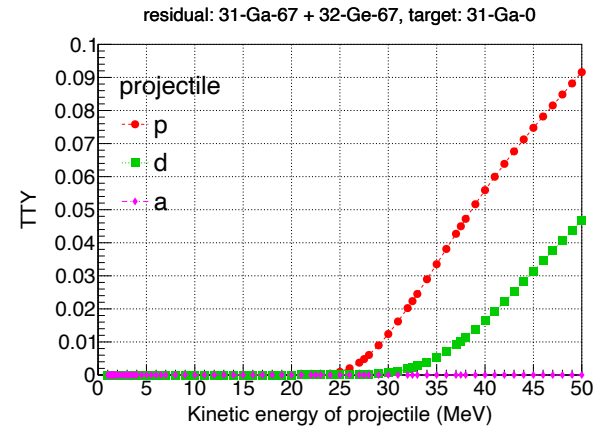
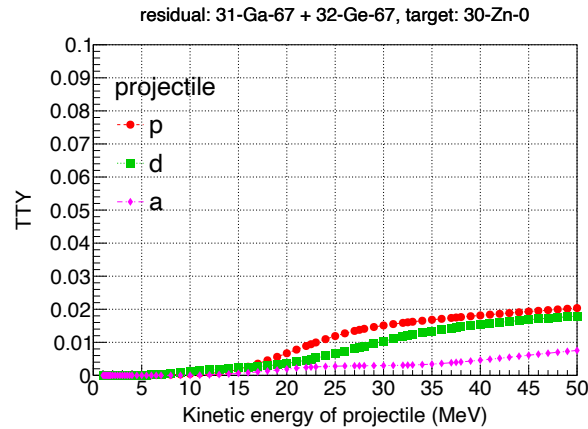
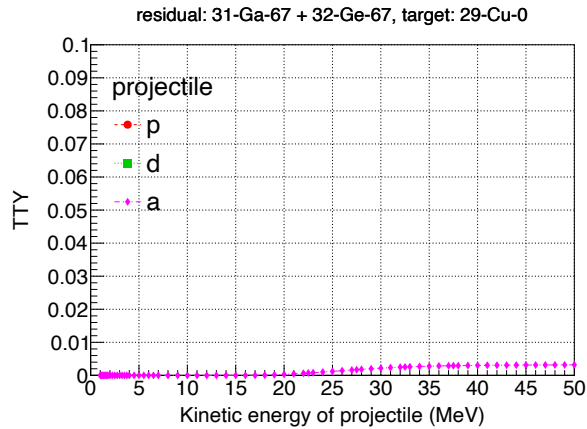
→ 結局 $\alpha + \text{natMo}$, $\text{p} + ^{103}\text{Rh}$ が良い？

^{67}Ga 生成



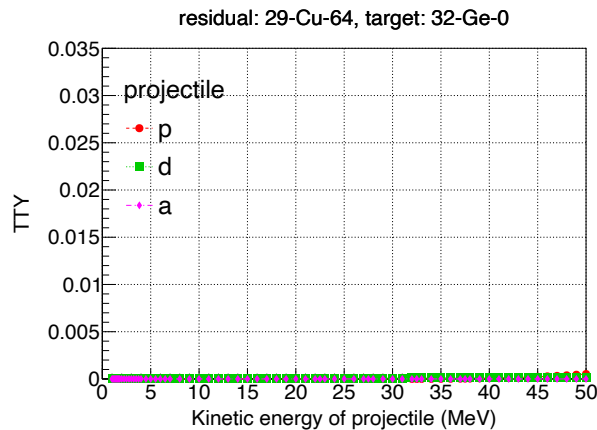
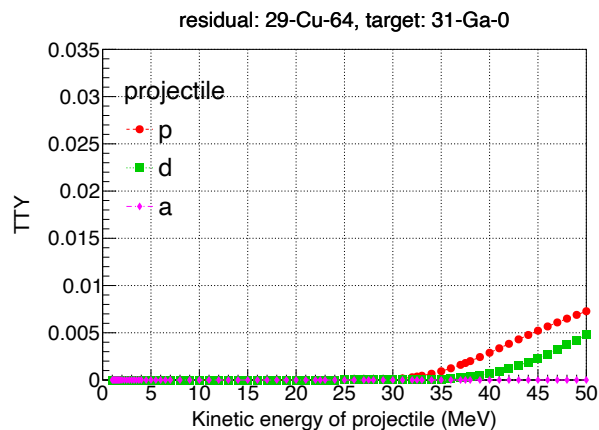
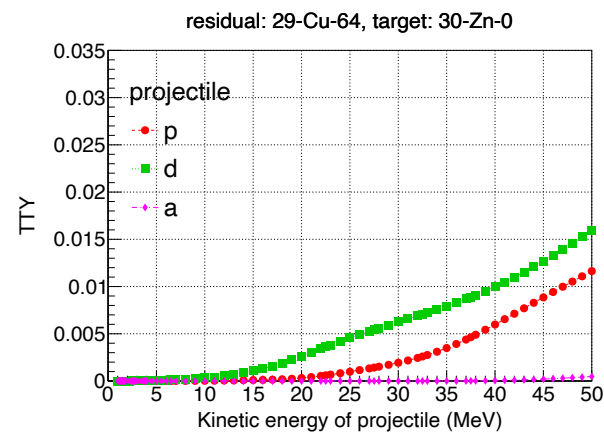
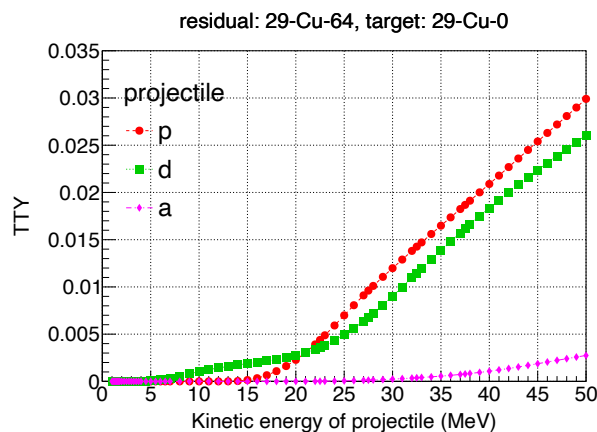
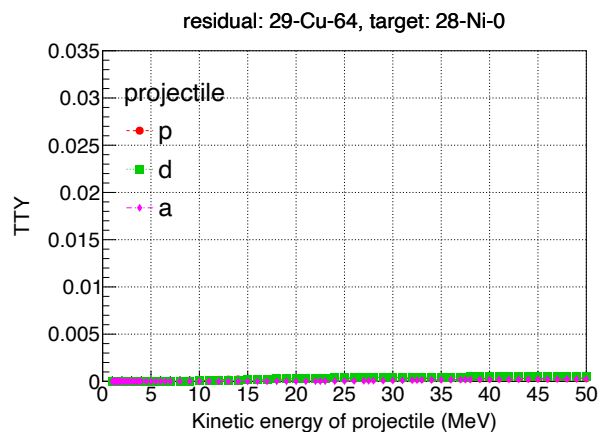
- $p + {}^{\text{nat}}\text{Ga} > d + {}^{\text{nat}}\text{Ga}$
 $> p + {}^{\text{nat}}\text{Zn}$
- ${}^{\text{nat}}\text{Ga}$ 標的の場合は同位体分離が必要
 $\rightarrow$ (n, γ を除くと) $p + {}^{\text{nat}}\text{Zn}$ が良い?

$^{67}\text{Ga} + ^{67}\text{Ge}$ (半減期18.9分)



- $\alpha + ^{\text{nat}}\text{Zn}$, $p(d) + ^{\text{nat}}\text{Ga}$, $^{\text{nat}}\text{Ge}$ 関連のTTYが増加
 - $p + ^{\text{nat}}\text{Ga} > d + ^{\text{nat}}\text{Ga}$
 $> p + ^{\text{nat}}\text{Zn}$
- 結局 $p + ^{\text{nat}}\text{Zn}$ が良い？

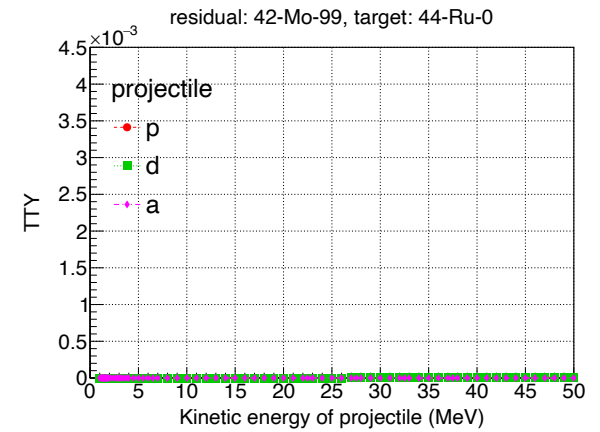
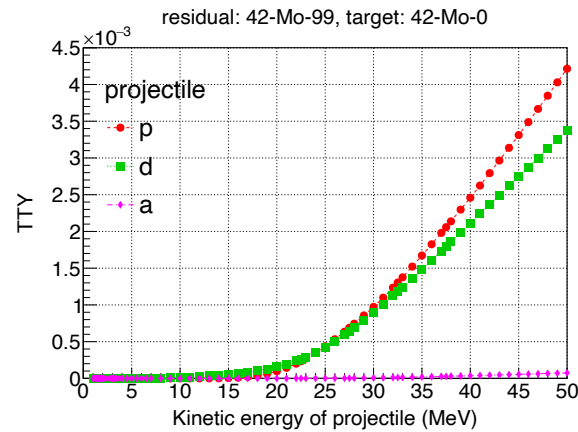
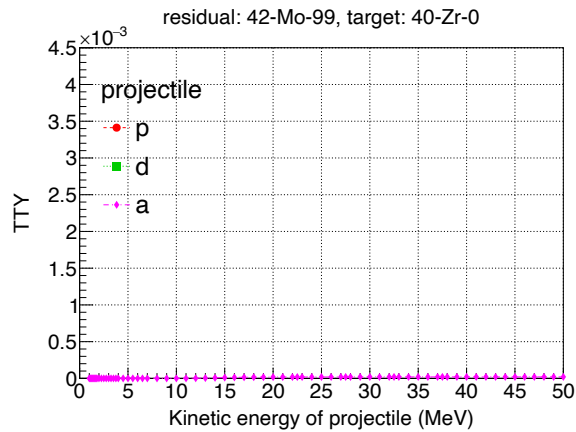
^{64}Cu 生成



- $p + {}^{\text{nat}}\text{Cu} > d + {}^{\text{nat}}\text{Cu}$
 $> d + {}^{\text{nat}}\text{Zn}$

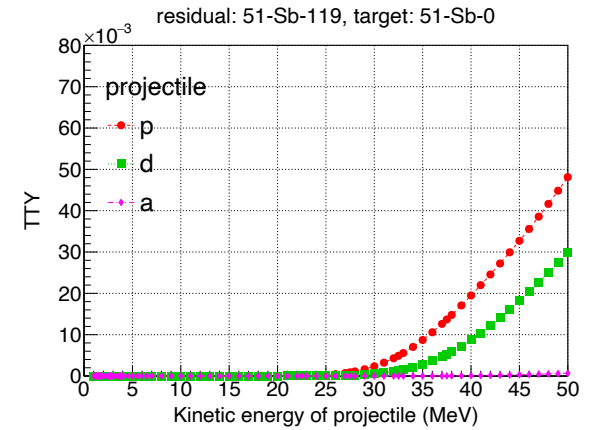
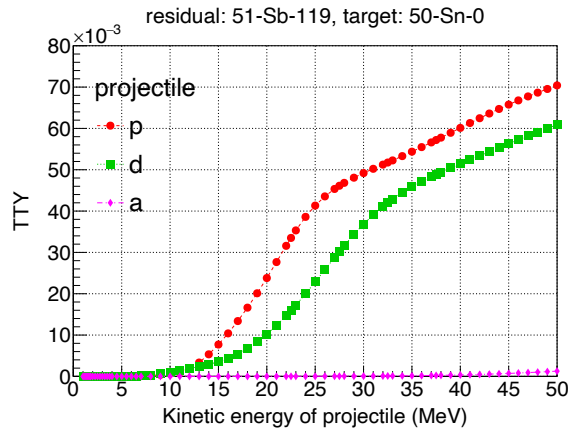
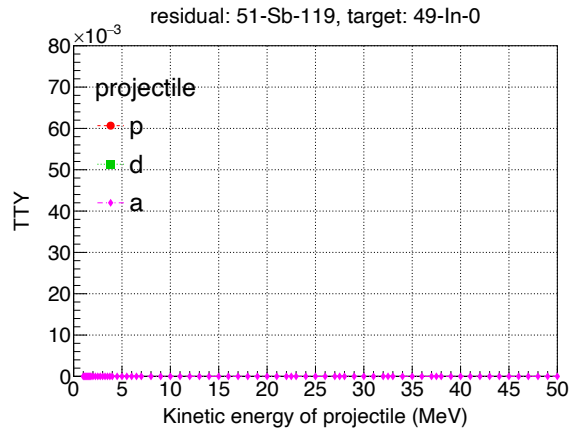
- ${}^{\text{nat}}\text{Cu}$ 標的の場合は同位体分離が必要
 $\rightarrow (n, \gamma \text{を除くと}) d + {}^{\text{nat}}\text{Zn}$ が良い?

^{99}Mo 生成



- $p + {}^{\text{nat}}\text{Mo} > d(\alpha) + {}^{\text{nat}}\text{Mo}$
 $> \alpha + {}^{\text{nat}}\text{Zr}$
 $\rightarrow (n, \gamma \text{を除くと}) p + {}^{\text{nat}}\text{Mo} \text{が良い?}$

^{119}Sb 生成



- $p + \text{natSn} > d + \text{natSn}$
 $> p + \text{natSb}$

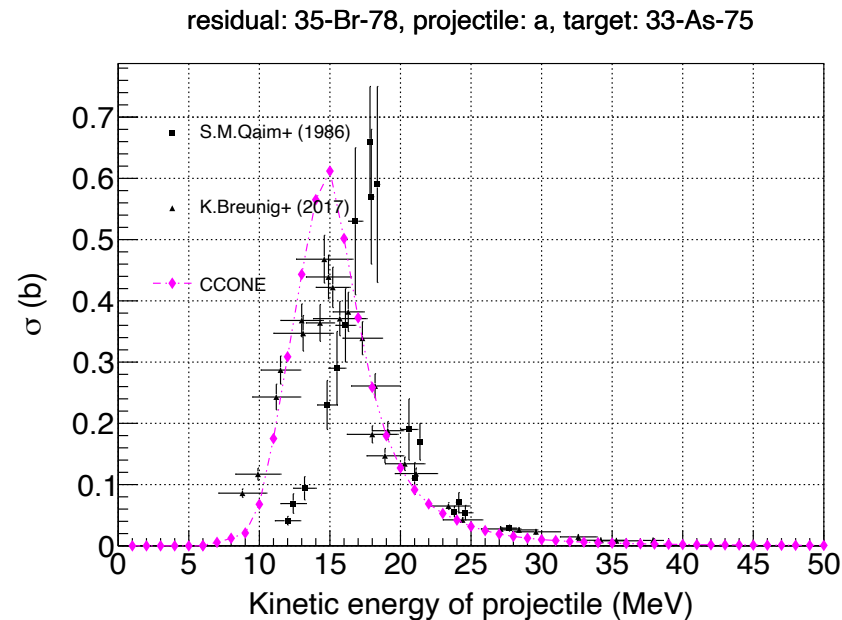
→ (n, γ を除くと)p + natSb が良い?

$\alpha + {}^{75}\text{As}$

- Qaim *et al.* (1986)の立ち上がりの位置が怪しい

K. Breunig *et al.*, Radiochim. Acta 105, 431 (2017)より

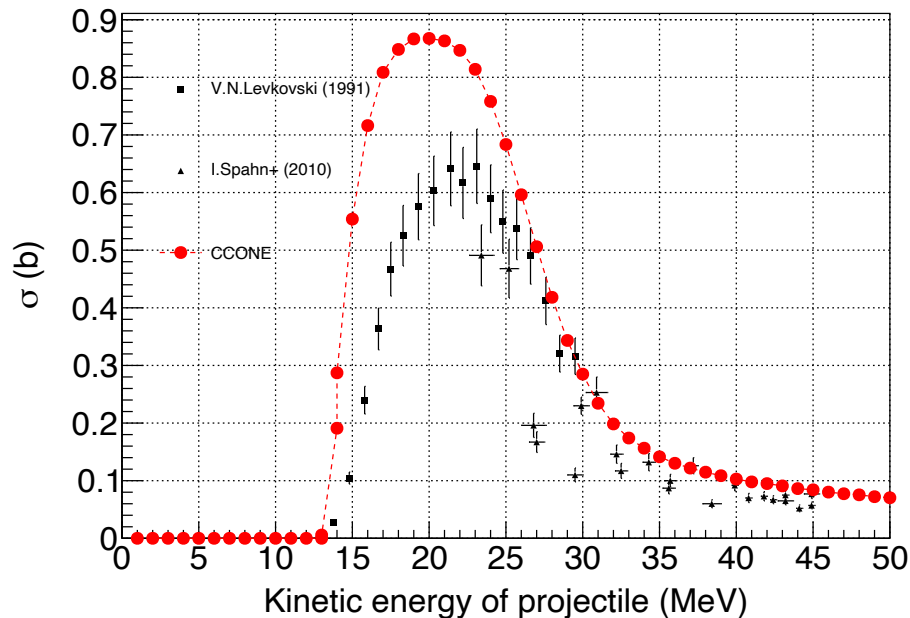
- Qaim *et al.* (1986)では入射エネルギー28 MeVを想定
→ 実は26.799 MeVだった？
- SudárとQaimが後に入射エネルギー26.8 MeVを想定して ${}^{55}\text{Mn}(\alpha, n){}^{58\text{m,g}}\text{Co}$ の励起関数を測定
→ 他の実験や計算値と良く一致した



$p + {}^{78}\text{Se}$

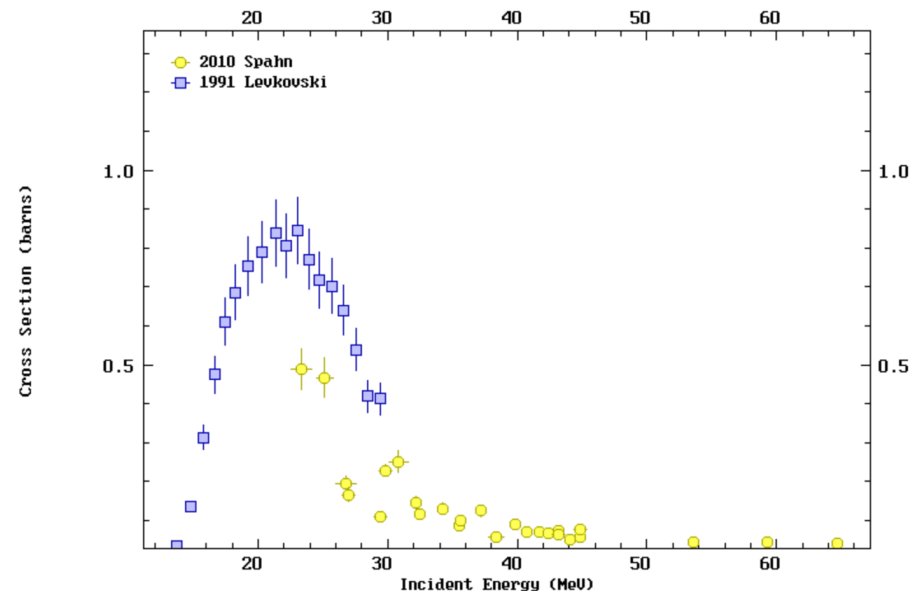
- EXFORのQuick-plot(右下図)と実験値(1991 Levkovski)が違う...
→ EXFOR-C5v4(左下図)では
最近のモニター反応や崩壊データを使って補正されている

residual: 35-Br-77, projectile: p, target: 34-Se-78



${}^{78}\text{Se}(p, 2n){}^{77}\text{Br}$

34-SE-78(P,2N)35-BR-77
EXFOR Request: 14578/1, 2024-Jul-05 2024:06:25



p + ^{78}Se

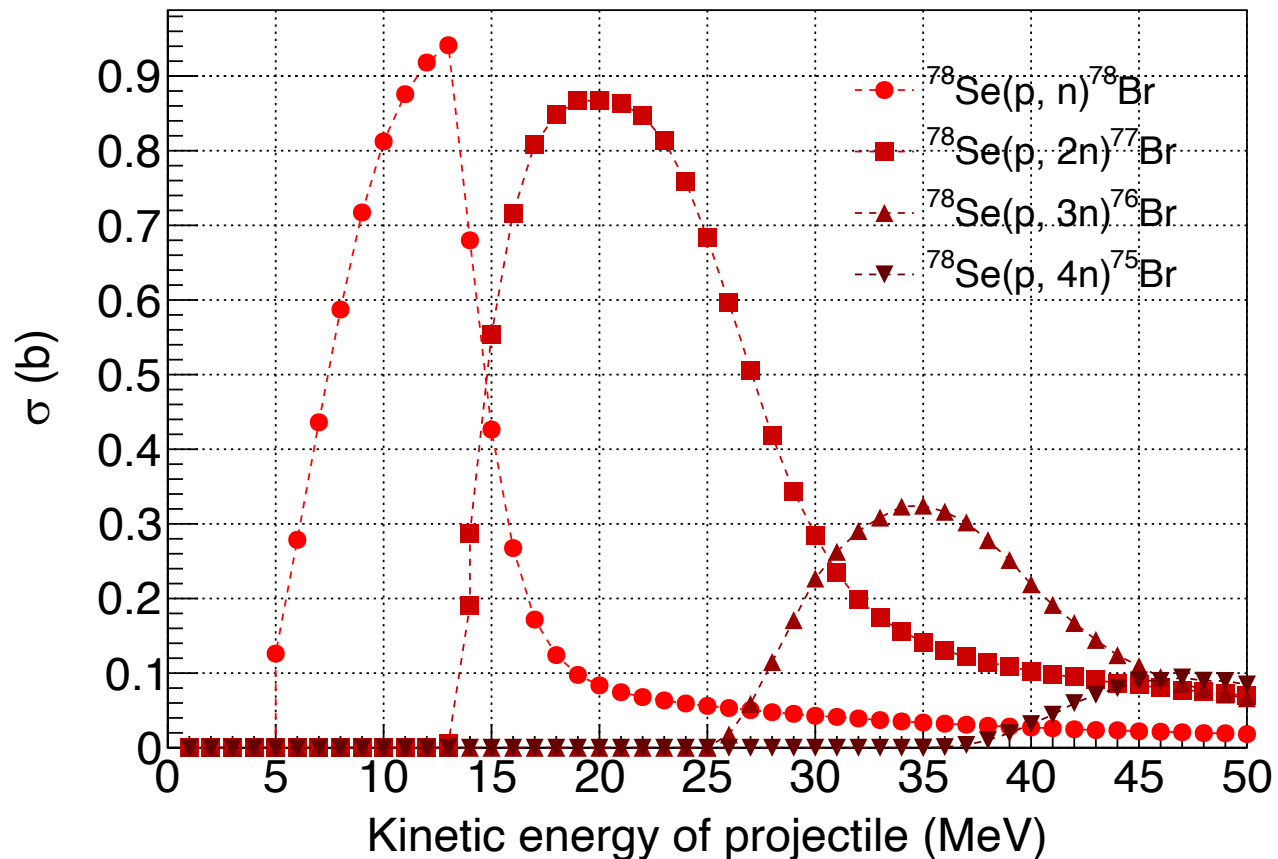
- EXFORのQuick-plot(右下図)と実験値(1991 Levkovski)が違う...
 - EXFOR-C5v4(左下図)では
最近のモニター反応や崩壊データを使って補正されている
- R. A. Rebeles *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **267**, 457 (2009)
に以下の記述あり
 - EXFOR-C5v4(左下図)が正しそう

Although the general shape of the excitation function suggested by values reported by Levkovskij [17] are in good agreement with our measured values, a general energy shift of about 1.5 MeV, and differences of 25% in absolute values can be noticed. In earlier studies [36], it was proven that the values of the monitor reaction cross section $^{\text{nat}}\text{Mo}(\text{p},\text{x})^{96}\text{Tc}$ that was used by Levkovskij [17] are systematically overestimated. Therefore, normalization by a factor of 0.8 is necessarily, Fig. 2, after which a better agreement is obtained, but the energy shift still remains.

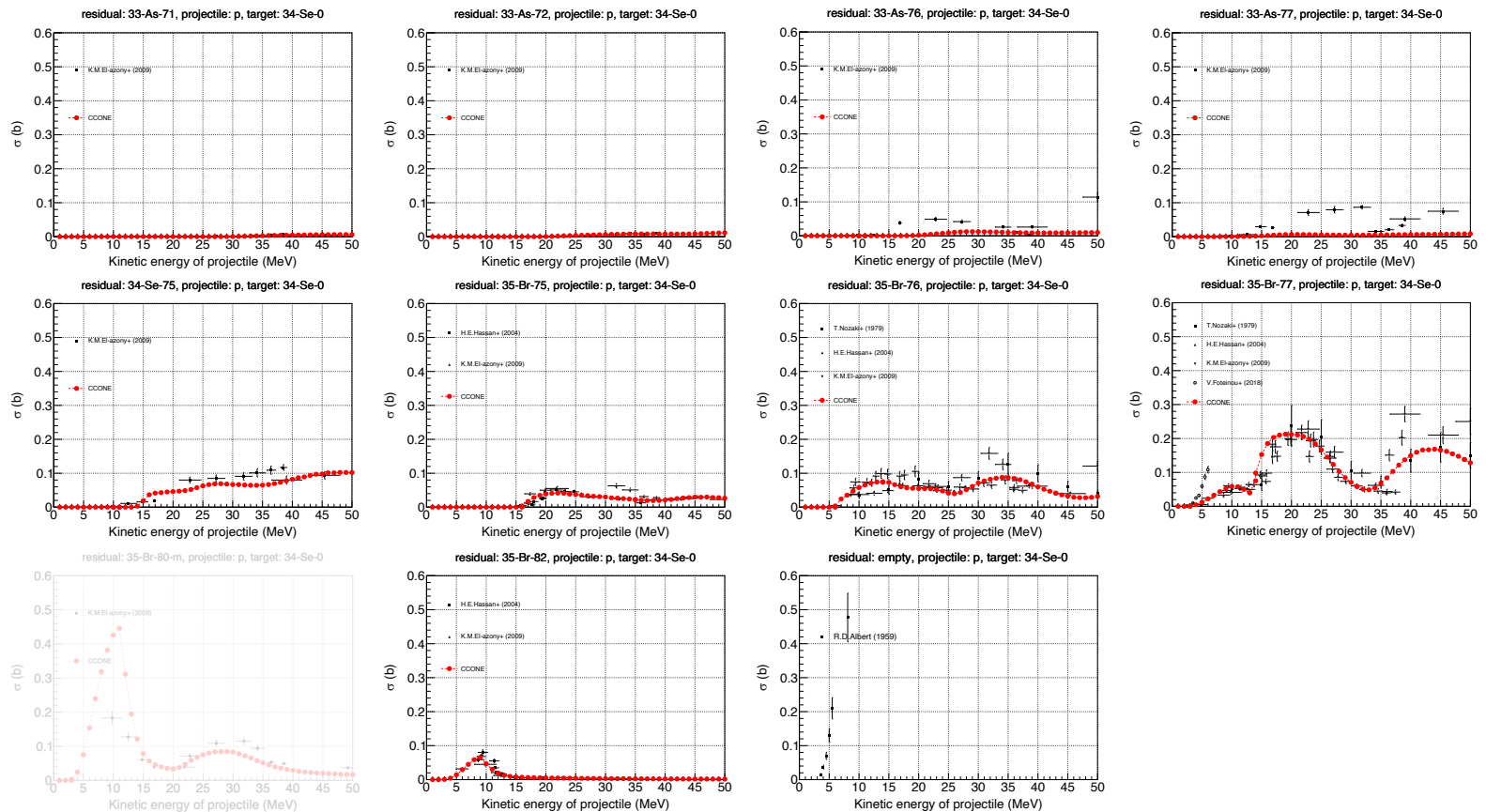
R. A. Rebeles *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **267**, 457 (2009)

$p + {}^{78}\text{Se}$

- ${}^{78}\text{Se}(p, n){}^{78}\text{Br}$, ${}^{78}\text{Se}(p, 2n){}^{77}\text{Br}$, ${}^{78}\text{Se}(p, 3n){}^{76}\text{Br}$, ${}^{78}\text{Se}(p, 4n){}^{75}\text{Br}$ の計算結果を重ね書きした



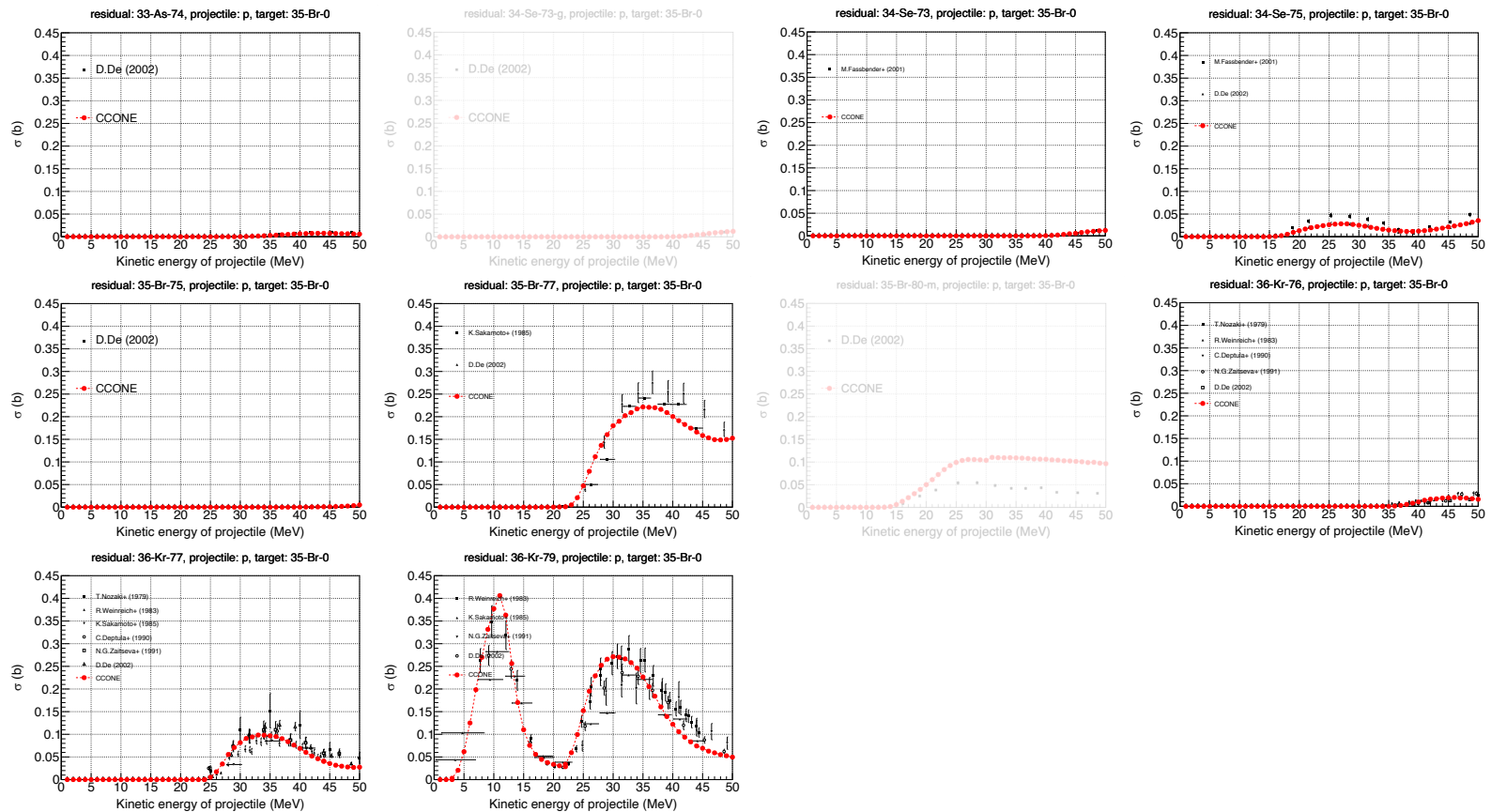
- < 50 MeVで実験値が存在する核種は11個
(薄い図はCCONEの計算結果を正しく図示できていない → 要確認)



p + natBr

- < 50 MeVで実験値が存在する核種は10個

(薄い図はCCONEの計算結果を正しく図示できていない → 要確認)



参考文献

- [1](#) ERATO, "プログラムの概要"
- [2](#) ERATO, "研究領域の紹介"
- [3](#) ERATO, "関口三体核力プロジェクト"
- [4](#) 関口仁子, 日本物理学会誌 **70**, 12 (2015)
- [5](#) 関口仁子, 岩波書店「科学」 **92**, 10 (2022)
- [6](#) 関口仁子, "少数核子系からさぐる古くて新しい核力 ～三体核力～", 東北大学 (2022)
- [7](#) E. Wigner, Phys. Rev. **43**, 252 (1933)
- [8](#) 京都大学 基礎物理学研究所 湯川記念館史料室, "湯川秀樹博士を偲ぶー追悼行事の記録ー"
- [9](#) H. Yukawa, Proc. Phys. Math. Soc. Jpn. **17**, 48 (1935)
- [10](#) G. P. S. Occhialini and C. F. Powell, nature **159**, 186 (1947)
- [11](#) 国立科学博物館, "ノーベル物理学賞"
- [12](#) V. G. J. Stoks *et al.*, Phys. Rev. C **48**, 792 (1993)
- [13](#) L. D. Faddeev, Sov. Phys. JETP **12**, 1014 (1961)
- [14](#) H. Witała *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**, 1183 (1998)
- [15](#) K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. C **65**, 034003 (2002)
- [16](#) K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 162301 (2005)
- [17](#) K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. C **89**, 064007 (2014)

参考文献

- [18](#) K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. C **83**, 061001(R) (2011)
- [19](#) C. R. Chen *et al.*, Phys. Rev. C **33**, 1740 (1986)
- [20](#) T. Sasakawa and S. Ishikawa, Few-Body Syst. **1**, 3 (1986)
- [21](#) S. C. Pieper *et al.*, Phys. Rev. C **64**, 014001 (2001)
- [22](#) G. Hagen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 242501 (2012)
- [23](#) A. Akmal *et al.*, Phys. Rev. C **58**, 1804 (1998)
- [24](#) P. B. Demorest *et al.*, nature **467**, 1081 (2010)
- [25](#) J. M. Lattimer and M. Prakash, Phys. Rep. **442**, 109 (2007)
- [26](#) 三輪祐也, 修士論文, 埼玉大学 (2020)
- [27](#) D. Filosofov *et al.*, Nucl. Med. Biol. 94-95, 1 (2021)
- [28](#) O. Iwamoto *et al.*, Nucl. Data Sheets **131**, 259 (2016)
- [29](#) J. F. Ziegler *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **268**, 1818 (2010)
- [30](#) N. Otuka and S. Takács, Radiochim. Acta **103**, 1 (2015)
- [31](#) IAEA, “Download Nuclear Data Packages”
- [32](#) J. M. Lattimer and M. Prakash, Astrophys. J. **550**, 426 (2001)
- [33](#) K. Breunig *et al.*, Radiochim. Acta **105**, 431 (2017)
- [34](#) R. A. Rebeles *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **267**, 457 (2009)