

# 重イオン衝突・ハイパー核 から探る中性子星

- 大西さんを指導教員とするまで、  
そして最初の研究: 中性子星と $\Lambda$ 側方フロー
- 2つ目の研究:  $\Lambda$ ハイパー核
- 修士号取得後

神野朝之丞 (京都大学, D1)

2024/3/2-3 大西さん追悼研究会

**大西さんを指導教員とするまで、**

**そして最初の研究: 中性子星と $\Lambda$ 側方フロー**

# 大西さんを指導教員とするに至った経緯

M1の2021年10月の指導教員選びにて

- 神野が漠然と考えていたこと

「まず分かってない自然現象があり、それを解明したい」

→ 中性子星に興味アリ

「実験家と関わりが多い研究をしたい」

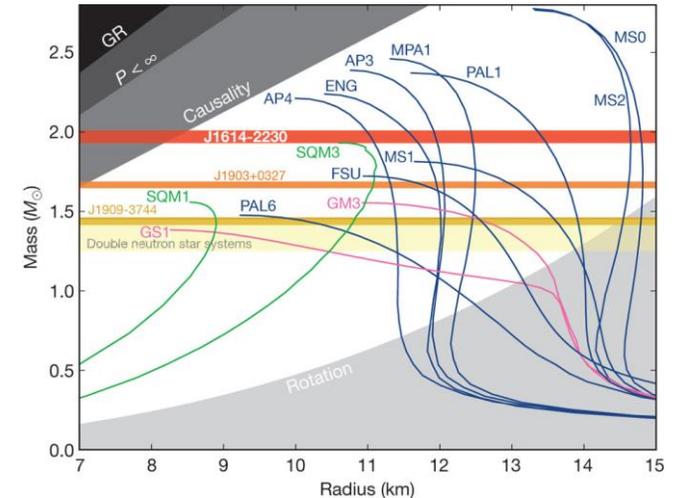
- 大西さんとの面談

様々な研究トピックをご提示いただいた。

その中に、重イオン衝突データ（ $\Lambda$ 側方フロー）から、中性子星の内部構造を探る研究があった。

# 中性子星のハイペロンパズル

- $\Lambda$ 粒子などのハイペロンを含む状態方程式の多くが、**軟化**のため、観測された**大質量の中性子星を支えられなかった**



Demorest et al. Nature (2010)

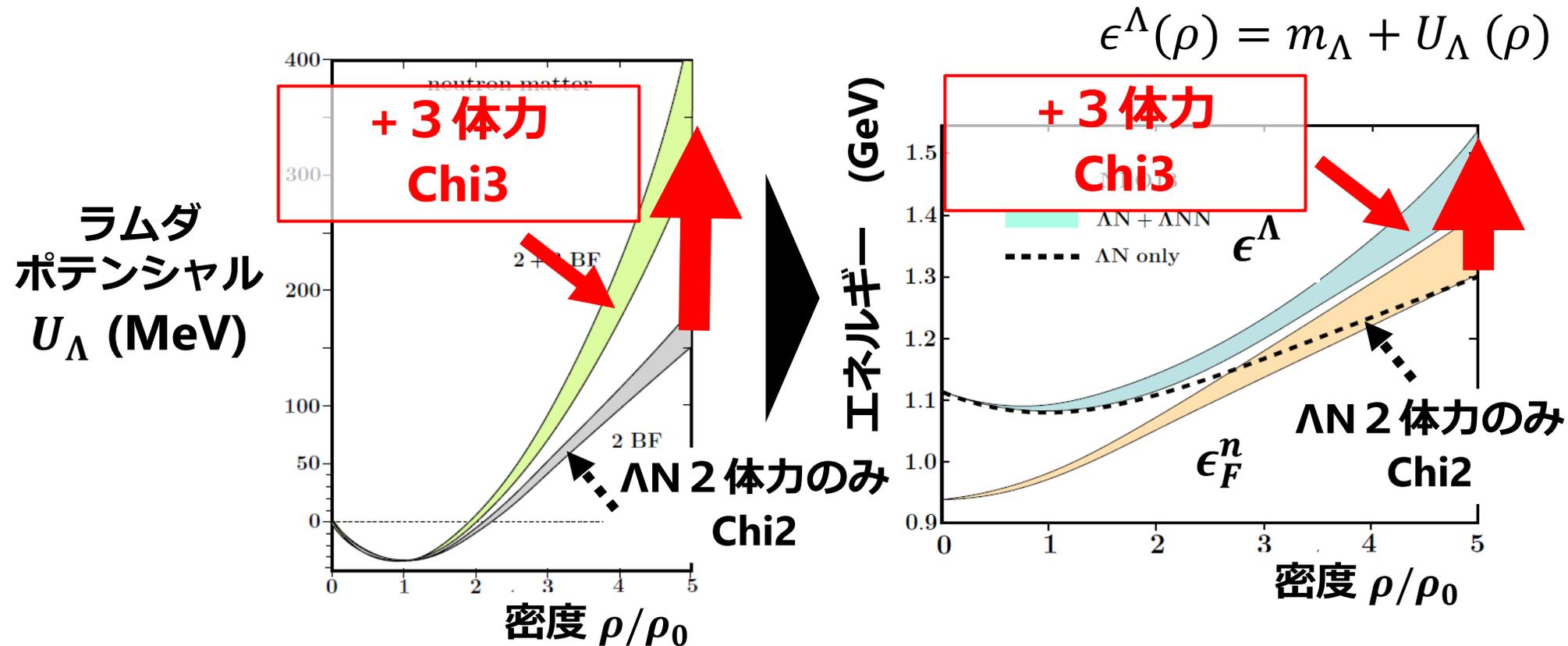
- 沢山の解決方法が考案されてきた

- ➡ **多体相互作用による斥力** (e.g.  $\Lambda$ NN): e.g. Nishizaki, Yamamoto, & Takatsuka (2002); Gerstung, Kaiser, & Weise (2020); Togashi, Hiyama, Yamamoto, & Takano (2016).
- YY相互作用による斥力** (e.g.  $\Lambda\Lambda$ ): e.g. Fortin, Avancini, Providencia, & Vidana (2017); Weissenborn, Chatterjee, Schaffner-Bielich (2012).
- クォーク物質にクロスオーバー転移**: e.g. Baym, Hatsuda, Kojo, Powell, Song, & Takatsuka (2018); Kojo, Baym, & Hatsuda (2022).
- 修正重力**: Astashenok, Capozziello, and Odintsov, Phys. Rev. D 89, 103509 (2014).

# $\Lambda$ NN 3 体力によるパズルの解決！？

$\Lambda$ NN (+ $\Sigma$ NN) 3 体力 from カイラル有効場理論

Kohno (2018), D. Gerstung, N. Kaiser, and W. Weise (2020)



高密度領域に  
おいても  
 $\Lambda$ 粒子が  
現れない！

ハイペロン  
パズル  
回避!?

# 提示された研究の流れ

Gerstung, Kaiser, and Weise (2020) の $\Lambda$ ポテンシャルを実験データを用いて検証すれば、ハイペロンパズルの解決に大きく繋がる！



重イオン衝突における $\Lambda$ 側方フロー  $v_1$ を計算しよう！

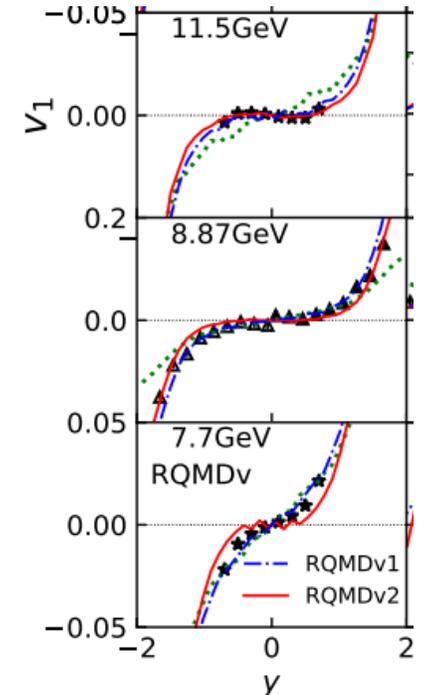
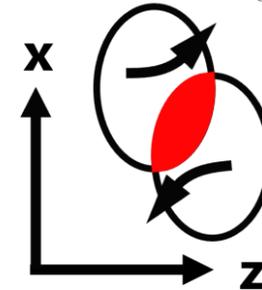
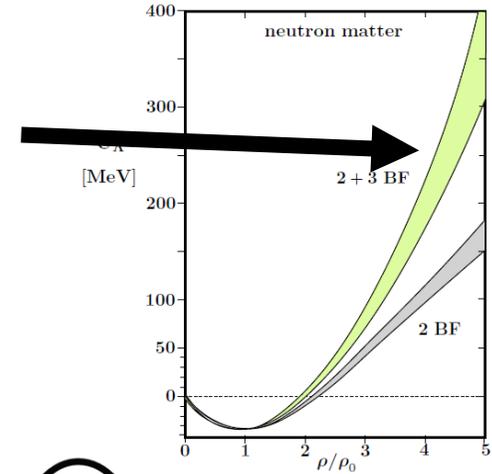
$$v_1 = \langle \cos\phi \rangle = \langle p_x/p_T \rangle \quad (p_T^2 = p_x^2 + p_y^2)$$

- 陽子の  $v_1$  の衝突エネルギー  $\sqrt{s_{NN}}$  依存性の説明に成功  
(相対論的量子分子動力学 RQMDv implemented in JAM)

Nara and Ohnishi, Phys. Rev.C 106 (2022) 044902.



$\Lambda v_1$  の  $\Lambda$ ポテンシャル依存性を調べよう！



# 大西さんの提示したテーマ: $\Lambda$ 側方フロー

神野「重イオン衝突と中性子星を繋げるの、面白そう！」

教員面談後、大西さんを捕まえ詳しく議論した

楽しげに話す感じや、熱量に惹かれた

## 研究発足時のメール (2021/10/28)

最初の題材と考えているテーマ、

"Collective flow of  $\Lambda$  and the Hyperon Puzzle"

についての「ストーリー」を文章として少し書いてみました (下記参照)。

こういう流れの論文なら集団運動流 (collective flow) が話しの中心になるので、

Y. Nara, A. Jinno, A. Ohnishi

の著者順になると思います。これを短い論文 (letter) でだして、

中性子星中のハイペロン・ポテンシャルを中心にした論文

"Hyperon potentials in neutron star matter and their relevance to hyperon collective flows"

で神野君が第一著者のしっかりした論文 (full paper) が書ければ、

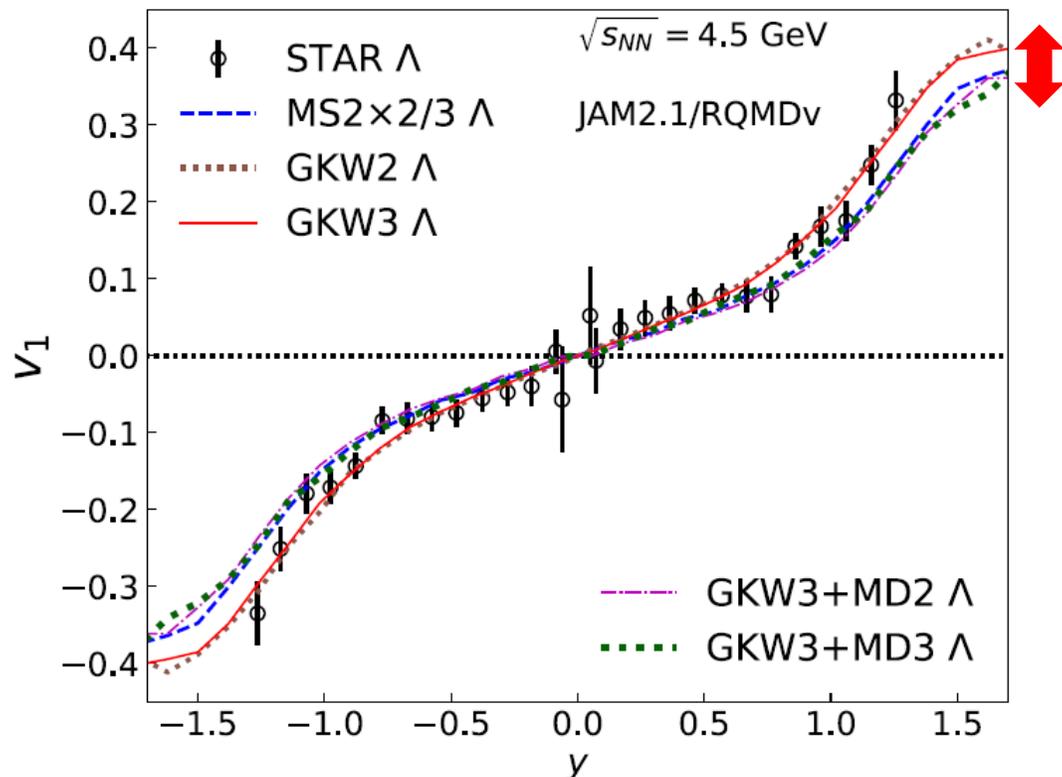
修論として十分(以上)の内容になると思います。

この時点で修論取得  
までの教育方針を打  
ち立てていた

# 結果: $\Lambda$ 側方フロー $v_1$

Y. Nara, A. Jinno, K. Murase, & A. Ohnishi, PRC 106, 044902(2022).

JAM2での計算 (相対論的量子分子動力学, RQMDv)



- $\Lambda v_1$ を再現!
- $\Lambda v_1$ は $\Lambda$ ポテンシャルの密度依存性にそれほど敏感では無く、むしろ運動量依存性に対して敏感である

大西さん

「チッ、検討が外れたか...」

STAR  $\Lambda$ : Phys. Rev. C 103, 034908 (2021).

GWK2 (3): ChEFT based potential with two- (two- and three-) body force. Gerstung, Kaiser, and Weise (2020).

MD2 & MD3: Mom. dep. fitted to result by Kohno (2018).

## 2つ目の研究: $\Lambda$ ハイパー核

小話 : 大西さんとのサシ飲み

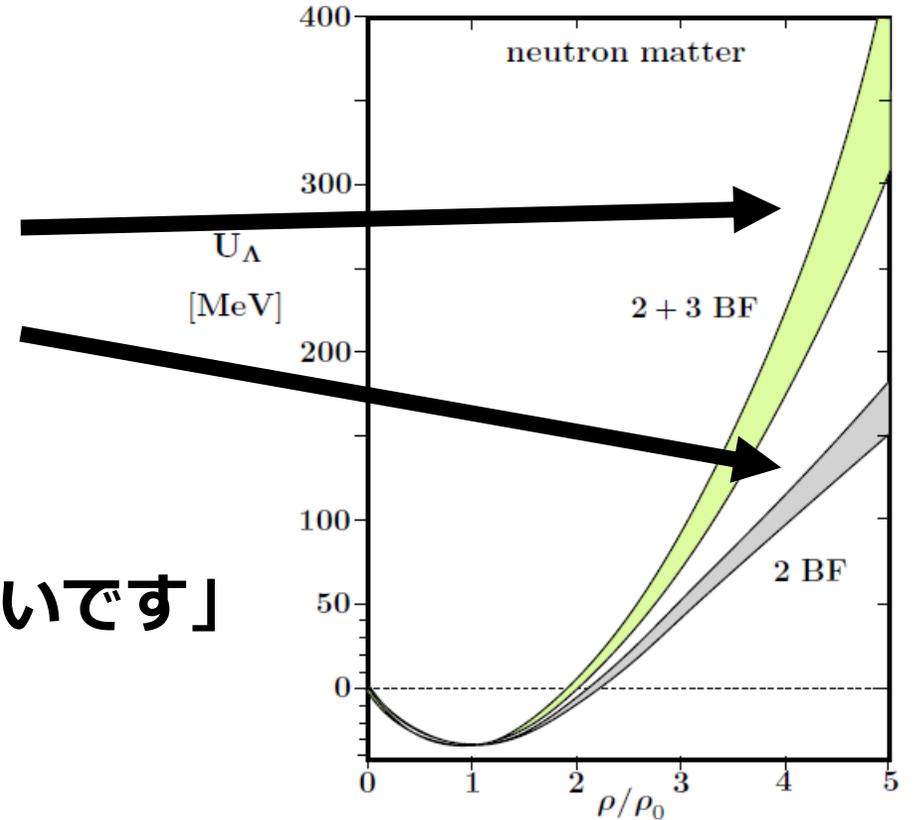
# 研究がひと段落。次の研究へ

2022年7月

重イオン衝突での $\Lambda$ 側方フローで $\Lambda$ ポテンシャルの密度依存性を見分けるには、少なくとも更なる工夫が必要

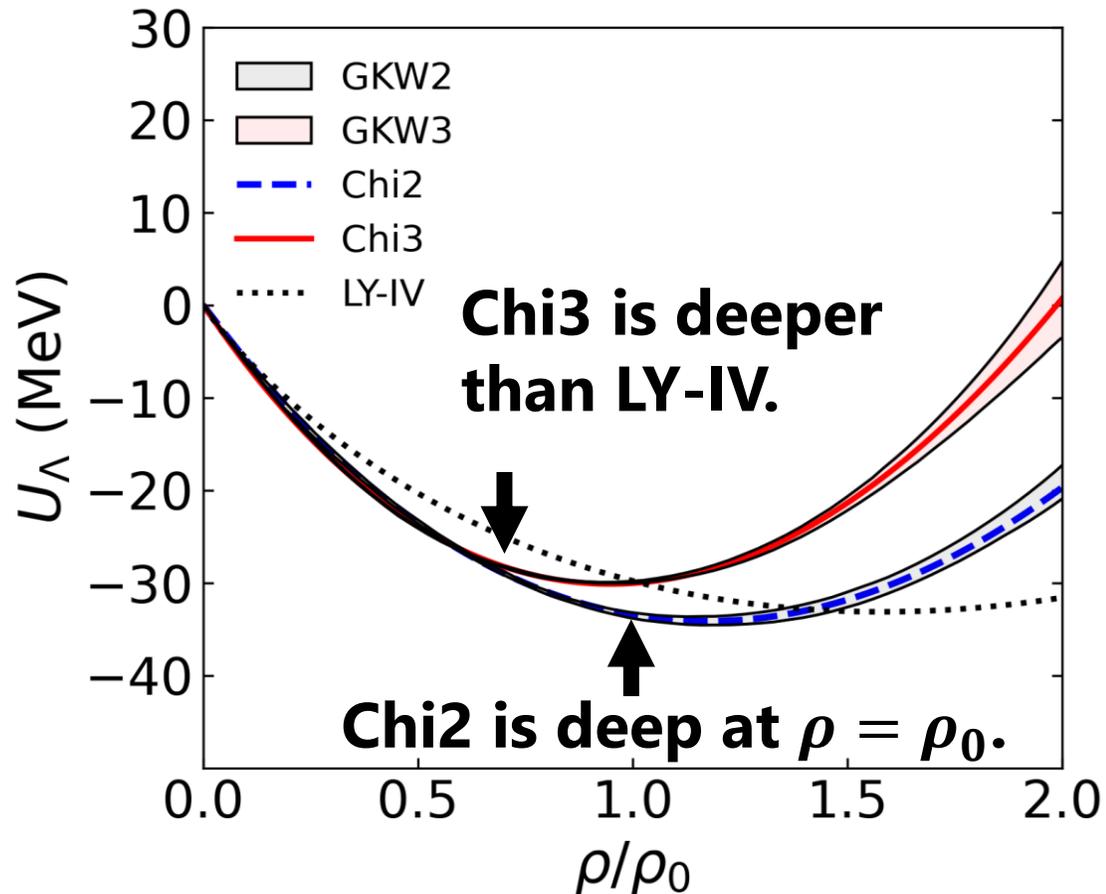
神野「自分でイチから計算できる研究がしてみたいです」

大西さん「 $\Lambda$ ハイパー核が良いのではないか？」



※他にも相対論的平均場近似での解析など、ハイペロンパズルに限らず沢山のアイデアを提案いただきました

# $\Lambda$ ハイパー核



- 2体力のみモデル (Chi2) と、3体力のみモデル (Chi3) は $\Lambda$ ハイパー核データを再現するか？
- もし再現するなら、高密度で引力的なモデル (LY-IV) と比べて、同じレベルで再現するか？

GKW2 (GKW3): Gerstung, Kaiser, and Weise (2020).

Chiral EFT calculation including YN (YN+YNN) interaction.

LY-IV: Lansky and Yamamoto (1997).

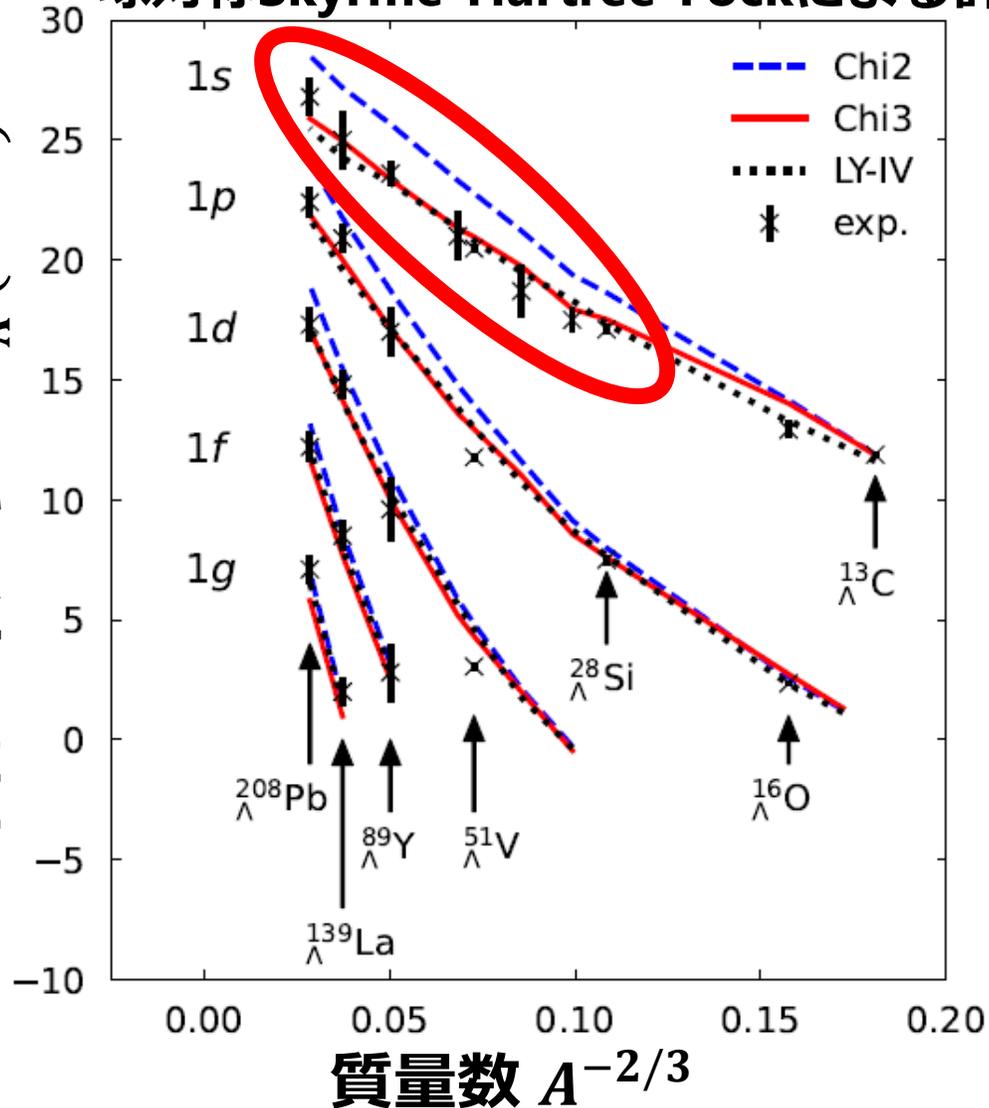
Skyrme-type  $\Lambda$  potential reproducing  $\Lambda$  binding energies.

# 結果: $\Lambda$ 束縛エネルギー

A. Jinno, K. Murase, Y. Nara, & A. Ohnishi, PRC 108, 065803 (2023).

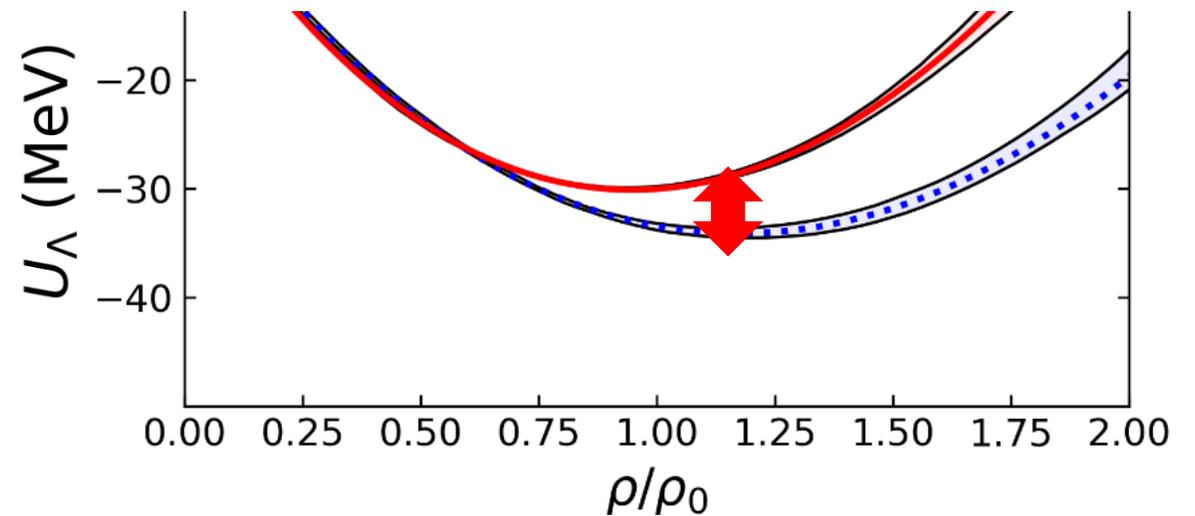
球対称Skyrme-Hartree-Fockによる計算

$\Lambda$ 束縛エネルギー  $B_\Lambda$  (MeV)



- 高密度で斥力的なモデル(Chi3)と引力的なモデル(LY-IV)は、両方データを再現
- 2体力のみのモデル(Chi2)は過剰に束縛する

∴  $\Lambda$  potential depth of Chi2 is too deep.



# Short summary

- 2020年、カイラル有効場理論に基づいて、YNN3体斥力により $\Lambda$ が中性子星内に現れないシナリオが提案された

重イオン衝突・ハイパー核データを用いて、高密度領域で非常に斥力的な $\Lambda$ ポテンシャルの妥当性を検証した

- $\Lambda$ 側方フロー  $v_1$ :  $\Lambda$ ポテンシャルの密度依存性にそれほど依存せず、むしろ運動量依存性に敏感である
- $\Lambda$ 束縛エネルギー: 2体力のみ含むモデルは過剰に束縛する。  
高密度で斥力的なものと引力的なものは、データを同精度で再現した

高密度での $\Lambda$ ポテンシャルの密度依存性を制限できる物理量の更なる探索が必要

大西さんには、研究者の基礎を教わりました。

**修士号取得後**

# 修論取得後

- 2023年2月27日のミーティングにて、検査の結果を教えてくださいました。
- 2023年3月J-PARCでの学会では大西さん自身も発表しておりました。  
神野の発表の前日には、夜遅くに練習に付き合ってくださいました。
- ご逝去される前の週までミーティングに出席されていました。  
論理の通っていないことを言った時には「それは、怒るよ」と尻を叩いてくださいました。
- 研究者を最後まで全うしたその姿は、今でも記憶に焼き付いています。

2023/5/12

フェローシップ採用されました！

---



Akira Ohnishi

よかった

大西

最後に良い報告が出来て良かったです

# 元気に研究しています！！！！

大西さんが繋いでくださった共同研究を継続しています

- 重イオン衝突 with 奈良さん（国際教養大）、村瀬さん（都立大、YITP）
- Y- $\alpha$ フェムトスコピー with 兵藤さん（都立大）、神谷さん（ボン大）
- 重イオン衝突での密度の時間発展の解析: 田屋さん（理研）、北沢さん（YITP）、奈良さん（国際教養大）、西村さん（阪大）

また、これまでの研究のお陰で、多数の素晴らしい出会いが有りました

- 京大・東北大のストレンジネス実験グループ、J-PARC関係の皆さま
- 学会で酒を飲み交わした皆さま
- もちろん、京大核理論研究室の皆さま

今年の4月からドイツのJülich研究所に留学しChiral EFTの修行をする予定です

- **大西さんと共同研究者として肩を並べて議論する未来が無くなってしまったのは非常に悲しいです**
- **大西さん「修士は先生が取らせるもの、博士は自分が取るもの」それが出来るほどには、十分な教育を受けることが出来たと感じています**
- **また面白い結果を報告できるよう精進いたします**