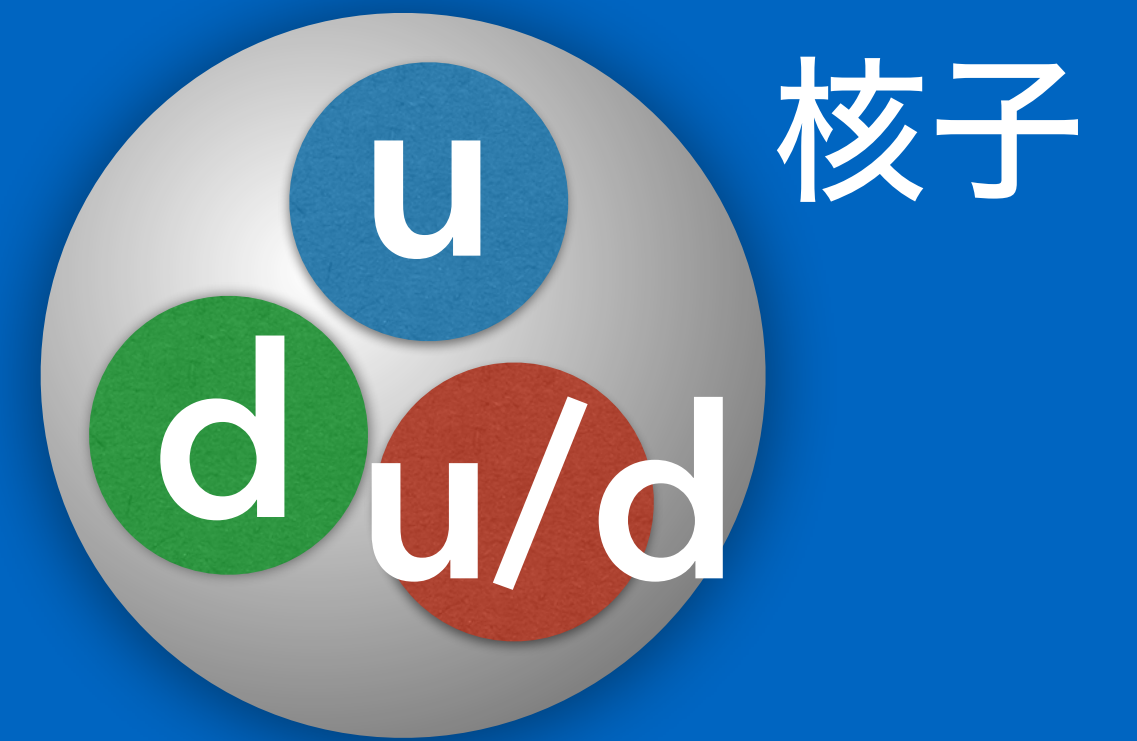
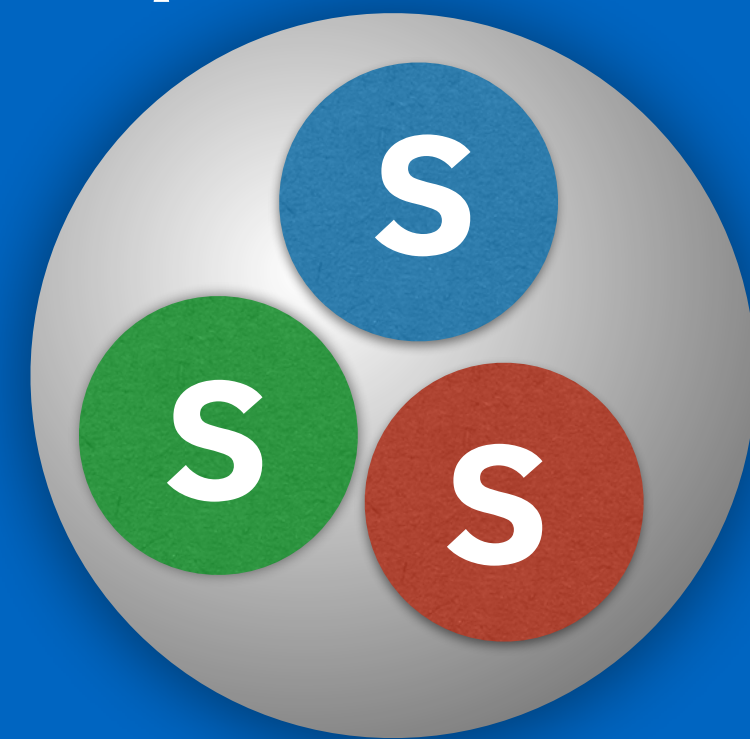


物理点格子QCDによる 核子・オメガ粒子間相互作用の解析

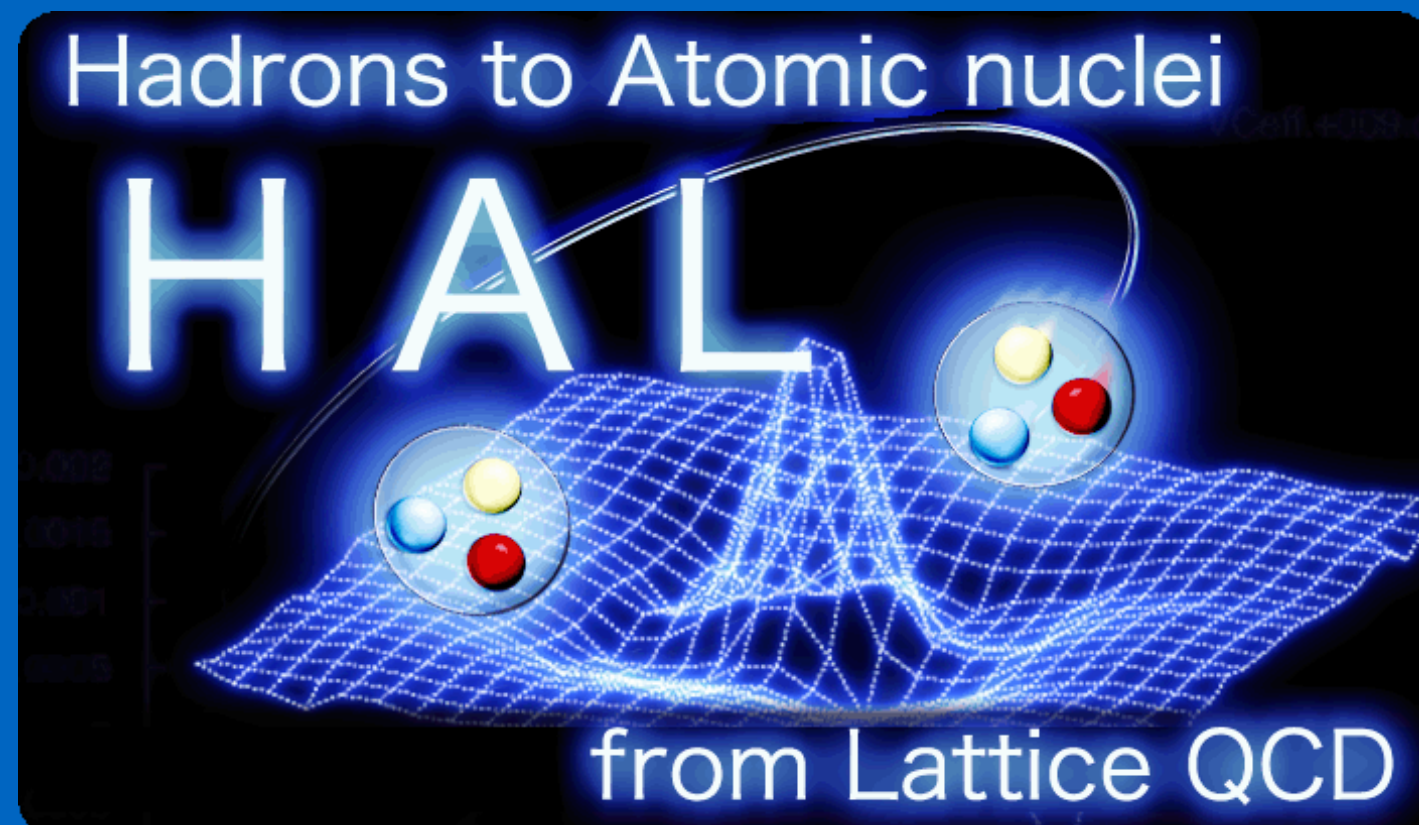


Ω粒子



入谷 匠 (理化学研究所)

素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム
2019.1.9-10 @ 筑波大学東京キャンパス



for HAL QCD Collaboration

S. Aoki, K. Sasaki, T. Aoyama, T. Miyamoto (YITP), T. Hatsuda, T. Doi,
S. Gongyo, T. M. Doi (RIKEN), T. Inoue (Nihon Univ.), N. Ishii, Y. Ikeda,
H. Nemura, K. Murano (RCNP), F. Etminan (Univ. of Birjand)

Ref. [arXiv:1810.03416 \[hep-lat\]](https://arxiv.org/abs/1810.03416)

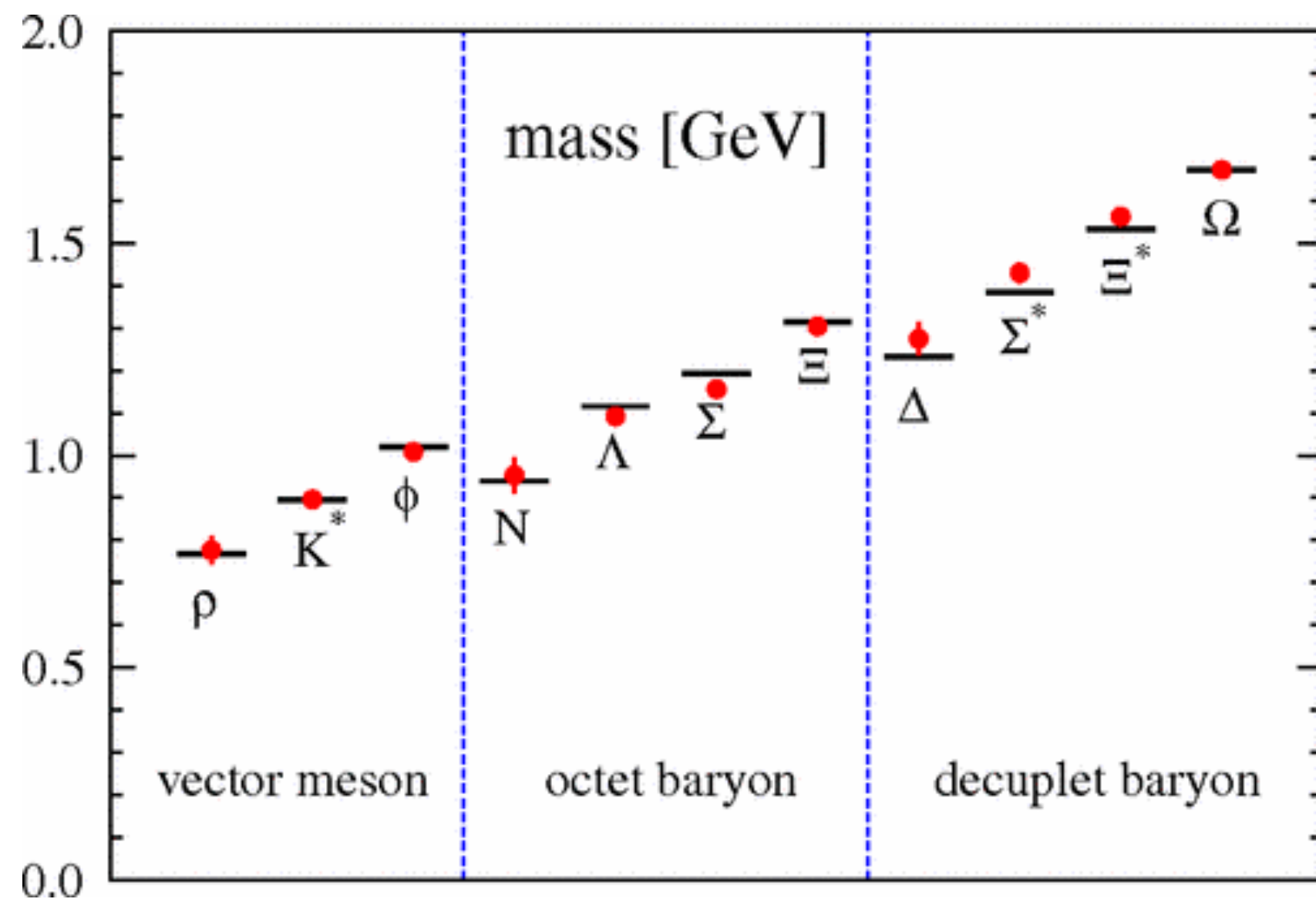
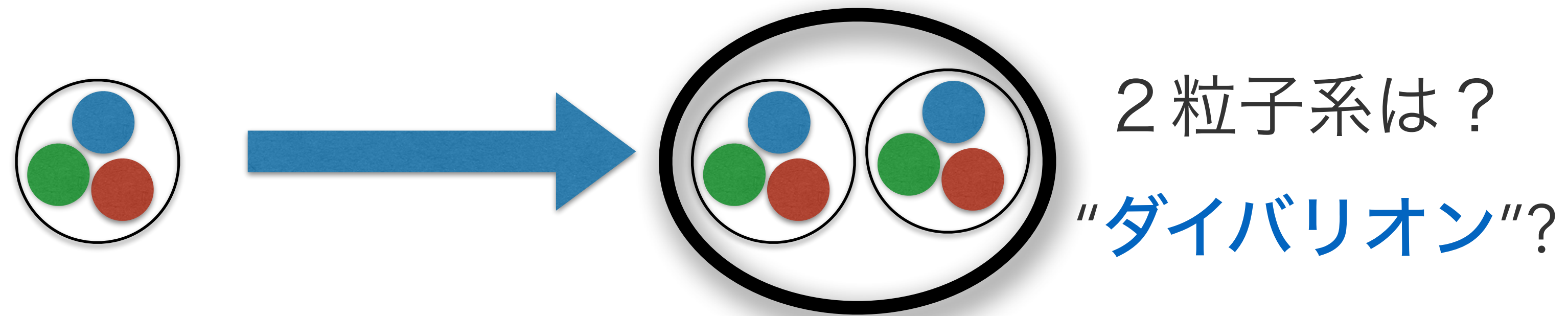
1. バリオン 2 体系と格子QCD計算

2. 核子・オメガ粒子系@物理点

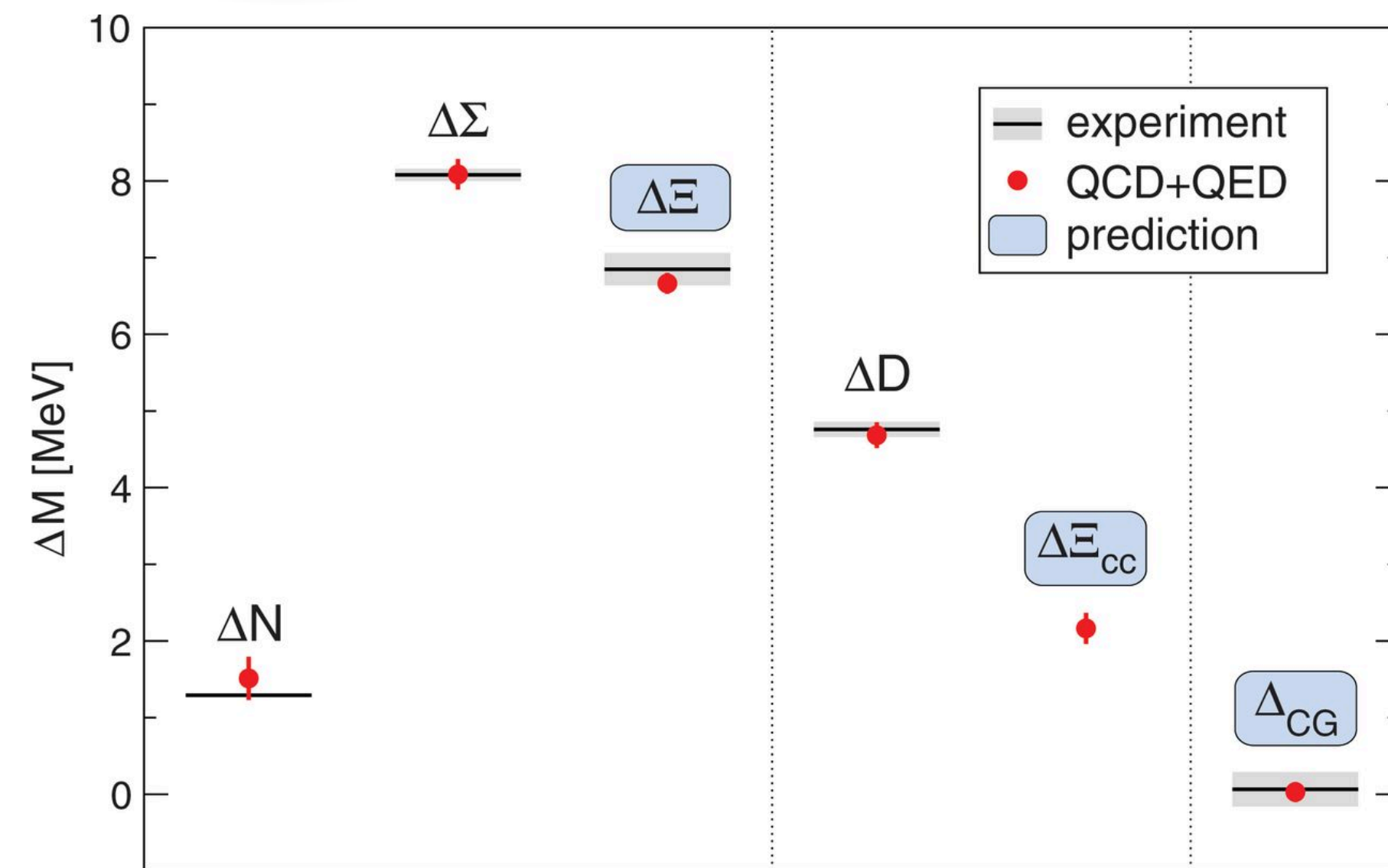
3. まとめ

格子QCDとハドロン物理

- [(計算機性能+理論)の発展] → クォーク質量物理点での計算が可能に
- (基底状態の)ハドロンの質量はほぼ再現

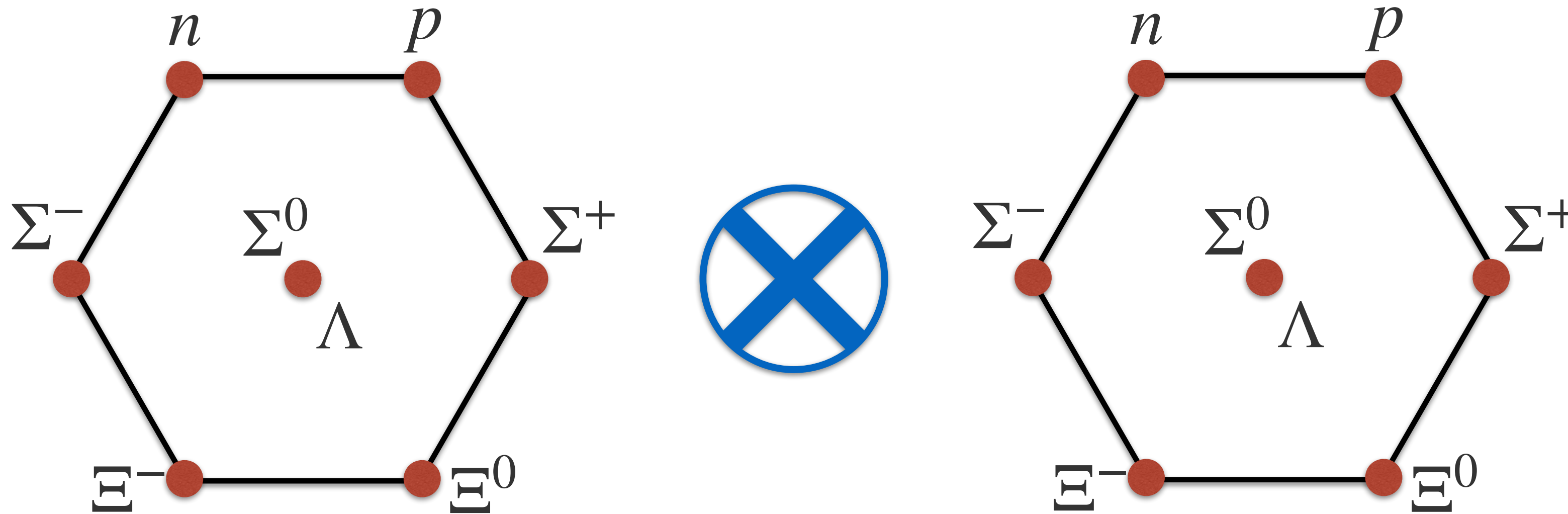


Aoki et al. (2009)



Borsanyi et al. (2015)

バリオン 8 重項 + バリオン 8 重項

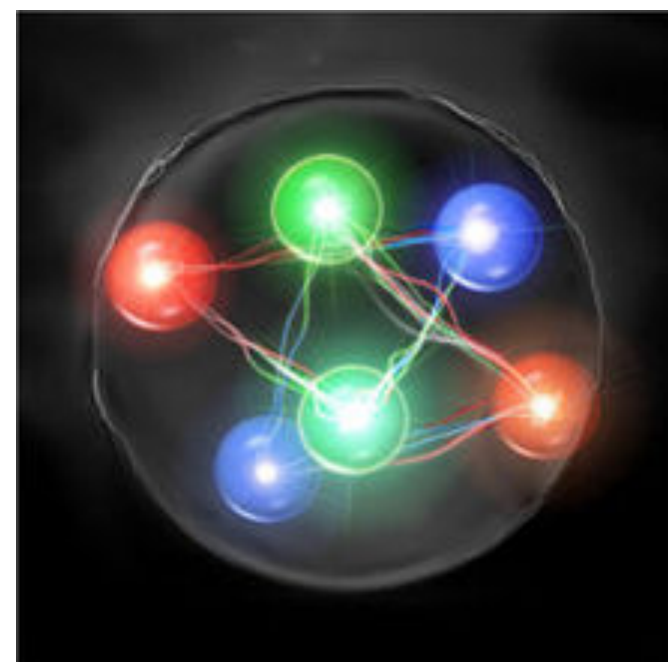


$$27 \oplus 8_S \oplus 1 \oplus 10 \oplus \overline{10} \oplus 8_A$$

↑
重陽子

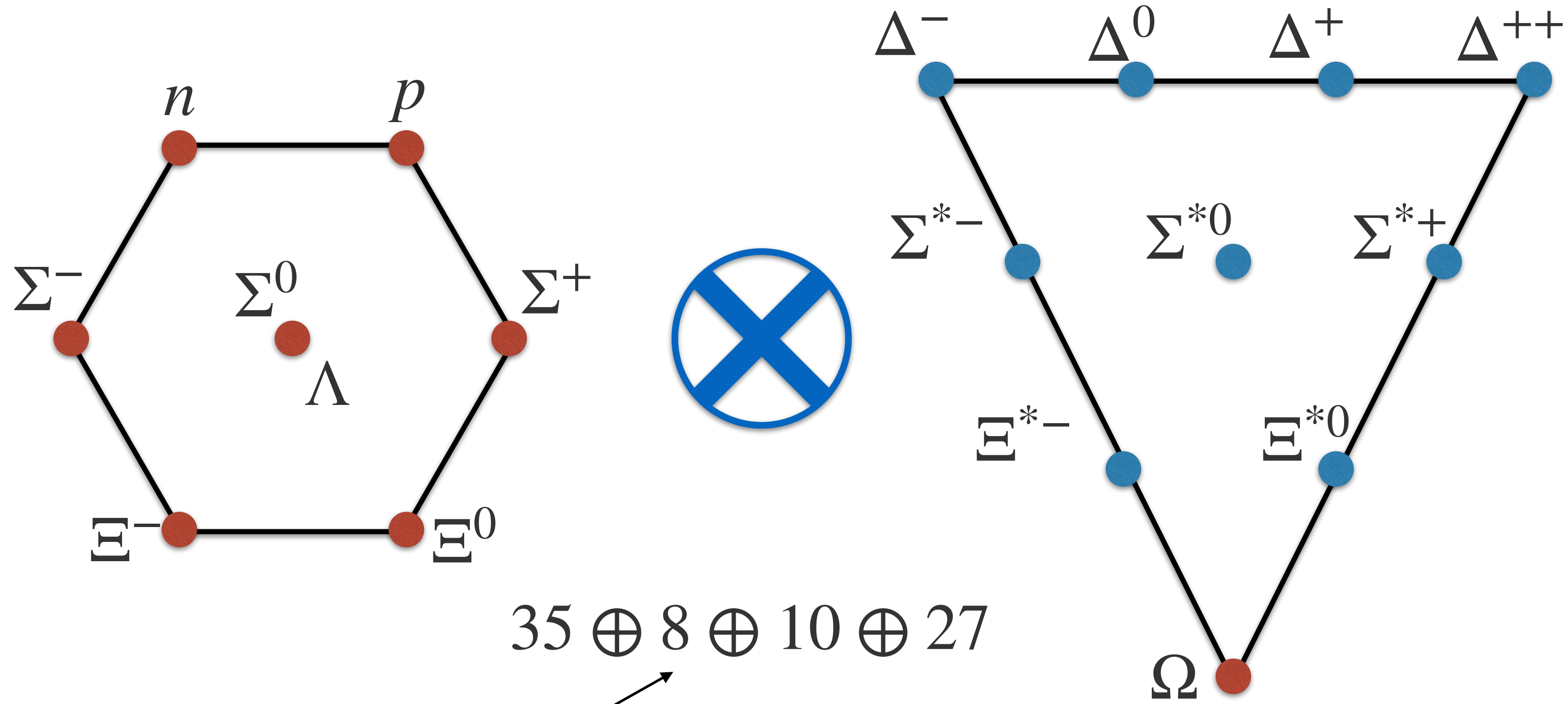
H-ダイバリオン (?)

Jaffe '77



up x 2
dow x 2
strange x 2

バリオン 8 重項 + バリオン 10 重項



$$35 \oplus 8 \oplus 10 \oplus 27$$

$$N\Omega(J = 2)$$

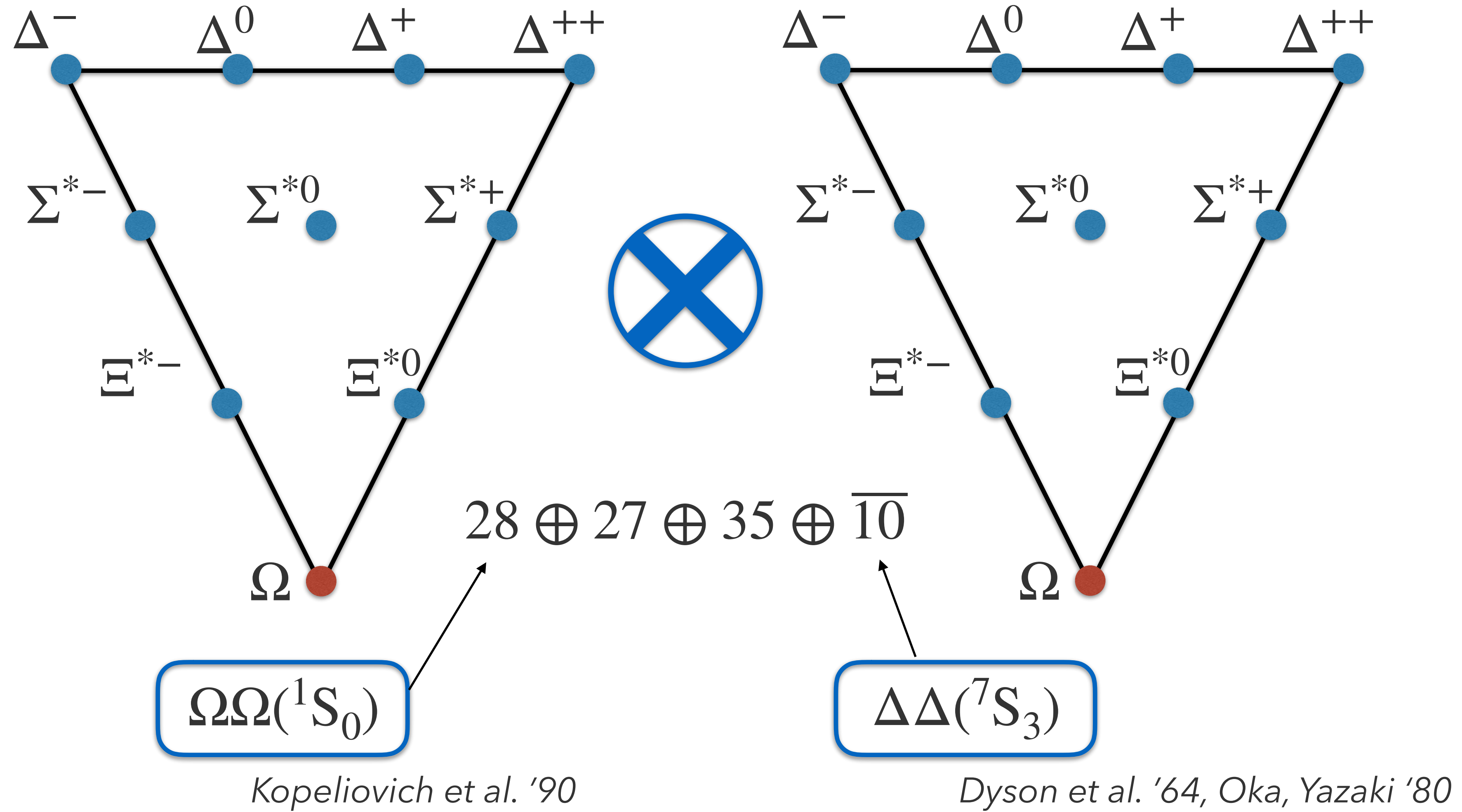
Ω: “弱い力”で崩壊 → 長寿命

N(uud/udd) + Ω(sss): Pauli Blocking なし

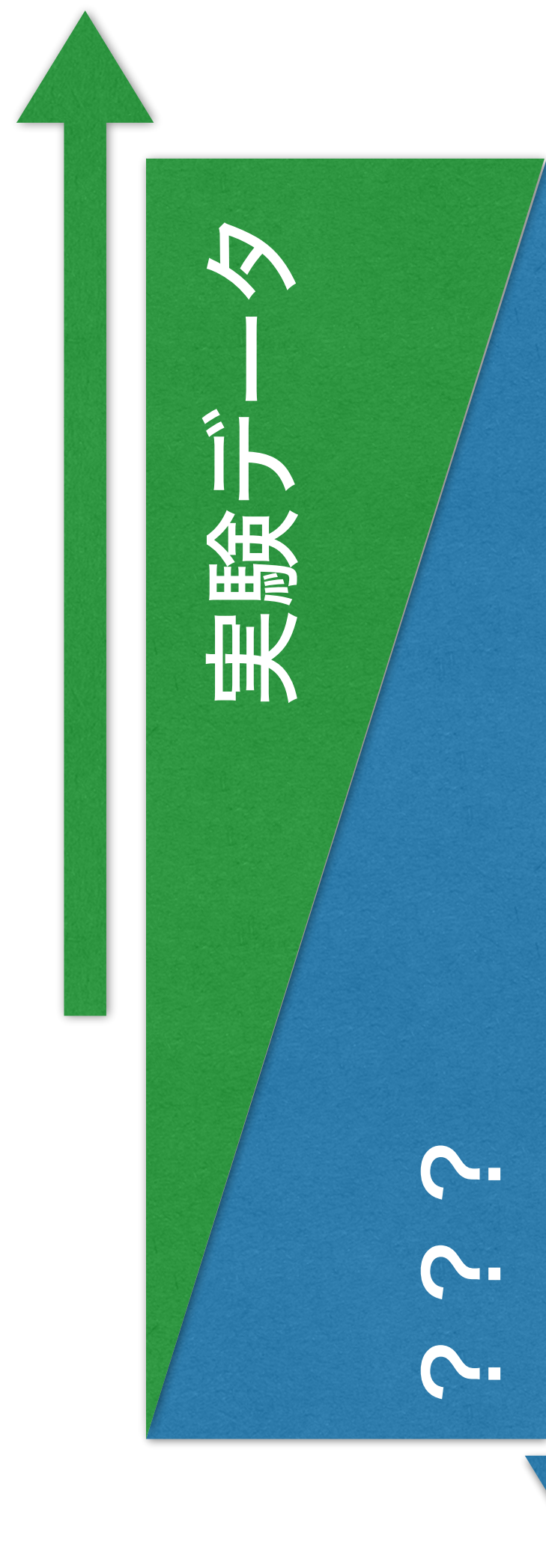
Goldman et al. '87, Oka '88, ...

➡ “ダイバリオン”の候補

バリオン 10 重項 + バリオン 10 重項



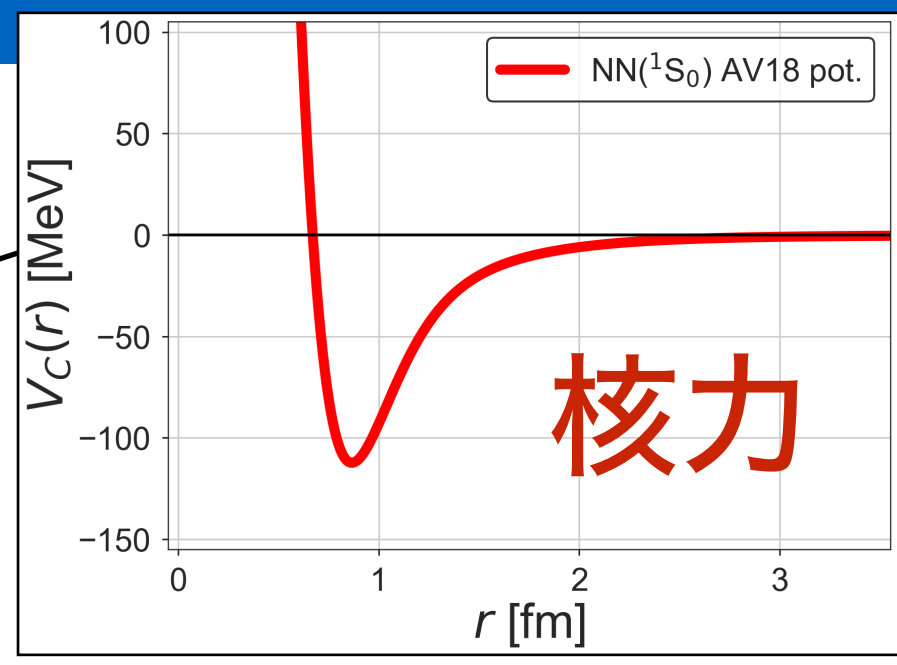
サブ課題B: 物質創生史の解明と物質変換 – バリオン間相互作用の解明



- $S = 0$ NN
- $S = -1$ $N\Lambda, N\Sigma$
- $S = -2$ $\Lambda\Sigma, \Lambda\Lambda, \Sigma\Sigma, N\Xi$
- $S = -3$ $\Lambda\Xi, \Sigma\Xi$ $N\Omega$
- $S = -4$ $\Xi\Xi$
- $S = -5$ $\Xi\Omega$
- $S = -6$ $\Omega\Omega$

状態方程式

ダイバリオン?



中性子星の内部構造

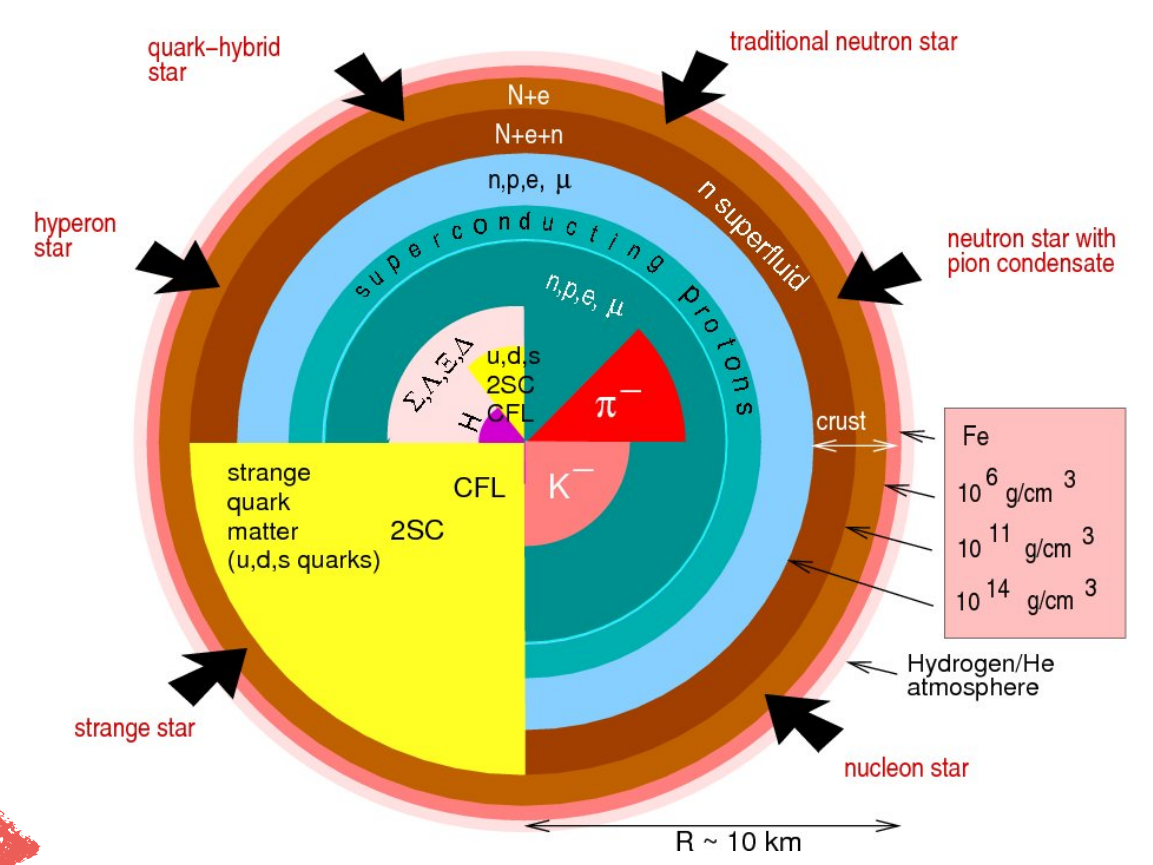
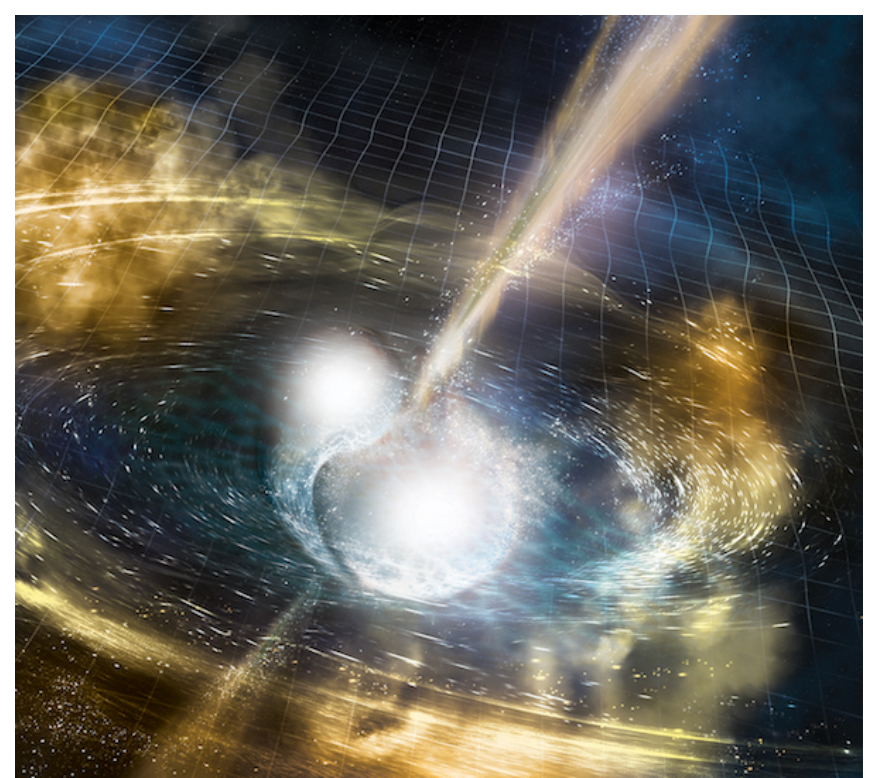


Fig. Weber '08

中性子星合体



(C) NSF/LIGO /Sonoma State University /A. Simonnet

$|S| \neq 0 \rightarrow$ 乏しい実験データ、信頼出来る格子QCD計算が不可欠

バリオン多体系の格子QCD第一原理計算の課題点

時間相関から**基底状態エネルギー**の測定 → 十分な虚時間発展

$$C_{NN}(t) = c_0 \exp(-E_0^{NN} t) + c_1 \exp(-E_1^{NN} t) + \dots \simeq c_0 \exp(-E_0^{NN} t)$$

- **SN比問題 (A: 質量数)**

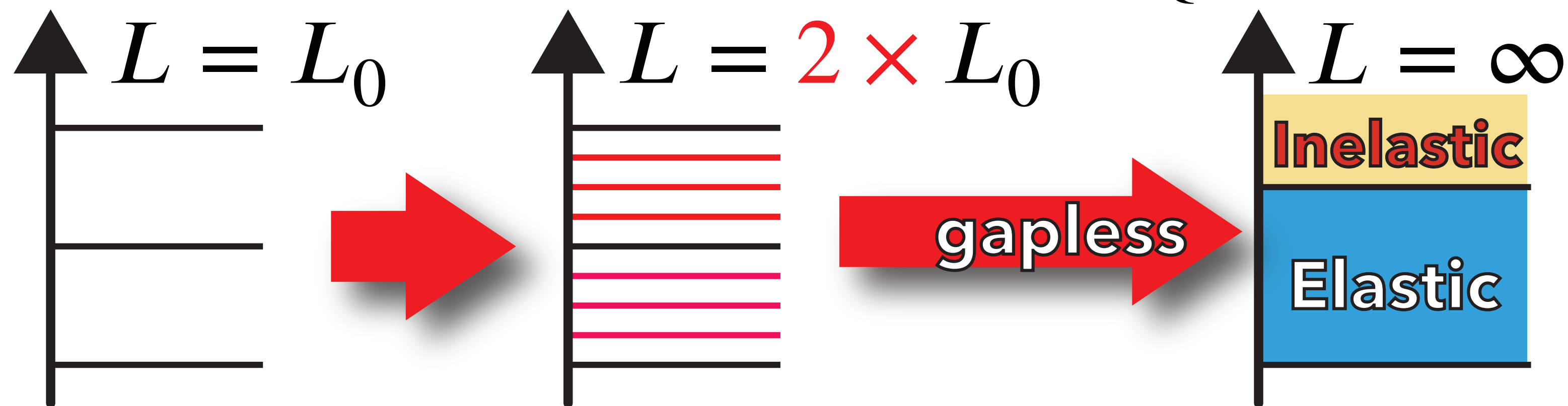
Parisi '84, Lepage '89

$$S/N \sim \exp[-A \times (m_N - (3/2)m_\pi) \times t]$$

ex. $L = 8 \text{ fm} \rightarrow \Delta E \simeq 25 \text{ MeV} \rightarrow t > 10 \text{ fm} \quad S/N \sim 10^{-32}$

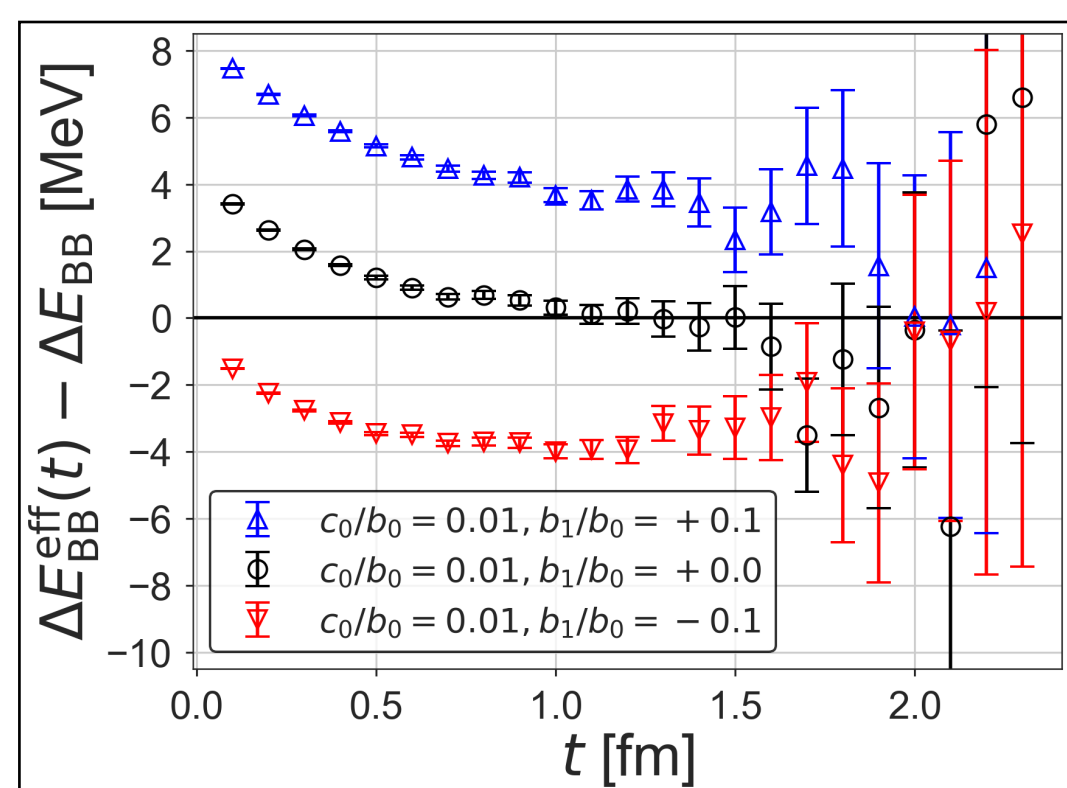
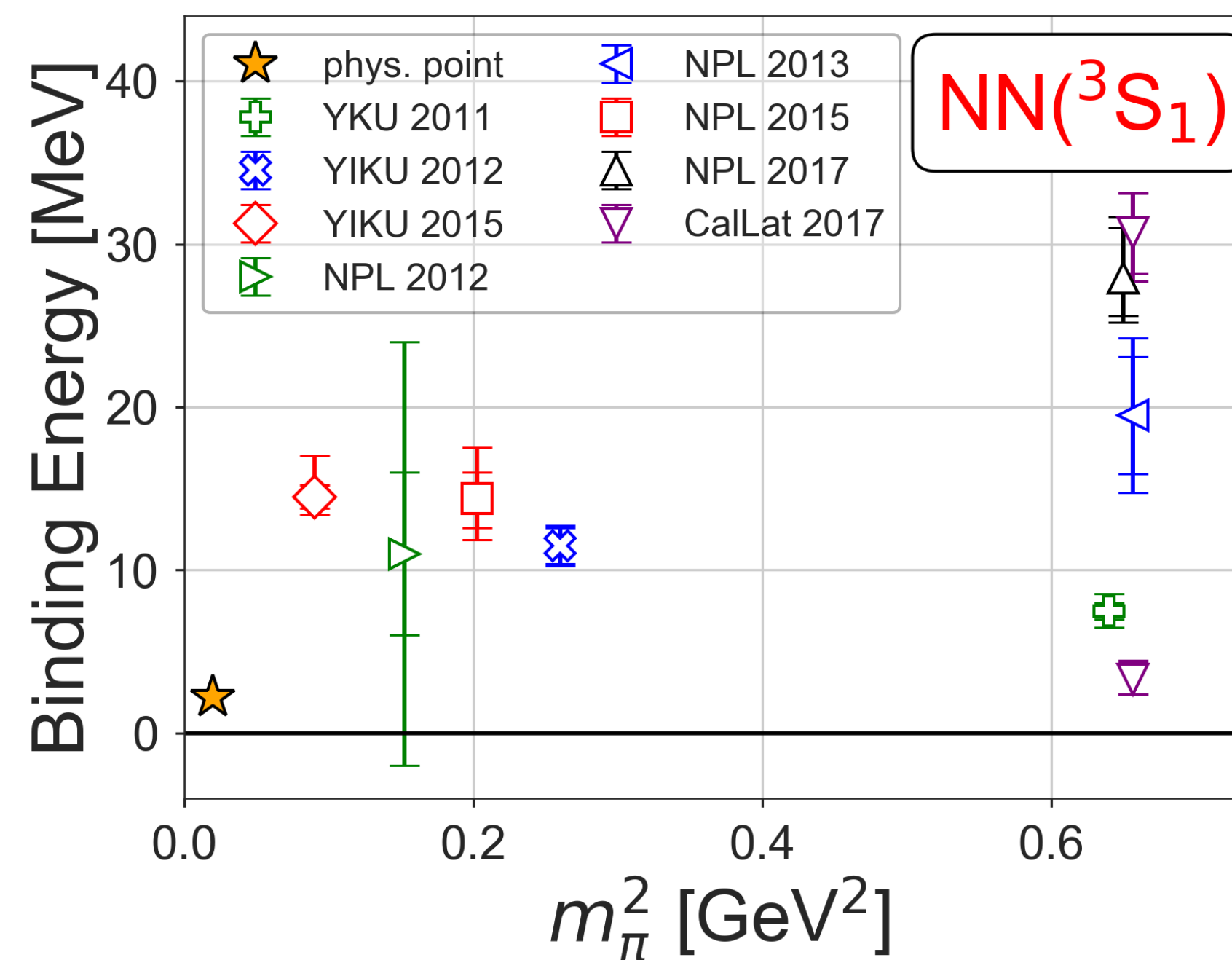
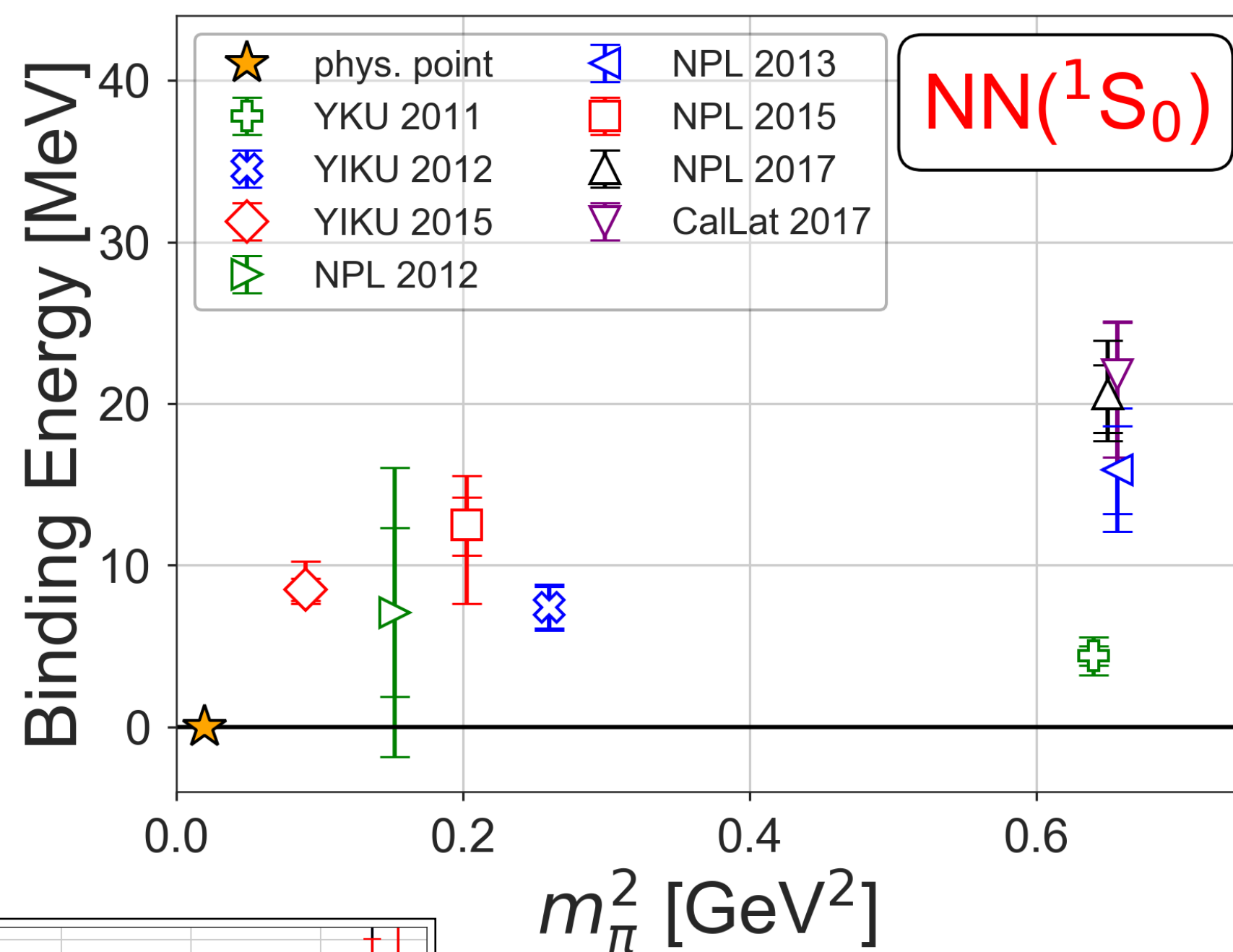
散乱状態の分離問題

$$\Delta E \sim p^2 / m_N \sim \mathcal{O}(1/L^2) \ll \mathcal{O}(\Lambda_{\text{QCD}})$$



従来の時間相関による2核子系研究

重いクォーク質量では「**重陽子・ダイニュートロン**」が**深く束縛**？



時間相関のみで**基底状態の収束**は**保証されない!!!**

これらの結果は**奇妙な散乱位相差**を示し、束縛状態と結論付けるには不十分

格子QCDによるバリオン2体系研究: HAL QCD法

Ishii-Aoki-Hatsuda '06

Hadrons to Atomic nuclei from Lattice QCD

◆ 2粒子の空間相関

Nambu-Bethe-Salpeter 波動関数

$$\psi_k(\vec{r}) = \langle 0 | B(\vec{r}) B(\vec{0}) | B(\vec{k}) B(-\vec{k}); \text{in} \rangle$$

- 漸近領域 $r \gg R$

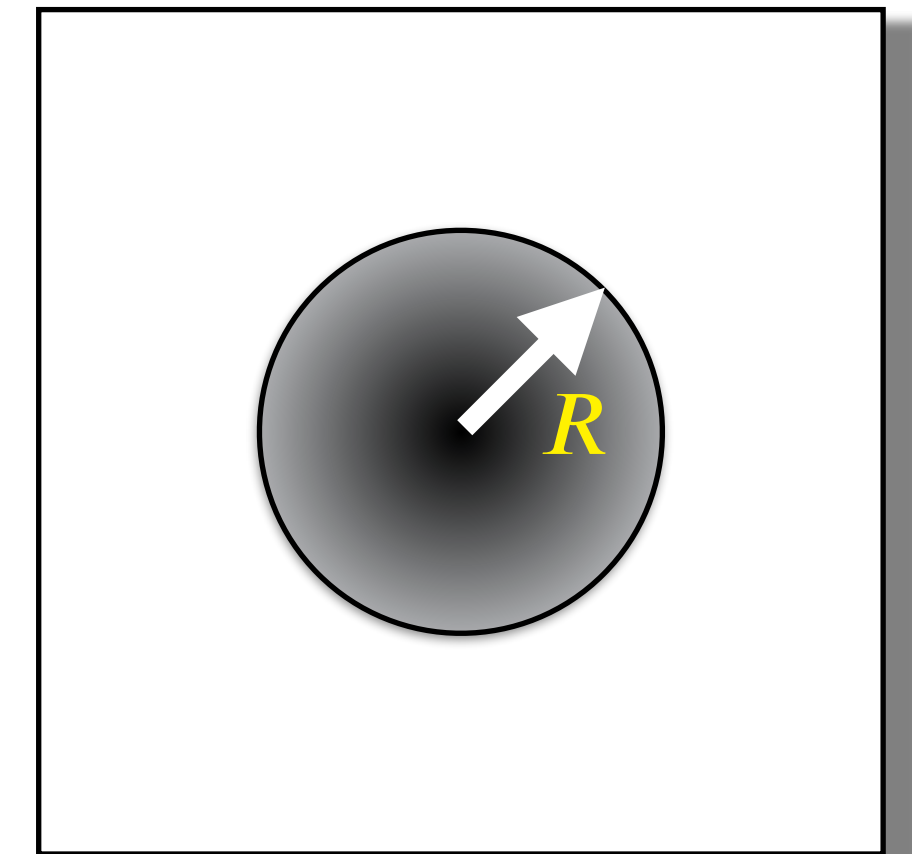
$$\psi_k(\vec{r}) \simeq C \sin(kr - l\pi/2 + \delta(k)) / (kr)$$

- 相互作用領域 $r < R$

$$(\nabla^2 + k^2)\psi_k(\vec{r}) = m \int d\vec{r}' U(\vec{r}, \vec{r}') \psi_k(\vec{r}')$$

エネルギー非依存 & 非局所 & 位相差に忠実

$$U(\vec{r}, \vec{r}') = \sum_{|\vec{p}| \leq p_{\text{th}}} [E_p - H_0] \psi_p(\vec{r}) \psi_p^*(\vec{r}')$$



HAL QCD 法: NBS 波動関数 \rightarrow $U(r, r')$ \rightarrow 観測量(散乱位相差)

$$R(\vec{r}, t) \equiv \langle 0 | T \{ B(\vec{x} + \vec{r}, t) B(\vec{x}, t) \} \bar{J}_{2B}(0) | 0 \rangle / \{ C_B(t) \}^2$$

$$= \sum_n a_n \psi_{W_n}(\vec{r}) e^{-(W_n - 2m_B)t} + \mathcal{O}(e^{-\Delta W_{\text{th}}t})$$

基底・散乱状態のNBS波動関数

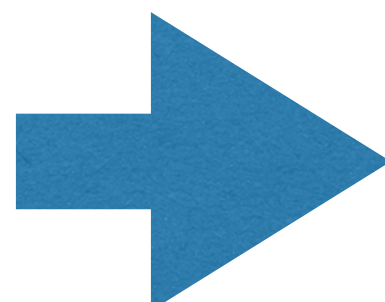
$$[E_{W_0} - H_0] \psi_{W_0}(\vec{r}) = \int d\vec{r}' U(\vec{r}, \vec{r}') \psi_{W_0}(\vec{r}')$$

$$[E_{W_1} - H_0] \psi_{W_1}(\vec{r}) = \int d\vec{r}' U(\vec{r}, \vec{r}') \psi_{W_1}(\vec{r}')$$

⋮

$$\mathcal{O}(e^{-\delta E_{\text{inel}}t}) \ll \mathcal{O}(e^{-\delta E_{\text{el}}t})$$

非弾性状態が無視できるなら (基底状態への飽和より容易)



$$\left[\frac{1}{4m_B} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial t} - H_0 \right] R(\vec{r}, t) = \int d\vec{r}' U(\vec{r}, \vec{r}') R(\vec{r}', t)$$

時間依存型HAL QCD法 (2)

$$\left[\frac{1}{4m_B} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial t} - H_0 \right] R(\vec{r}, t) = \int d\vec{r}' U(\vec{r}, \vec{r}') R(\vec{r}', t)$$

エネルギー非依存 & 非局所 $U(r, r')$: **微分展開** → 局所ポテンシャル

$$U(\vec{r}, \vec{r}') = \left[V_0(\vec{r}) + V_1(\vec{r}) \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + V_2(\vec{r}) \nabla^2 + \dots \right] \delta(\vec{r} - \vec{r}')$$

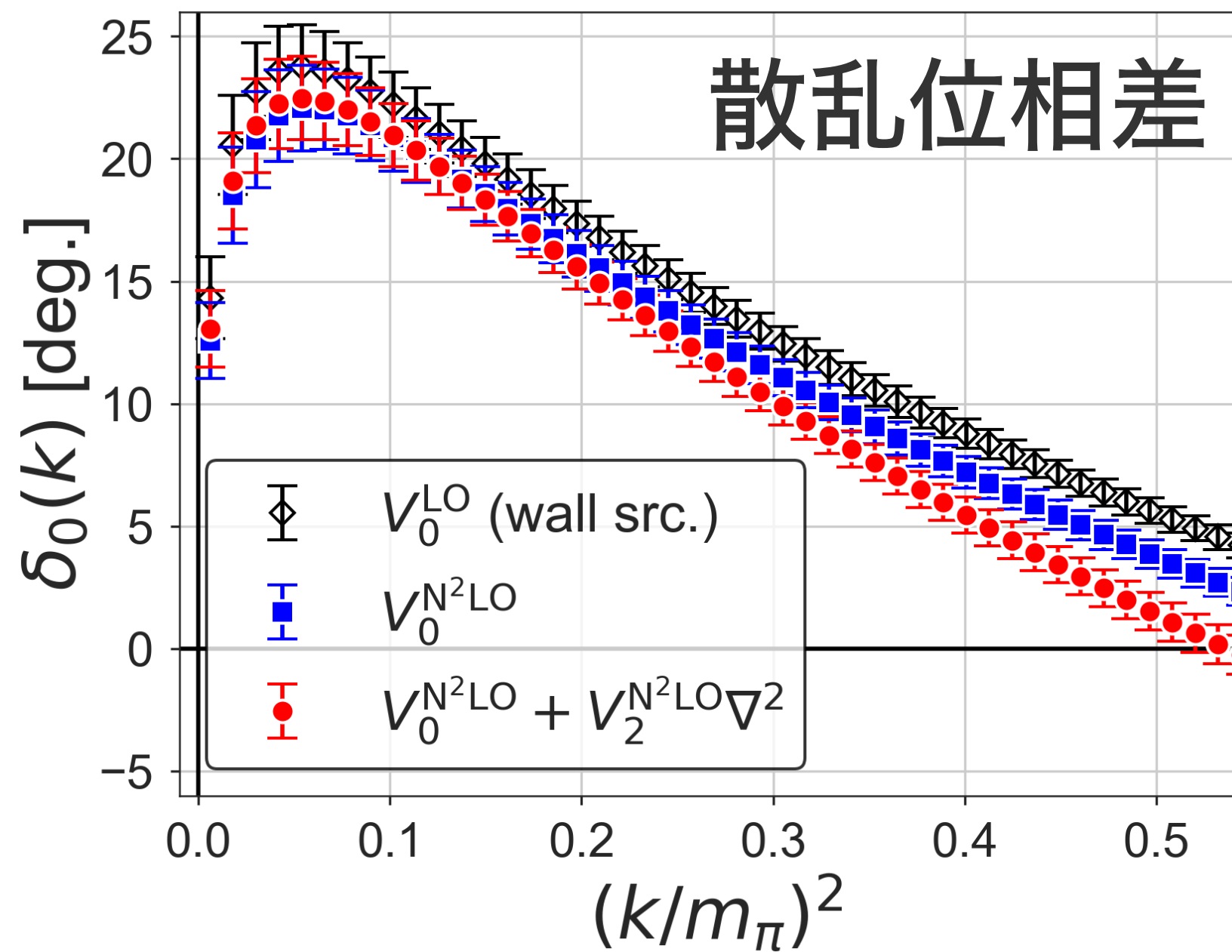
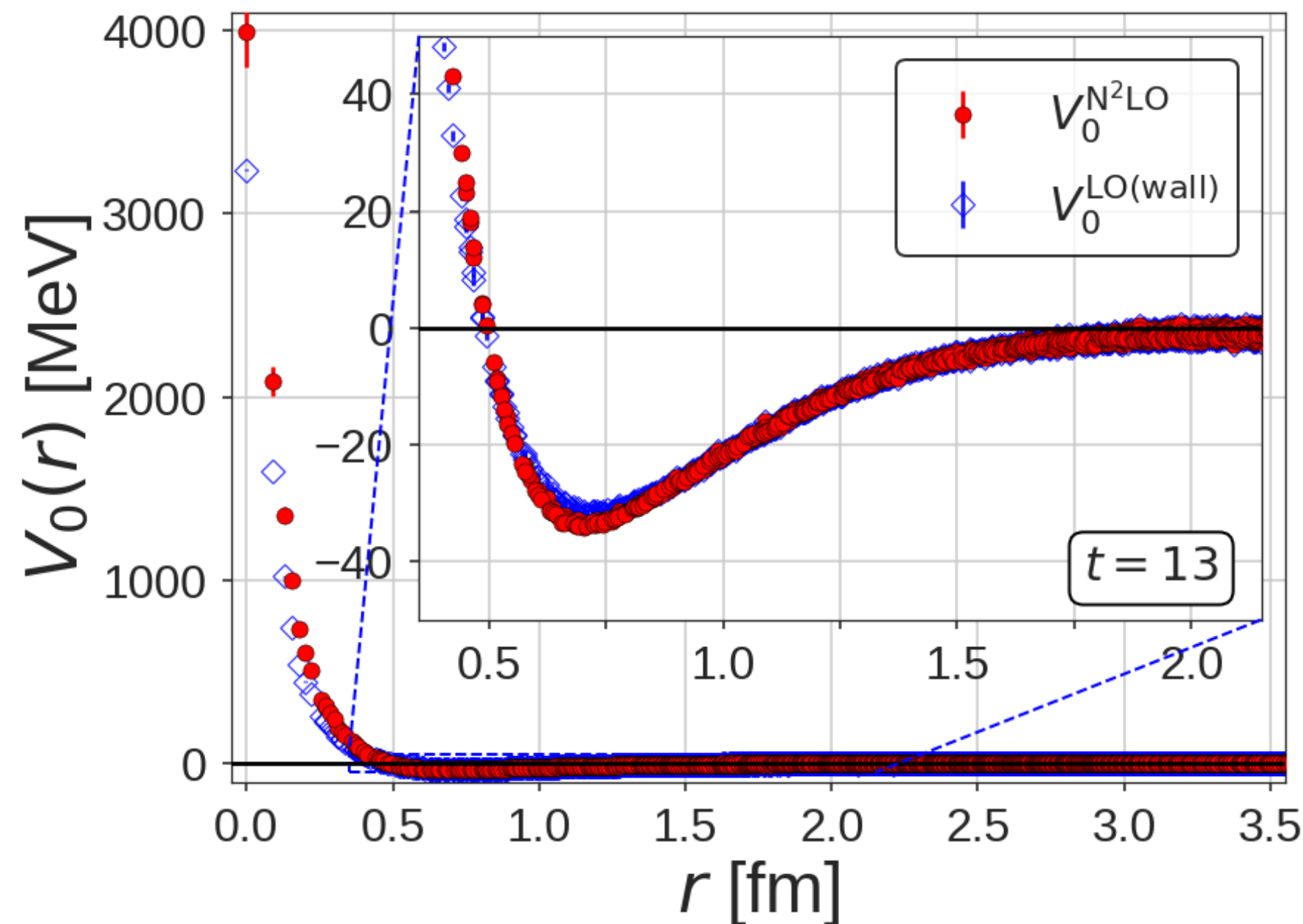
wall-type quark src. & **“Leading order approx.”** 収束を確認!!

$$U(\vec{r}, \vec{r}') \simeq V_0^{\text{LO}}(\vec{r}) \delta(\vec{r} - \vec{r}')$$

Ref: TI for HAL QCD Coll.

>> [arXiv:1805.02365](https://arxiv.org/abs/1805.02365)

$\Xi\Xi(^1S_0)$ system at $m_\pi = 510$ MeV



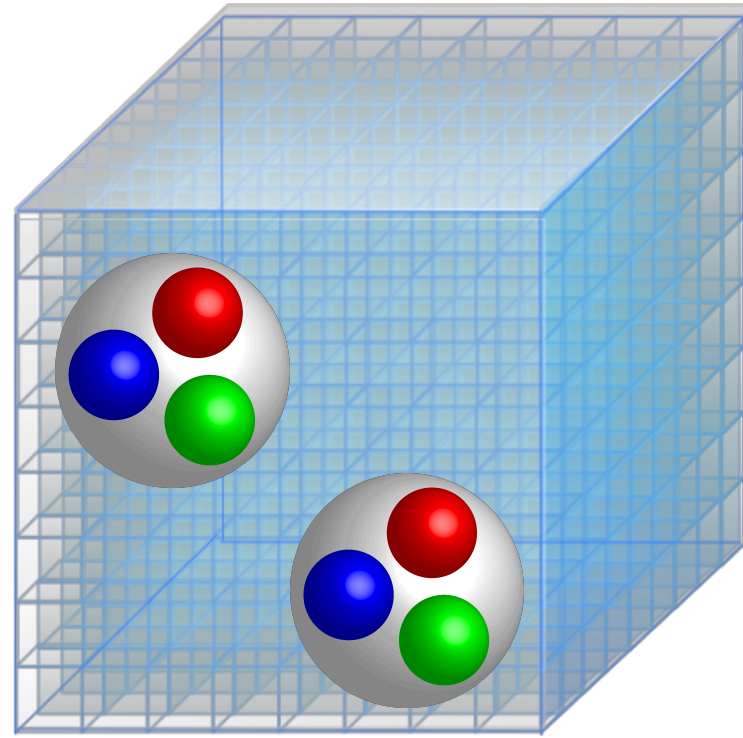
1. バリオン 2 体系と格子QCD計算

2. 核子・オメガ粒子系@物理点

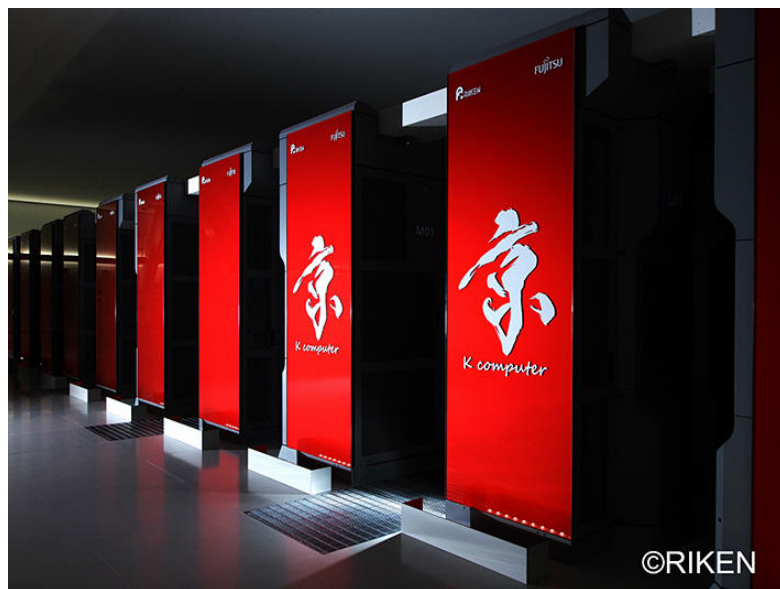
3. まとめ

2バリオン系計算 @ (ほぼ)物理点

- $96^4 \sim (8.1 \text{ fm})^4$ (格子間隔 0.085 fm)
- $M_\pi = 146 \text{ MeV}, M_K = 525 \text{ MeV}, M_N = 964 \text{ MeV}$



K-computer & FX100 @ RIKEN



NN
 $N\Lambda, N\Sigma$
 $\Lambda\Lambda, \Lambda\Sigma, \Sigma\Sigma, N\Xi$
 $\Lambda\Xi, \Sigma\Xi$
 $\Xi\Xi$
 $\Xi\Omega$
 $\Omega\Omega$

$N\Omega$

実験データ

高精度格子計算

$N\Omega(^5S_2)$ の **single channel** 解析

$\Lambda\Xi, \Sigma\Xi$ への崩壊はD-waveで抑制

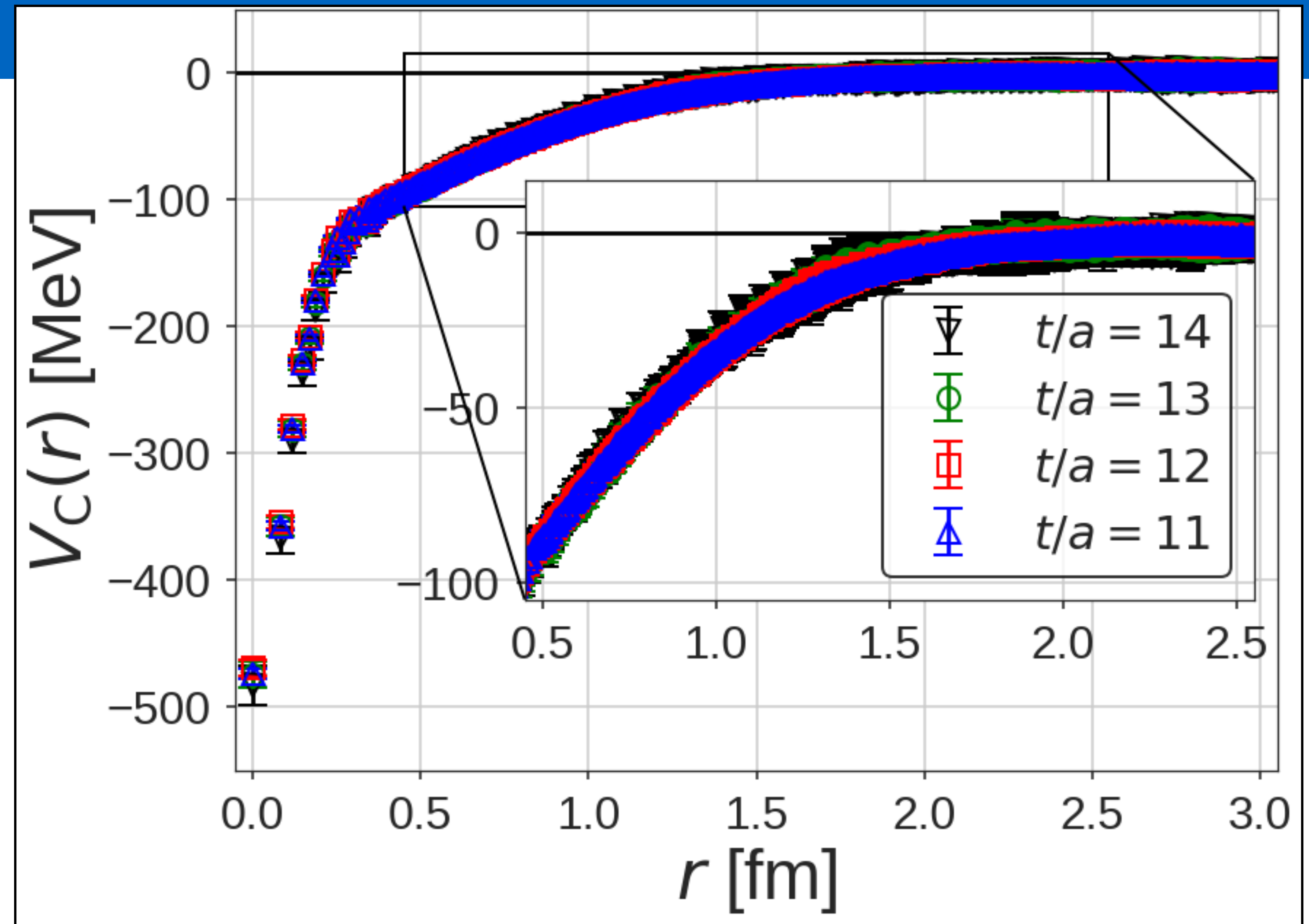
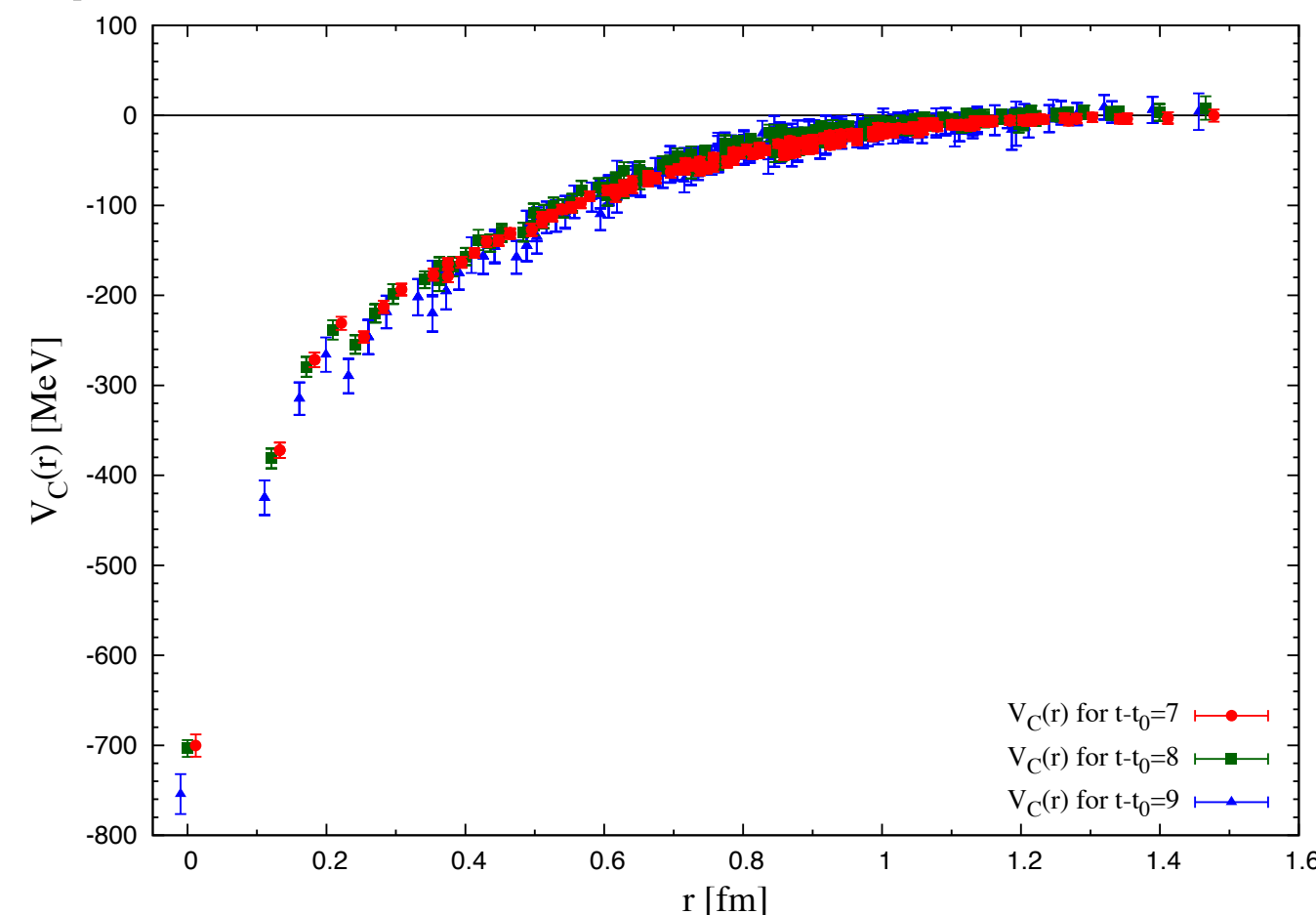
$N\Omega(^5S_2)$: ポテンシャル

- 強い引力・斥力芯なし

時間依存性が見えない

- ポテンシャルの微分展開の収束
- 結合チャンネル効果の抑制

重いクォーク質量の結果と
定性的には同じ



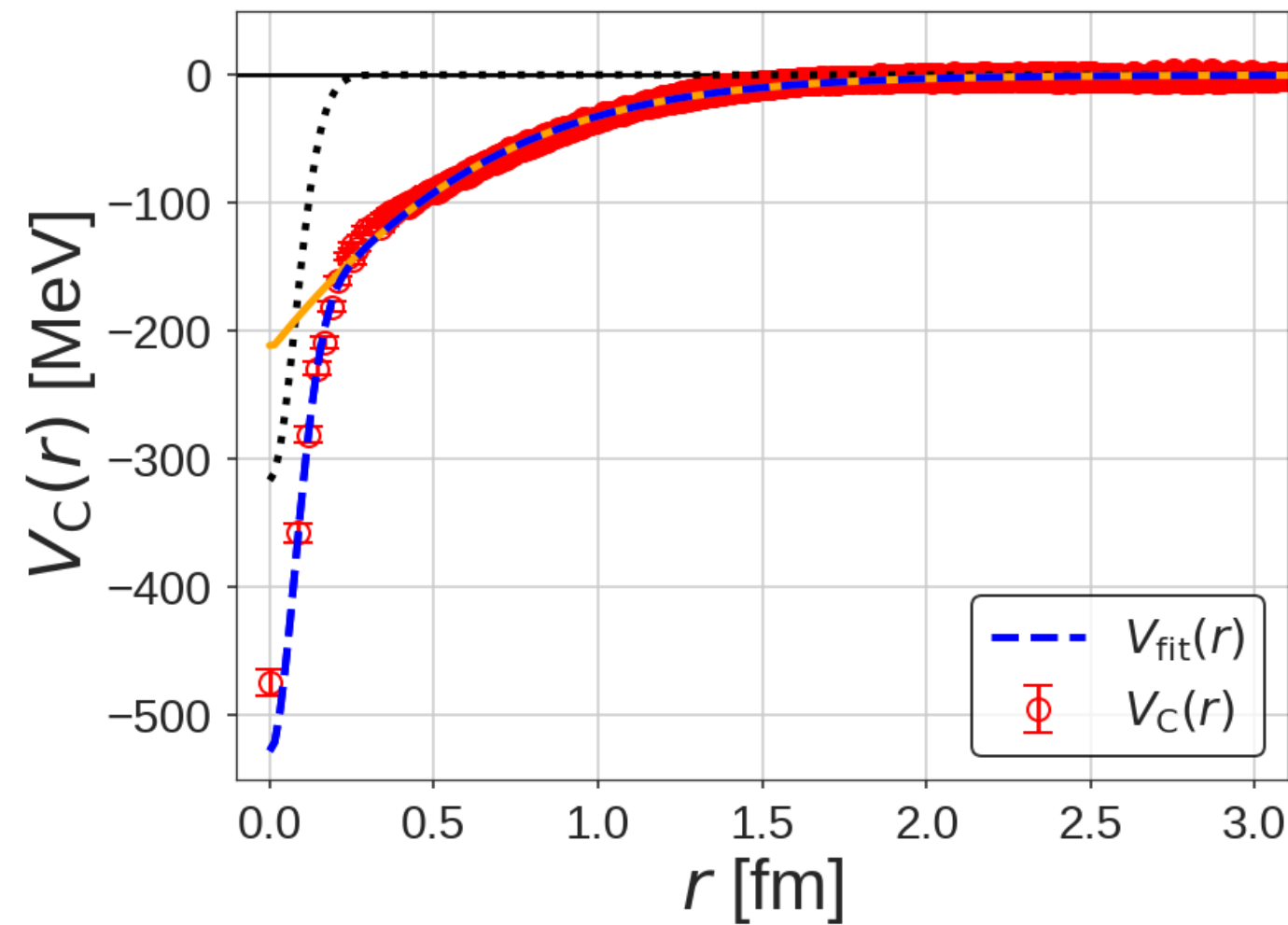
Etminan for HAL QCD Coll. '14

@ $M_{\pi} = 875$ MeV

B.E. = $18.9(5.0)(+12.1)(-1.8)$ MeV

$N\Omega(^5S_2)$: 散乱位相差

十分強い引力で“ダイバリオン”を形成

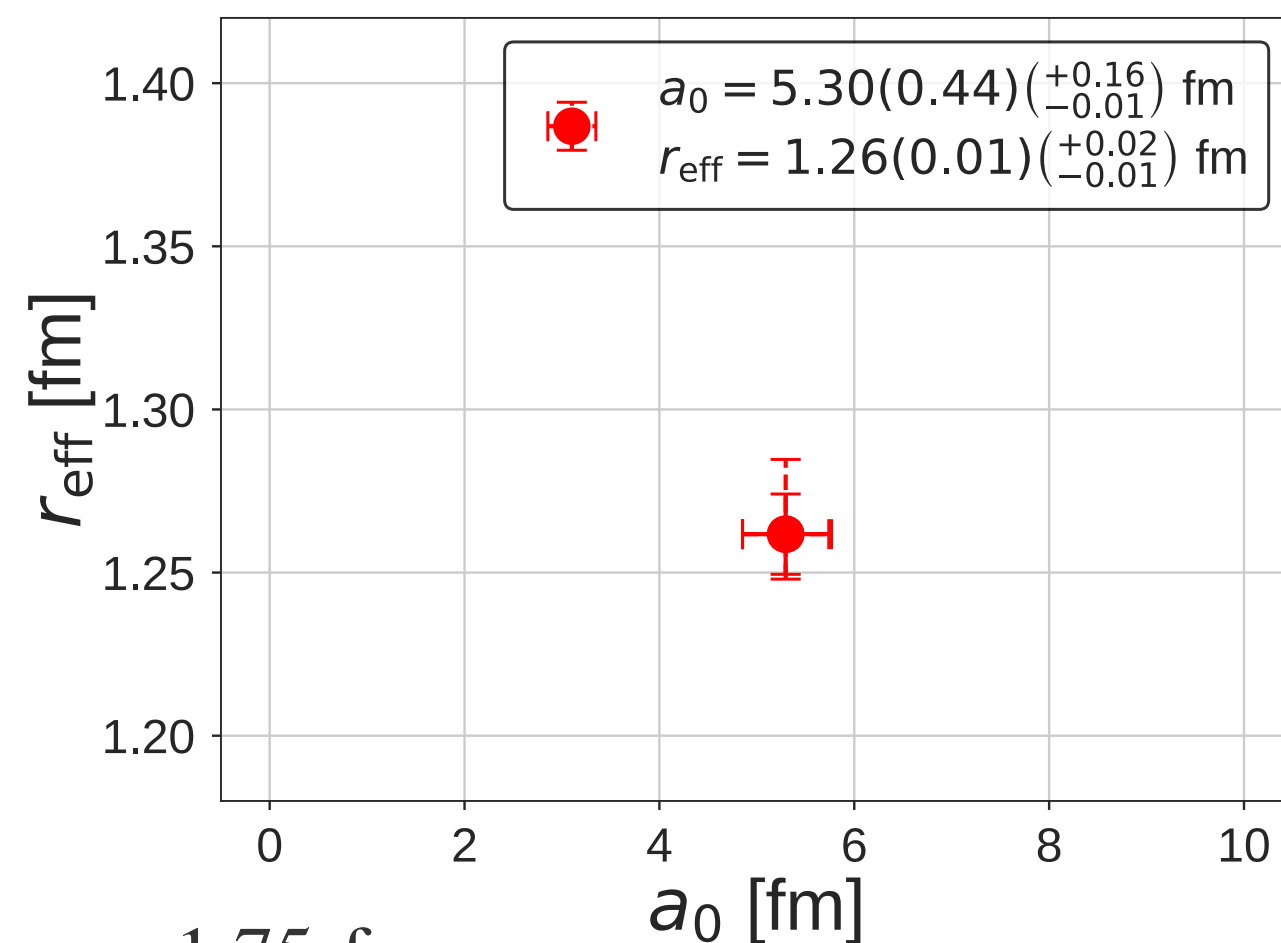
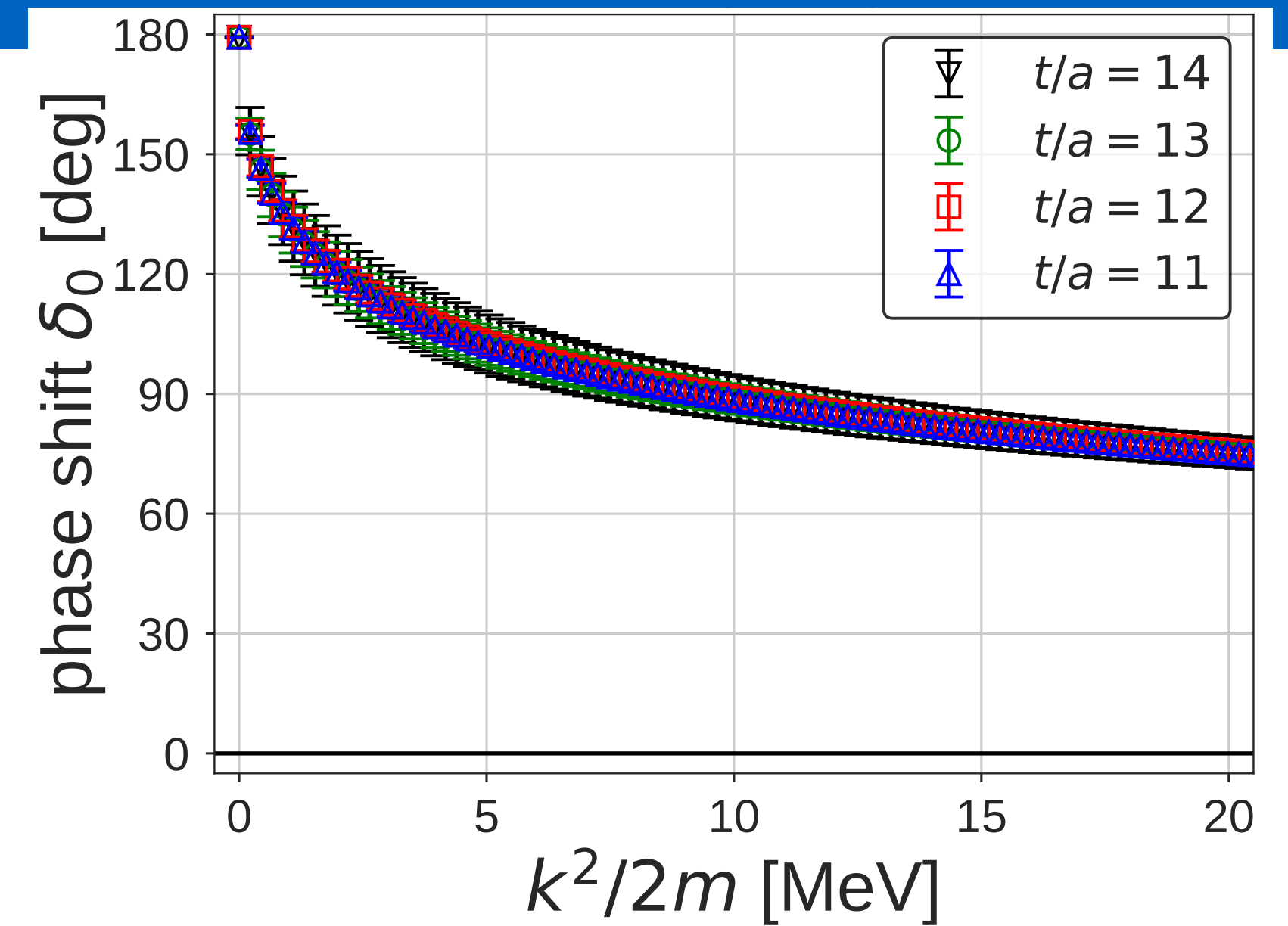


$$V_{\text{fit}} = b_1 e^{-b_2 r^2} + b_3 \left(1 - e^{-b_4 r^2}\right) \left(\frac{e^{-m_\pi r}}{r}\right)^2$$

Gauss + (Yukawa)²-type

$$\delta_0(0) = 180^\circ$$

ポテンシャルから観測量



cf. 重陽子

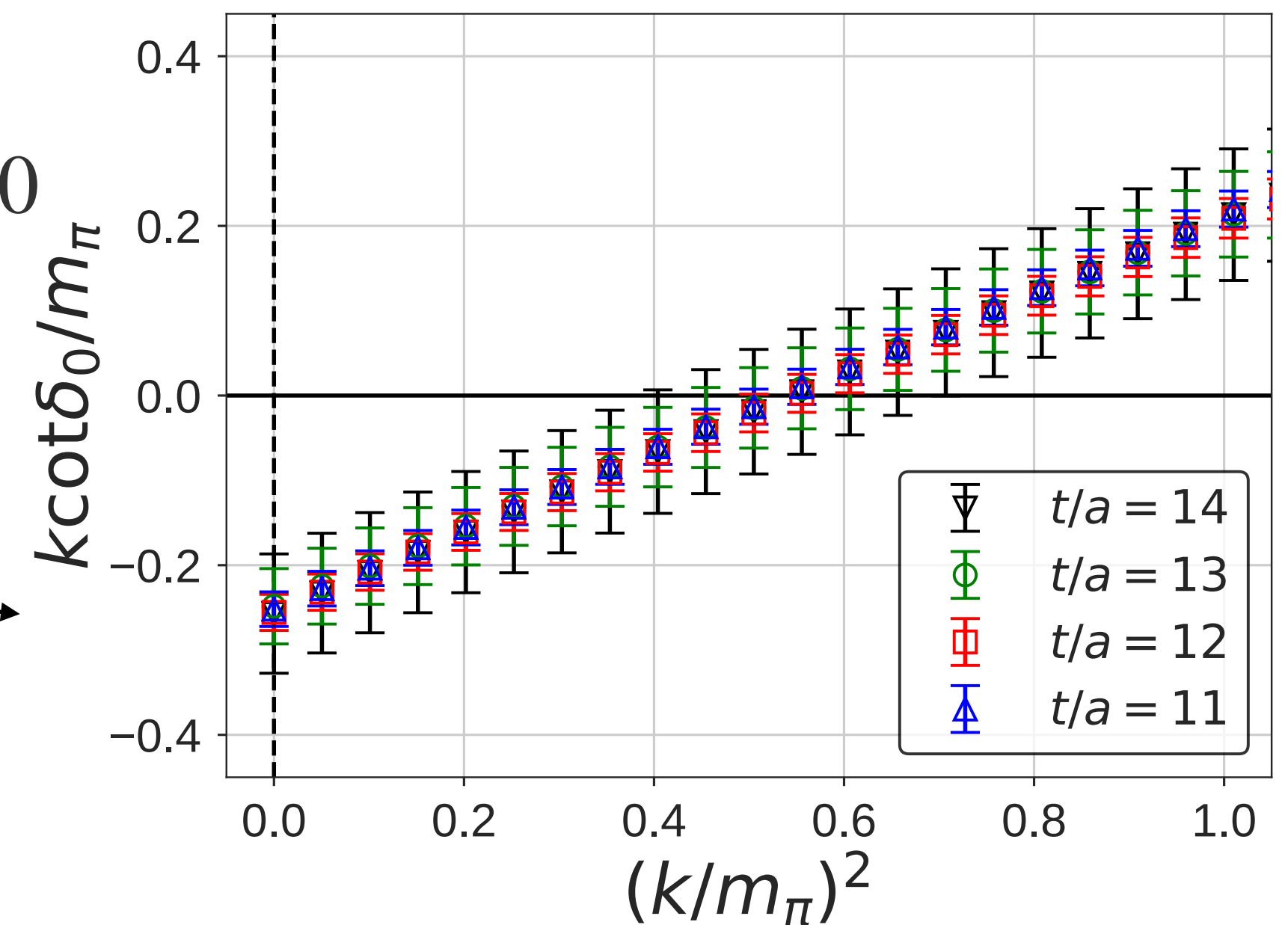
$$a_0 \simeq 5.41 \text{ fm}, r_{\text{eff}} \simeq 1.75 \text{ fm}$$

$$\lim_{k \rightarrow 0} k \cot \delta_0 \equiv -1/a_0 < 0$$

ERE パラメーター

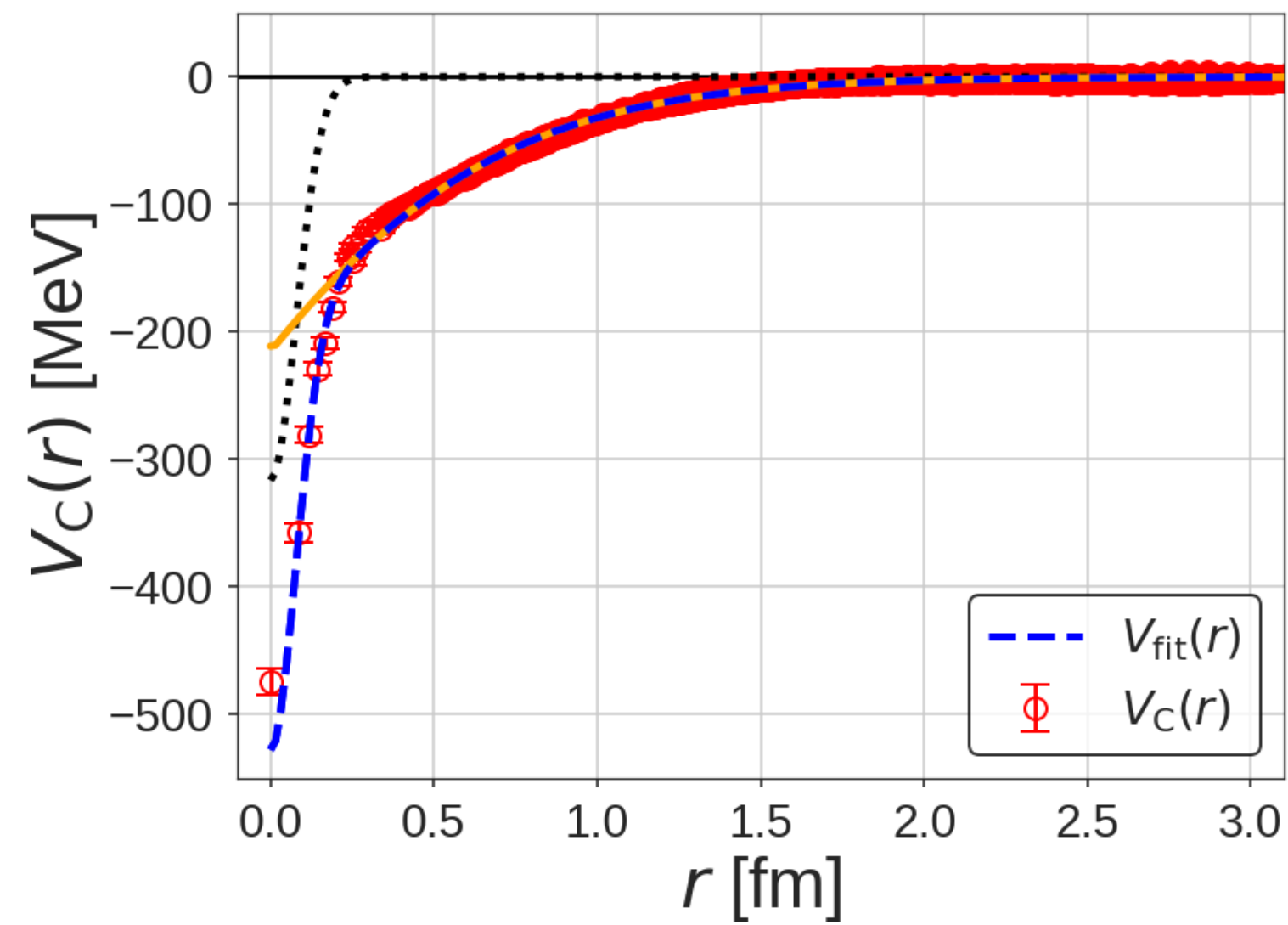
$$k \cot \delta_0 = -\frac{1}{a_0} + \frac{1}{2} r_{\text{eff}} k^2$$

散乱長 有効距離



NΩ系の束縛エネルギー

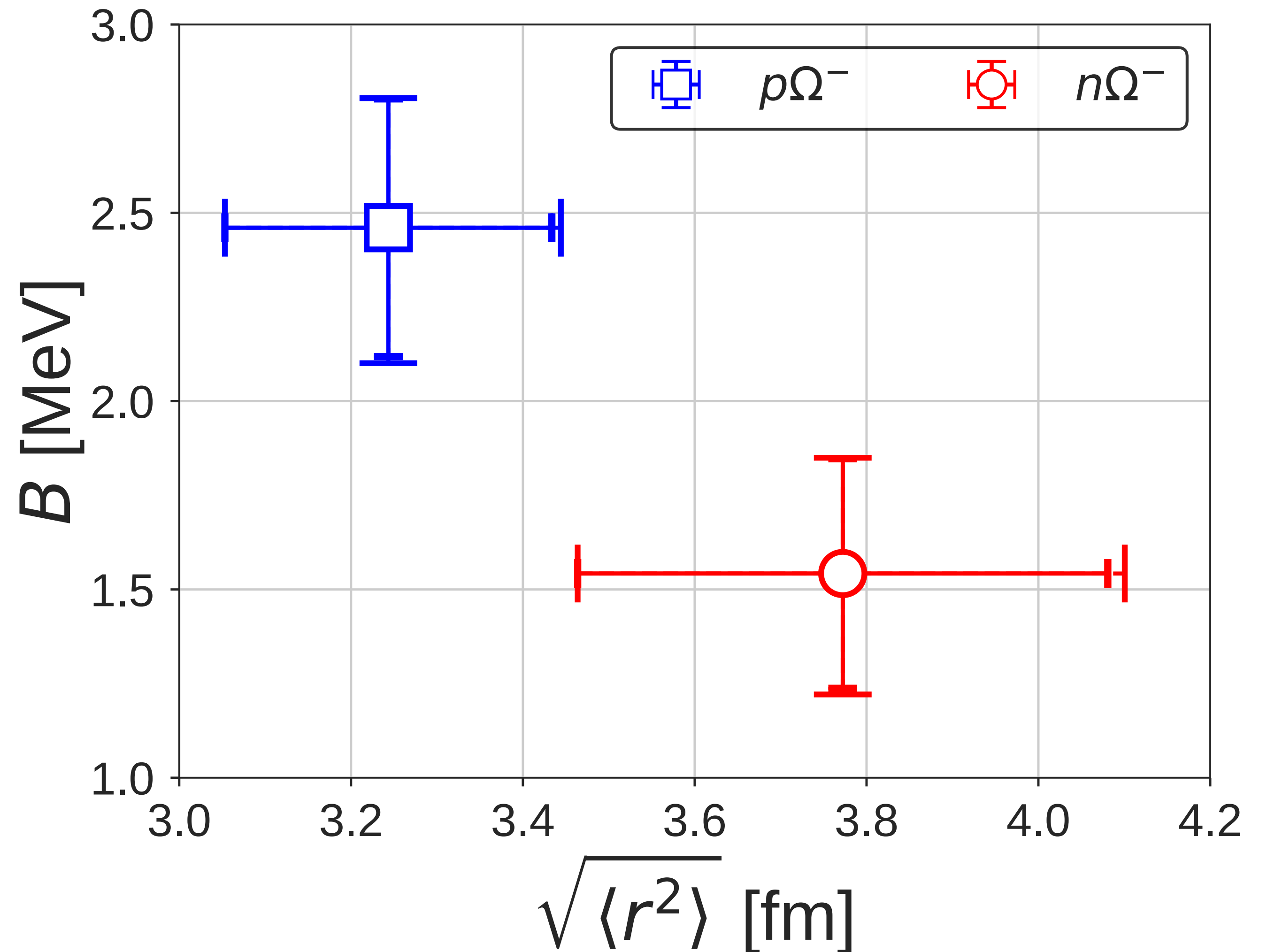
NΩ(⁵S₂)ポテンシャル



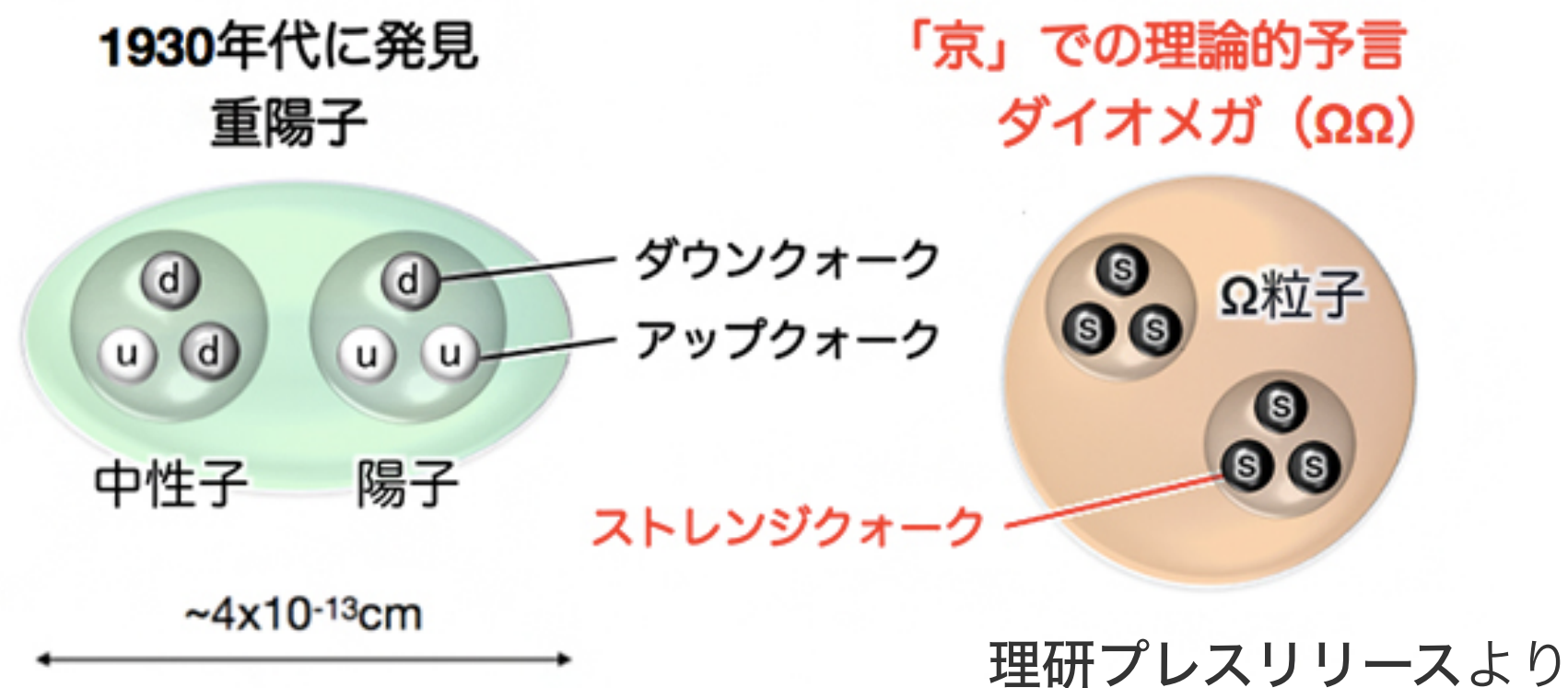
+ Coulomb 引力 ($p\Omega^-$)

$$-\frac{\alpha}{r}$$

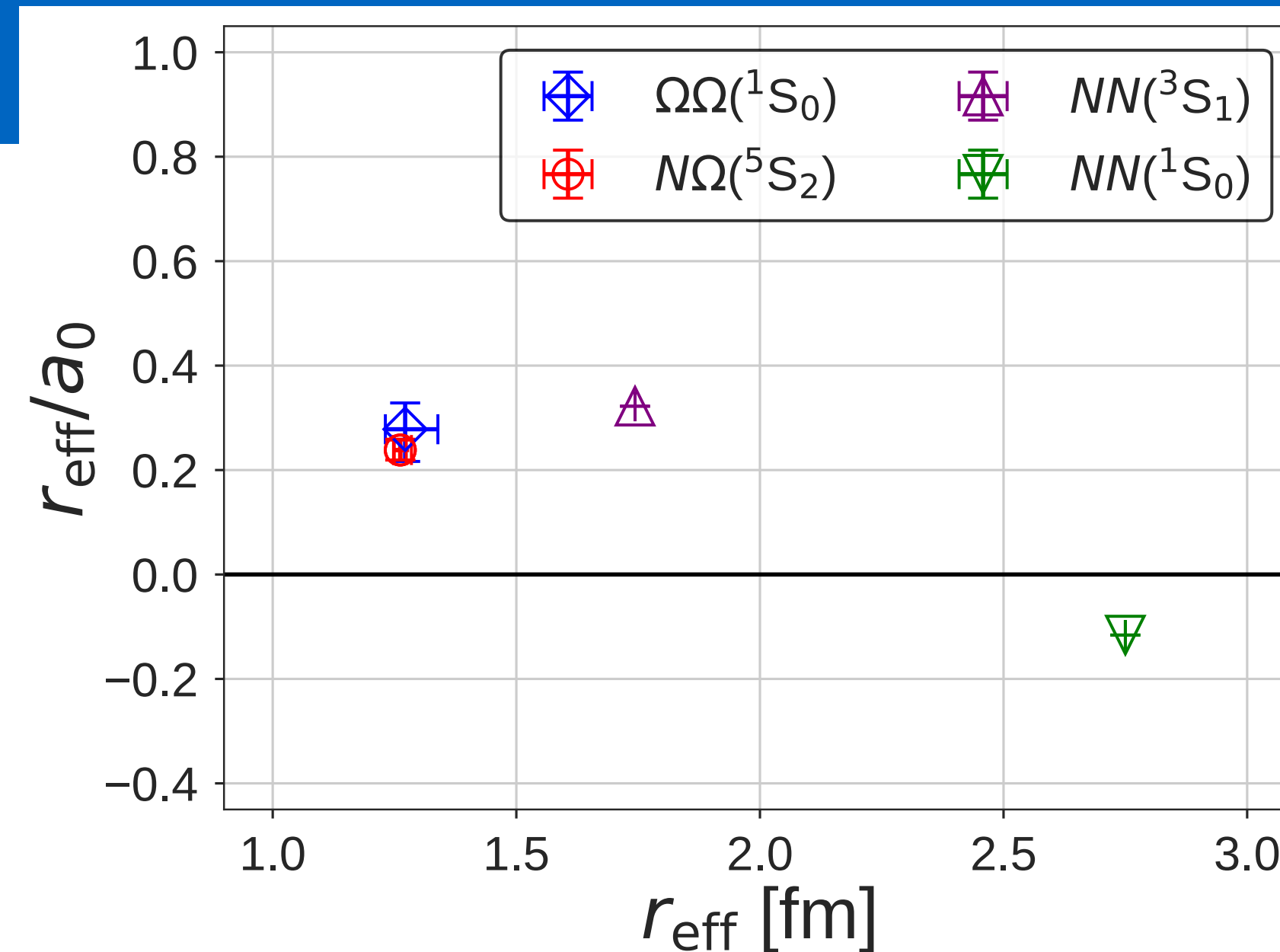
2 MeV 程度の束縛エネルギー



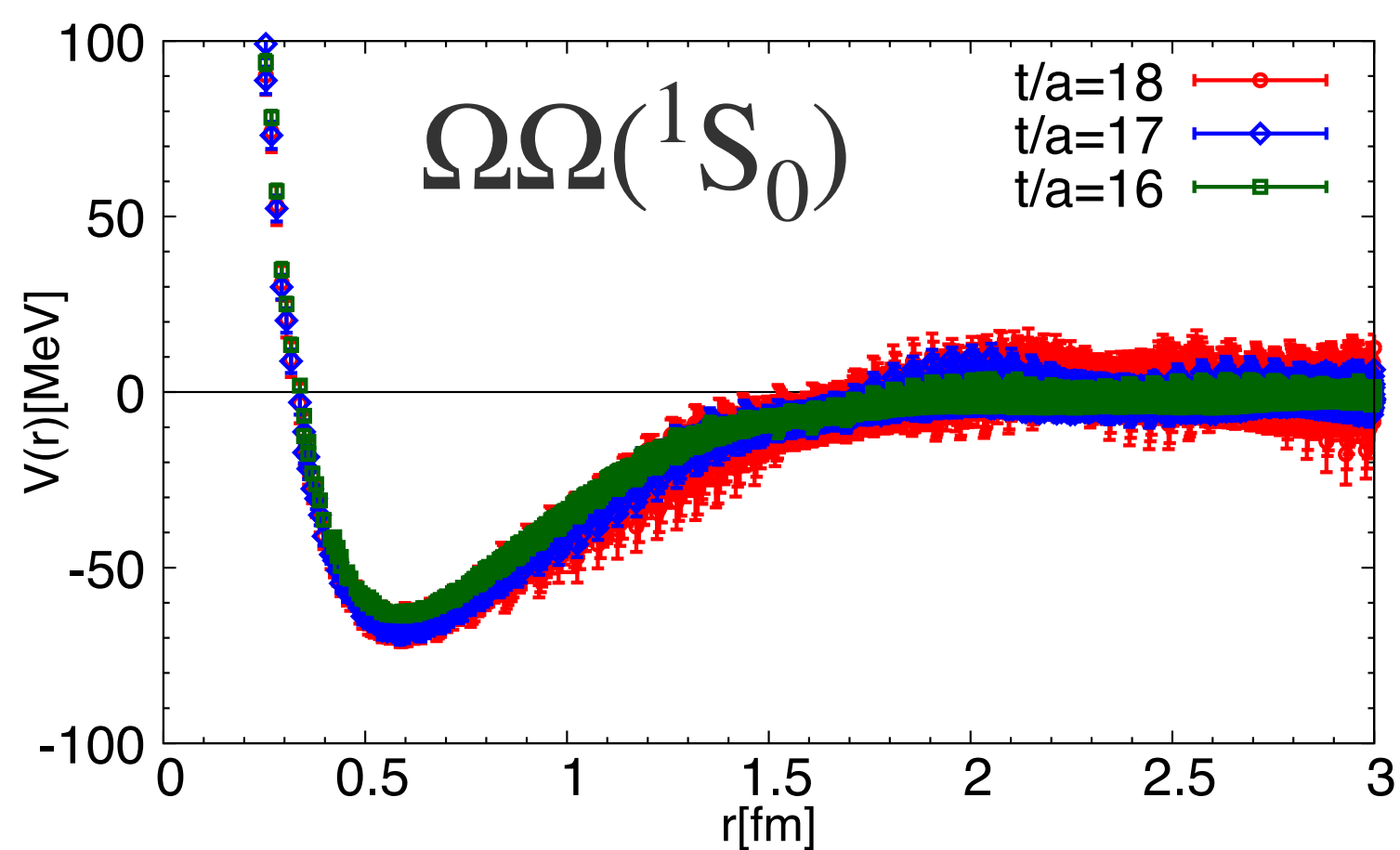
他のダイバリオン系との比較



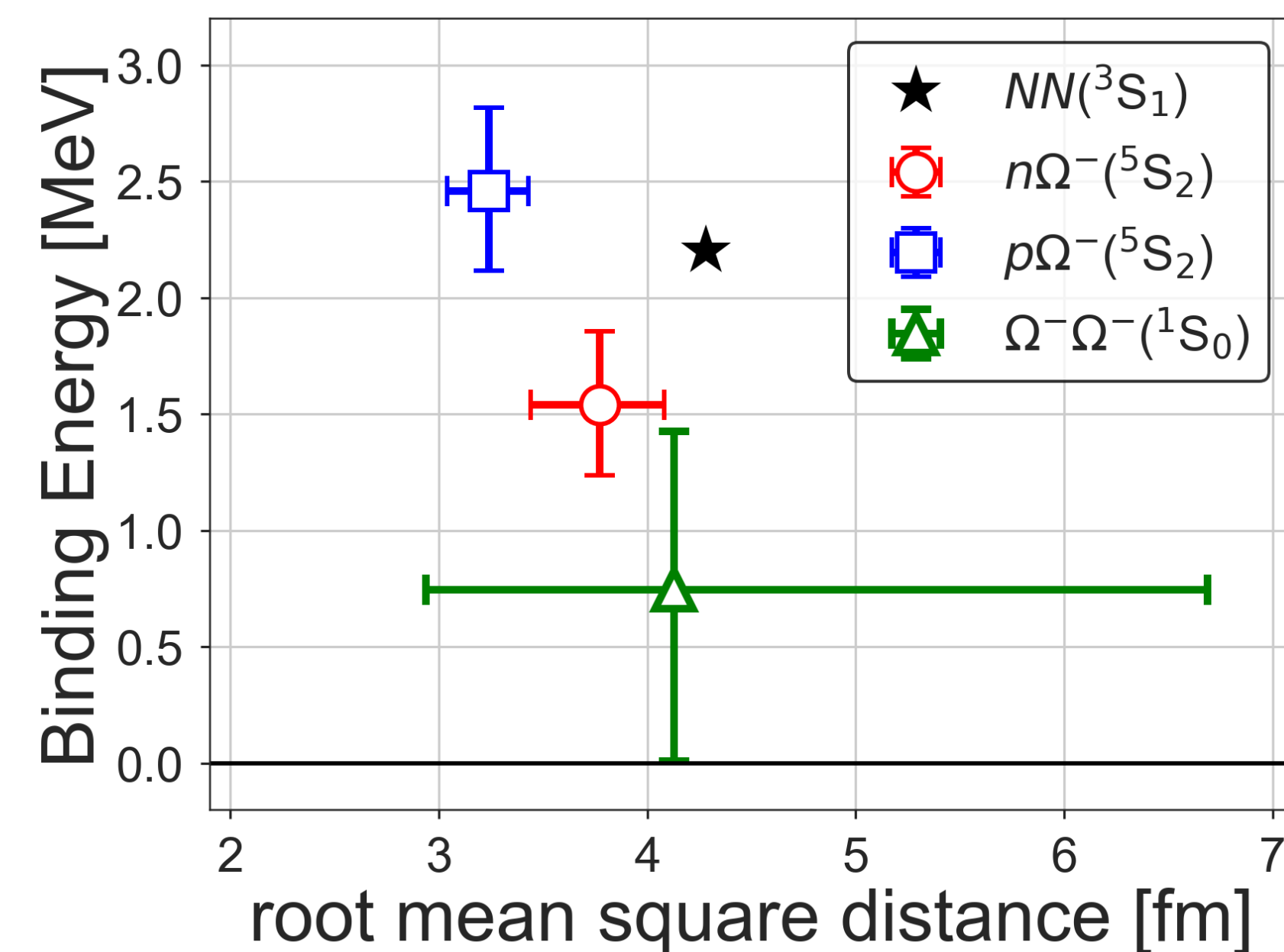
ユニタリー極限に近い
 $|r_{\text{eff}}/a_0| \ll 1$



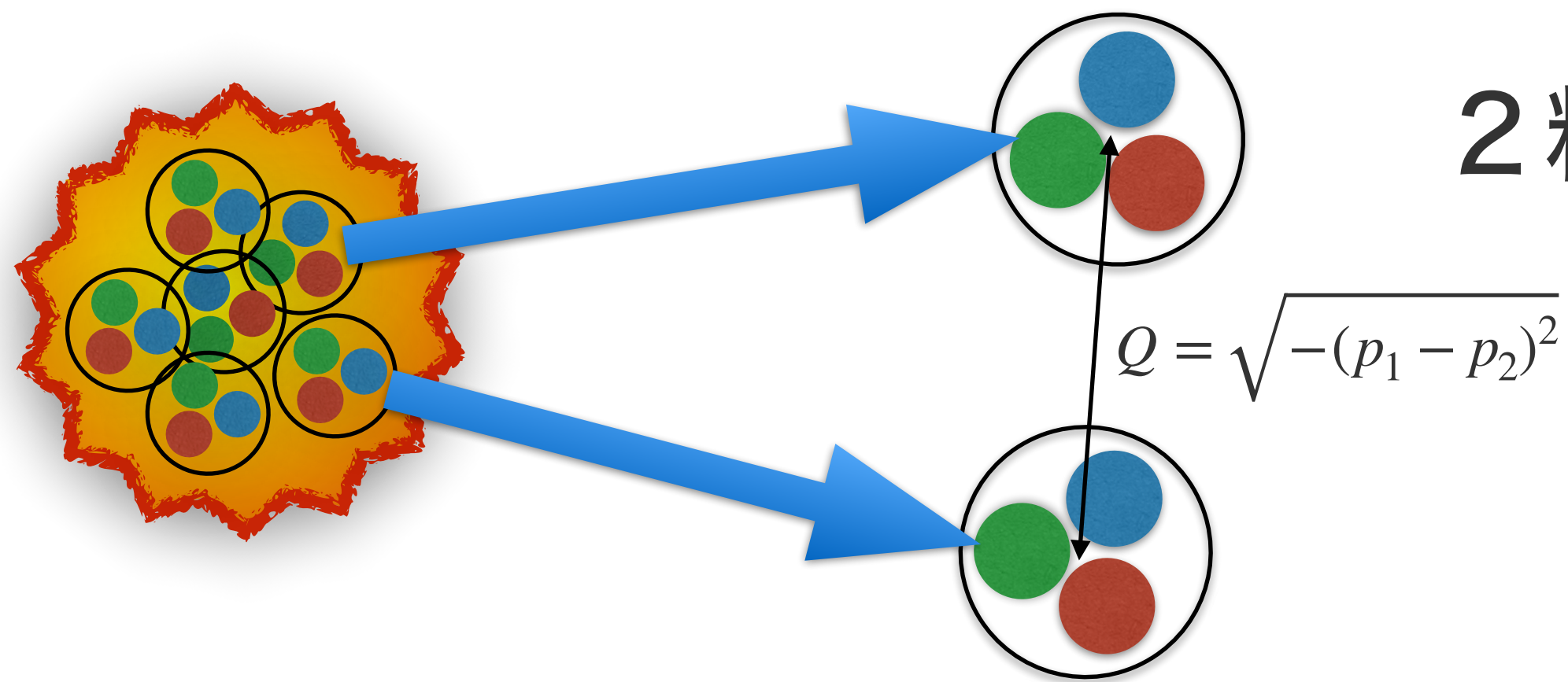
ゆるい束縛系
サイズは同程度



Gongyo for HAL QCD, PRL, 120.212001(2018).



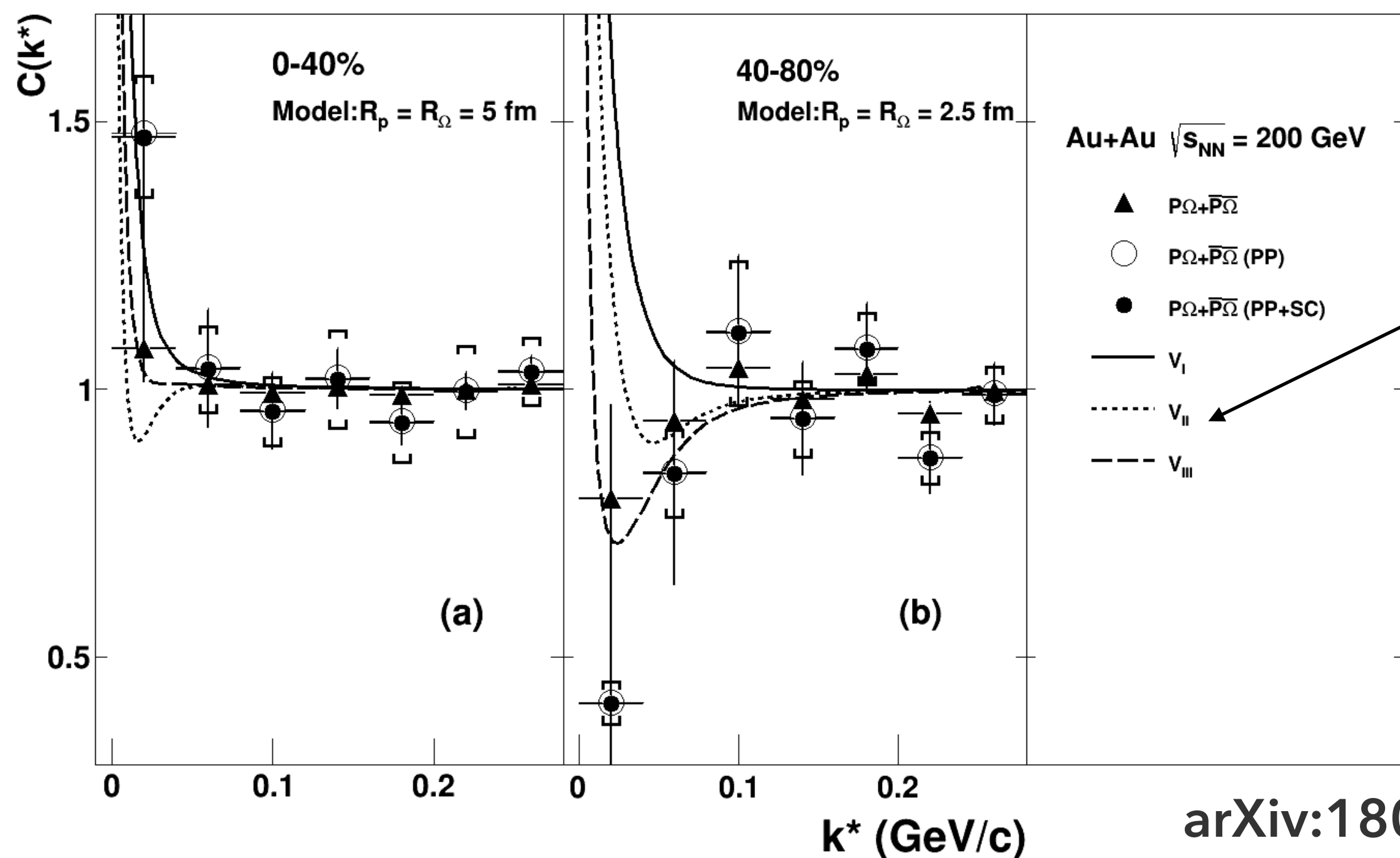
重イオン衝突実験での核子・オメガ系測定



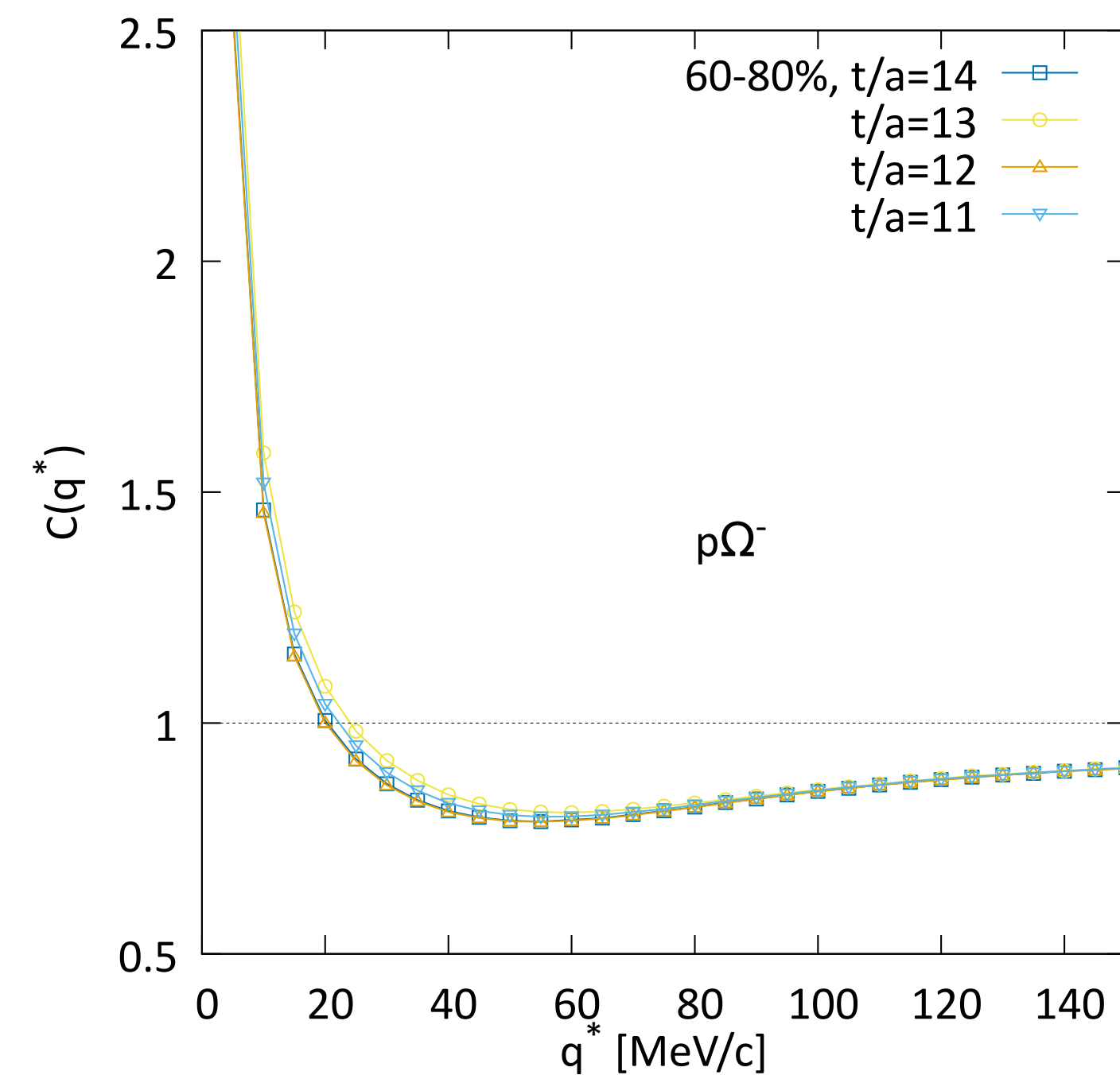
$$C(Q) = \frac{N_{AB}^{\text{pair}}(Q)}{N_A N_B(Q)}$$

より現実的な $N\Omega$ 相互作用での予言

STAR Collaboration (2018)



重いクォーク質量での
格子QCDの結果



arXiv:1808.02511 [hep-ex]

K. Morita in prep.

1. バリオン 2 体系と格子QCD計算

2. 核子・オメガ粒子系@物理点

3. まとめ

格子QCDによるダイバリオン研究

- (ほぼ)物理点の格子QCD計算による核子・オメガ粒子系
 - 十分強い引力、**ダイバリオン**を形成(準束縛状態)
 - single channel解析 ($\Lambda\Xi$ 、 $\Sigma\Xi$ への崩壊は抑制と仮定)
 - 格子QCD計算は**実験の再現**から**予言の時代**へ
- ポスト京へ向けて
 - $|S| = 0, 1, \dots$ セクターの精密測定
 - 物理点直上での計算
 - LS力、3体力などの系統的な解析
 - 結合チャンネル解析

