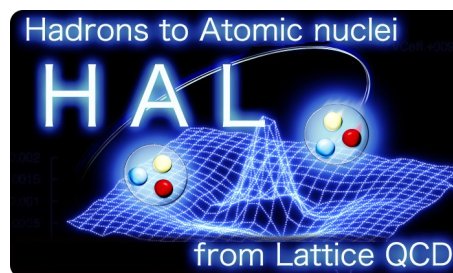


BBILQCD グループの成果 & 中間報告

QCDによるバリオン間相互作用

筑波大学 佐々木健志

HAL (Hadrons to Atomic nuclei from Lattice) QCD Collaboration



- フレーバーSU(3) 極限でのBB相互作用 → 井上
 - 核力(Central, Tensor, LS) → 石井、村野
 - 結合チャンネルYN相互作用 → 根村、佐々木
 - 3核子力 → 土井
 - 全体 → 青木
- } H25

背景、導入

- 我々の**目的とゴール**

- 全てのバリオン間相互作用を**QCDから**直接に明かにする。
- バリオン間相互作用の包括的な理解を得る。
- 得られた理解を、様々な物理に応用し、新たな知見を得る。

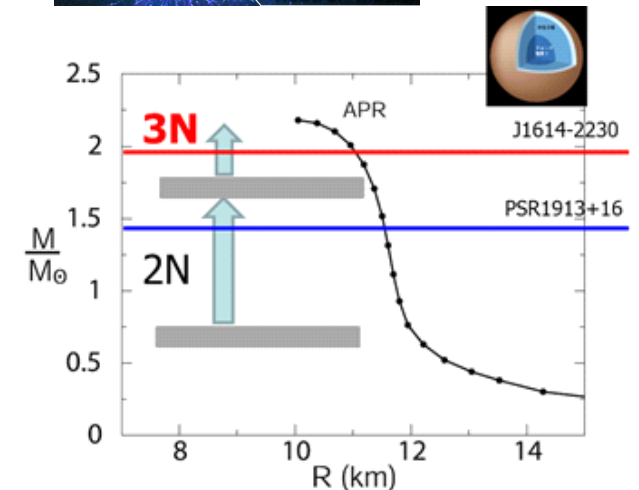
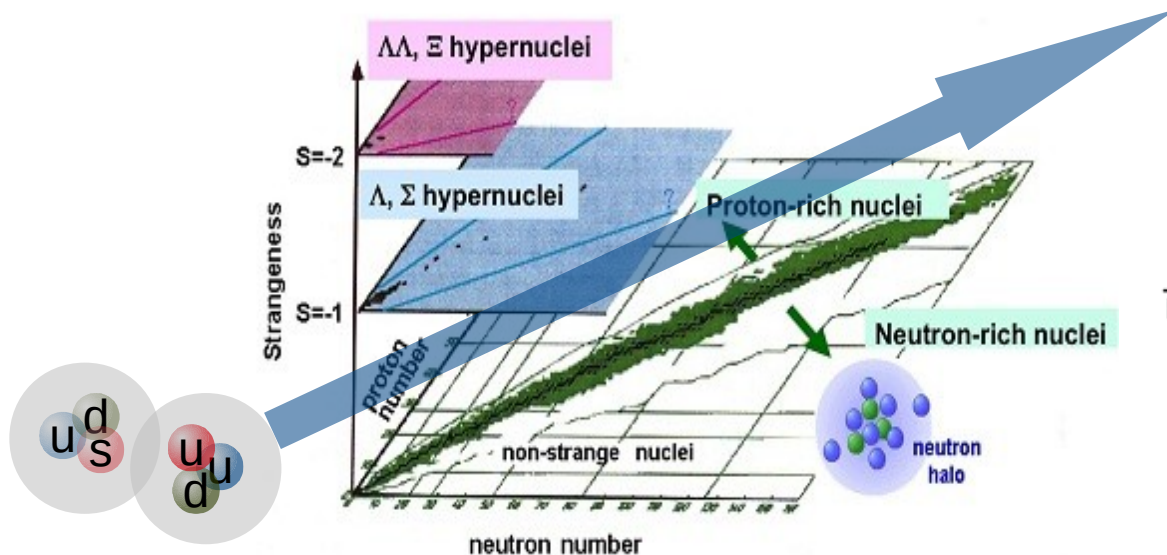
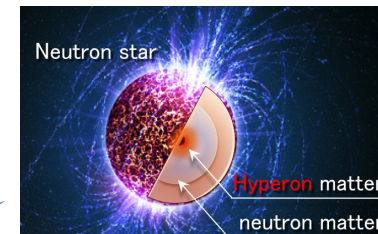
バリオン間相互作用はクォーク・グルーオンから星・宇宙までを繋ぐ際に不可欠な要素

- **核力**(NN, NNN力)

- 膨大なデータから、NN力は詳細に判っている。
- NNN力の必要性は確実にようになって来ているが、詳細は不明。

- **ハイペロン力** (YN, YY力)

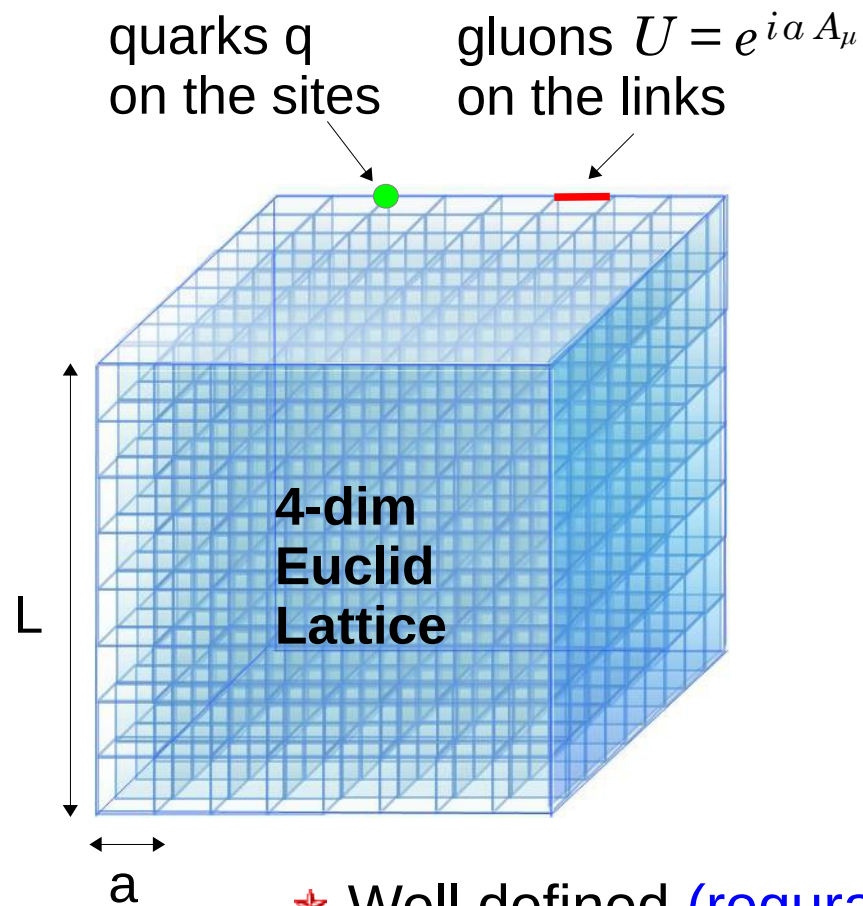
- 様々な面白い物理に重要。例: 中性子星の最大質量。
- 実験データの不足から、あまり判っていない。



格子QCDシミュレーション

QCD:クォーク・グルーオンの力学を記述する基礎理論

$$L_{QCD} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + \bar{q} \gamma^\mu \left(i \partial_\mu - g t^a A_\mu^a \right) q - m \bar{q} q$$



真空期待値

$$\begin{aligned} \langle O(\bar{q}, q, U) \rangle &= \int dU d\bar{q} dq e^{-S(\bar{q}, q, U)} O(\bar{q}, q, U) \\ &= \int dU \det D(U) e^{-S_U(U)} O(D^{-1}(U), U) \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O(D^{-1}(U_i), U_i) \end{aligned}$$

経路積分
クォーク伝搬関数

{ U_i } generated w/ probability $\det D(U) e^{-S_U(U)}$

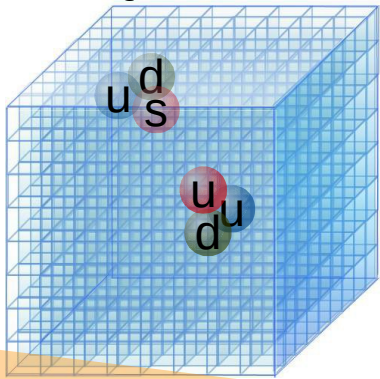
- ★ Well defined (regularized)
- ★ Fully non-perturbative
- ★ Manifest gauge invariance
- ★ Highly predictable

格子QCDを用いたハドロン系の研究

格子QCDシミュレーション：クォーク階層とハドロン階層をつなぐ架け橋

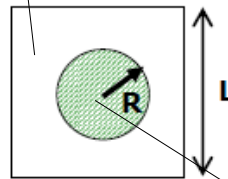
$$L_{QCD} = \bar{q}(i\gamma_\mu D^\mu - m)q + \frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu}$$

Lattice QCD simulation

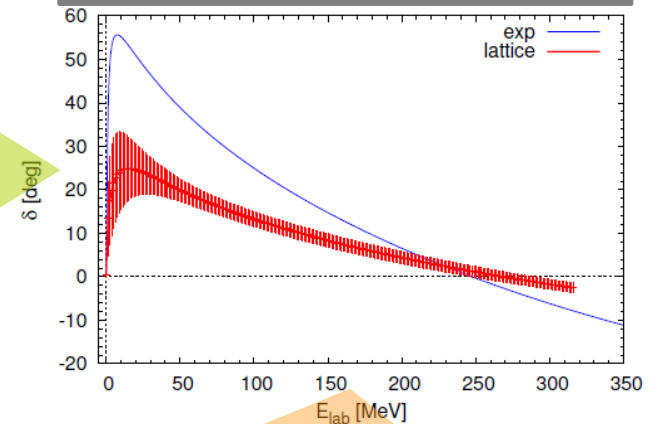


Lüscher's finite volume method

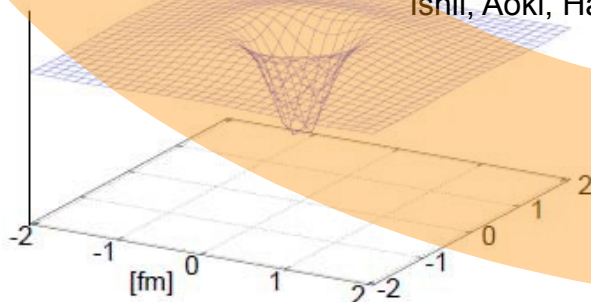
M. Lüscher, NPB354(1991)531



BB scattering phase shift



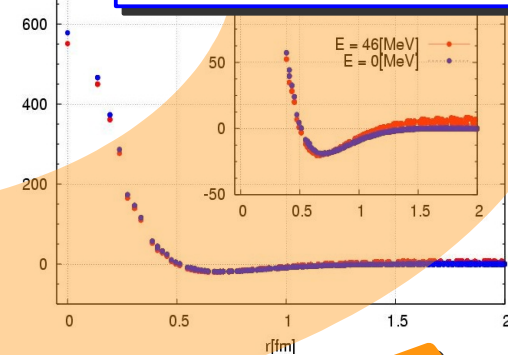
NBS wave function



HAL QCD method

Ishii, Aoki, Hatsuda, PRL99 (2007) 022001

BB interaction (potential)



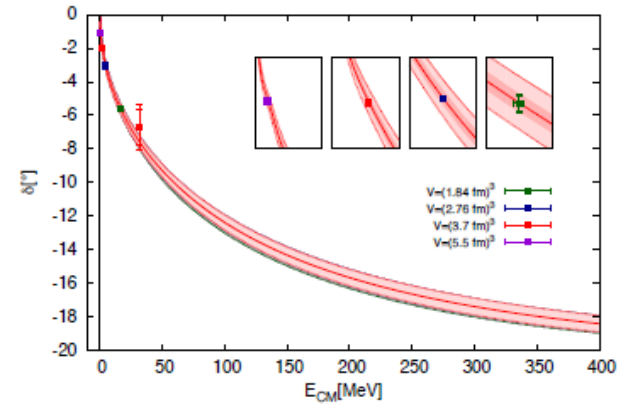
The potential is proper for the phase shift by QCD

格子QCDを用いたハドロン系の研究

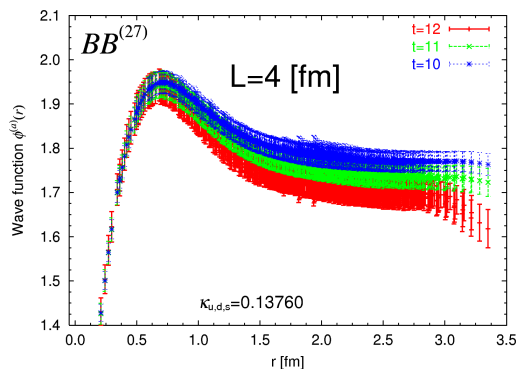
- **HAL QCD法の利点**

- Lüscher法と同一の散乱位相差を導出

T.Kurth et al JHEP 1312 (2013) 015

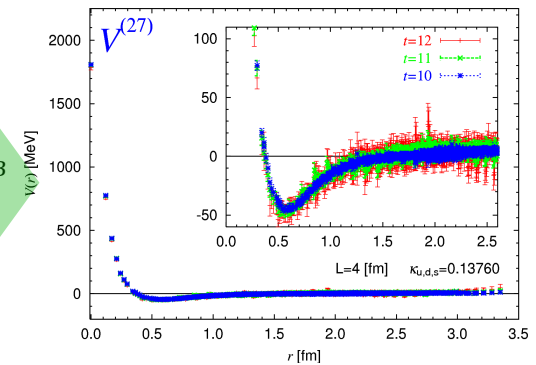


- エネルギー固有状態を分ける必要なし。
NBS w.f. からエネルギー非依存ポテンシャルが得られる。



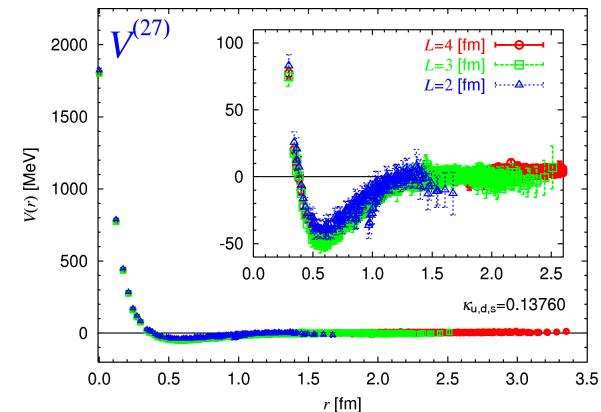
$$V(\vec{r}) = \frac{1}{2\mu} \frac{\nabla^2 \psi(\vec{r}, t)}{\psi(\vec{r}, t)} - \frac{\frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t)}{\psi(\vec{r}, t)} - 2M_B$$

$\psi(\vec{r}, t)$: NBS W.F.



- 格子の空間体積は最小限でよい。
(無限体積への外挿は必要ない。)

- 多くの観測量を予言できる。



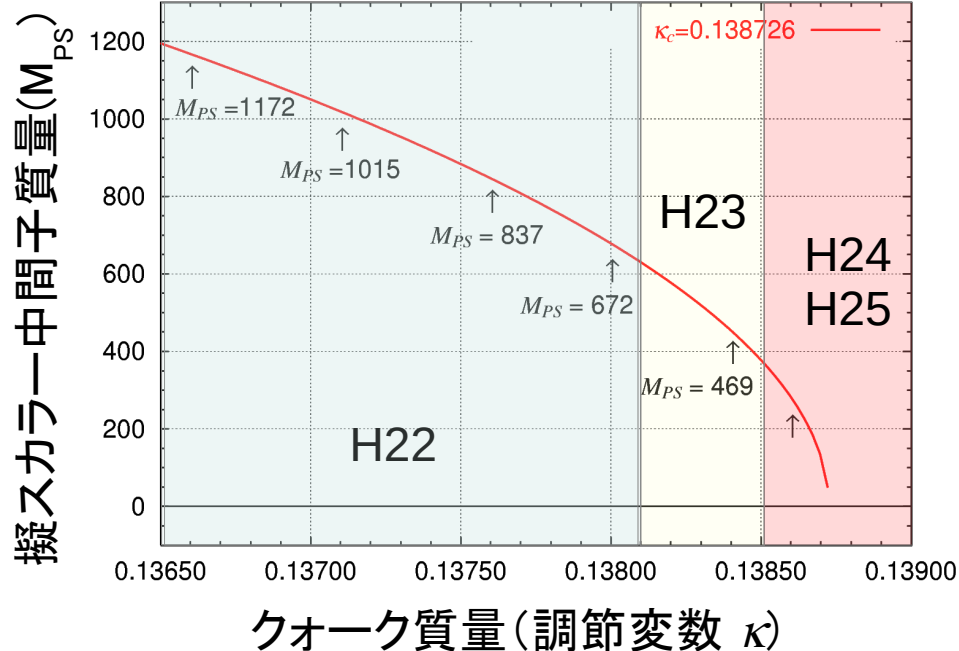
これまでの成果

- バリオン間相互作用の全体像を捉えるため、フレーバー対称な世界($m_u = m_d = m_s$)を考える。

$$8 \times 8 = \underbrace{27 + 8s + 1}_{\text{Symmetric}} + \underbrace{10* + 10 + 8a}_{\text{Anti-symmetric}} \quad \leftarrow \text{6種類のみ独立(S波)} \\ \text{計算量の大幅な節約}$$

- SU(3)_F極限のゲージ配位を生成し、ポテンシャルを導出。
- ゲージ配位生成について、PACS-CS Collaboration (特に、石川氏、浮田氏)に協力して頂く。
 - Iwasaki Gauge + Wilson quark, DDHMC/RHMC

size	β	C_{SW}	a [fm]	L [fm]
$48^3 \times 48$	1.83	1.761	0.121(2)	5.81



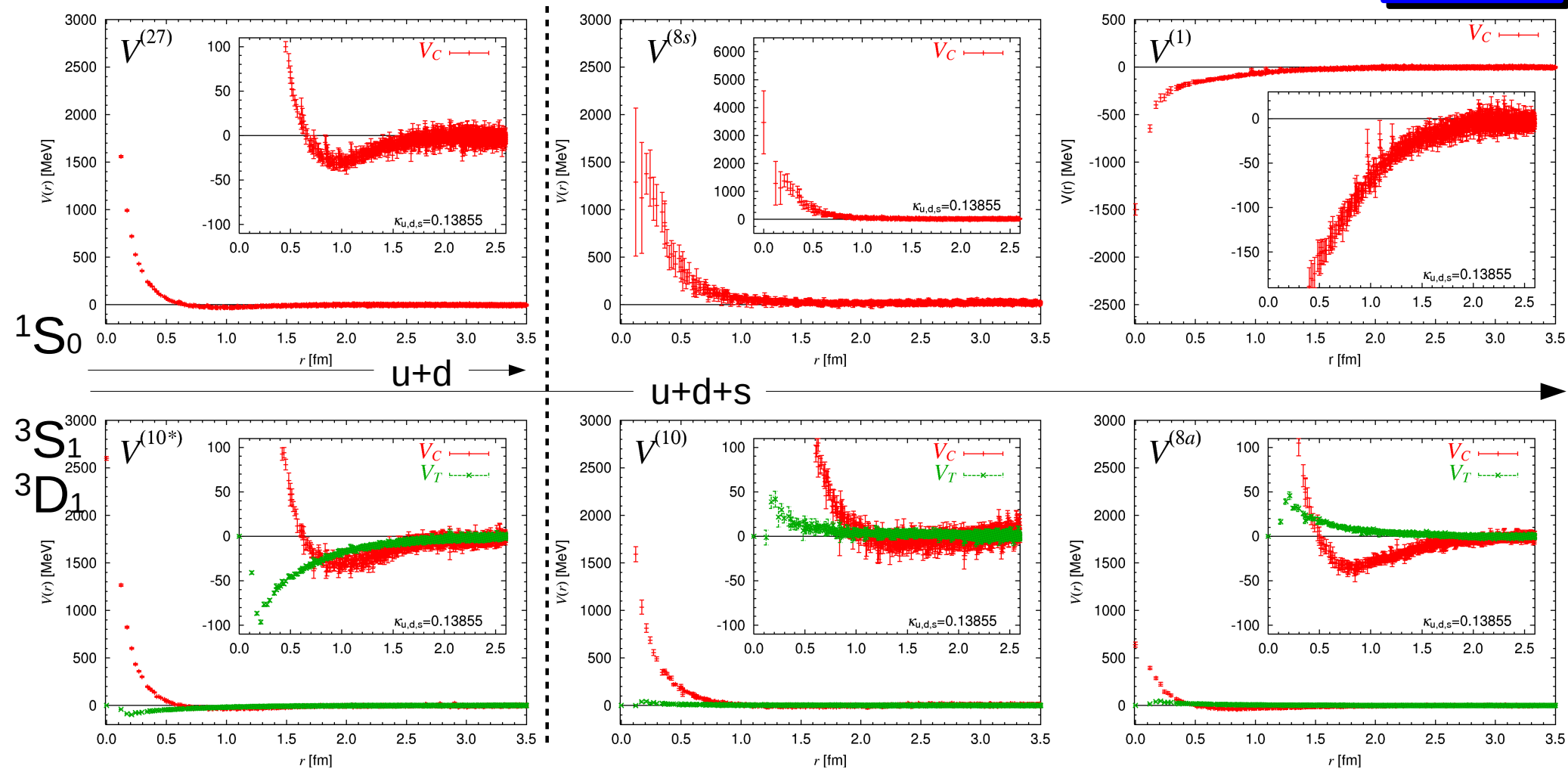
- 本プロジェクトは平成2?年からの継続
- 平成24年度には、 $M_{PS} = 347\text{MeV}$ に対応する配位生成を開始。
- 統計量が不十分だったためH25年度に追加で生成。

(180 conf. → 360 conf.)

平成25年度 成果報告

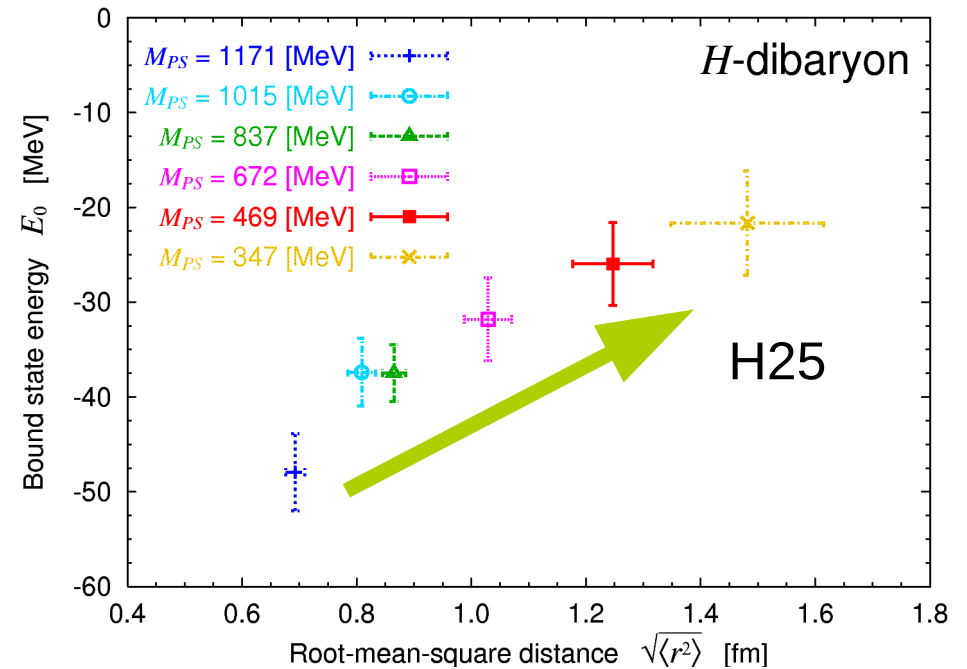
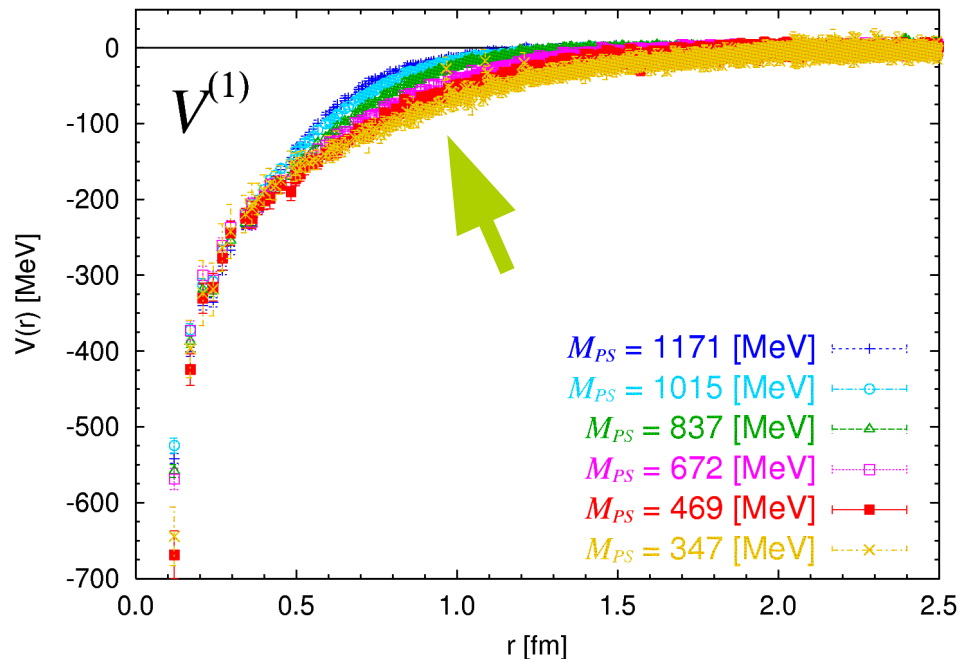
バリオン間相互作用ポテンシャル(SU(3)_F)

$M_{PS} = 347 \text{ MeV}$



- 配位数を増やした結果、定量的な研究が可能な水準のポテンシャルを獲得。
 - フレーバー1重項のポテンシャルに強い引力を確認。← H-ダイバリオン状態
 - フレーバー8sのポテンシャルは強い斥力。← クォークレベルでのパウリ排他効果

H-ダイバリオンの質量

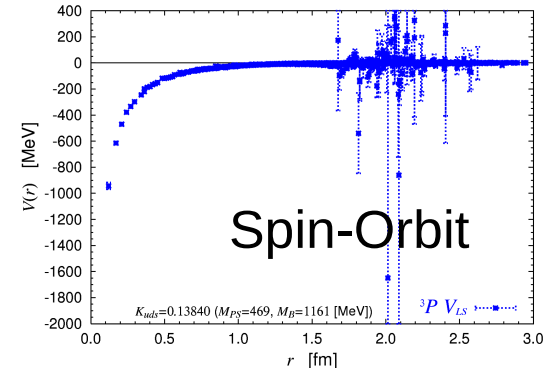
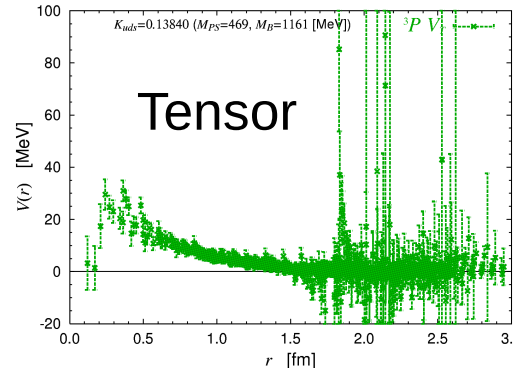
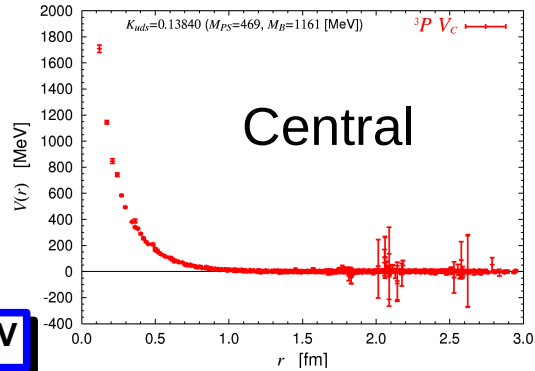


- 左: フレーバー1重項BB相互作用ポテンシャル
 - 黄色のデータがH25年度の計算で得られたもの。
 - 軽いクォーク質量の結果と同様に強い引力ポテンシャルとなる事を確認。
- 右: H-ダイバリオンの束縛エネルギーとサイズ
 - 広い範囲で束縛エネルギーのクォーク質量依存性が判明した。
 - クォーク質量の減少と共に束縛エネルギーは減少するが、依然として束縛状態が存在する事を確認した。

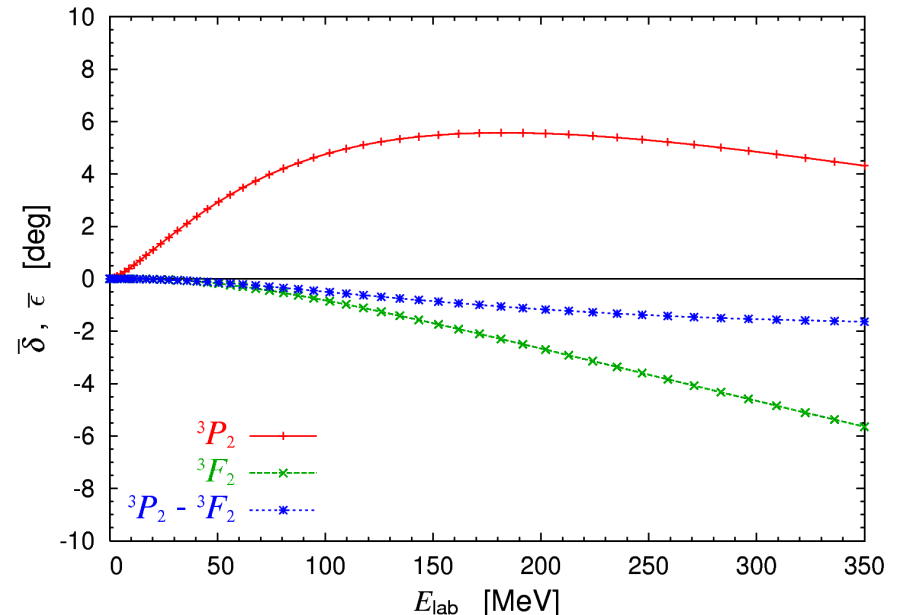
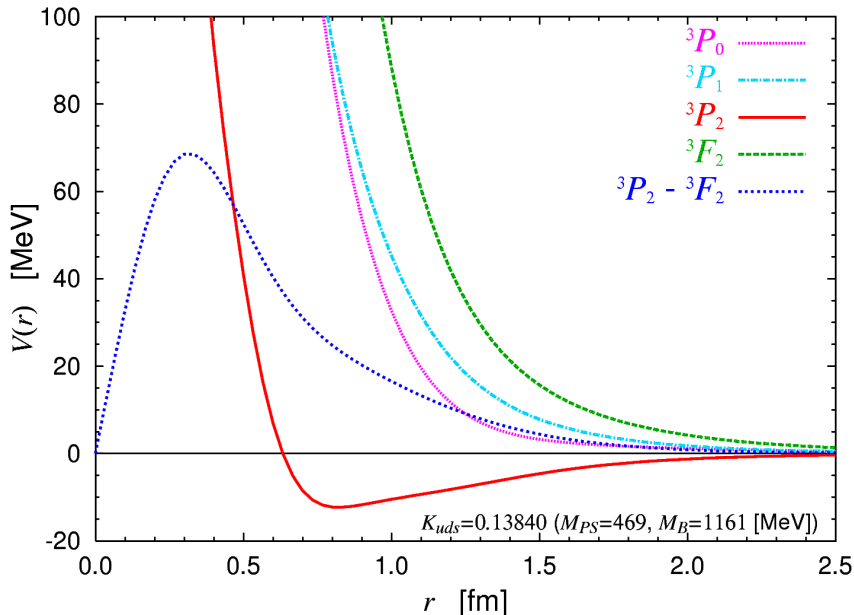
^3P 部分波での核力ポテンシャル

K. Murano et al. (HAL QCD Collaboration) Phys. Lett. B735, 19 (2014)

$$V^I(\vec{r}, \vec{\nabla}) = V_0^I(r) + V_\sigma^I(r) \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2 + V_T^I(r) S_{12} + V_{LS}^I(r) \vec{L} \cdot \vec{S} + O(\vec{\nabla}^2)$$



$M_{PS} = 469 \text{ MeV}$



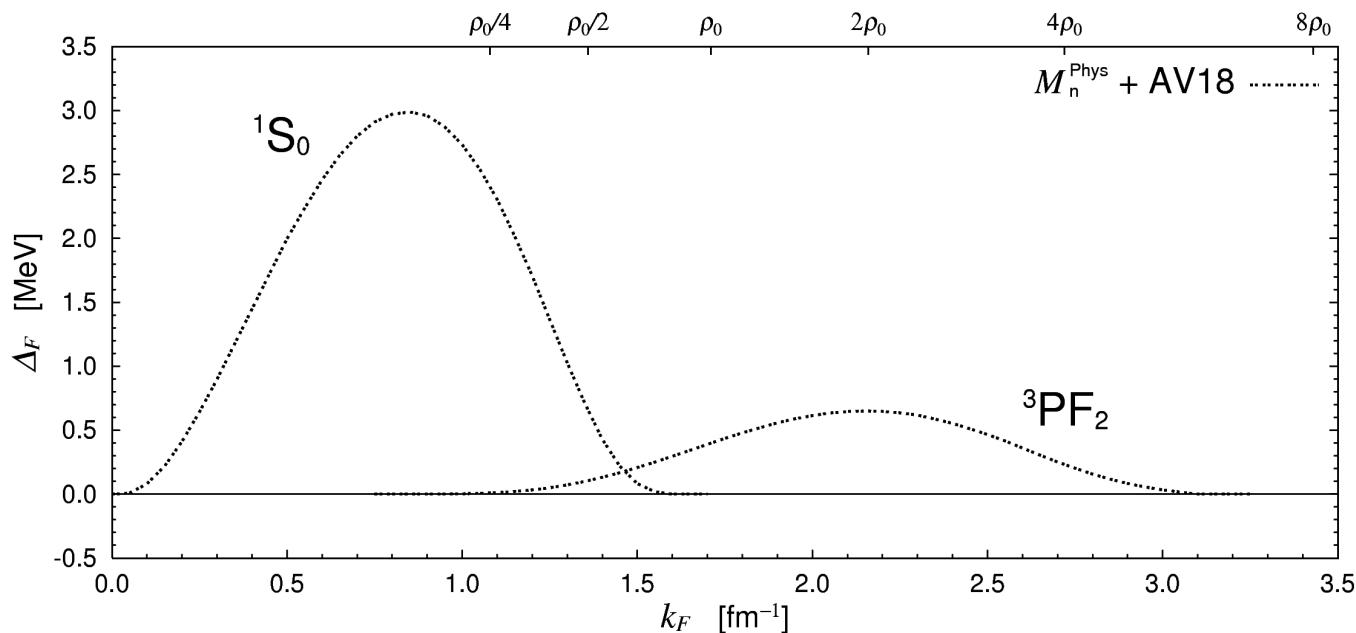
- 全体的な傾向は実験の結果と一致。
- $^3\text{P}_2$ チャンネルに**引力**が存在。←テンソル力とスピン軌道力の寄与による
 - 中性子星の核で超流動？

中性子物質での対ギャップ

核子系のギャップ方程式

M. Baldo, O. Elgoy, L. Engvik, M. Hjorth-Jensen, H.-J. Schulze, Phys. Rev. C58 1921 (1998)

$$\begin{pmatrix} \Delta_L^{SJ}(k) \\ \Delta_{L+2}^{SJ}(k) \end{pmatrix} = -\frac{2}{\pi} \int_0^\infty dp p^2 \frac{1}{2E(p)} \begin{pmatrix} V_{L,L}^{SJ}(k,p) & -V_{L,L+2}^{SJ}(k,p) \\ -V_{L+2,L}^{SJ}(k,p) & V_{L+2,L+2}^{SJ}(k,p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta_L^{SJ}(p) \\ \Delta_{L+2}^{SJ}(p) \end{pmatrix}$$



- ・現象論的核力 AV18
- ・自由スペクトル
- ・BCS 近似

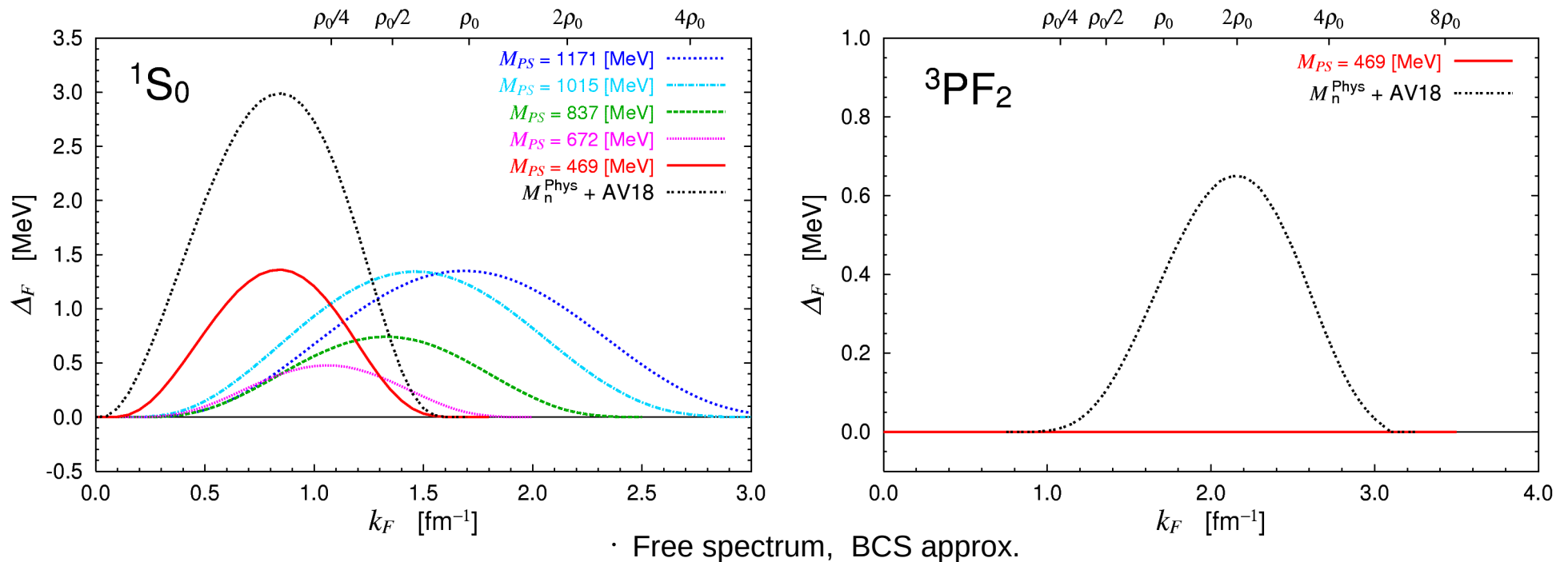
$$\Delta_F = \Delta(k_F) \text{ where}$$

$$E(p) = \sqrt{\epsilon(p)^2 + \Delta(p)^2}$$

- ・中性子星のクラストと核では、それぞれ、 1S_0 と 3PF_2 チャンネルにおける対ギャップによって、超流動が起こっていると予想される。

T. Takatsuka and R. Tamagaki, Prog. Theo. Phys. 46 (1971) 114, Suppl. 112 (1993) 27

LQCDによる中性子対ギャップ



- 左: 1S_0 対ギャップ

- 全てのクォーク質量で、QCDは有限のギャップを生成。→ **超流動**
- 複雑なクォーク質量依存性。 m_q 減少でピークは低密度へ移動。

- 右 3PF_2 対ギャップ

- 調べたクォーク質量で、QCDはギャップを生成しない。→ **常流動**

平成26年度 経過報告

LQCD における有限核

- HALQCD法 + BHF理論

- クォーク質量 $M_{PS} = 469$ [MeV] で、 ^{16}O と ^{40}Ca の束縛状態が見つかった。

	Total Energy [MeV]		Radius [fm]
	E_0	E_0 / A	$\sqrt{\langle r^2 \rangle}$
^{16}O	-34.7	-2.17	2.35
^{40}Ca	-112.7	-2.82	2.78

- このクォーク質量では原子核が存在する。
- 世界で初めて、QCDから中重核を導くことに成功。
- 他のクォーク質量では同様の計算で(深く束縛した)原子核は存在しなかった。

T. Inoue et al. [HAL QCD Colla.] arXive 1408.4892

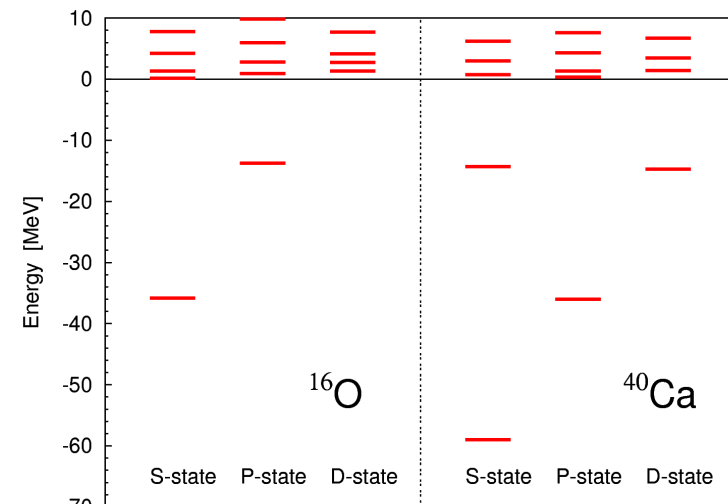


図1: 原子核中の1核子レベル

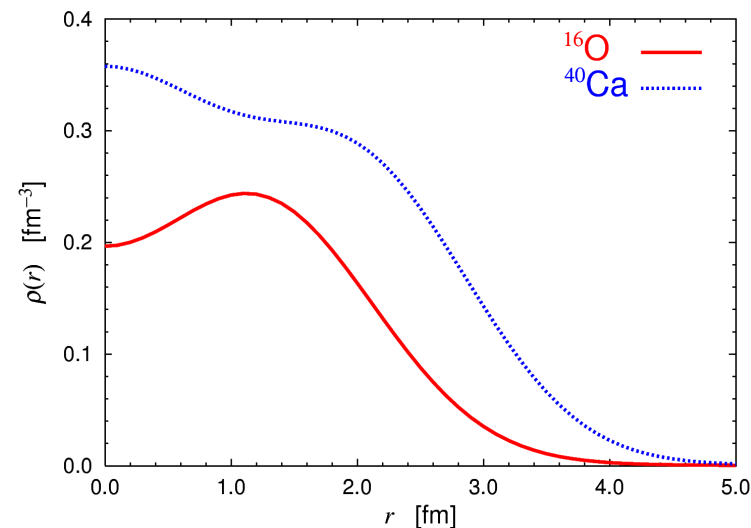


図2: 原子核中の核子数密度

計算コードの改良

- **ゲージ固定:**

- 公開されているcuLGTコード(GPU用に効率化されたコード)を導入。

Mario Schröck, Hannes Vogt Comp. Phys. Commun. 184 (2013) 1907-1919

- 使用するゲージ配位について事前にゲージ固定を行う。

- **クォーク伝搬関数:**

- HPCI戦略分野5課題1によって開発されたコードを利用。

GPU化され、HA-PACS上で効率化されたものを使用。

- **NBS波動関数計算:**

- Unified Contraction Algorithm(UCA)の実装。
- FFT計算の効率化(レイテンシの削減)。
- スレッド並列。

} GPU化されていないが、
クォーク伝搬関数の計算に比べて
少ない計算時間

- **NBS波動関数計算部の拡張:**

- 偶パリティに加え、奇パリティセクターの核力・ハイペロン力が導出可能。
- 十重項バリオン同士の相互作用を導出可能。
- その他、一般のハドロン間相互作用の計算への拡張を予定。

まとめ

- BBILQCDグループの成果 & 中間報告
 - 平成25年度
 - $M_{PS} = 347 \text{ MeV}$ $SU(3)_F$ 点でのゲージ配位の追加生成
 - $M_{PS} = 469 \text{ MeV}$ でのP波核力の測定
 - P波核力の成果を論文に → Phys. Lett. B735, 19
 - Hダイバリオンのクォーク質量依存性 → 論文準備中
 - LQCDを用いた中性子物質の超流動の研究 → 論文準備中
 - 平成26年度
 - LQCDを用いた有限核の研究 → 論文 submit 済み
 - HA-PACS 用のコード整備とテスト計算 arXive 1408.4892