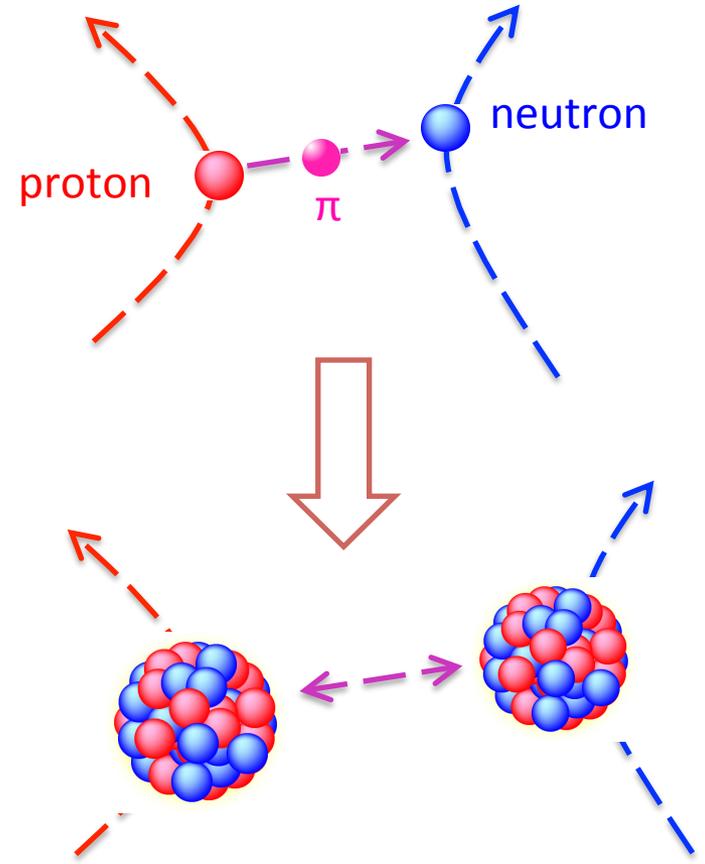
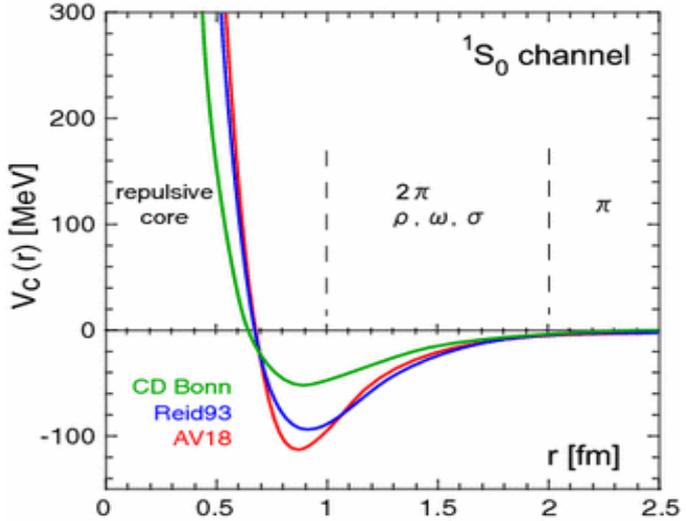


# ポスト京における バリオン間相互作用と格子QCD

石井理修(大阪大学核物理センター)

# 背景:核力

## ◆ 核力 = 二核子間相互作用



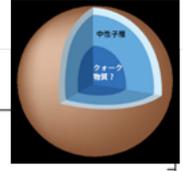
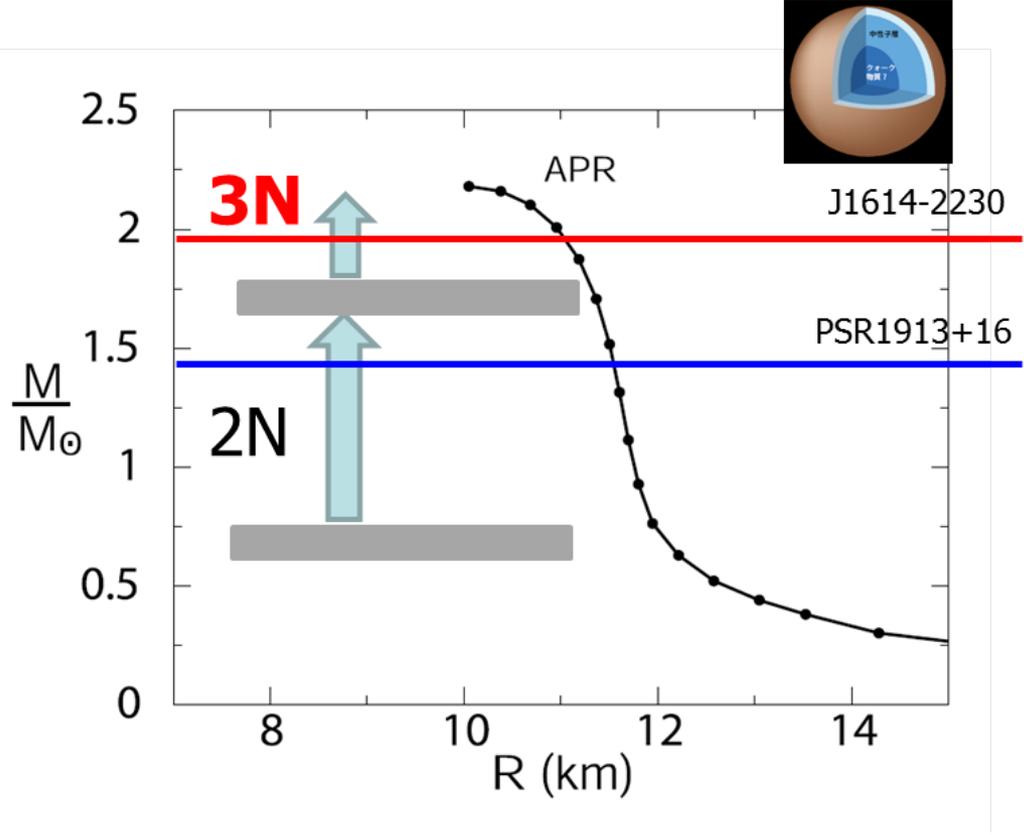
## ◆ 核構造・核反応

## ◆ 超新星爆発、中性子星



# 背景: 中性子星とバリオン間力

## ◆ 2倍太陽質量中性子星の発見(2010)



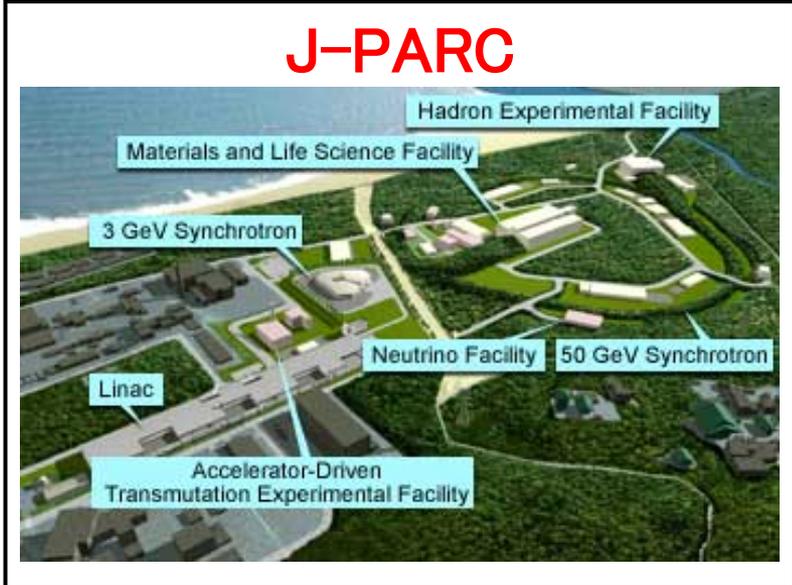
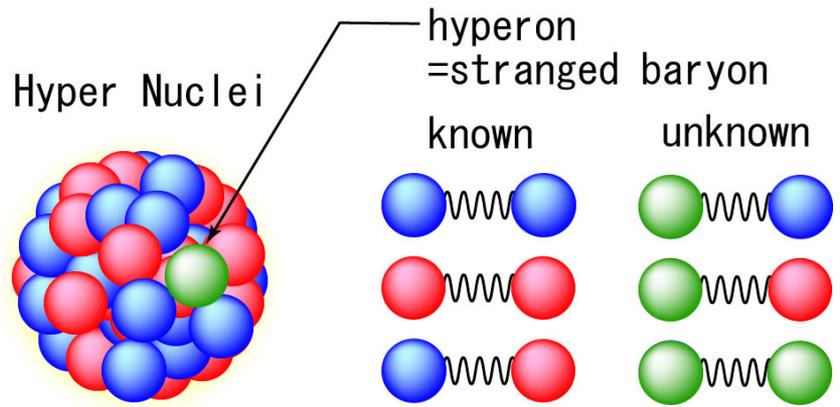
## ◆ 2倍太陽質量の中性子星の存在を説明するためには、

- ◆ 核力 + 核子三体力
- ◆ ハイペロン力(2体力) + ハイペロン三体力

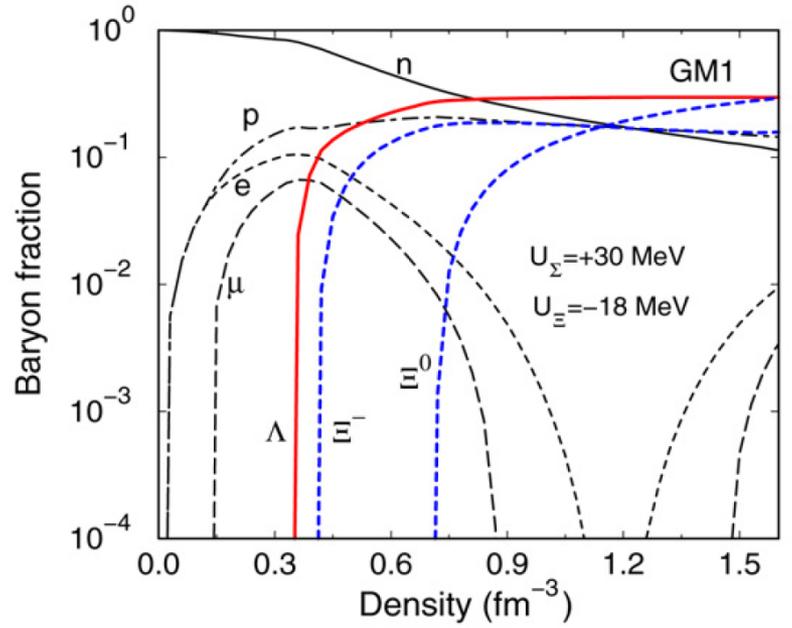
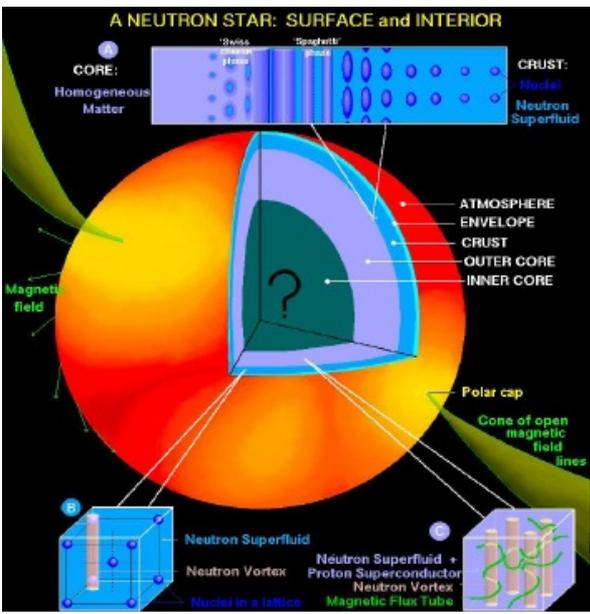
が全部必要

# 背景: J-PARC実験とハイペロン核

## ◆ ハイパー核の構造の理解



## ◆ 中性子星内部でのハイペロン物質

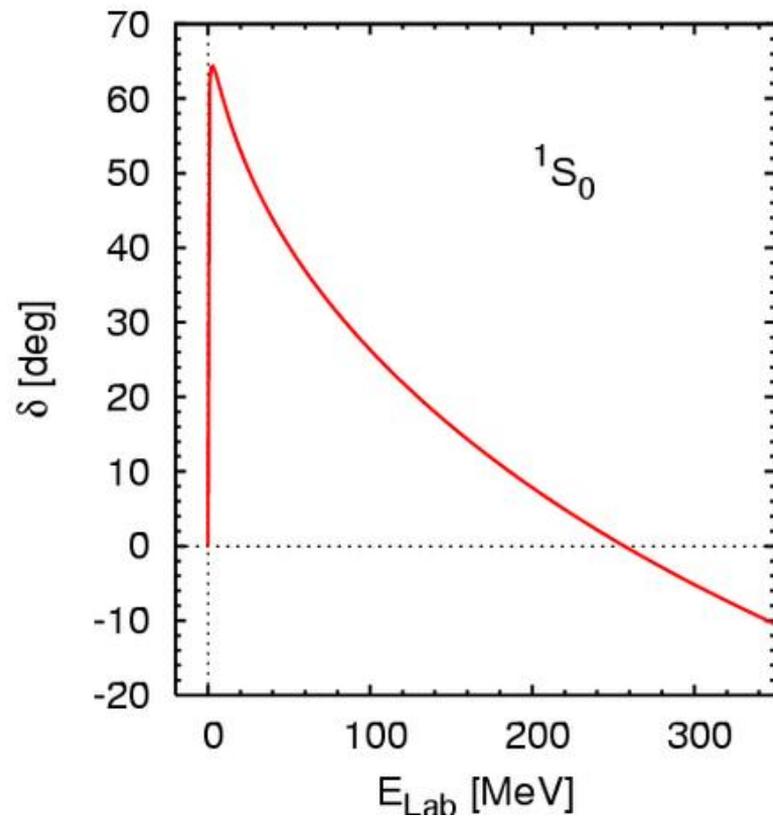


[J.Schaffner-Bielich, NPA804('08)309.]

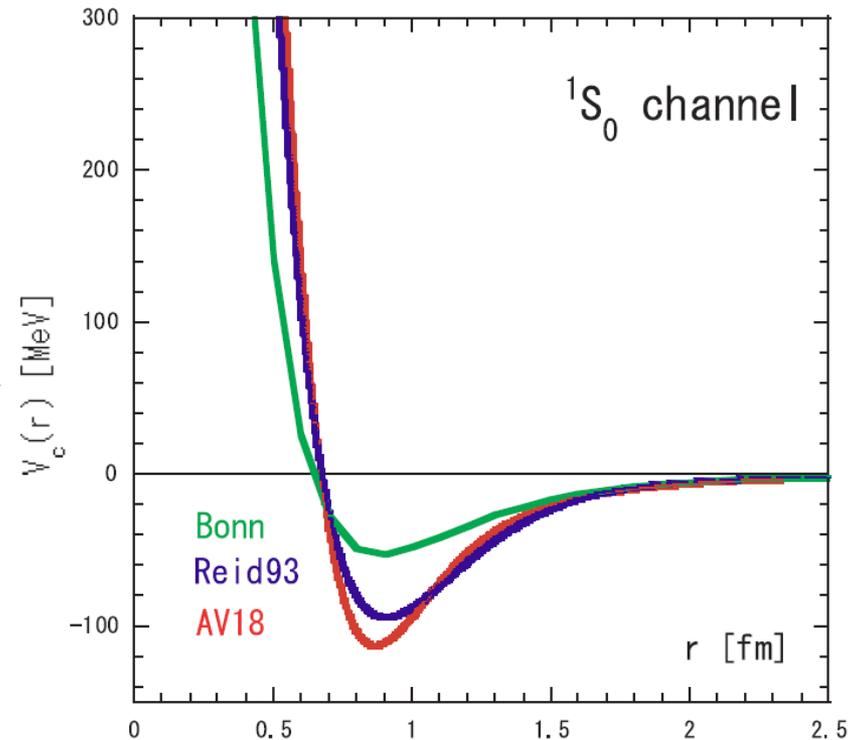
# 背景：現象論的核力決定法

## 散乱位相差 $\rightarrow$ 2体ポテンシャル決定

### NN 散乱データ ( $\sim 4000$ data点)



### 高精度な現象論的核力 (18 fit parameter $\rightarrow \chi^2/\text{dof} \sim 1$ [AV18])



# 背景:現象論的ハイペロン力決定法@J-PARC

◆ 核力と同じ方法(散乱位相差→2体ポテンシャル決定)では、決定は困難。

- ◆ ハイペロンは不安定で寿命が短い。
- ◆ ハイペロンの散乱実験は難しい。

◆ J-PARCで用いられる方法

ハイパー核励起スペクトル(多体)から決定。

## 有効模型

中間子交換、クォーク模型、etc.

提供



改良要請



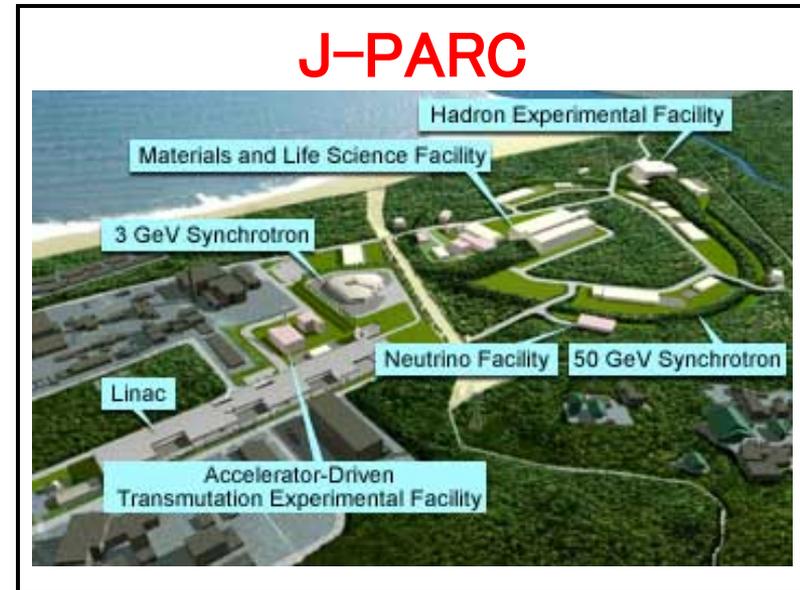
## 少数多体精密計算

比較・検証

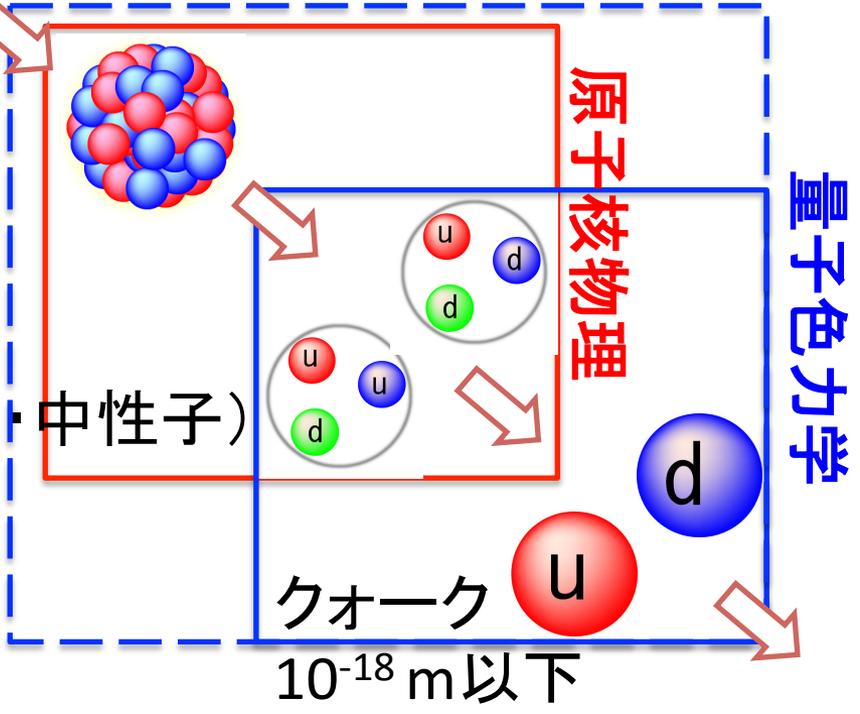
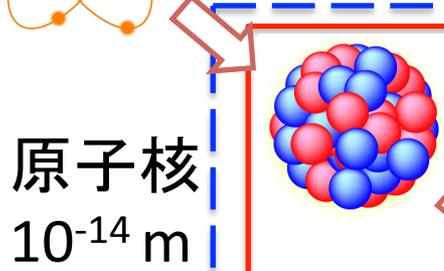
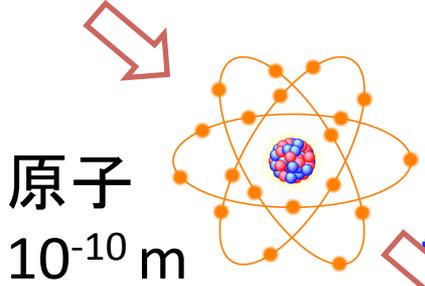


## 実験

- ◇ ハイパー核励起スペクトルの精密測定
- ◇ 原子核乾板データ



# 背景：原子核物理とQCDの融合



- ◆ 量子色力学(QCD)が見つかって、40年以上たつ。
- ◆ 原子核物理と、QCDは独立の発展を遂げてきた。
- ◆ この二つの融合が、始まろうとしている。

# 背景: HAL QCD法 (格子QCD→核力・ハイペロン力)

「散乱位相差→2体ポテンシャル決定」を、格子QCD的に実現する方法

- ◆ 同時刻 Nambu-Bethe-Salpeter (NBS) 波動関数

$$\begin{aligned}\psi_k(\vec{x} - \vec{y}) &\equiv \langle 0 | N(\vec{x}) N(\vec{y}) | N(+k) N(-k), in \rangle \\ &\sim e^{i\delta(k)} \frac{\sin(kr + \delta(k))}{kr} + \dots \quad \text{as } r \equiv |\vec{x} - \vec{y}| \rightarrow \text{large}\end{aligned}$$

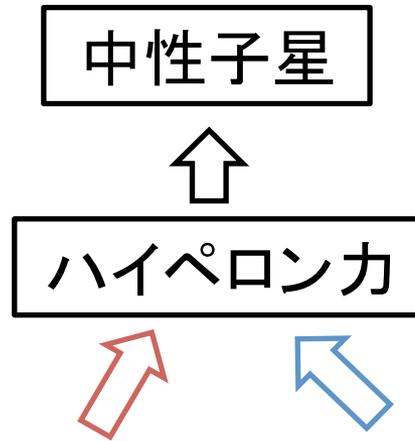
(重要) 長距離の振舞が、量子力学の散乱波動関数と全く同じ関数形

- ◆ 同時刻 NBS 波動関数を Schrodinger 方程式が生成する事を要請してポテンシャルを決定

$$(k^2 / m - H_0) \psi_k(\vec{r}) = \int d^3 r' U(\vec{r}, \vec{r}') \psi_k(\vec{r}')$$

→ 散乱位相差に忠実なポテンシャル。

# 背景: J-PARC実験と格子QCDは相補的である



## (J-PARC)実験

◆ **実験** ⇔ 少数多体精密計算 ⇔ 有効模型

- ◆ ハイパー核励起スペクトル (**多体系**)  
→ **2体ポテンシャル**  
(ここで初めて用いられるやり方)
- ◆ Strange quarkの数が多いと**難しくなる**。  
(実質的に2以下)
- ◆ 核力 (J-PARCとは直接関係ないが...):  
既に多数の散乱実験データが存在。  
それを再現する高精度な核力が存在。

## 格子QCD

◆ **理論** (格子QCD計算)

- ◆ 散乱位相差 (**2体系**)  
→ **2体ポテンシャル**  
(核力で実績があるアルゴリズムを  
格子QCD的に実現[HALQCD法])
- ◆ Strange quarkの数が多い方が、  
統計ノイズが減って計算が**安定になる**。
- ◆ 核力:  
統計ノイズが大きく、計算が一番大変。  
精度を上げるのは統計勝負。

## ポスト京でやりたい事・やるべき事

- ◆量子色力学(QCD)に基づく数値計算により、陽子や中性子に加えて未だ謎の多いハイペロンなどのいわゆるハドロン間の相互作用を正確に決定する。
- ◆さらにこの研究をベースに未だに正確なものが知られていない高密度核物質の状態方程式をこれまでにない精度で導出する。

# 計算手法の様々な進展(2011年以降)

## ◆時間依存法

励起状態の寄与がある中でも、ポテンシャルを正確に決定できる。  
(巨大空間体積のマルチハドロン系において非常に有利)

→ 劇的な計算時間の短縮

## ◆統一縮約法(unified contraction)

多フェルミオン系のWick contractionの問題(クォーク数の階乗で計算量が増大)を、非常に組織的・効率的に解決。

→ 大幅な効率化

${}^3\text{H}/{}^3\text{He}$ : ×192

${}^4\text{He}$ : ×20736

## ◆結合チャンネル

通常のLuescherの方法の結合チャンネル散乱への拡張は、あまり簡単ではない。  
ポテンシャルに注目するHALQCDの方法では、自然に拡張される。

結合チャンネルポテンシャルは、ハイペロン多体系を考える上で必須。

→ J-PARC実験や中性子星

# 京で直面した問題

- ◆ 物理点近傍で、multi-baryon系は、統計ノイズが非常に大きい。

NNポテンシャル

Preliminary  
公開・再配布禁止

閲覧不可

三三ポテンシャル

Preliminary  
公開・再配布禁止

閲覧不可

NNポテンシャルは統計ノイズが非常に大きい。  
しかし、NNセクタは、実験データが多く、精密科学。

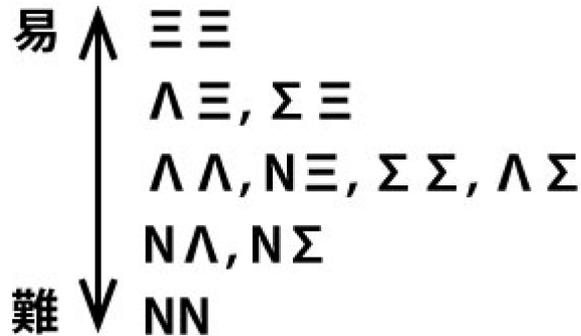
# 統計ノイズの問題

- ◆ Signal to Noise for Multi-nucleon system

$$\frac{\text{signal}}{\text{noise}} \sim \exp(-A(m_N - 3/2m_\pi) t)$$

- ◆ バリオン数(A)が大きいほど、シグナルが小さい。  
(二体系よりも、三体系の方が難しい)
- ◆ クォーク質量が軽いほど、シグナルが小さい。

小←ストレンジネス→大



- ◆ NBS波動関数を観測する時刻 t が大きいほど、シグナルが小さい。

$$\langle 0 | B(\vec{x}, t) B(\vec{y}, t) \cdot \bar{B}(0) \bar{B}(0) | 0 \rangle$$

# 可能な対策

◆ 問題: 二体系より三体系の方が圧倒的に難しい。

◆ 統計ノイズが大きい

◆ 計算量が多い

◆ Unified contraction: 2013年～  
192倍の効率化達成

◆ 二体系の正確な計算に、三体系の計算は依存している。

◆ しかし、三体系の方が二体系よりも圧倒的に興味深い！

◆ 対策

◆ Flavor SU(3) 極限で外観をつかむ。

$$8 \otimes 8 \otimes 8 = 1^2 \oplus 8^8 \oplus \overline{10}^4 \oplus 10^4 \oplus 27^6 \oplus \overline{35}^2 \oplus 35^2 \oplus 64$$

(右辺のいくつかは難しい計算になる可能性がある。  
これを見極めるための予備計算を行う必要がある)

◆ 有効模型との連携

(格子QCDで計算しやすいところの情報を提供し、  
有効模型の力で、格子QCDで計算しにくいところへ拡張する)

◆ カイラル外挿。

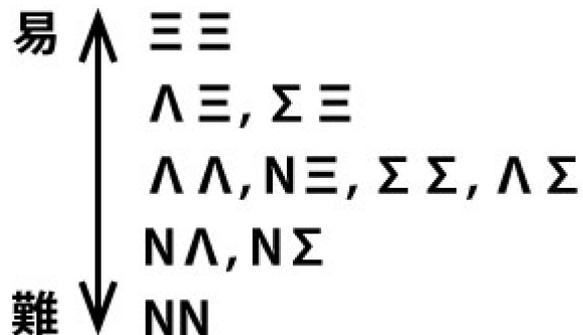
◆ 核力・ハイペロン力生成アルゴリズムの進展とともに、物理点を目指す！

小←ストレンジネス→大



# 可能な対策

- ◆ 問題:クォーク質量が軽くなるにつれノイズが大きくなる。



小 ← ストレンジネス → 大



- ◆ 対策(2体力)

- ◆ コンピュータのパワーで押し切る!

- ◆ ハイペロンセクタは直接完全計算。

- ◆ 軽いクォークを多く伴う計算に、どうしても難しい場合は、カイラル外挿を併用する。  
(ポテンシャルのカイラル外挿の方法の開発)

- ◆ 他の進化に期待。

# 可能な対策

- ◆ 問題: NBS波動関数を観測する時間  $t$  が大きくなるにつれて、統計ノイズが大きくなる。

$$\langle 0 | B(\vec{x}, t) B(\vec{y}, t) \cdot \bar{B}(0) \bar{B}(0) | 0 \rangle$$

- ◆ 対策: 計算する  $t$  を、より小さいところへ持ってくる。

- ◆ 2006年～ オリジナルHAL QCD法

$t \sim 40$ 程度必要

2体の基底状態で、サチルまでの時間

- ◆ 2011年～ 時間依存法

$t \sim 15$ 程度必要

“核子が核子になるまでの時間”

- ◆ 201X年 NEW method(?)

- ◆ Feed back source

- ◆ 時間依存法の適用範囲外でもポテンシャルは既にstableである。

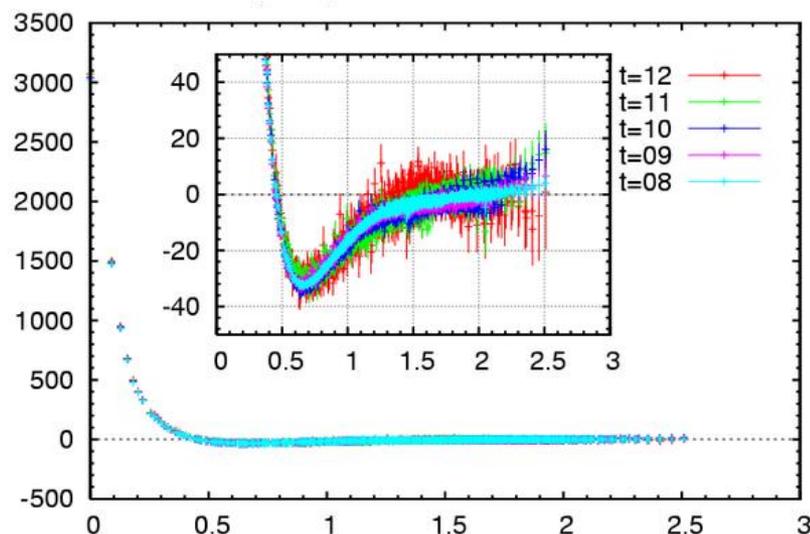
- ◆ 様々な setup の変更、etc.

- ◆ いろんな問題を一気に解決する突破口。

小←ストレンジネス→大



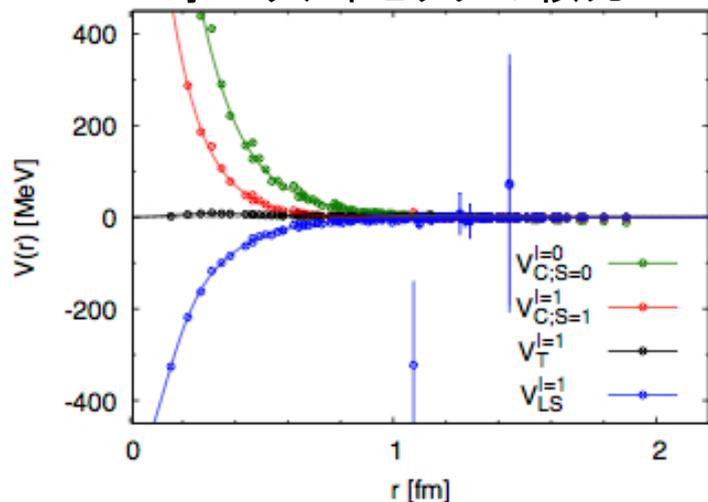
ポテンシャルの例



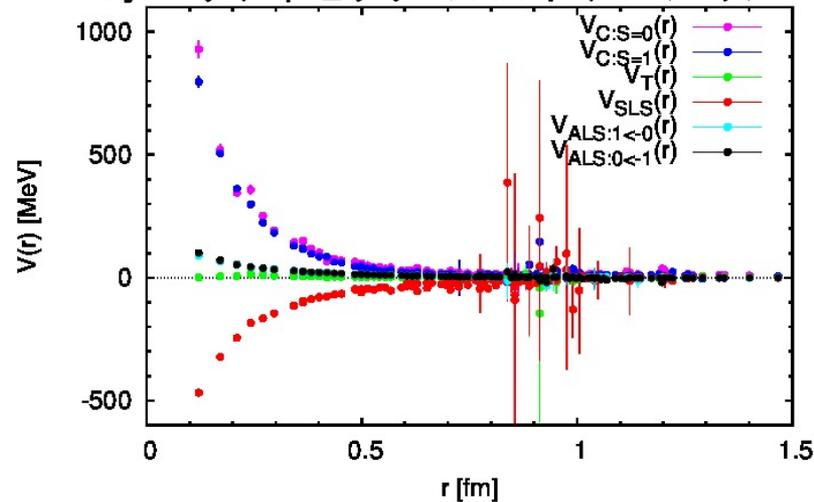
# 解けきれていない問題: 偶パリティLS力

- ◆ 奇パリティセクタの核力・ハイペロン力 (LS力・反対称LS力)  
点群とmomentum wall sourceを駆使して計算可能になった。

奇パリティセクタの核力

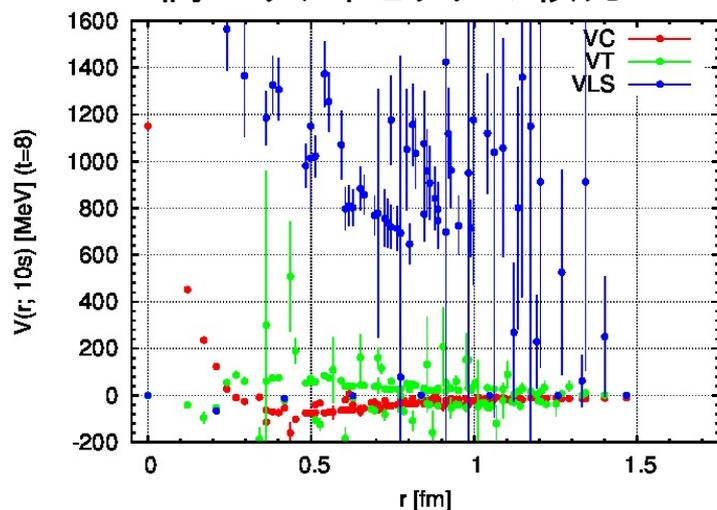


奇パリティセクタの $\Lambda N$ ポテンシャル



- ◆ 偶パリティセクタのLS力 (核力・ハイペロン力) は、未だうまくいかない。

偶パリティセクタの核力



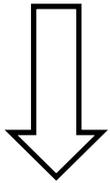
- ◆ LS力を取り込んだとたん、  
テンソル力を道連れにしてダメになる。
- ◆ ハイペロンセクタも同じ振る舞い。
- ◆ 原因究明急務

# 体制の変更

## HPCI 戦略分野5課題1

### 格子班

物理点ゲージ配位生成

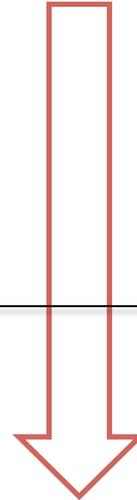
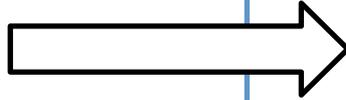


2+1 flavor QCD → 1+1+1 flavor QCD  
 Various physical quantities  
 Investigation of resonances  
 Direct construction of light nuclei

### 核力班

核力・ハイペロン力決定

その応用



### ポスト京

核力班が独立して、重点課題9サブ課題B:QCD班になる。  
 ゲージ配位生成も自前で行う。

# 重点課題9サブグループB: QCD班

## ◆ 平成31年度まで

- ◆ 135～200 MeV程度までのパイオン質量でゲージ配位生成。
- ◆ 偶奇両パリティセクタでポテンシャル生成。
- ◆ ポテンシャルのカイラル外挿の開発。
- ◆ NBS波動関数の観測点  $t$  を小さくする方法の探索。  
Feed back source、その他。
- ◆ 偶パリティセクタのLS力の計算の安定化。
- ◆ Flavor SU(3)極限の3体力。
- ◆ 有効模型との連携手法の模索(3体力)

## ◆ 平成32年度以降の目標

- ◆ 核力・ハイペロン力を結合チャンネルで精度よく決定する。  
偶・奇両パリティ  
中心力、テンソル力、LS力、反対称LS力まで
  - ◆ 高統計は必須である。
  - ◆ 必要に応じて、カイラル外挿を併用する。
- ◆ 三体力(核力・ハイペロン力)
- ◆ 原子核物理・中性子星への応用。

**backup**