

# 原子核分野の挑戦的課題とその世界的状況

東京大学  
大塚孝治

素粒子

量子色力学に基づく物質構造の究極的解明

原子核

核力、ハドロン力から構築される  
エキゾチック原子核

宇宙

多粒子数値シミュレーションによる核反応と  
元素起源の解明

# 核図表と主要な研究課題

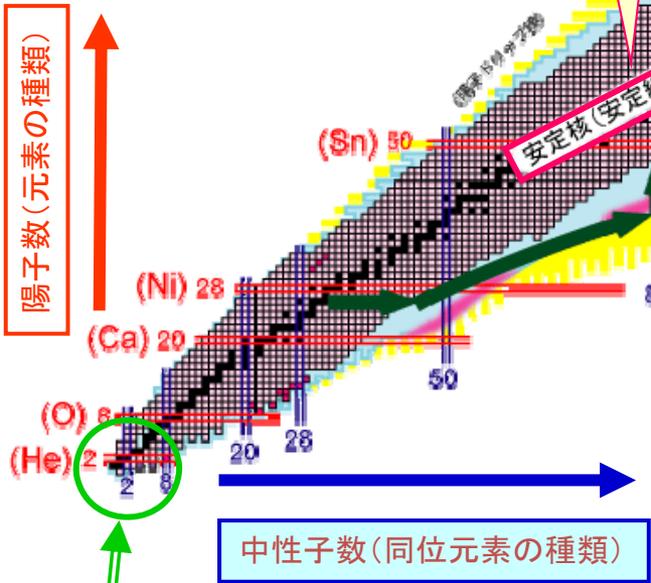
安定核以外は不安定核  
 極めて短寿命  
 →加速器で作る  
 エキゾチックな性質

■ 安定核  
 地球上の原子核

■ 存在が実験で確認された不安定核

■ RIBFの到達領域

■ 理論予想



超新星爆発で生成される不安定核の道筋(理論的予想) ⇒ Rプロセス

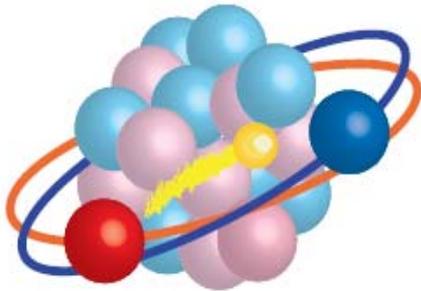
宇宙の初めに出来るのはごく軽い原子核だけ

- 次世代ペタコンで開拓する研究課題:
1. 陽子数と中性子数のアンバランスからくる新しい量子構造  
 新たな魔法数、殻構造、クラスター構造
  2. 超新星爆発などによる物質創成の道筋  
 元素創成の連鎖の道の解明
  3. 超重元素や物質存在限界の探求  
 物質の存在限界と核力(2体力、3体力)

## 不安定核は未知の世界

頼りになる道しるべは原理的なこと : 原理主義

核力から原子核をつくる



2体力ばかりでなく、3体力も  
原子核の存在限界などにまで  
強い影響

核力は極めて複雑で未だに全容は不明 : 格子QCD計算からのインプット

核力から原子核を作る



次ページ

# 原子核構造計算におけるモンテカルロ殻模型(MCSM)の概要

量子多体系を解くための  
元々のハミルトニアン行列

$$\begin{bmatrix} * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ & & \dots & & & & \\ * & * & * & * & * & * & * \end{bmatrix}$$

← N次元 →



補助場量子モンテカルロ法に  
ヒントを得た、重要な多体基底  
ベクトルの生成法を独自に提唱  
(1995年本間、水崎、大塚)

$$\begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{bmatrix}$$

n次元

n=30~50

これを対角化

N ~ 旧来の方法では最大10億次元  
(鉄やニッケルのあたりで、  
シェルが壊れていない場合)

現在までに行われたMCSM計算で最大のものは、N と言えば $10^{28}$ 次元に相当

不安定核で現れる新たな構造解明に寄与 論文数(共同研究含む) 50以上  
citation(共同研究含む) 2000以上

計算のサイズは活性粒子数とともに緩やかに増大



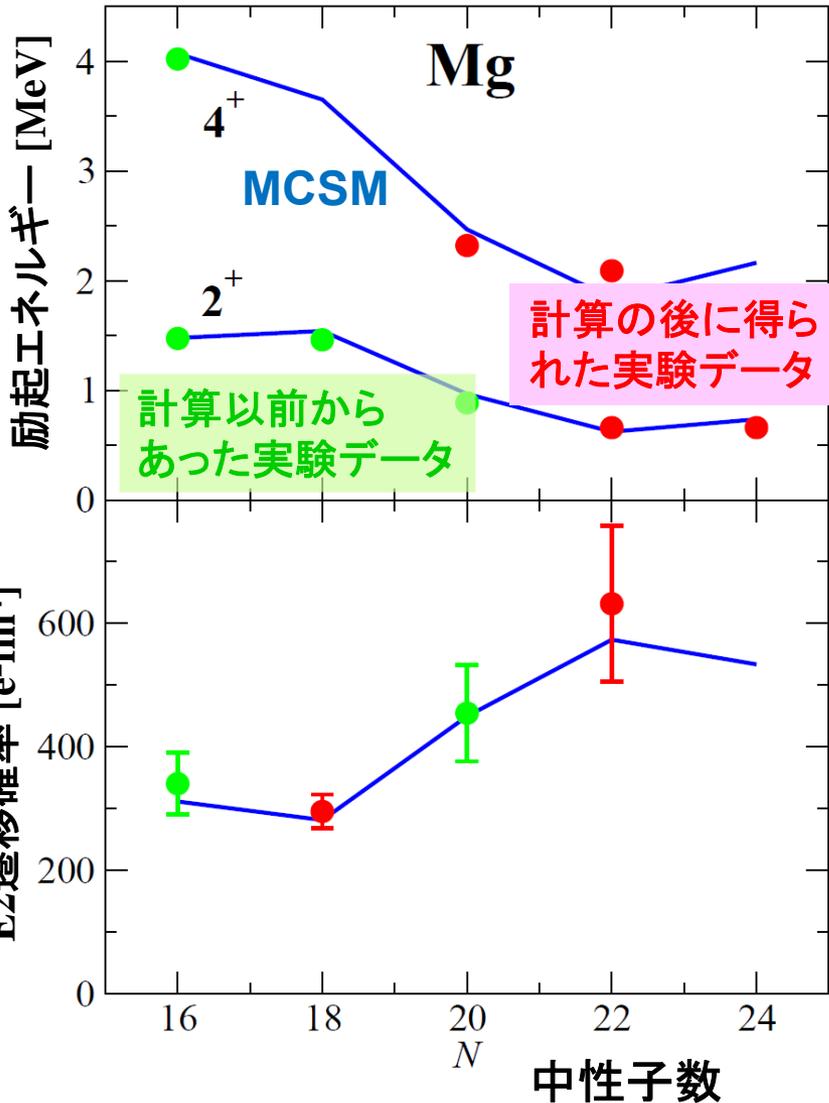
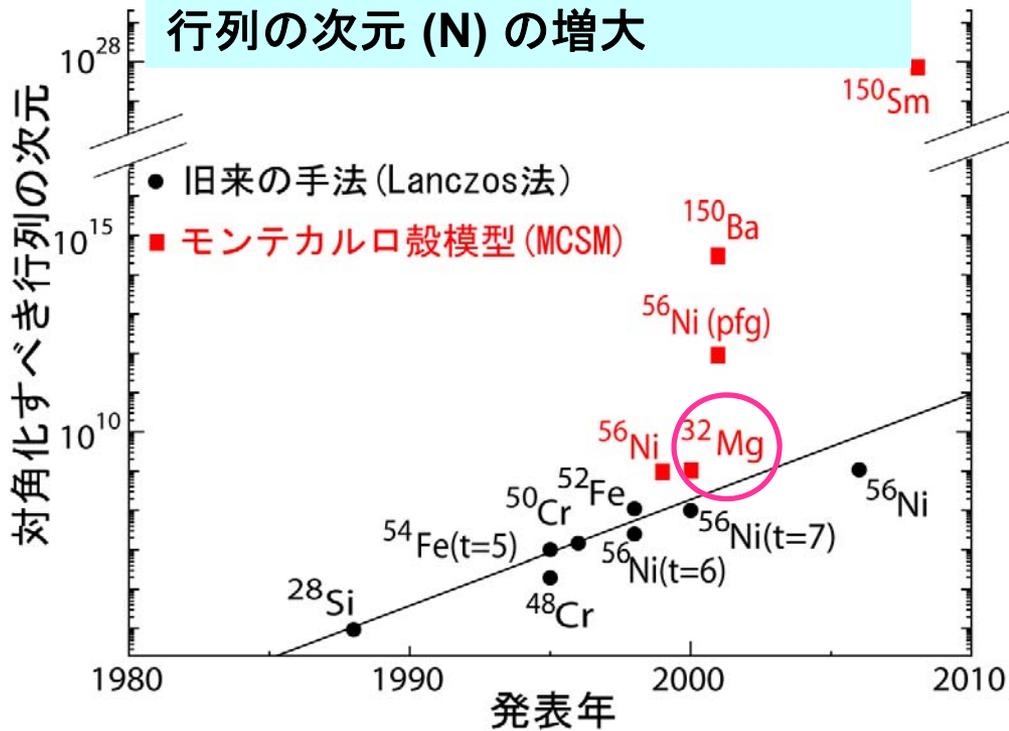
ウランのような原子核をやるには10ペタ級が必要

# 原子核における量子多体問題： 大規模計算(モンテカルロ殻模型)による予言と計算のサイズ

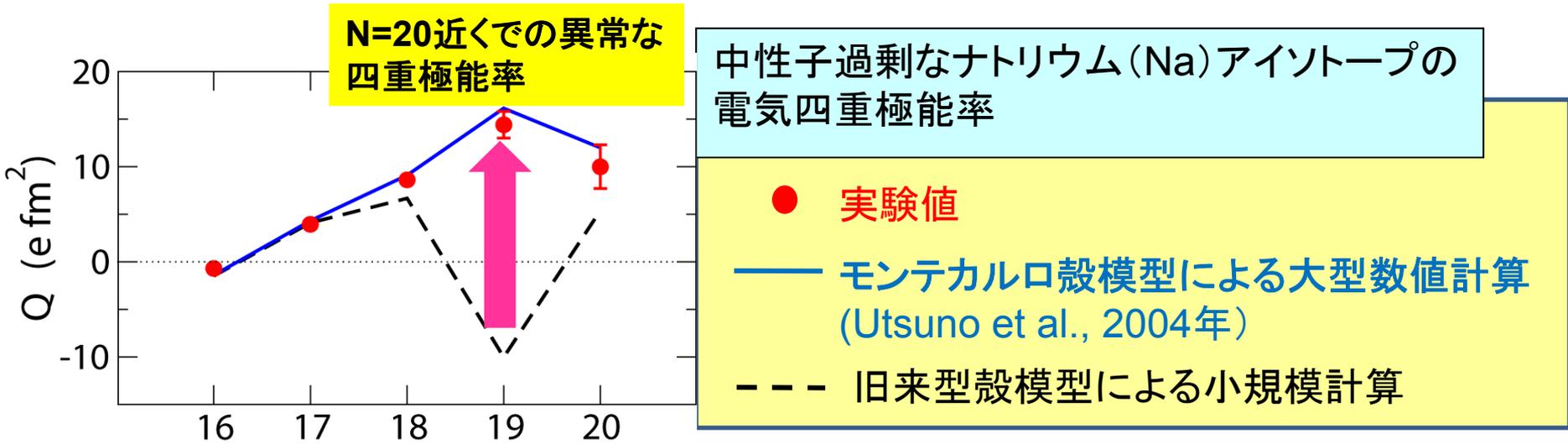
- モンテカルロ殻模型(MCSM)計算:

旧来型計算ではハミルトニアン行列の次元が $10^{20}$ 次元を超えるような場合でも量子モンテカルロ的方法と対角化を組み合わせると数十次元の問題に帰着させて解く

## 対角化すべき元々のハミルトニアン行列の次元(N)の増大

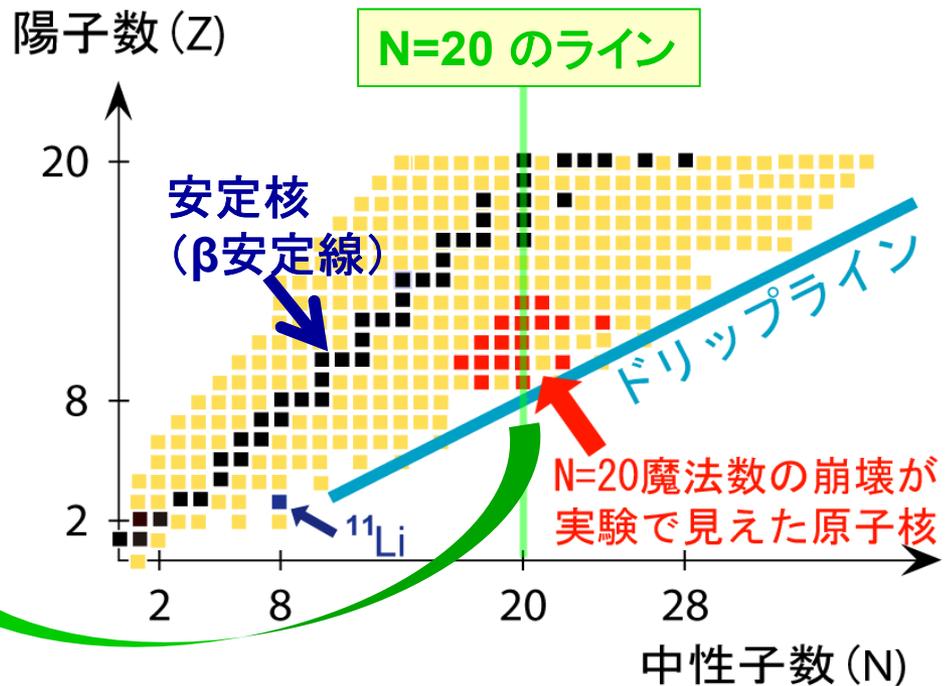
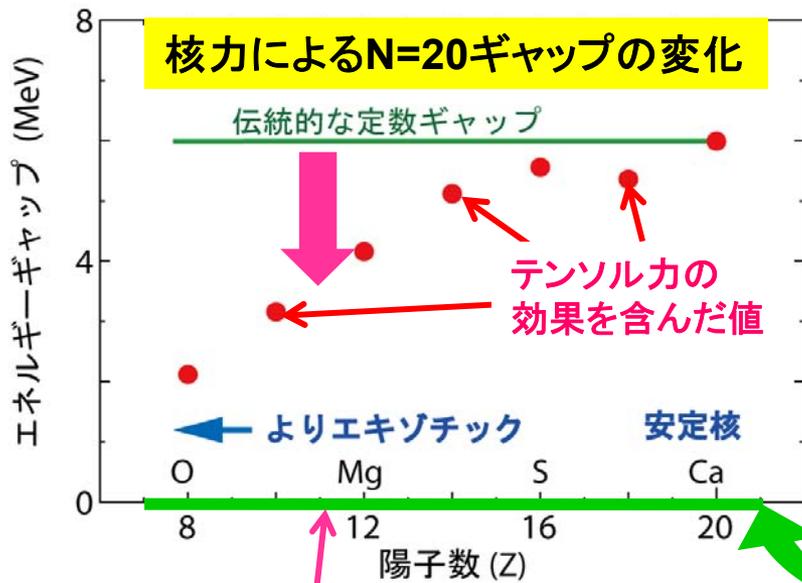


# 不安定核で起こる魔法数のパラダイムシフトとその大型計算による検証



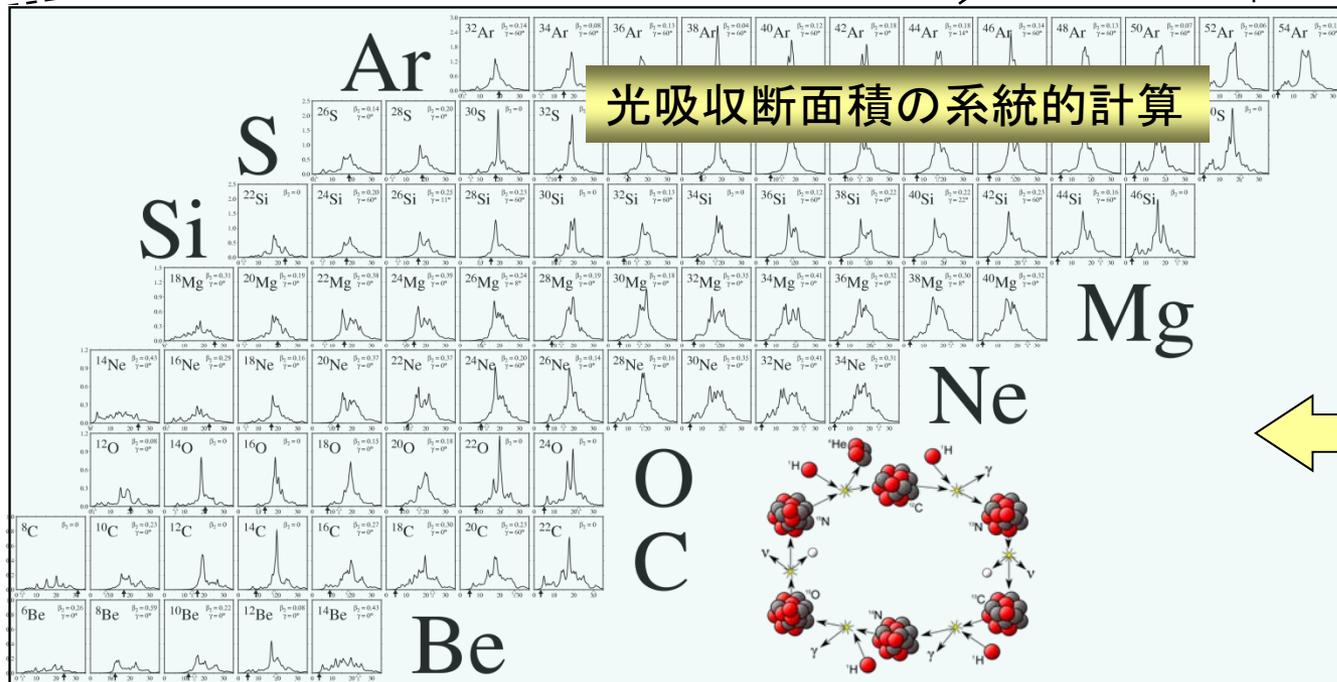
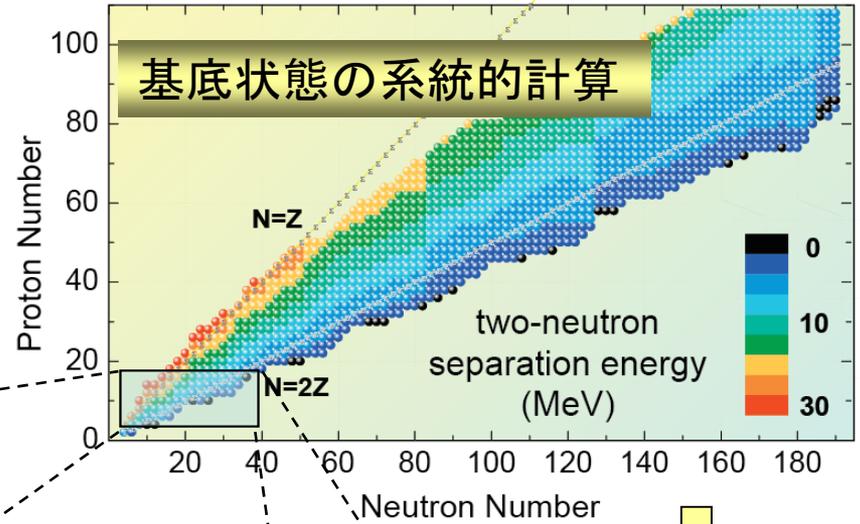
## 基本理論を大規模計算で検証

雑誌パリティ、2008年12月号、大塚



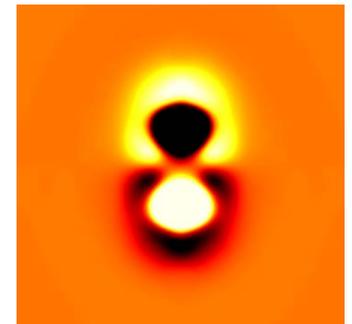
# シミュレーションで原子核の構造・反応を調べる

•密度汎関数理論を用いて、コンピュータ上に存在可能なあらゆる原子核を作り出し、その性質を調べる。現在世界最高レベルの加速器を用いても合成が難しい原子核の性質を解明。宇宙進化、物質の創生に深く関わり、また原子炉シミュレーション、核変換シミュレーションの基礎データとしても利用できる。



時間依存コーン・シャム方程式

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi_i(t)\rangle = (h_{KS}[\rho(t)] + V_{\text{ext}}(t)) |\psi_i(t)\rangle$$



中性子過剰核の光吸収過程の実時間応答

核力は十分に分かり、使われてきたか？

最近の3体力の研究

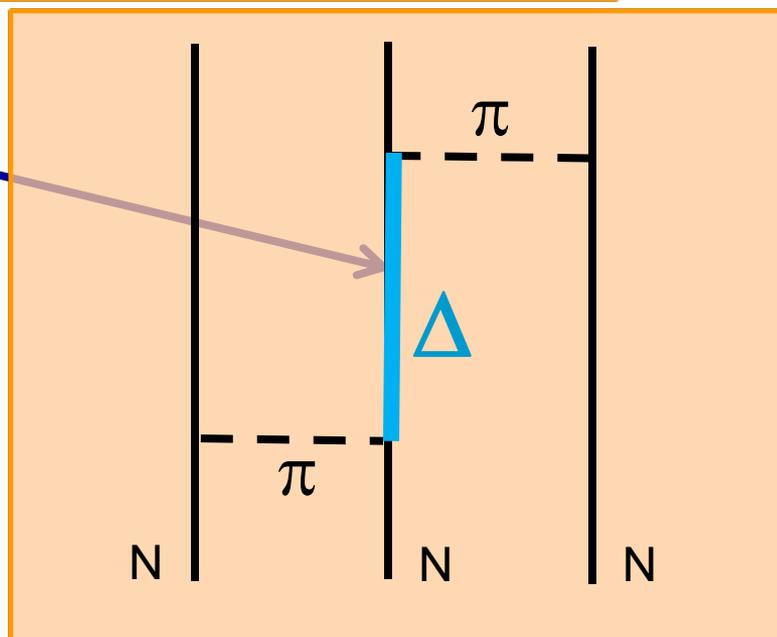
# The key : Fujita-Miyazawa 3N mechanism ( $\Delta$ -hole excitation)

Progress of Theoretical Physics, Vol. 17, No. 3, March 1957

## Pion Theory of Three-Body Forces

Jun-ichi FUJITA and Hironari MIYAZAWA

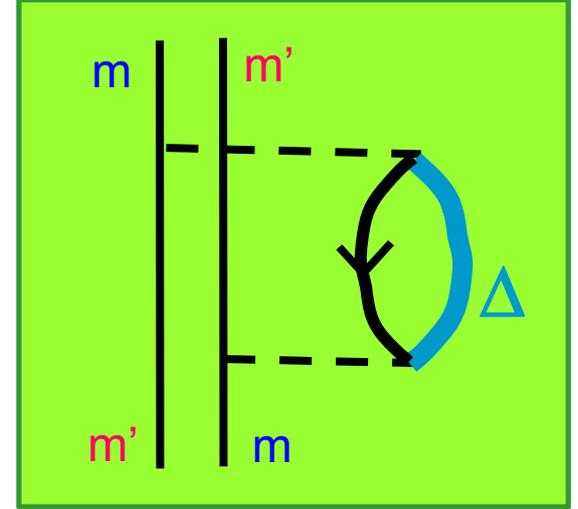
$\Delta$  particle  
 $m=1232$  MeV  
 $S=3/2, I=3/2$



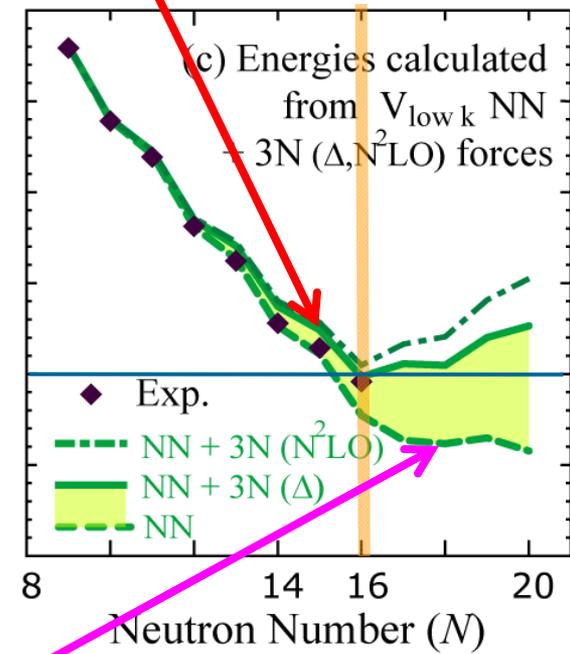
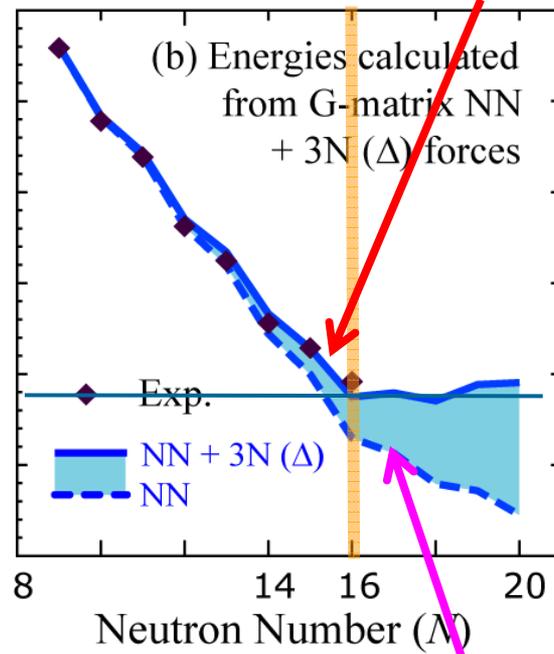
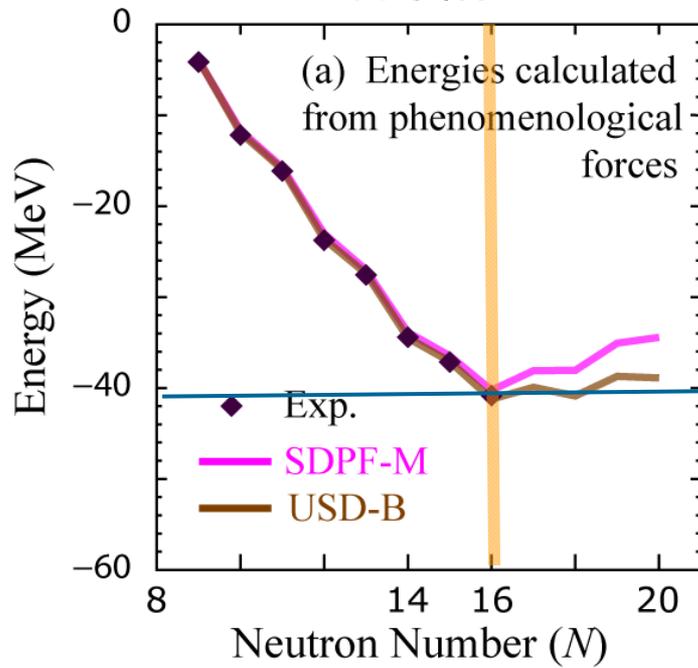
# Ground-state energies of oxygen isotopes

$NN$  force +  $3N$ -induced  $NN$  force

(Fujita-Miyazawa force)



## 現象論



Conventional calculation with  $\pi N\Delta$  coupling

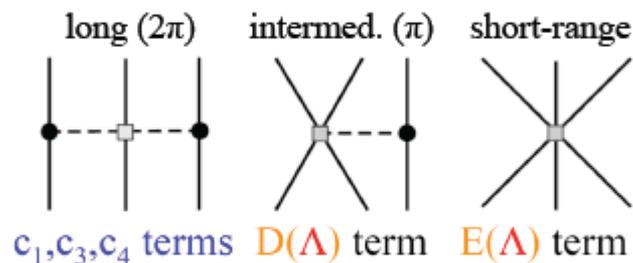
$\pi$  exchange with radial cut-off at 0.5 fm ,  $\Delta E = 293$  MeV

$$f_{\{\pi N\Delta\}}/f_{\{\pi NN\}} = \sqrt{9/2}$$

A.M. Green, Rep. Prog. Phys. 39, 1109 (1976)

### Low-momentum 3N interactions

from leading  $N^2$ LO chiral EFT  $\sim (Q/\Lambda)^3$  van Kolck (1994), Epelbaum et al. (2002)



$c_i$  from  $\pi N$ , consistent with NN

Meissner (2007)

$$c_1 = -0.9^{+0.2}_{-0.5}, c_3 = -4.7^{+1.2}_{-1.0}, c_4 = 3.5^{+0.5}_{-0.2}$$

$c_3, c_4$  important for structure, large uncertainties at present

NN for smooth cutoff  $V_{low k}$  ( $n_{exp}=4$ ) from  $N^3$ LO(500)

D, E terms fitted to E(3H) and radius(4He)

国内の分野内連携      全国の研究者のネットワーク

理研—CNS(東大原子核センター)  
京大基礎物理学研究所  
阪大RCNP(核物理研究センター)

核理論委員会

素粒子論との連携      格子QCD

宇宙物理との連携      様々な「元素合成」過程  
弱い相互作用によるプロセス      国際的な展開