

Effects of three-nucleon interaction on isotope shifts of Pb nuclei

中田 仁 (千葉大・理)

@ 新学術理論班研究会
(京大基研; Mar. 12, 2015)

Contents:

- I. Introduction
- II. $3N$ LS int. と Pb 核の isotope shift
- III. Summary

Ref.: H.N. & T. Inakura, P.R.C 91, 021302(R) ('15)

I. Introduction

Shell structure $(\rightarrow \text{magic number})$

— 核構造の基本概念

astrophysical importance

$$\left\{ \begin{array}{l} s\text{- \& } r\text{-process の waiting point} \\ \text{EOS の制限} \leftarrow \text{shell effects の subtraction} \\ n\text{-star inner crust 中の cluster } (\leftrightarrow \text{ e.g. QPO}) \end{array} \right.$$

★ $Z\text{- \& } N\text{-dep.}$! (“shell evolution”)

★ central + ℓs potential

ℓs pot. $\leftrightarrow \ell s$ splitting $(\rightarrow \text{magic \#’s in } Z, N > 20)$

○ $2N$ LS int. — 不十分 ($\Rightarrow$ 多くの場合, 現象論的に強い LS int. を導入)

○ tensor int. $(+\alpha) \rightarrow Z, N\text{-dep.}$

overall strength への寄与 $\dots$ 一定の摂動的寄与,

しかしあまり大きくない

shell structure の origin の理解 $\rightarrow$ 正しい予言

★ 河野 ... ℓ_s splitting の origin を説明する新たな mechanism の指摘

Ref.: PRC 86, 061301(R)

$3N$ int. (χ EFT) $\rightarrow$ ρ -dep. LS int.

stronger LS int. at higher ρ ($\rightarrow$ stronger ℓ_s pot.)

$\Rightarrow$ 実験的 evidence ?

... 特に, ℓ_s splitting と独立な evidence があれば面白い

(より信頼性が高まる)

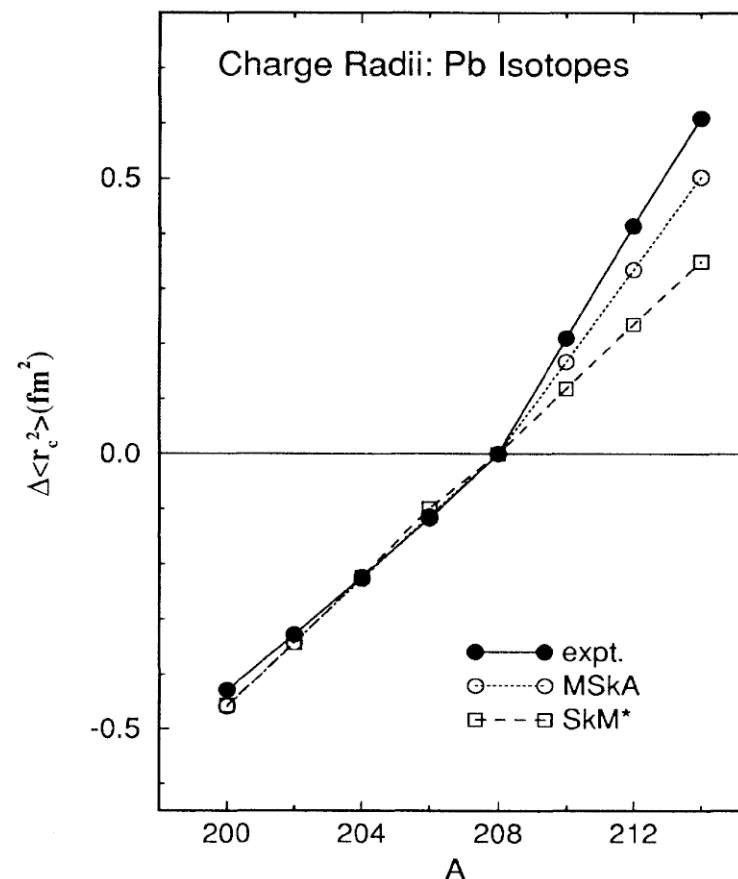
Pb核のisotope shift

$$\Delta\langle r^2 \rangle_p(^A\text{Pb}) := \langle r^2 \rangle_p(^A\text{Pb}) - \langle r^2 \rangle_p(^{208}\text{Pb})$$

exp.

$\Rightarrow N = 126$ でのkink!

{ electron scatt.
X-ray freq. difference
(μ^- atom, $K\alpha$, OIS)



Ref.: M.M. Sharma *et al.*, PRL 74, 3744

'90年頃までのSkyrme EDFでは説明できない, しかしRMFでは出せる

→ **LS int. の isospin content による?** (→ Skyrme EDF の拡張)

... **しかし, 十分な解決とは言えない!**

$\Delta\langle r^2 \rangle_p(^A\text{Pb})$ の $N = 126$ での kink $\leftarrow n0i_{11/2}$ occupation

$\Uparrow$
 p - n attraction

$\left\{ \begin{array}{l} \text{neighboring orbits より } \langle r^2 \rangle \text{ 大} \\ N < 126 \text{ で unocc.} \\ N > 126 \text{ では occ. prob. を持つ} \\ (\because \text{pairing}) \end{array} \right.$

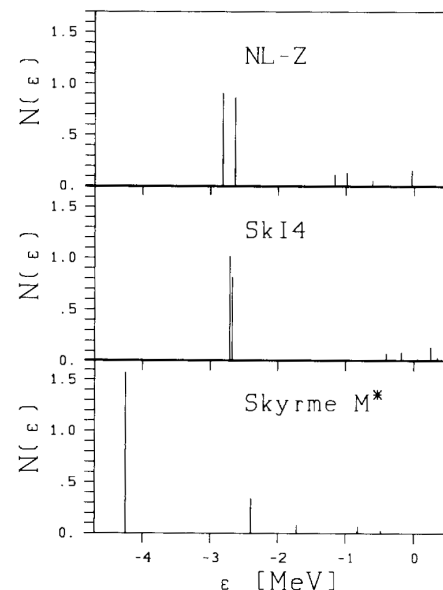
Ref.: P.-G. Reinhard and H. Flocard, NPA 584, 467

'90年代の“理解” $\dots \varepsilon_n(0i_{11/2}) - \varepsilon_n(1g_{9/2})$ が本質的

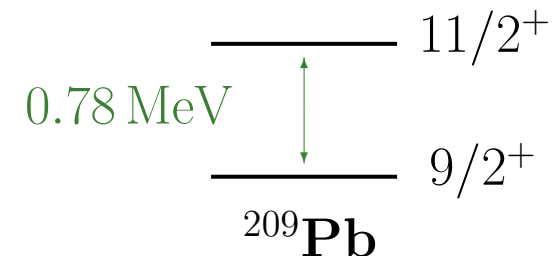
$\leftrightarrow$ LS int. の isospin content

しかし, $\varepsilon_n(0i_{11/2}) \approx \varepsilon_n(1g_{9/2})$ ($\leftrightarrow$ ほぼ等しい occ. prob.) でないと

$\Delta\langle r^2 \rangle_p$ を説明できない! (それでも少し足りない)



一方 $\dots$



II. 3N LS int. と Pb 核の isotope shift

LS int. の ρ -dep. $\rightarrow$ $\begin{cases} \text{核内 } (\rho \text{ 大}) \text{ で強い LS} \\ \text{核外 } (\rho \text{ 小}) \text{ で弱い LS} \end{cases}$

$\rightarrow$ $\begin{cases} j = \ell + 1/2 \text{ 軌道は核内に寄る} \\ j = \ell - 1/2 \text{ 軌道は核外に寄る} \end{cases} \quad (\because \text{variation})$

$n0i_{11/2}$ の半径が大きくなる

$\rightarrow$ Pb 核の isotope shift に効く ?

確認 $\leftarrow$ spherical HFB with semi-realistic M3Y-P6 int.

$\dots$ G-matrix + ρ -dep. contact term + enhanced LS
 $(\rightarrow \text{reasonable な shell structure})$

M3Y-P6 $\longrightarrow v_{\text{M3Y}}^{(\text{LS})} \times 2.2$

vs. $(\varepsilon_n(0i_{11/2}) - \varepsilon_n(0i_{13/2}) \text{ を合わせる})$

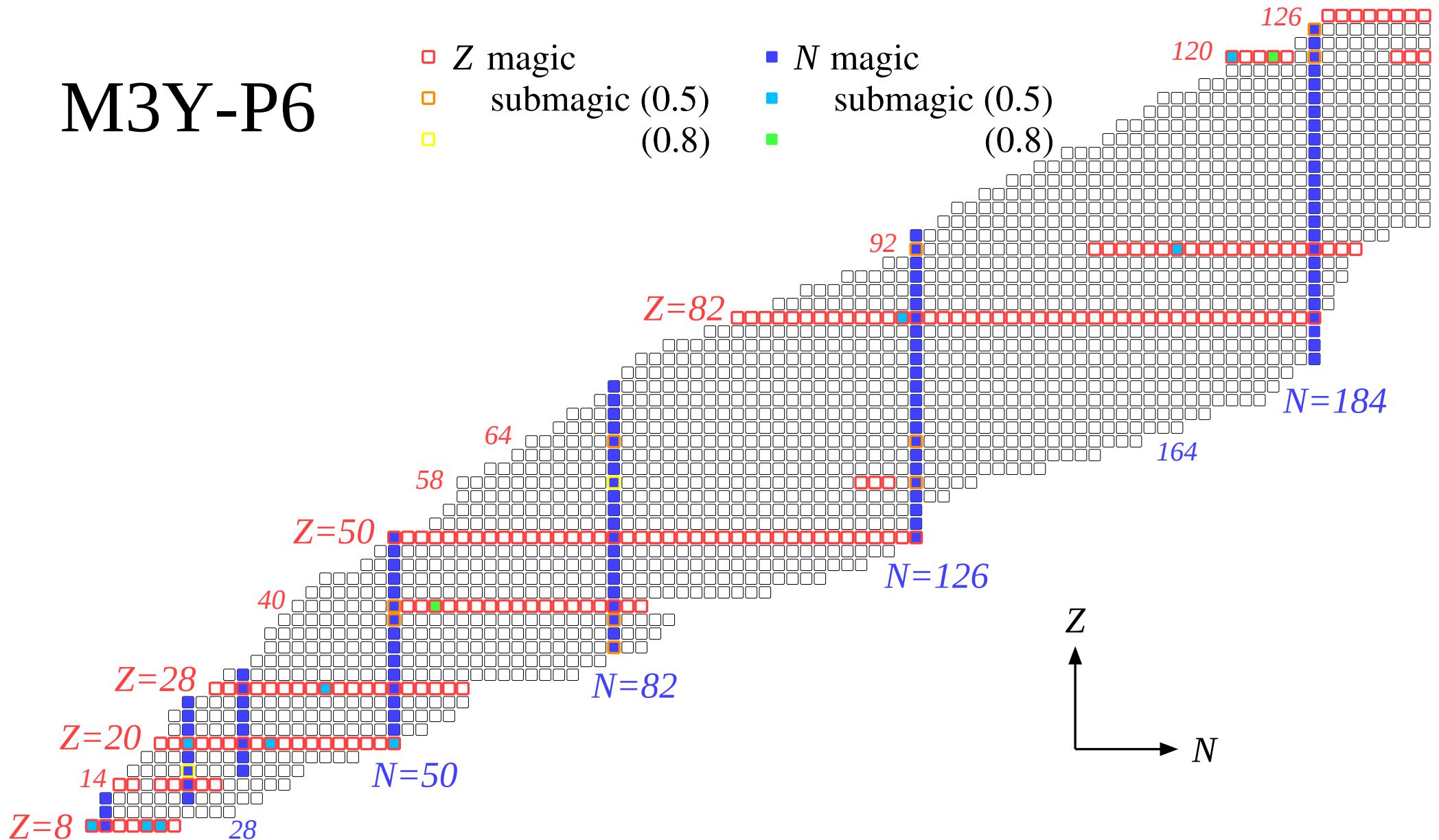
M3Y-P6a $\longrightarrow v_{\text{M3Y}}^{(\text{LS})} + v^{(\text{LS}\rho)}$

$$v^{(\text{LS}\rho)} = 2i D[\rho(\mathbf{R}_{ij})] \mathbf{p}_{ij} \times \delta(\mathbf{r}_{ij}) \mathbf{p}_{ij} \cdot (\mathbf{s}_i + \mathbf{s}_j);$$

$$D[\rho(\mathbf{r})] = -w_1 \frac{\rho(\mathbf{r})}{1 + d_1 \rho(\mathbf{r})} \left(\approx -w_1 \rho(\mathbf{r}) \right)$$

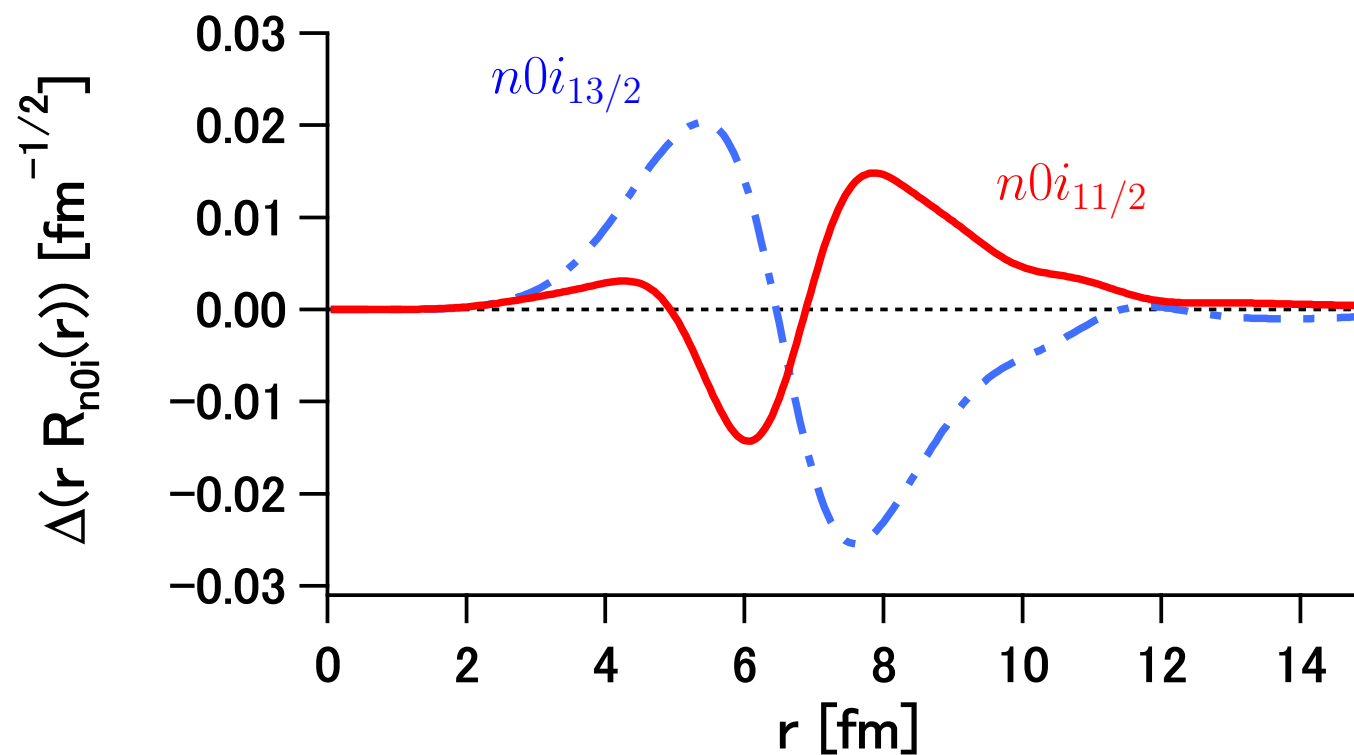
M3Y-P6

- | | |
|--|--|
| □ Z magic | ■ N magic |
| □ submagic (0.5) | ■ submagic (0.5) |
| □ (0.8) | ■ (0.8) |



★ 波動関数に対する効果

$$\Delta[r R_j(r)] := [r R_j(r)]_{\text{M3Y-P6a}} - [r R_j(r)]_{\text{M3Y-P6}} \quad @ \text{ } ^{208}\text{Pb}$$

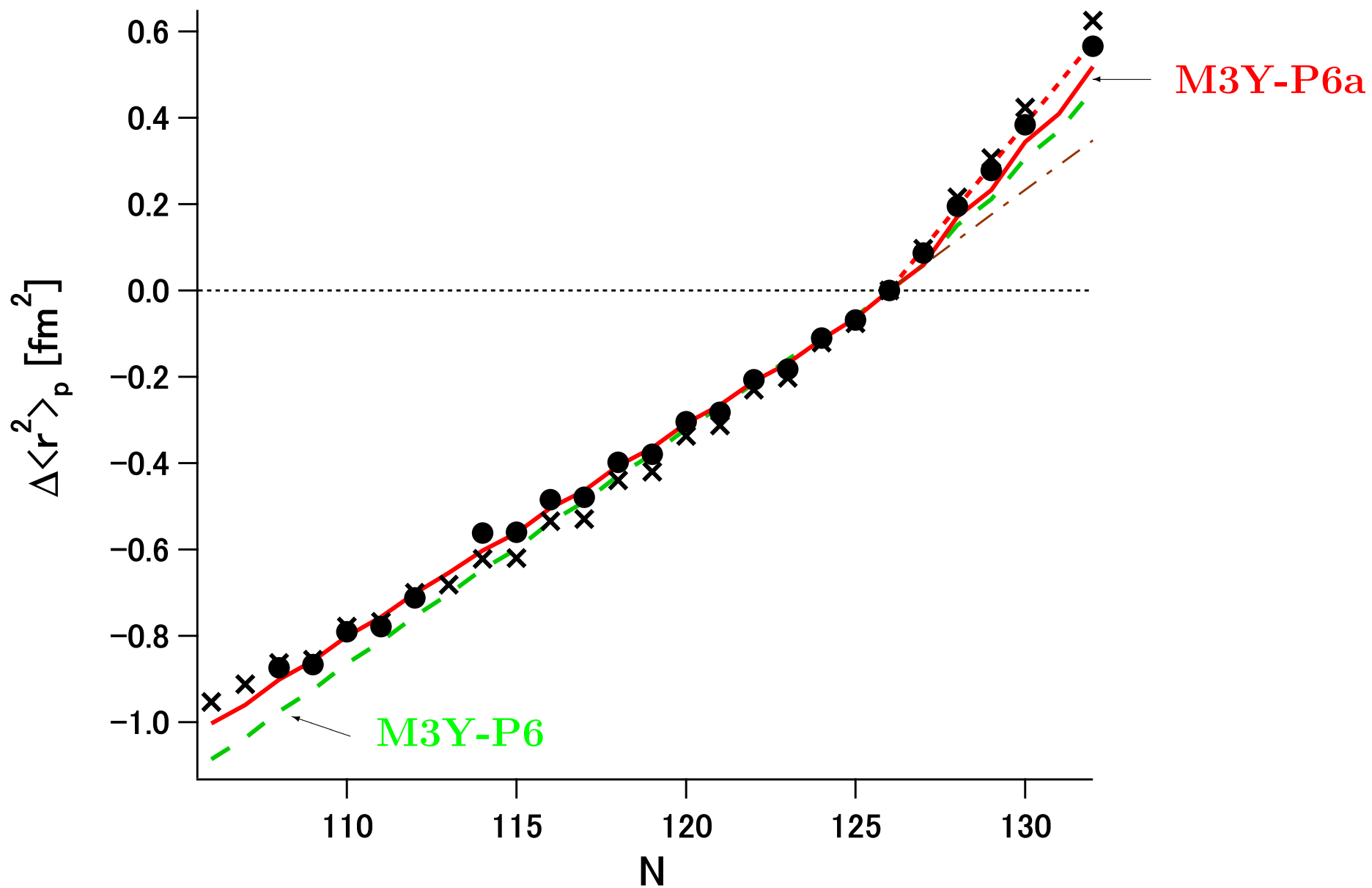


$\left\{ \begin{array}{l} j = \ell + 1/2 \text{ 軌道は核内に寄る} \\ j = \ell - 1/2 \text{ 軌道は核外に寄る} \end{array} \right.$

$\langle r^2 \rangle_j [\text{fm}^2] :$

	M3Y-P6	M3Y-P6a
$n1g_{9/2}$	32.3	31.8
$n0i_{11/2}$	40.2	40.7

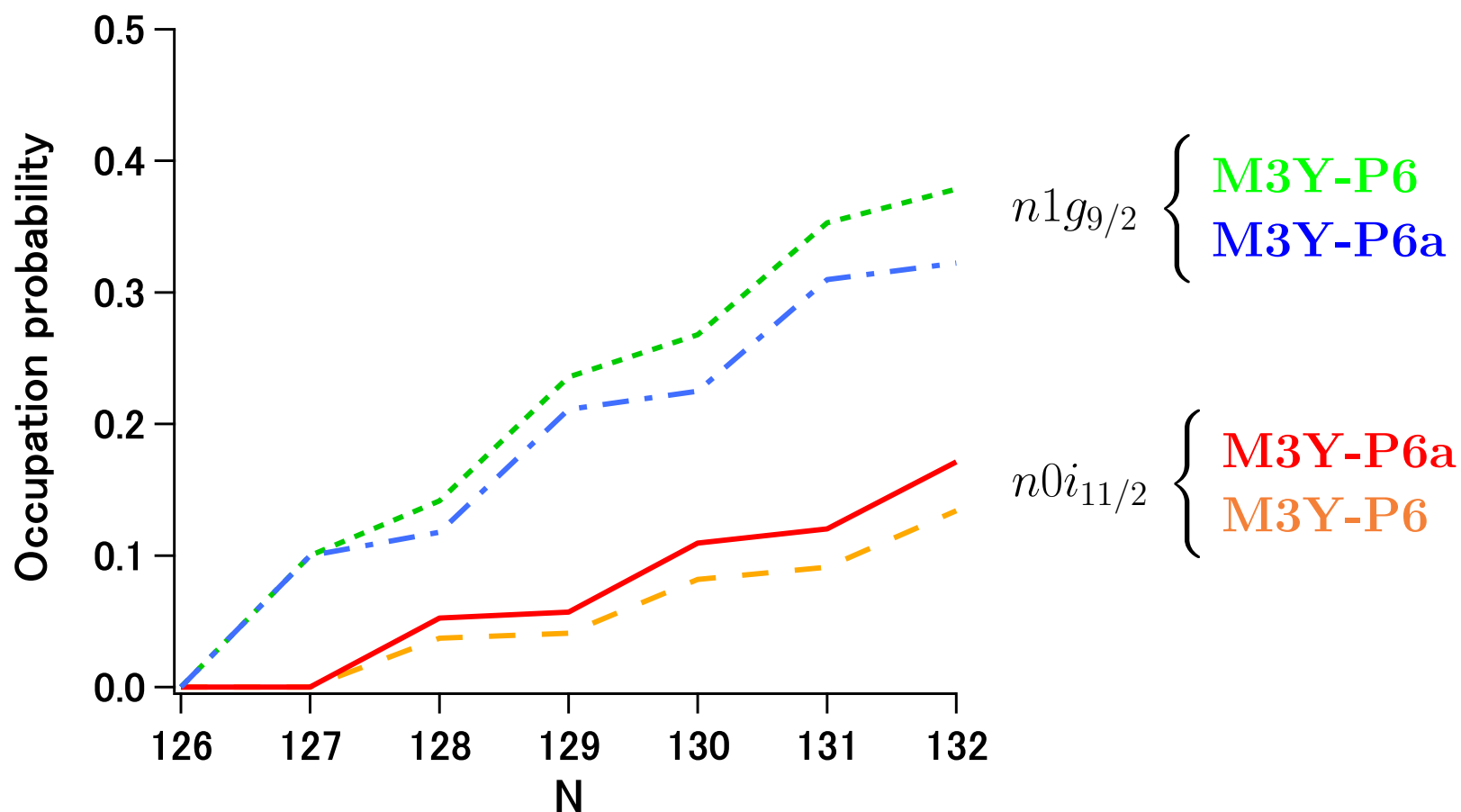
★ Pb核のisotope shift



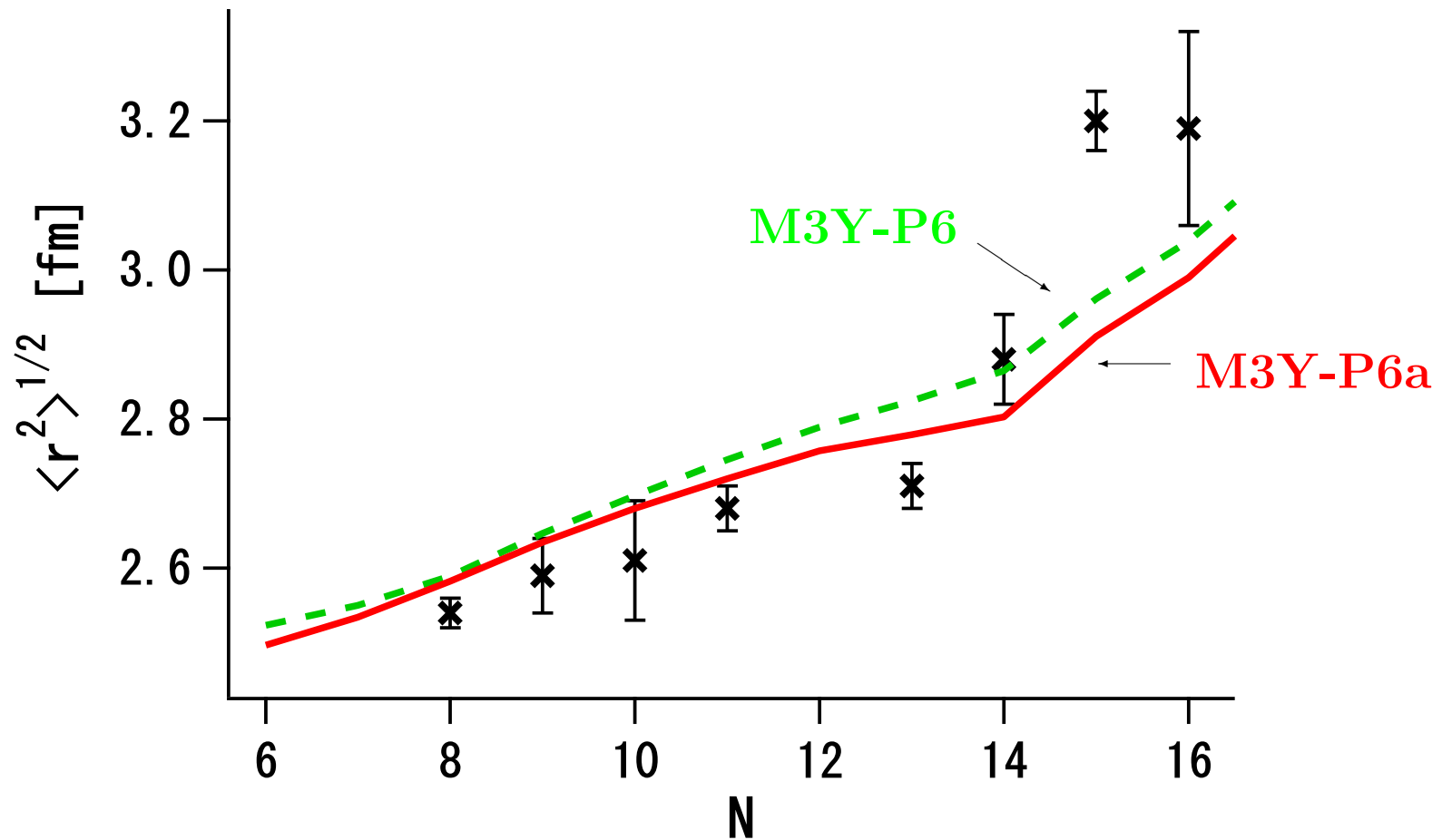
★ 1 粒子 energy & occ. prob.

$$\varepsilon_n(0i_{11/2}) - \varepsilon_n(1g_{9/2}) : \quad \begin{cases} \text{exp. @ } ^{209}\text{Pb} \rightarrow 0.78 \text{ MeV} \\ \text{M3Y-P6a} \rightarrow 0.72 \text{ MeV} \end{cases}$$

occ. prob.



★ 他の領域では？ ... $\sqrt{\langle r^2 \rangle}$ in O isotopes



幾らかimprove, 依然²³Oでは不一致

III. Summary

- **M3Y-P6a** $\rightarrow n1g_{9/2}$ - $n0i_{11/2}$ の (fictitious な) 縮退なしに
Pb核の isotope shift がほぼ再現できた
— $3N$ LS int. の evidence !
- $N > 126$ での isotope shift の even-odd staggering
 $\rightarrow n1g_{9/2}, n0i_{11/2}$ の occ. prob. の even-odd staggering
 $\rightarrow N = \text{odd}$ 核基底状態 $\cdots$ 1 q.p. state (on $n1g_{9/2}$)
 $\Rightarrow n0i_{11/2}$ occupation による $N > 126$ での isotope shift の説明を support



- Shell structure の origin のより正確な理解
- χ EFT の有効性

Perspectives :

- Drip line, shell structure への影響 ?
 - 変形, excitation (特に spin excitation) への影響 ?
- } $\rightarrow$ astrophysical effects ?