

モンテカルロ殻模型による 中重核の構造の研究

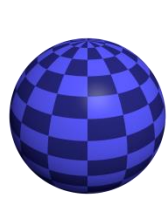
東京大学原子核科学研究センター(CNS)

角田佑介

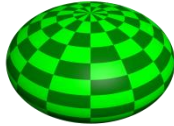
共同研究者: 大塚孝治(理研仁科セ)
清水則孝(東大CNS)
富樫智章(東大CNS)
本間道雄(会津大数理セ)
宇都野穰(原子力機構)

Motivation

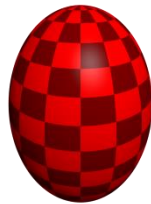
原子核の形状:



spherical



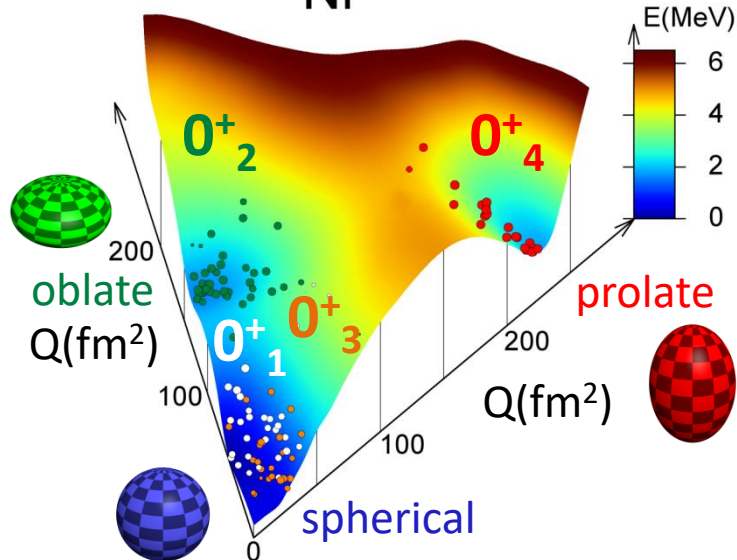
oblate



prolate

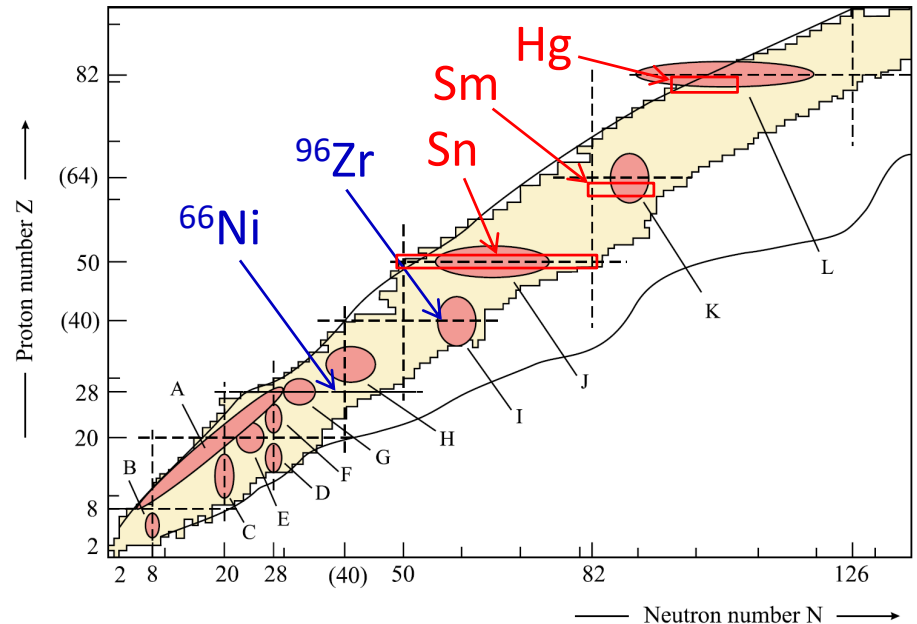
一部の核種では
異なる形状を持つ固有状態が
近いエネルギーに現れる(変形共存)

^{66}Ni



S. Leoni et al., PRL **118**, 162502 (2017)

変形共存の領域



Heyde et al., Rev. Mod. Phys. **83**, 1467 (2011)

陽子、中性子の一方が閉殻に近い領域で
変形共存が見られる⇒殻構造との関係

Sn(陽子数 $Z=50$),
Sm($Z=62$), Hg($Z=80$)同位体の
原子核形状を議論

モンテカルロ殻模型 (MCSM)

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} * & * & * & * & * & \cdot & \cdot \\ * & * & * & * & \cdot & \cdot & \cdot \\ * & * & * & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ * & * & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{diagonalization}} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & & & & & & 0 \\ & \varepsilon_2 & & & & & \\ & & \varepsilon_3 & & & & \\ & & & \cdot & & & \\ & & & & \cdot & & \\ & & & & & \cdot & \\ 0 & & & & & & \cdot \end{pmatrix}$$

Conventional Shell Model
all Slater determinants

重い核種を計算したり
原子核の変形を十分に扱うには
広い模型空間が必要だが、
非常に広い模型空間では
直接対角化は不可能

$$\mathbf{H} \approx \begin{pmatrix} * & * & * & \cdot \\ * & * & * & \cdot \\ * & * & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{diagonalization}} \begin{pmatrix} \varepsilon'_1 & & 0 \\ & \varepsilon'_2 & \\ 0 & & \cdot \end{pmatrix}$$

Monte Carlo Shell Model
bases important for a specific eigenstate

T. Otsuka *et al.*, PPNP47, 319 (2001)

モンテカルロ殻模型では、
MCSM基底による小さな
ハミルトニアン行列を対角化

補助場MC+変分的手法で
固有エネルギーを最小化

固有状態 $\rightarrow |\Psi_N\rangle = \sum_{n=1}^N \sum_{K=-J}^J f_{n,K}^{(N)} \boxed{P_{MK}^{J\pi} |\psi_n\rangle}$

1基底ではHFに相当

Slater行列式

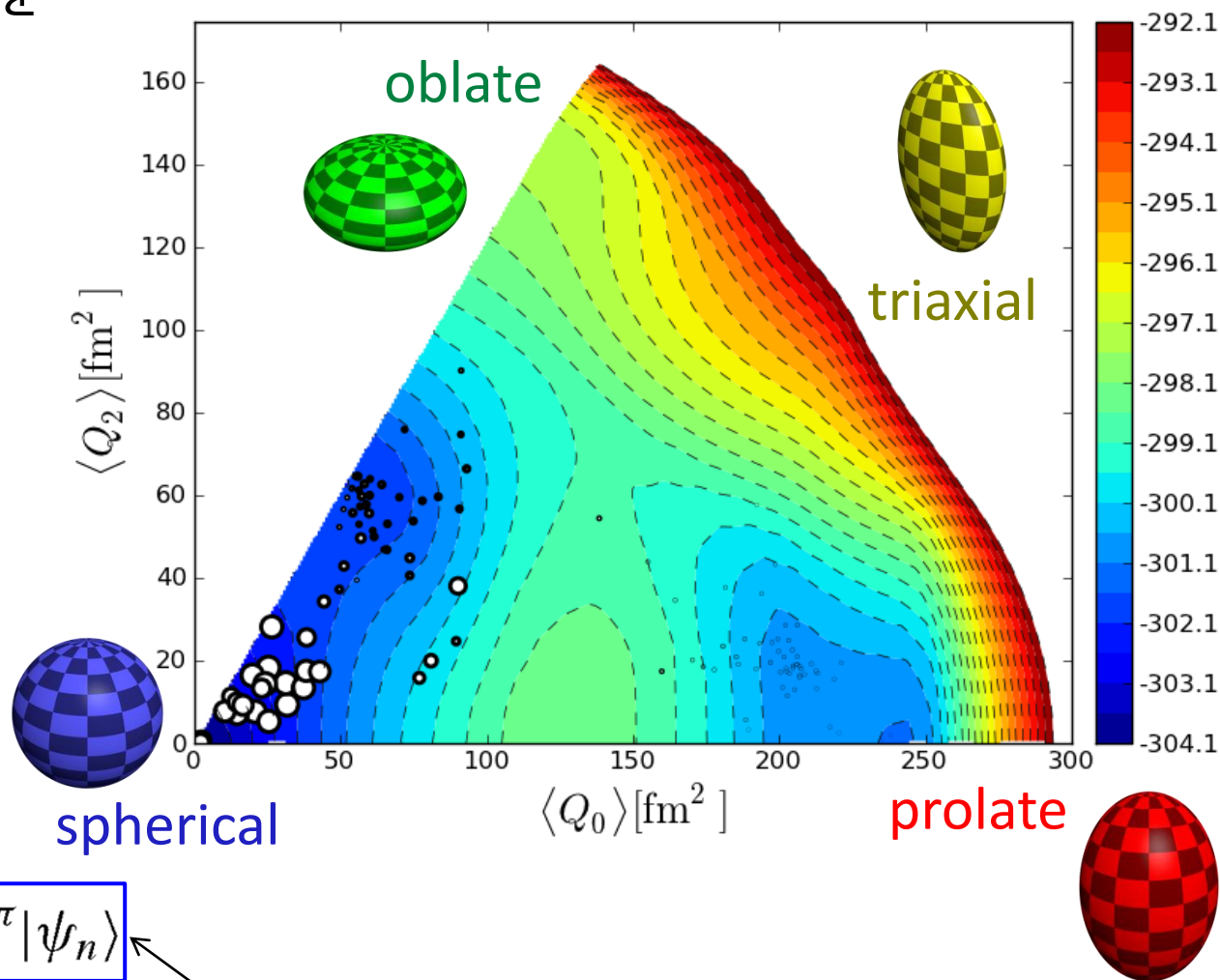
角運動量・パリティ射影

MCSM基底から**原子核形状**の情報を抽出(T-plot)

MCSMによる原子核形状の解析(T-plot)

‘T-plot’ of 0^+_1 state of ^{68}Ni (Z=28, N=40)

- 殻模型計算の相互作用を用いて、
Constrained HFにより
Potential energy surface (PES)を計算
- 点の位置: 変形度
射影前のMCSM基底の
四重極変形
- 点の面積: 重要さ
射影後の基底と
波動関数との
overlap probability



角運動量・パリティ射影

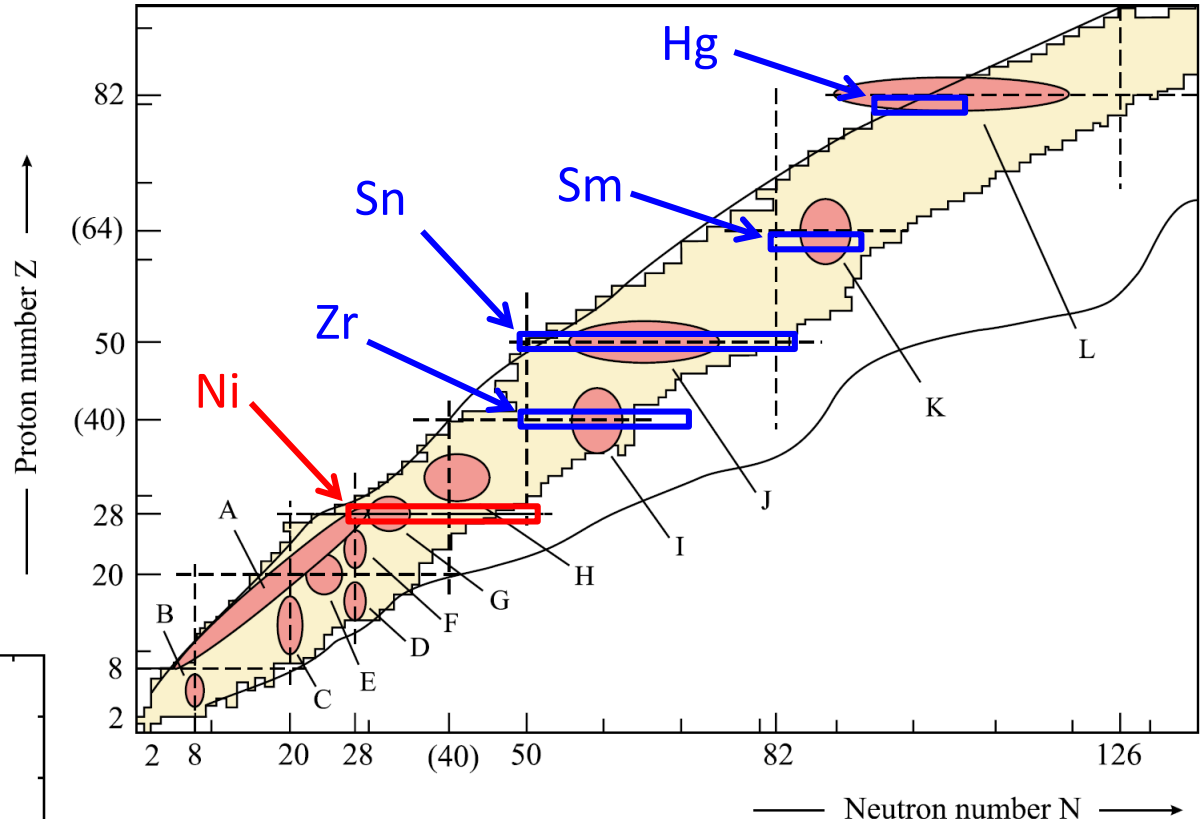
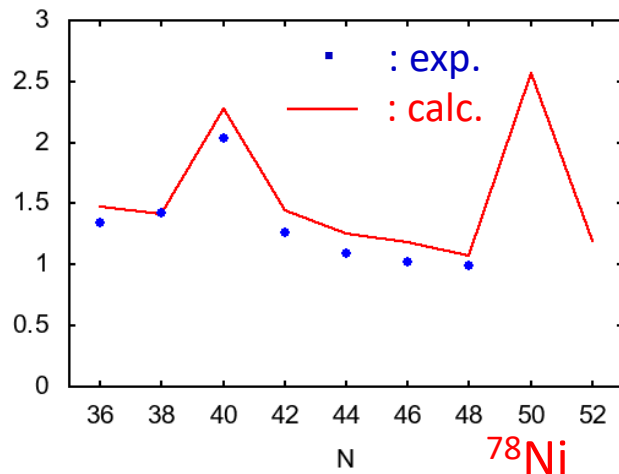
$$|\Psi\rangle = \sum_n f_n P^{J\pi} |\psi_n\rangle$$

MCSM波動関数 MCSM基底 Slater行列式

Ni (Z=28)

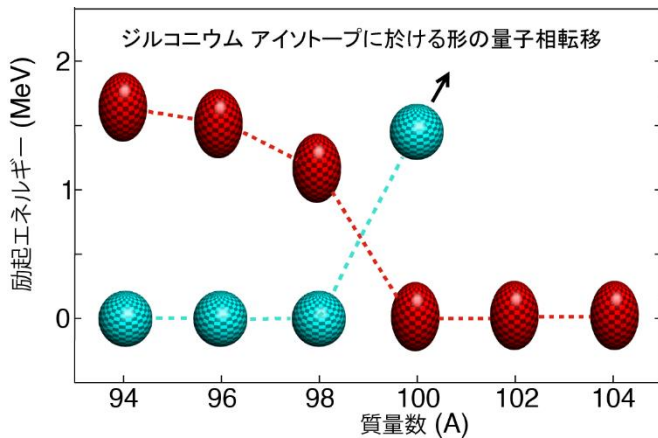
- モンテカルロ殻模型 (MCSM)により、従来の殻模型計算の手法では困難な核種も計算可能に
- Ni同位体 (YT *et al.*) Ni領域での実験との共著17本

2⁺ 励起エネルギー

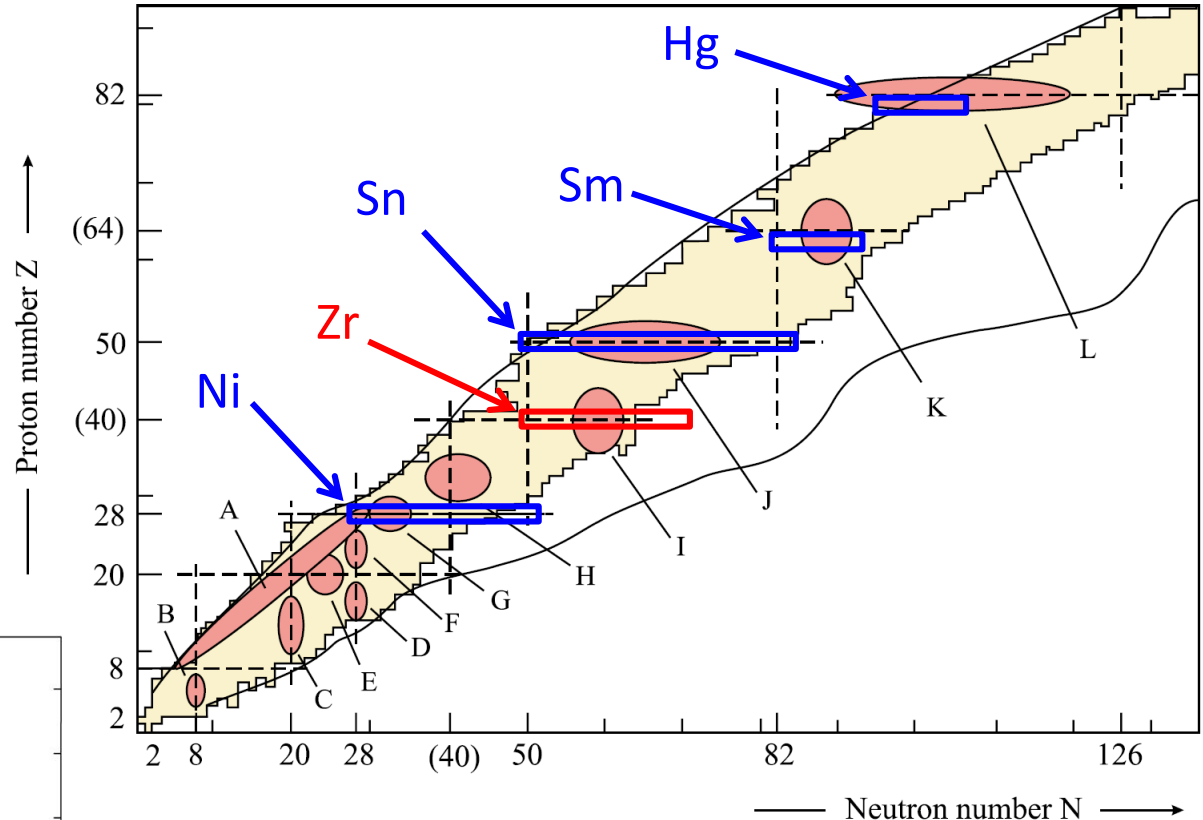


Zr (Z=40)

- Zr同位体 (Togashi *et al.*)
プレスリリース
「原子核での
形の量子相転移と
スーパーコンピュータ
「京」による
シミュレーション」
2016/10/18

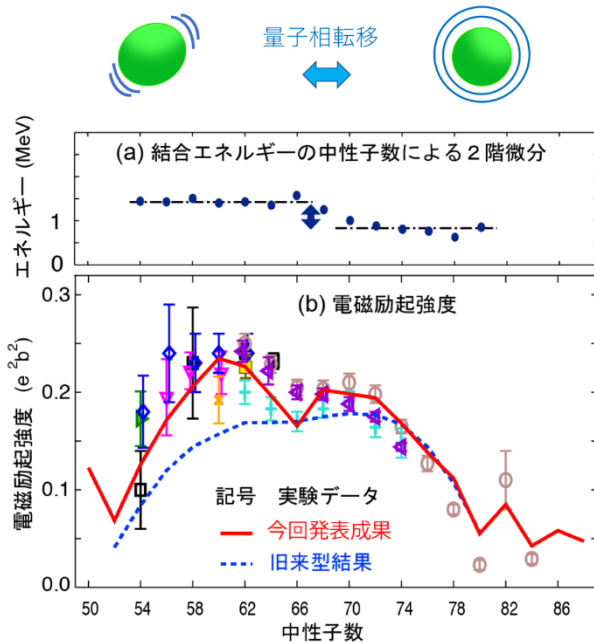


プレスリリースより引用

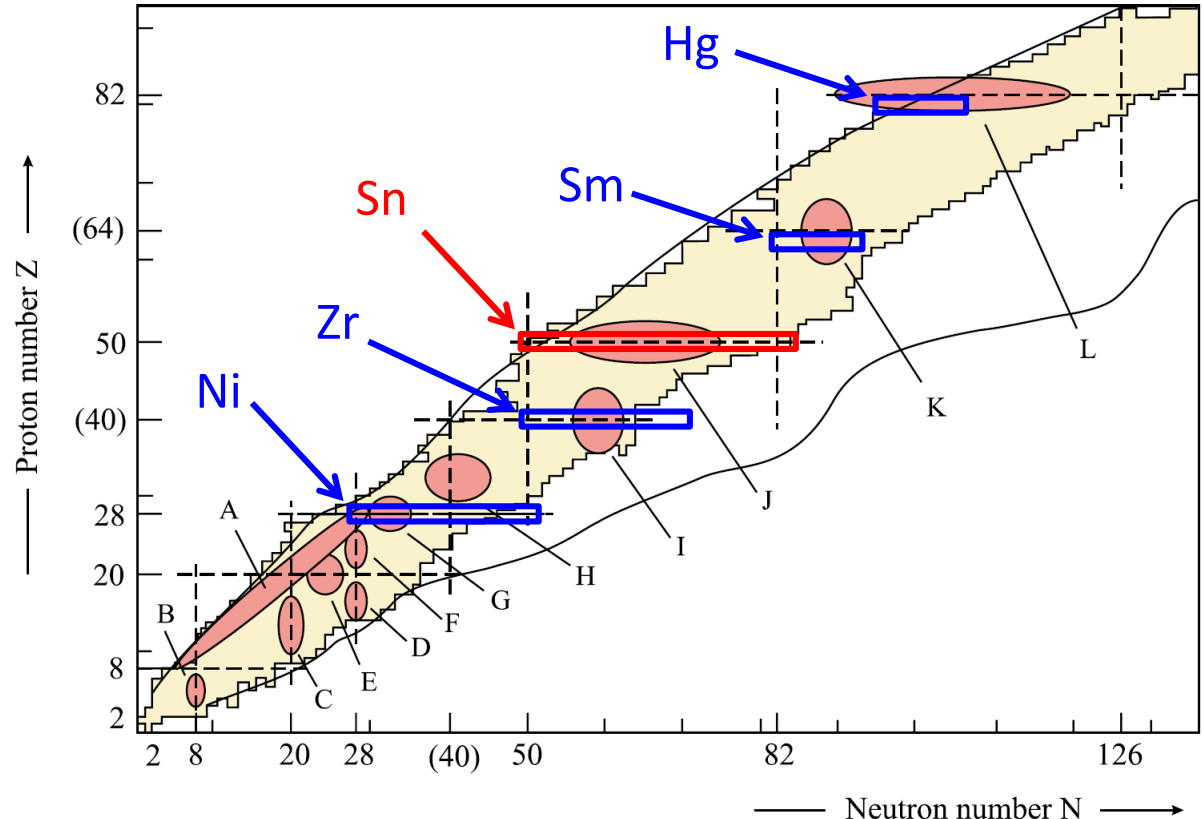


Sn (Z=50)

- Sn同位体 (Togashi *et al.*)
プレスリリース
「原子核形状の
2次相転移をスパコン
シミュレーションで発見」
2018/08/11

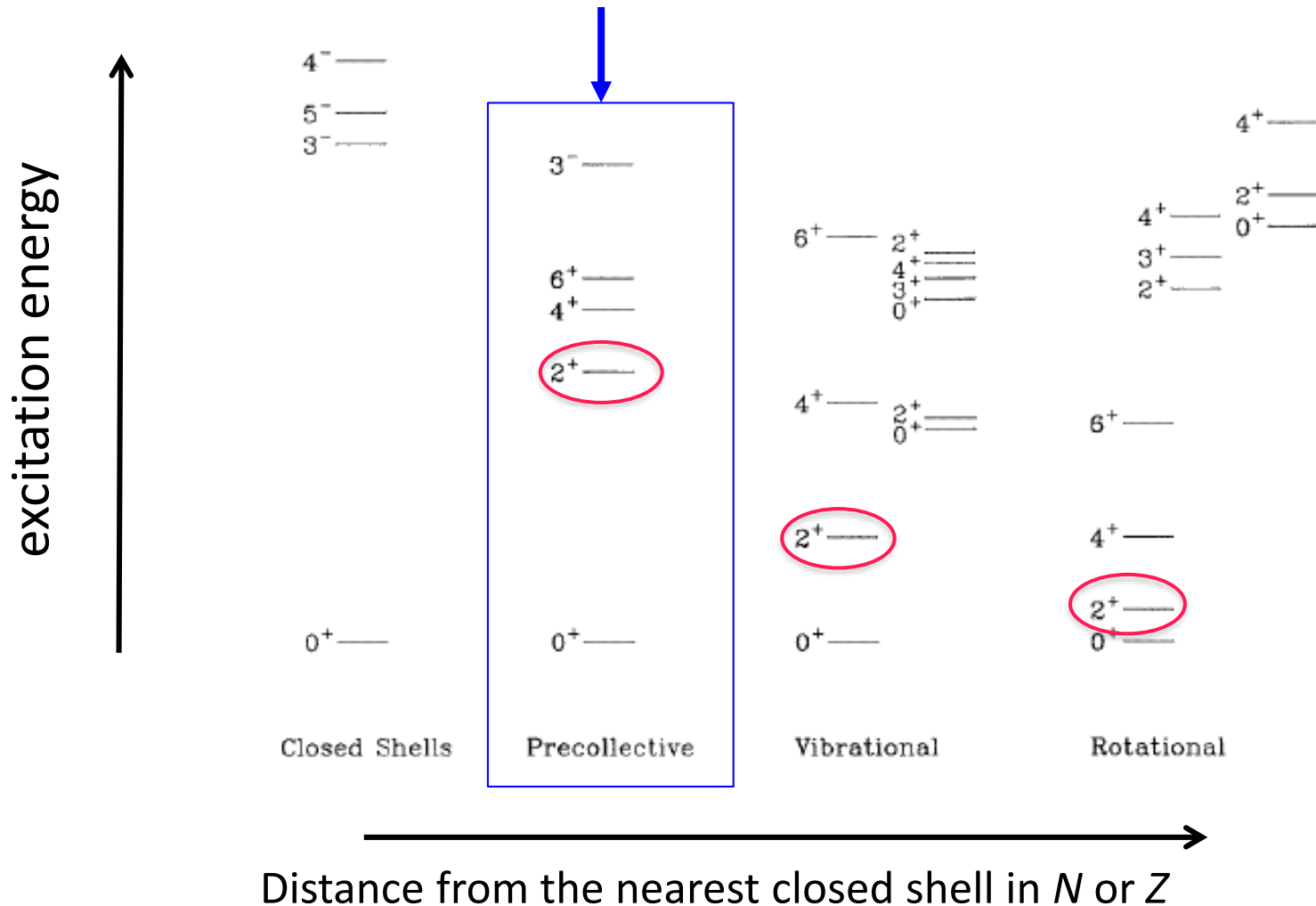


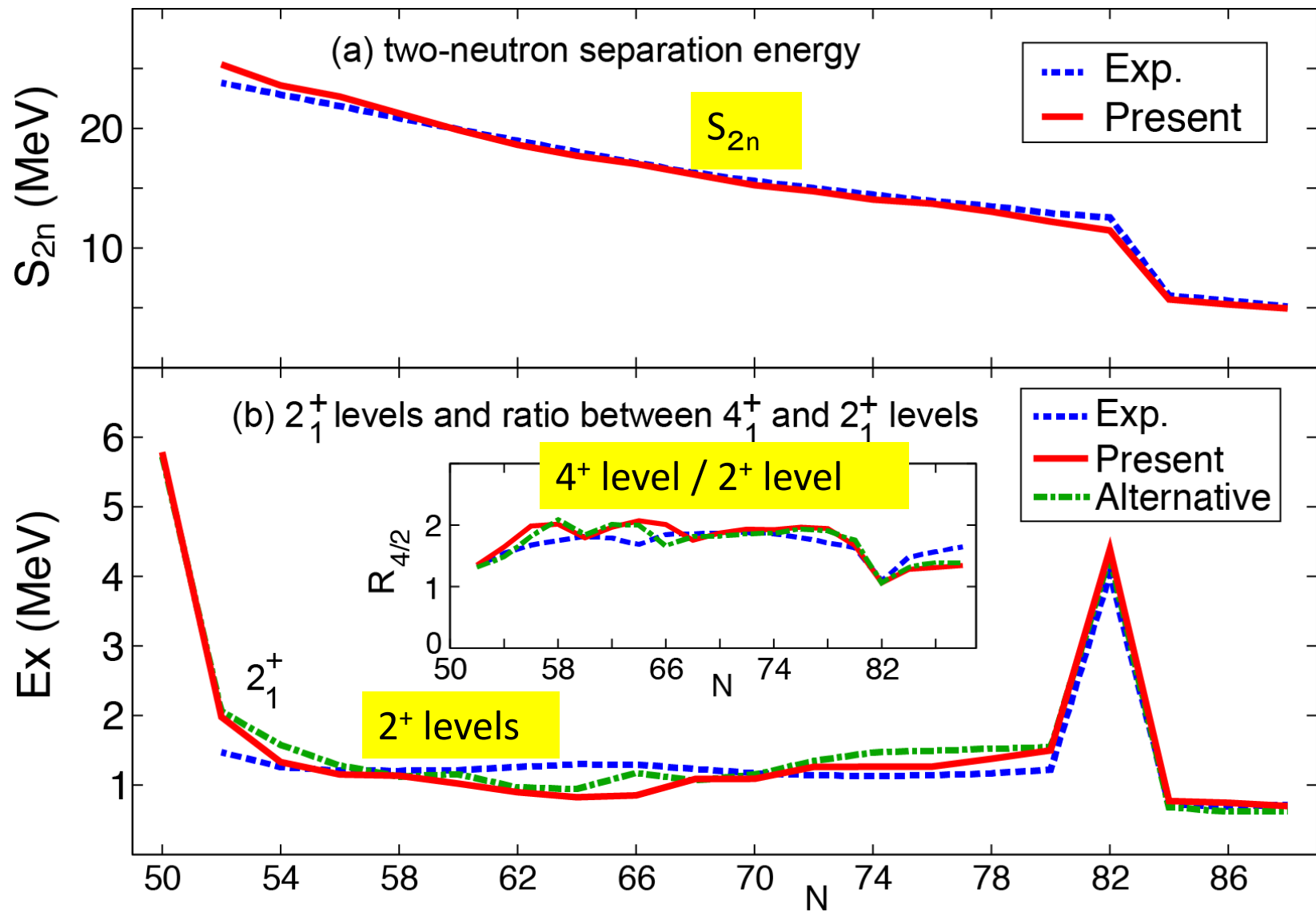
プレスリリースより引用



shape evolution (sphere to ellipsoid)

Sn isotopes are like this





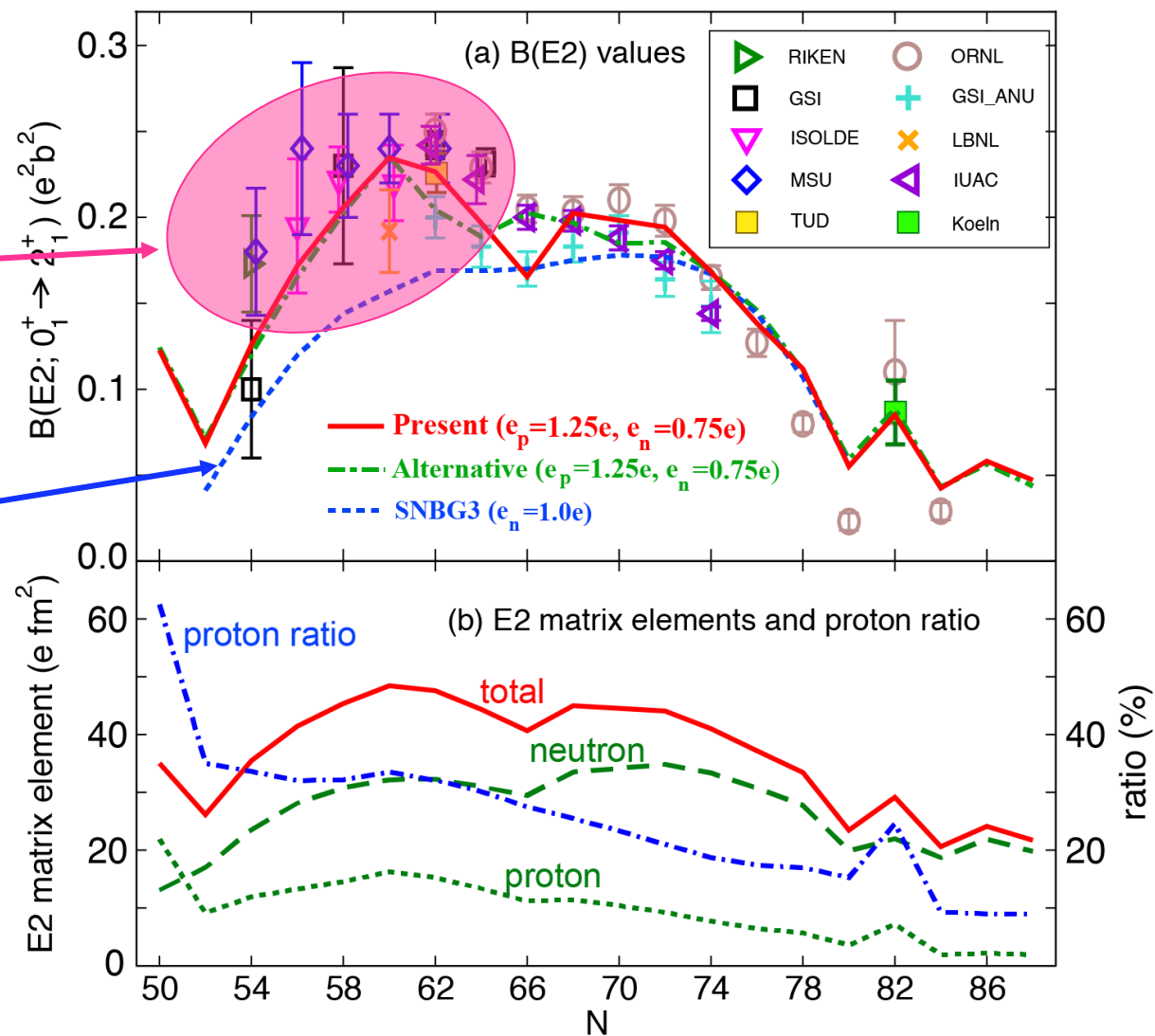
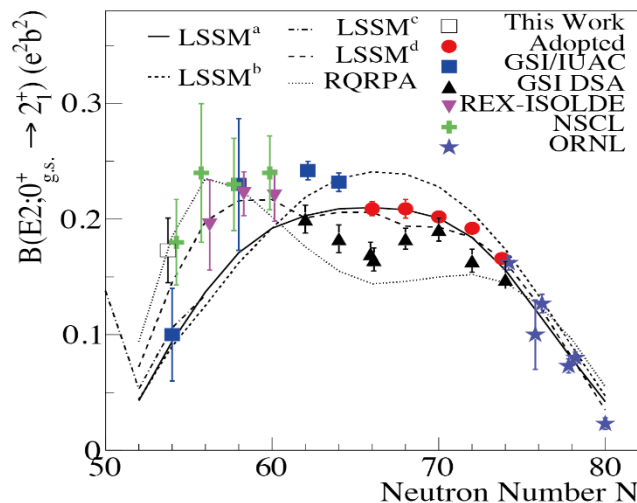
Almost constant 2^+ level $\rightarrow$ seniority (-like) structure ?

Sn isotopes

$$B(E2; 0^+ \rightarrow 2^+)$$

Big puzzle :
Can it be real ?
Need exotic ?

SNBG3 (Honma et al.):
a shell model calc.
in the $N=50-82$ shell
only with valence
neutrons ($e_n=1e$)
... perfect for $Ex(2^+)$



From Banu *et al.*, PRC72, 061305 (2005)

RQRPA: A. Ansari PLB 623, 37 (2005).

LSSM^a: ¹⁰⁰Sn core, $e_\nu = 1.0e$, A. Banu *et al.*, PRC 72, 061305(R) (2005).

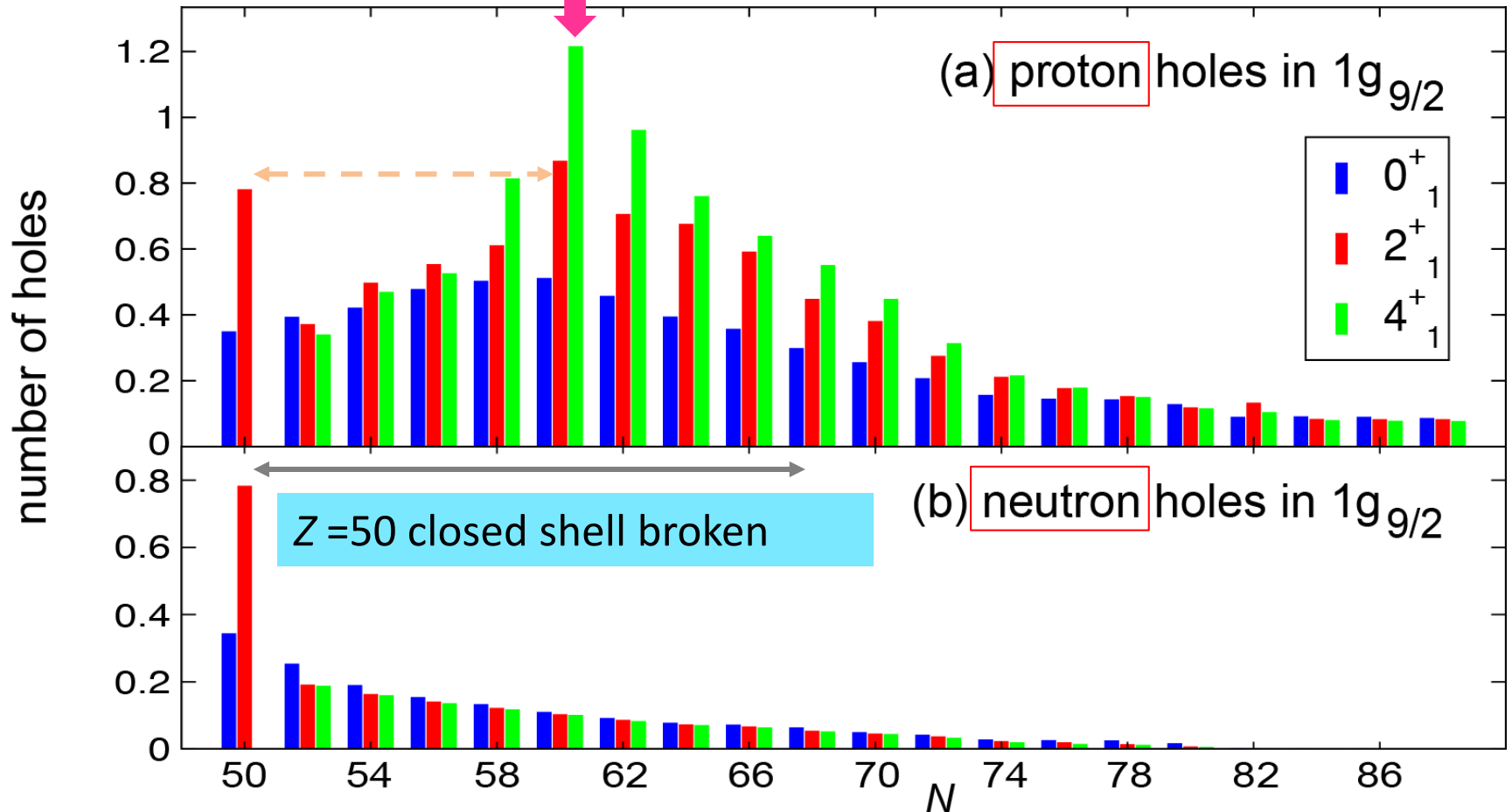
LSSM^b: ⁹⁰Zr core, $e_\nu = 0.5e, e_\pi = 1.5e$, A. Banu *et al.*, PRC 72, 061305(R) (2005).

LSSM^c: ⁸⁰Zr core, $e_\nu = 0.5e, e_\pi = 1.5e$, G. Guastalla *et al.*, PRL 110, 172501 (2013).

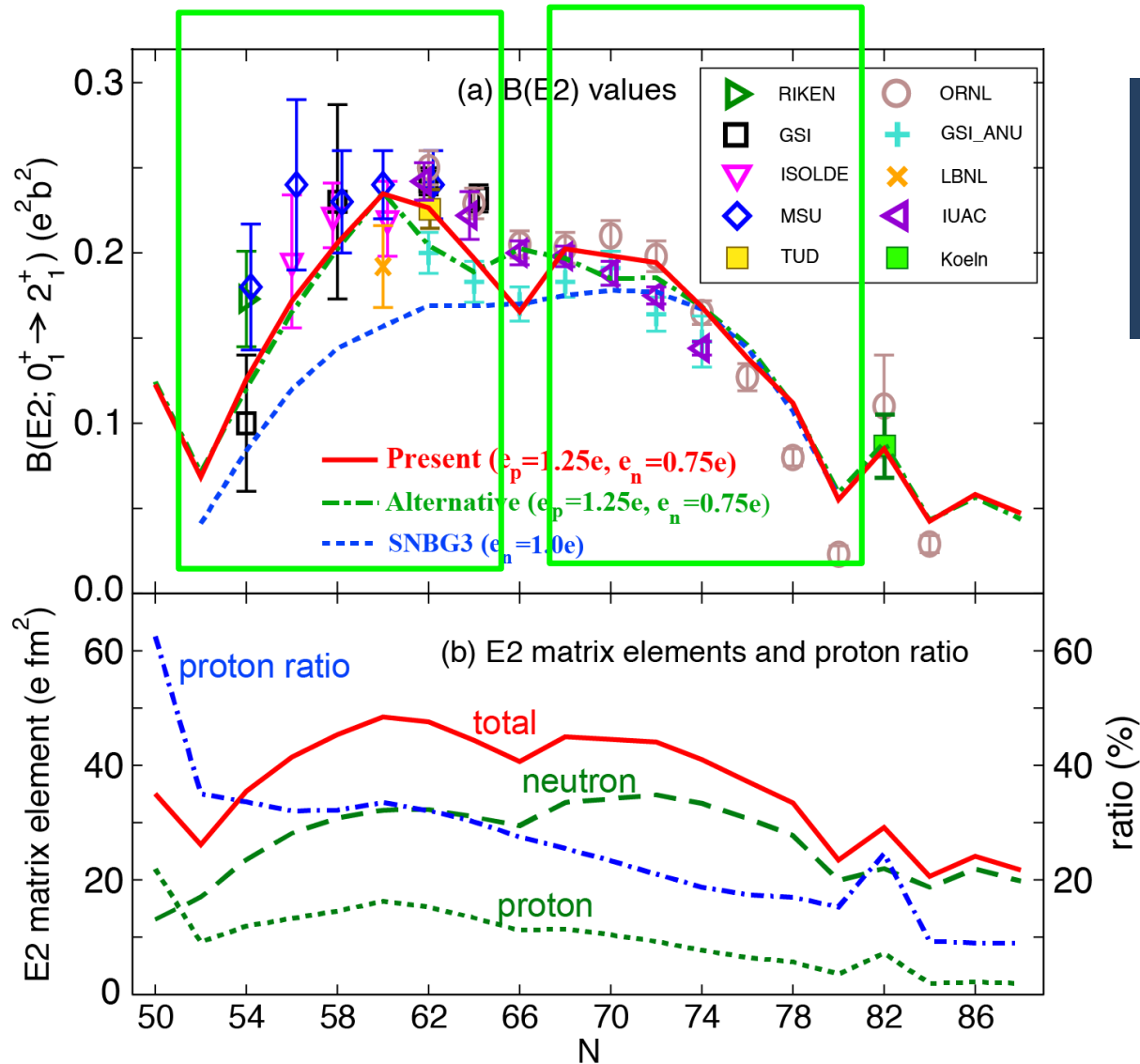
LSSM^d: ⁹⁰Sn core, isospin dependent e_ν , T. Bäck *et al.*, PRC 87, 031306(R) (2013).

Number of holes in $g_{9/2}$

Peak at $N = 60$
for $0^+, 2^+, 4^+$

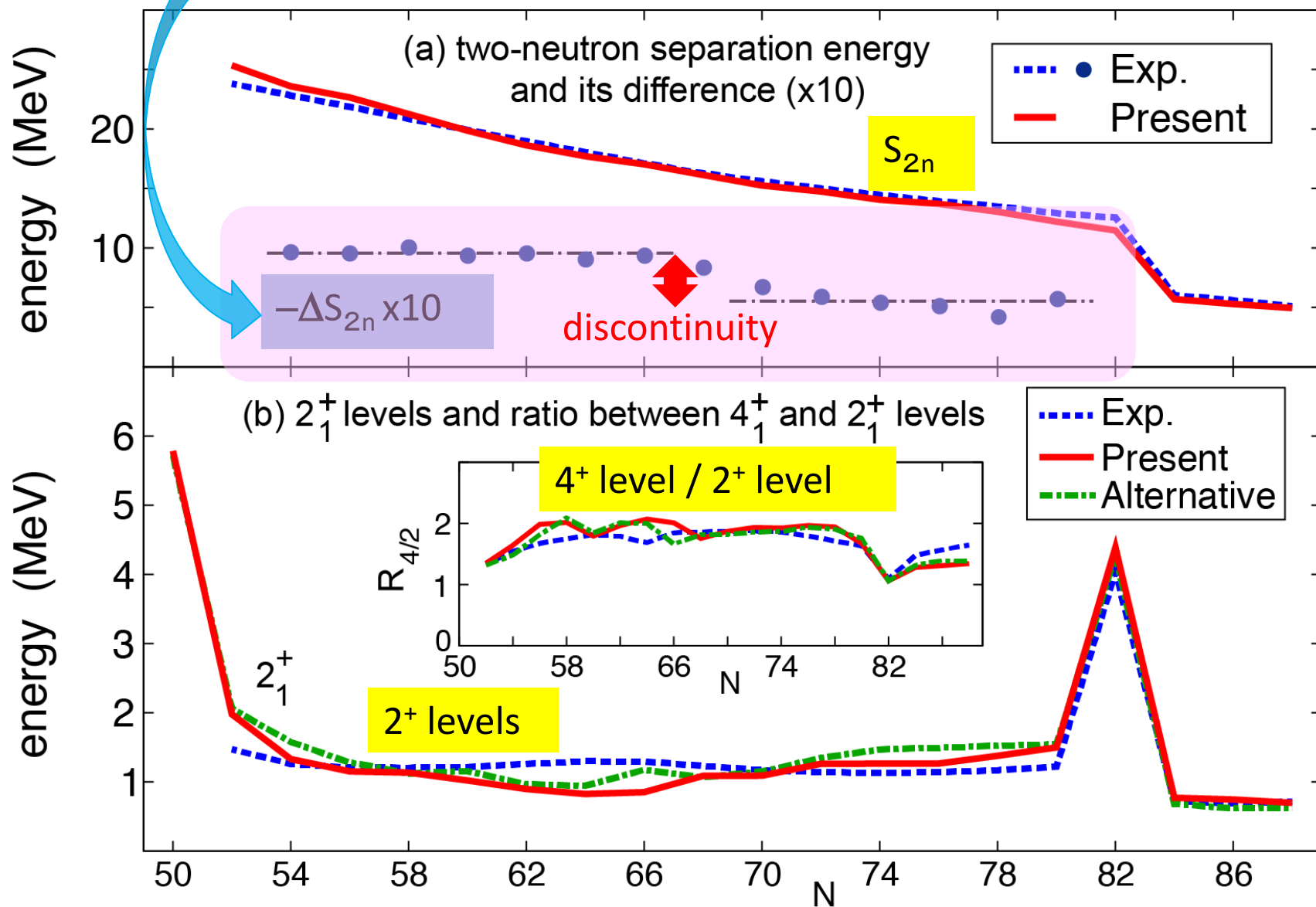


What happens around $N = 66$?



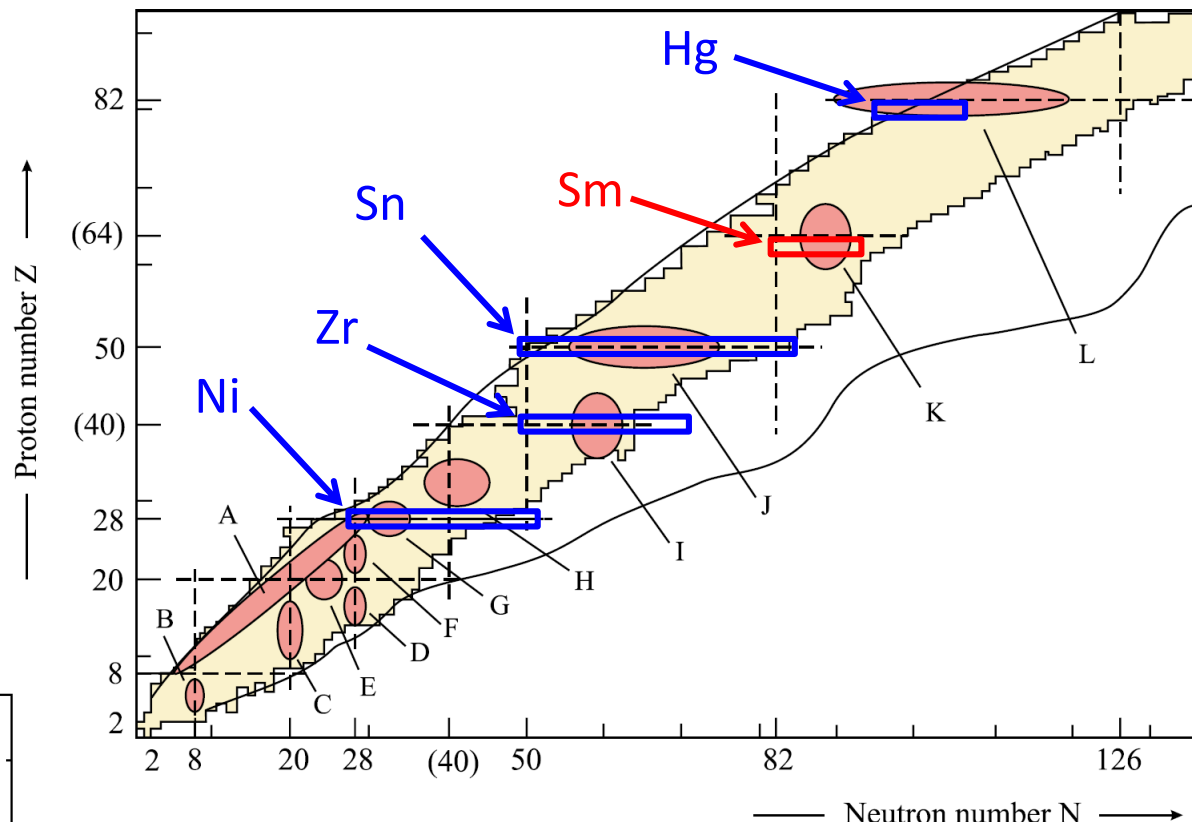
There seem to be
two structures:
one for $N < 66$
the other for $N > 66$.

2nd derivative of the ground-state energy

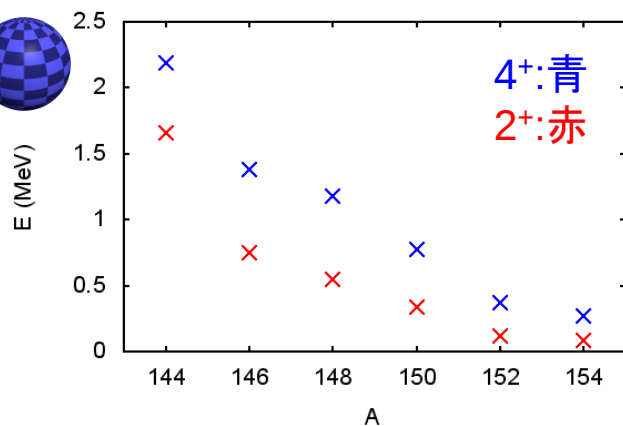


Sm (Z=62)

- Sm同位体 (YT *et al.*)
中性子数N=82(魔法数)
から中性子が増えると
球形から変形度が
大きくなる



Sm 励起エネルギー(実験値)

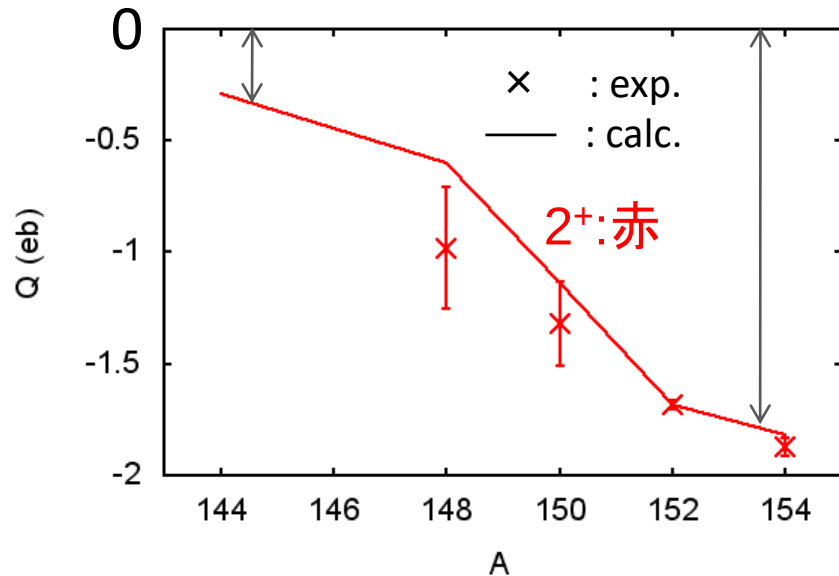


Sm同位体(Z=62) (preliminary)

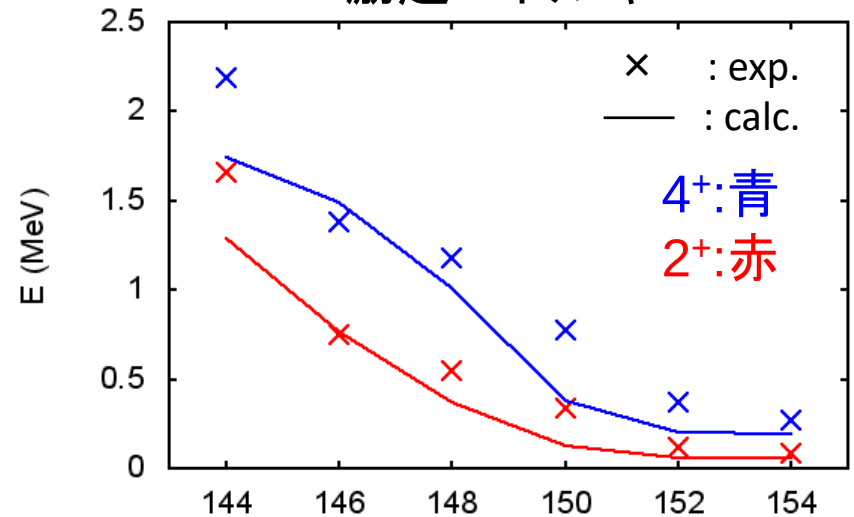
- ^{144}Sm (N=82で魔法数)で球形
- 中性子数が増えると大きく変形
- Zr同位体と比べて、
球形から変形へ連続的に変化



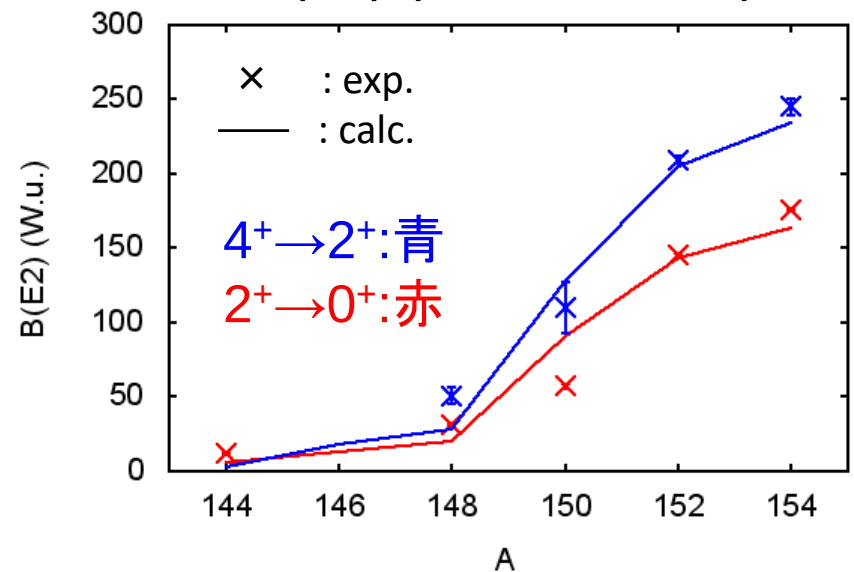
四重極モーメント



励起エネルギー

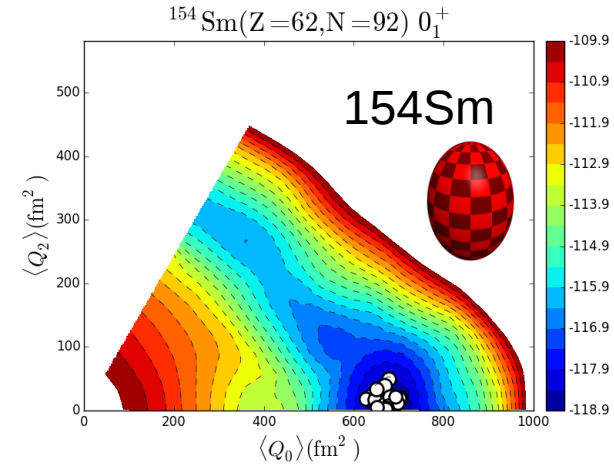
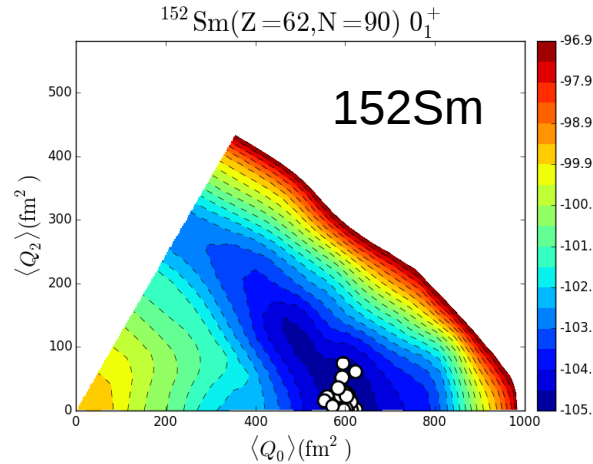
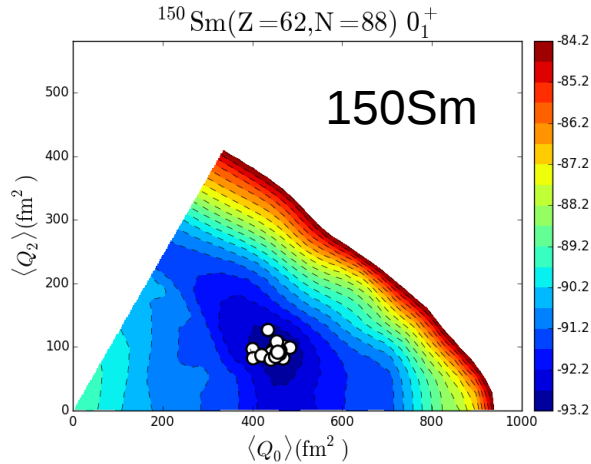
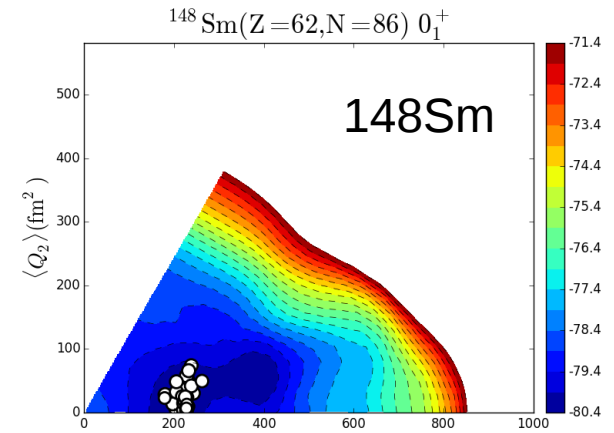
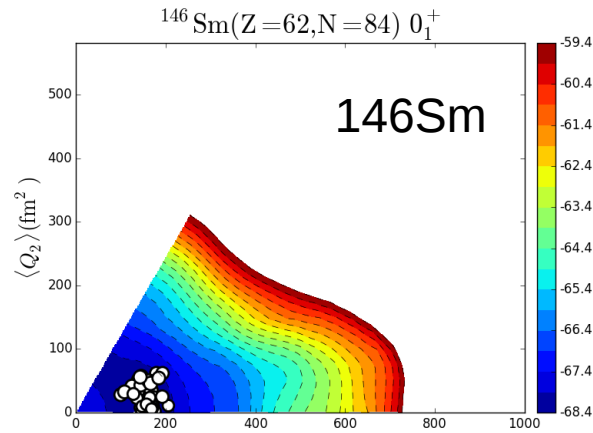
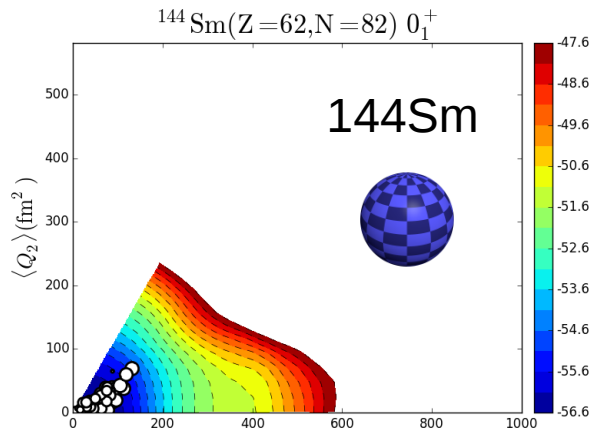
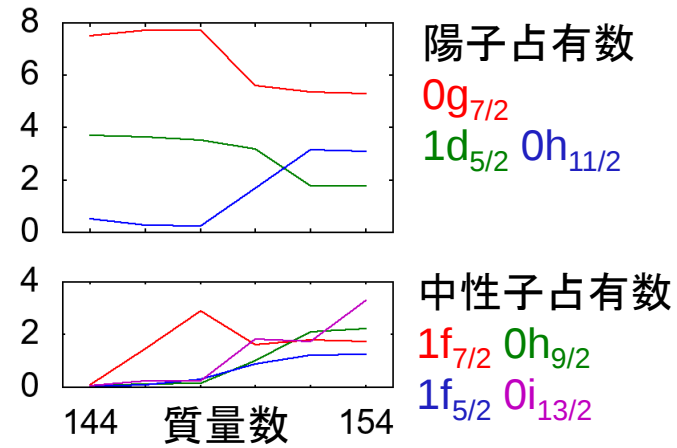


B(E2) (換算遷移確率)

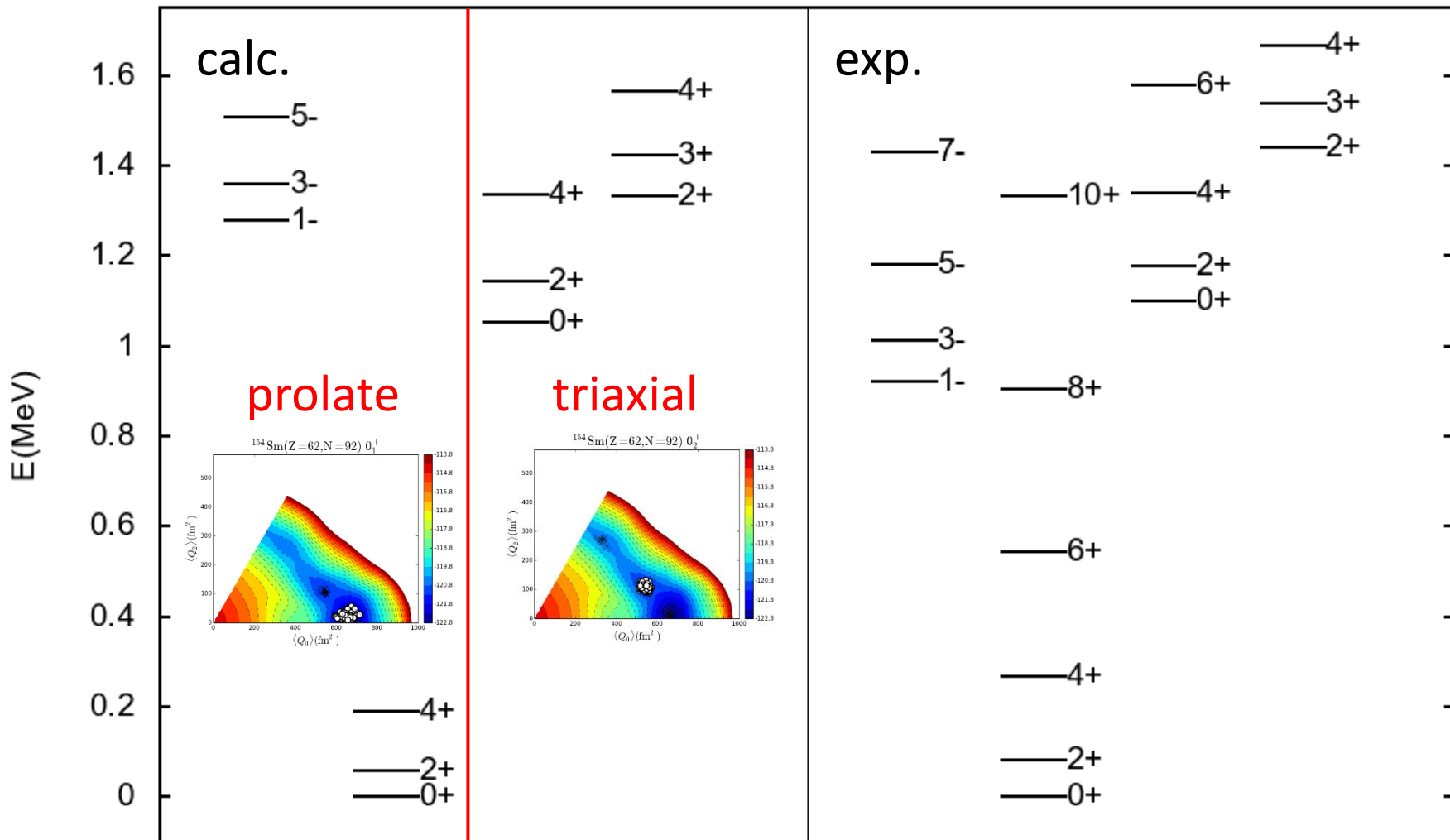


Sm同位体(Z=62)のT-plot

- ^{144}Sm から ^{154}Sm にかけて変形度が増加
- ^{150}Sm から配位(軌道への核子の入り方)が変わる

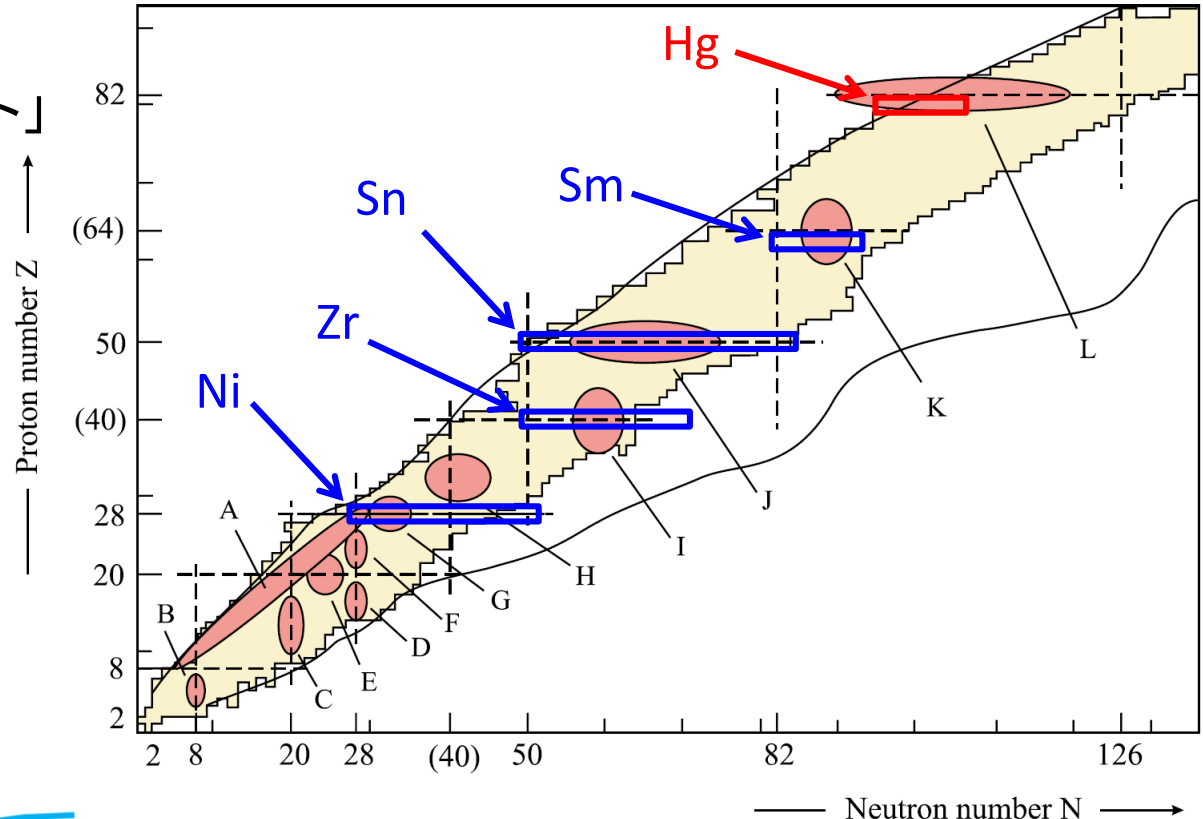


Level scheme of ^{154}Sm

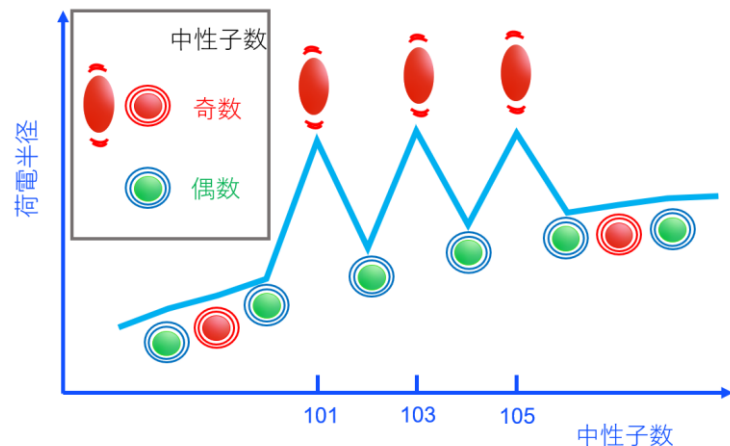


Hg (Z=80)

- Hg同位体 (YT *et al.*)
プレスリリース
「水銀原子核はハムレット」
2018/10/02
- 実験との共著論文が
Nature Physics誌に掲載
B. A. Marsh *et al.*,
Nature Physics **14**,
1163 (2018)

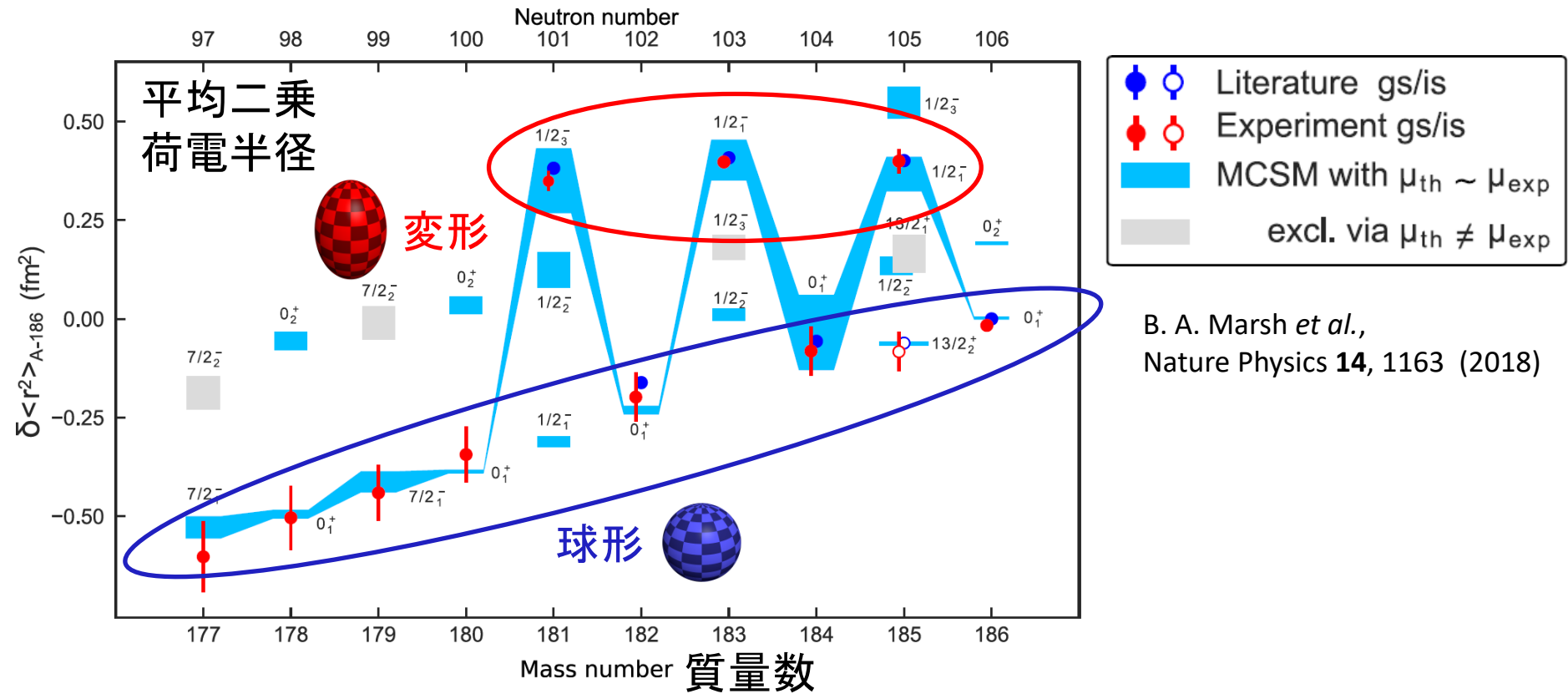


1次相転移が6回連続して
起きていると考えられる



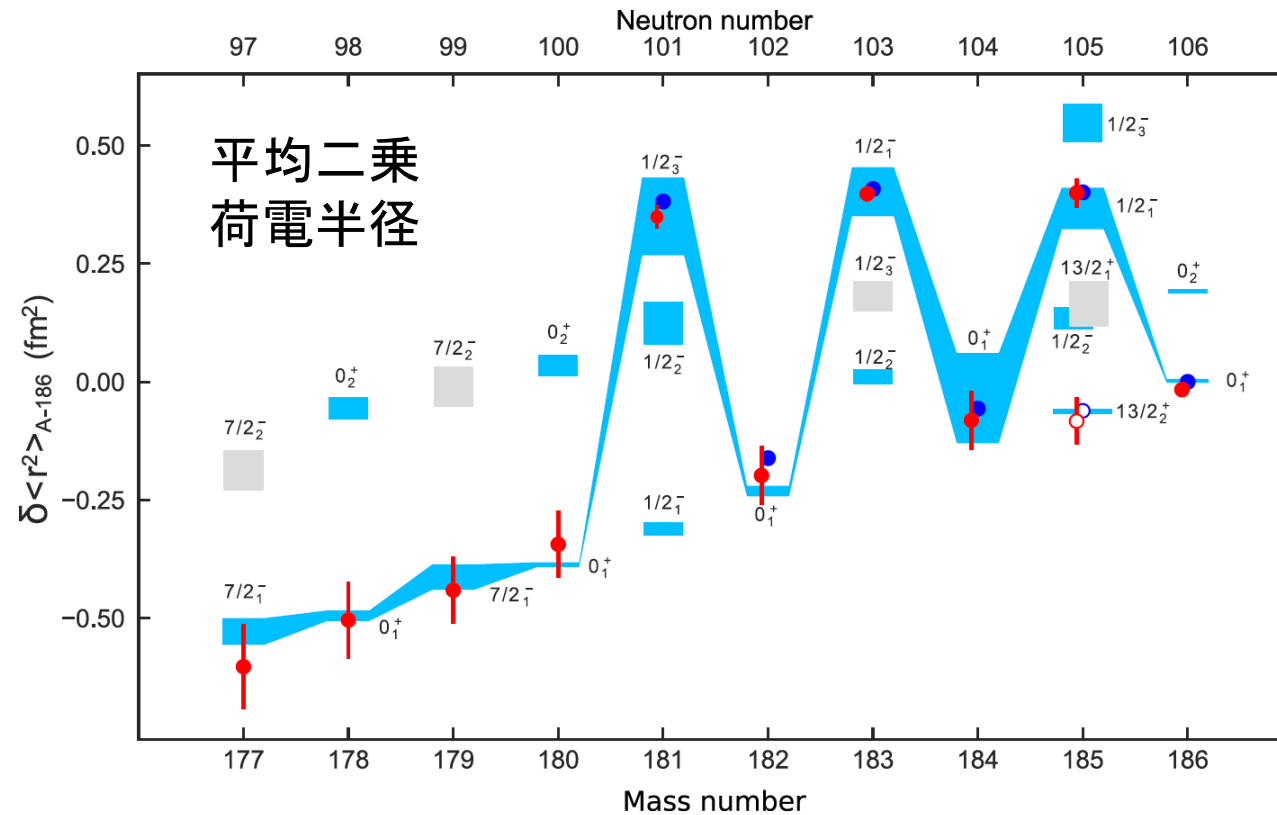
プレスリリースより引用

Hg同位体(Z=80)

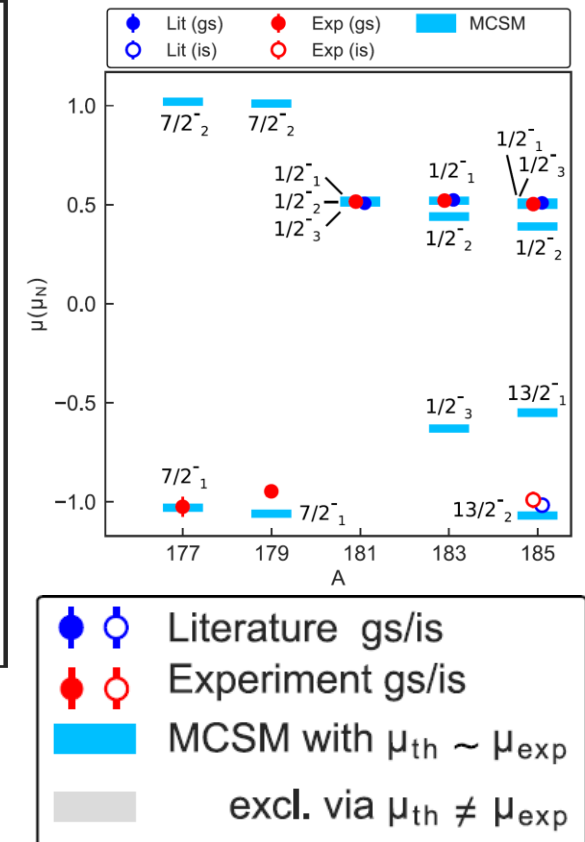


- 変形した原子核では荷電半径が大きくなる
- 荷電半径の実験値から^{181,183,185}Hgの基底状態は変形しており、その他の核種の基底状態は球形と考えられている
- 中性子数の偶奇によって異なる形の基底状態が現れる
- 異なる形の状態が共存しており、核種によってエネルギーの順番が入れ替わると考えられる

Hg同位体(Z=80)



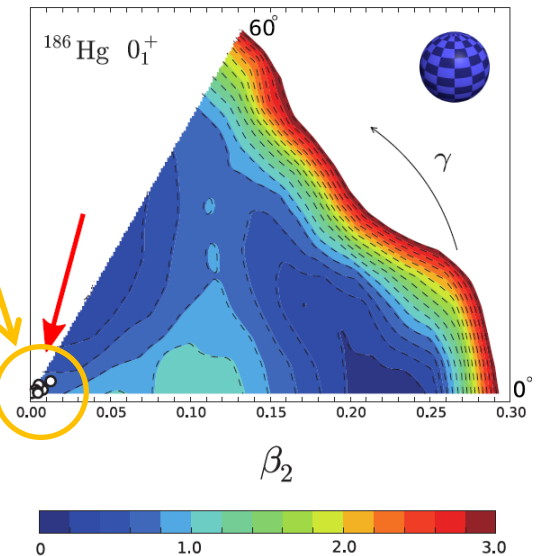
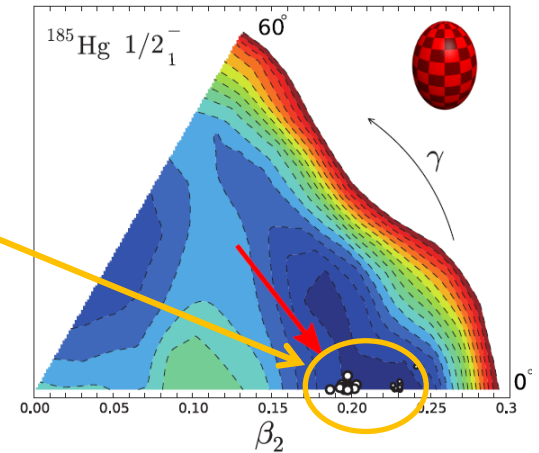
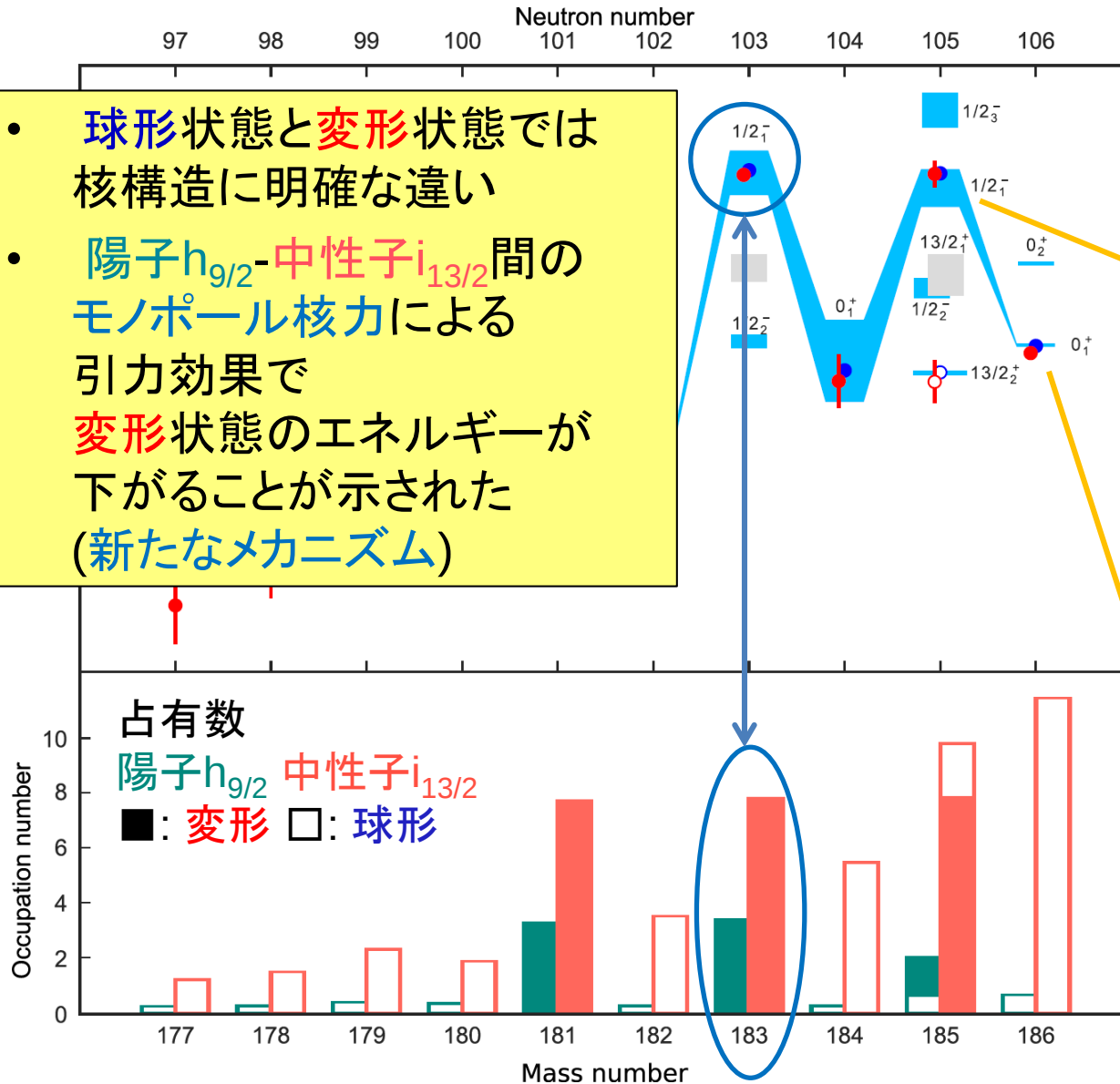
磁気モーメント



- m-scheme次元が 2×10^{42} にも達する、ポスト京クラスの計算に挑戦
- T-plotの変形度から求めた荷電半径が最新の実験(CERN ISOLDE)と一致
- 磁気モーメントも実験と一致

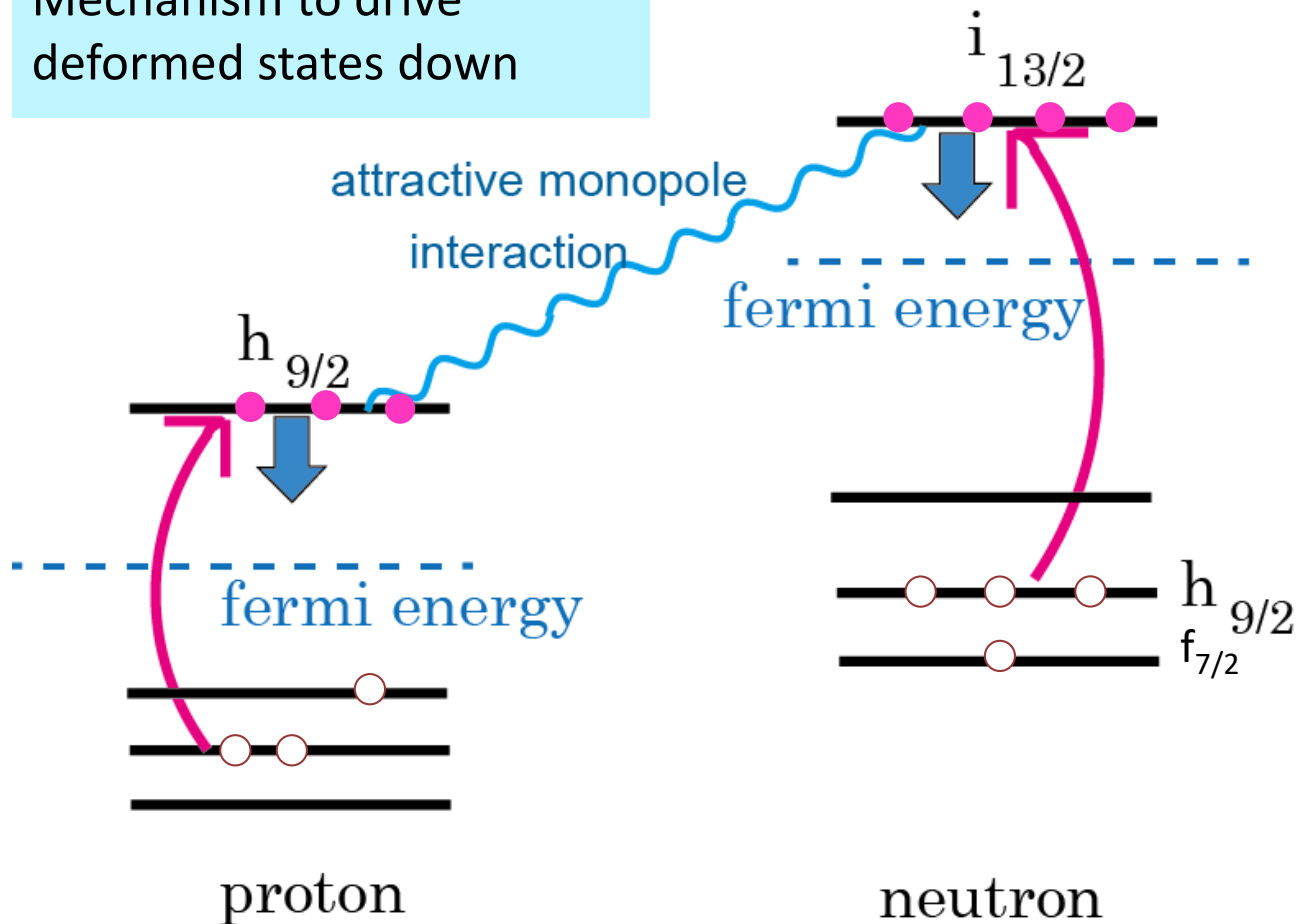
Hg同位体(Z=80)

- 球形状態と変形状態では核構造に明確な違い
- 陽子 $h_{9/2}$ -中性子 $i_{13/2}$ 間のモノポール核力による引力効果で変形状態のエネルギーが下がることが示された(新たなメカニズム)



$h_{9/2} - i_{13/2}$
 strong **quadrupole** correlations (up to 8 neutrons in $i_{13/2}$)
 +
 strong **monopole** correlations (linearly dep. on # of particles)

Mechanism to drive
deformed states down



Summary

- モンテカルロ殻模型(MCSM)により
中重核から重い核までを計算
- MCSMの特性を用いたT-plotによる原子核形状の解析
- Sn同位体($Z=50$)の原子核形状の二次相転移
- Sm同位体($Z=62$)の球形から変形への連続的な変化
- Hg同位体($Z=80$)の球形状態、 $^{181,183,185}\text{Hg}$ の変形状態
- 幅広い質量領域の核種をMCSMで計算し、
原子核形状を中心とする性質を議論
- Hgなど重い原子核の計算→rプロセス核の計算も可能に