

モンテカルロ殻模型計算による 中重核の構造の研究

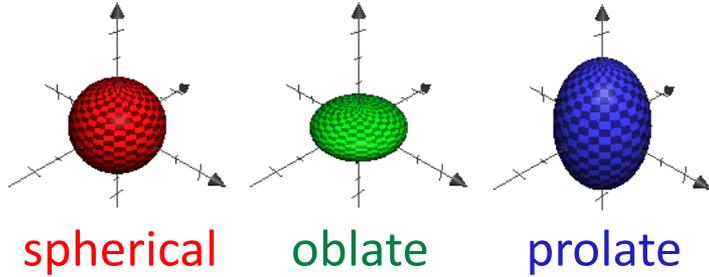
東京大学原子核科学研究センター(CNS)

角田佑介

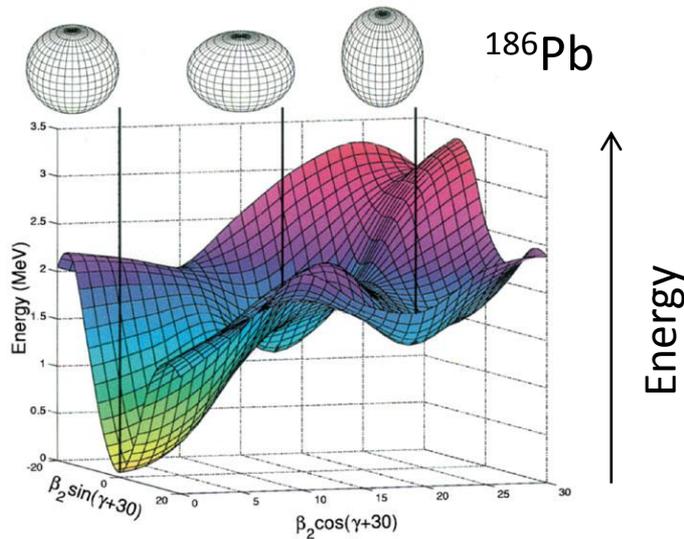
共同研究者: 大塚孝治(理研仁科セ)
清水則孝(東大CNS)
本間道雄(会津大数理セ)
宇都野穰(原子力機構)

Motivation

原子核の形状:

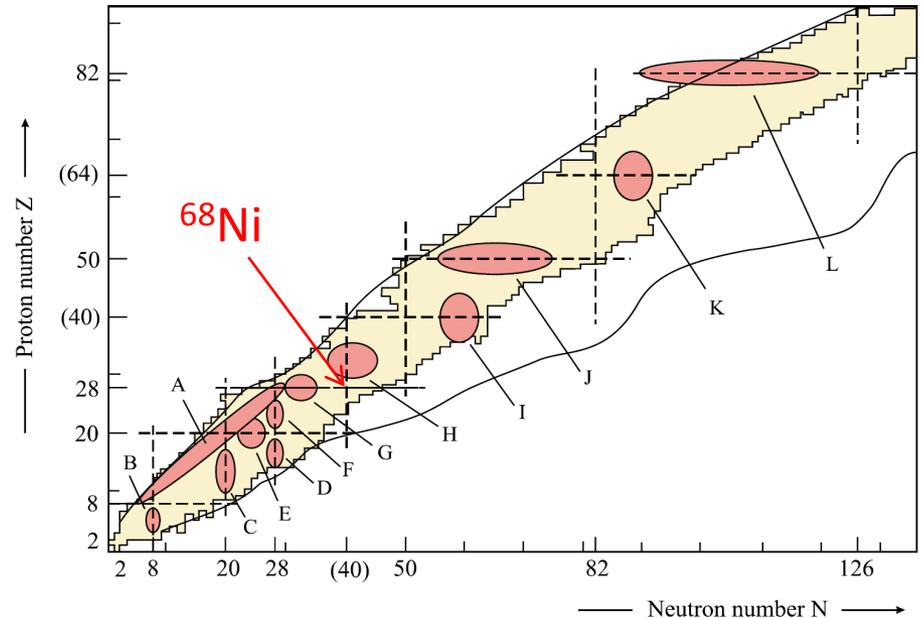


一部の核種は異なる形状で
近いエネルギーの固有状態を持つ
(変形共存)



Andreyev *et al.*, Nature **405**, 430 (2000)

変形共存の領域

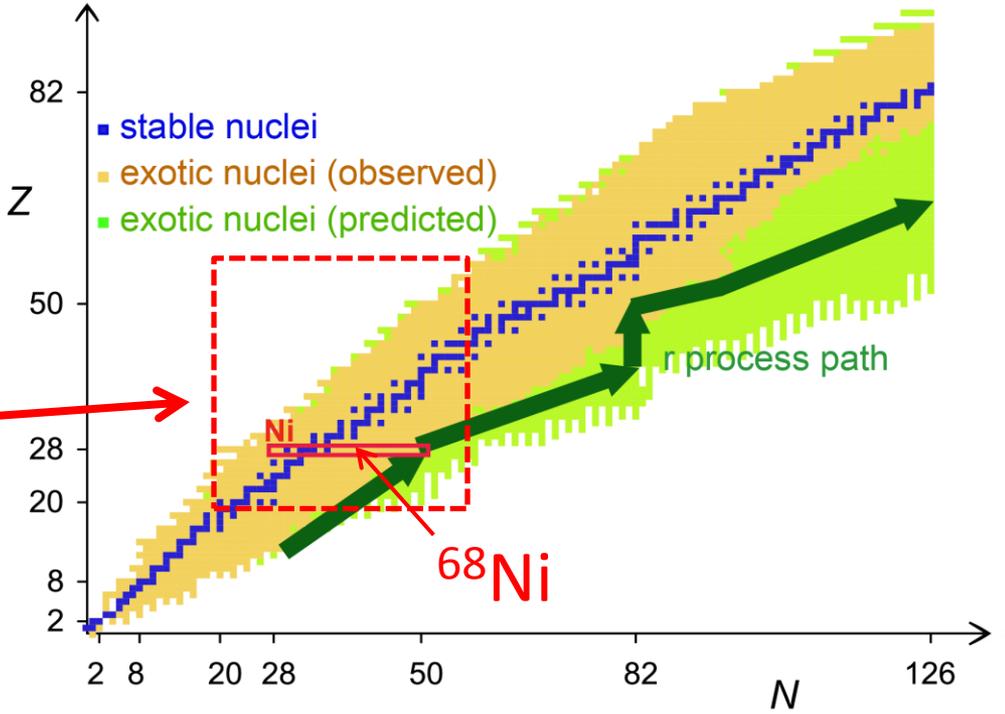
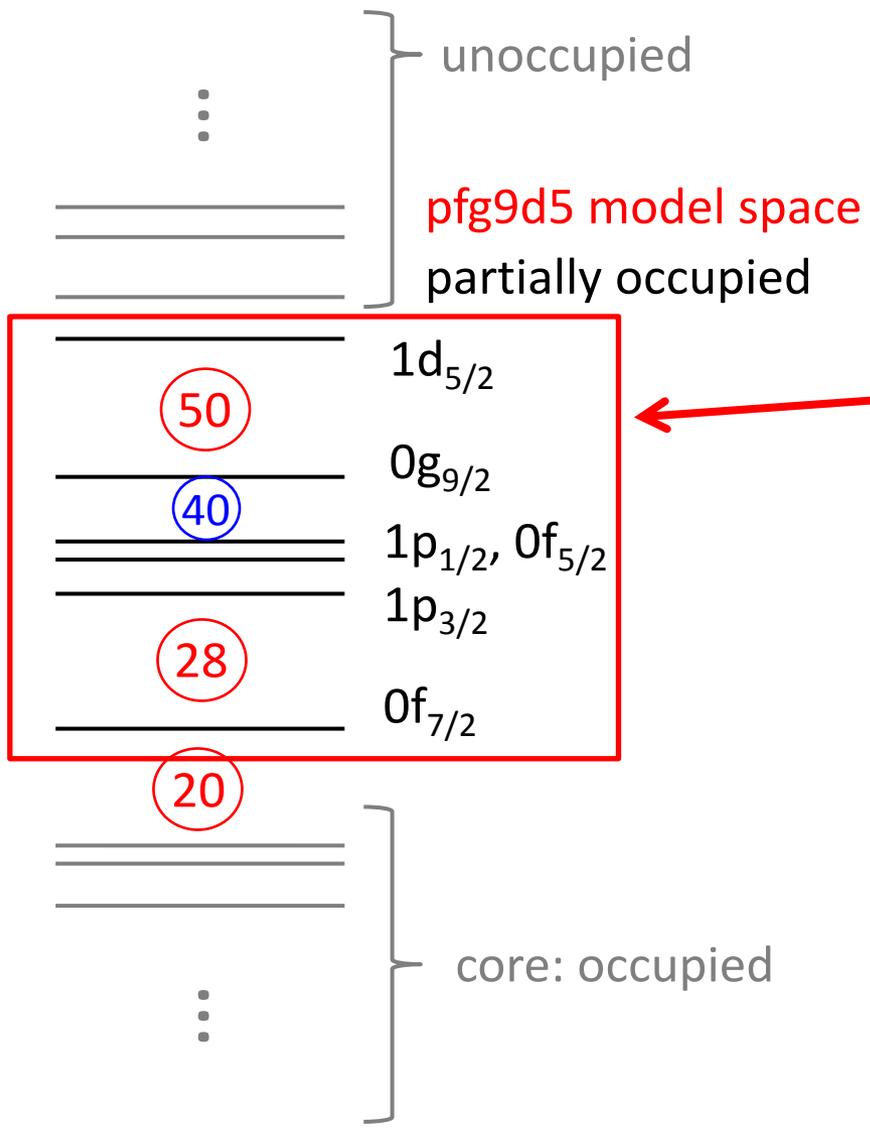


Heyde *et al.*, Rev. Mod. Phys. **83**, 1467 (2011)

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

Ni同位体(Z=28)の原子核形状を
中心に議論

殻模型計算

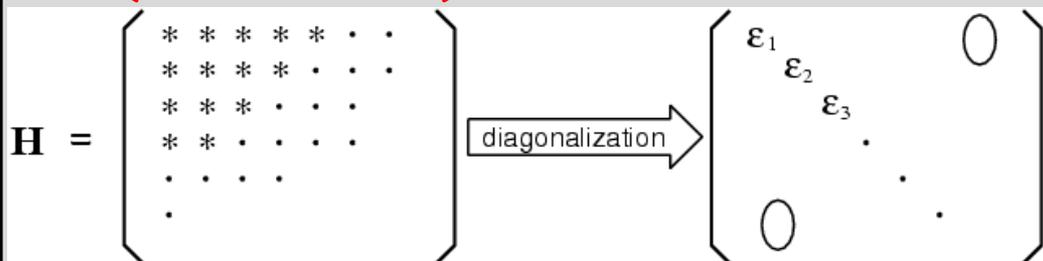


広い模型空間
 ⇒ 魔法数28、50、準魔法数40
 の性質を議論
 モンテカルロ殻模型(MCSM)計算

微視的・経験的有効相互作用を
 組み合わせたものを用いる

モンテカルロ殻模型 (MCSM)

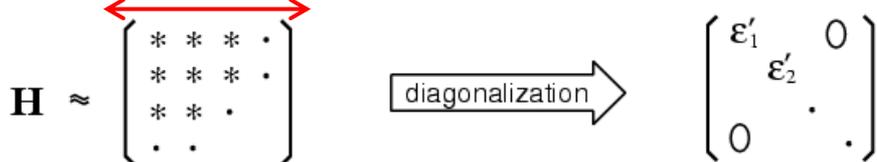
10¹⁵次元以上 (pfg9d5空間)



Conventional Shell Model
all Slater determinants

広い模型空間では
直接対角化は不可能

約100次元



Monte Carlo Shell Model
bases important for a specific eigenstate

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

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

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

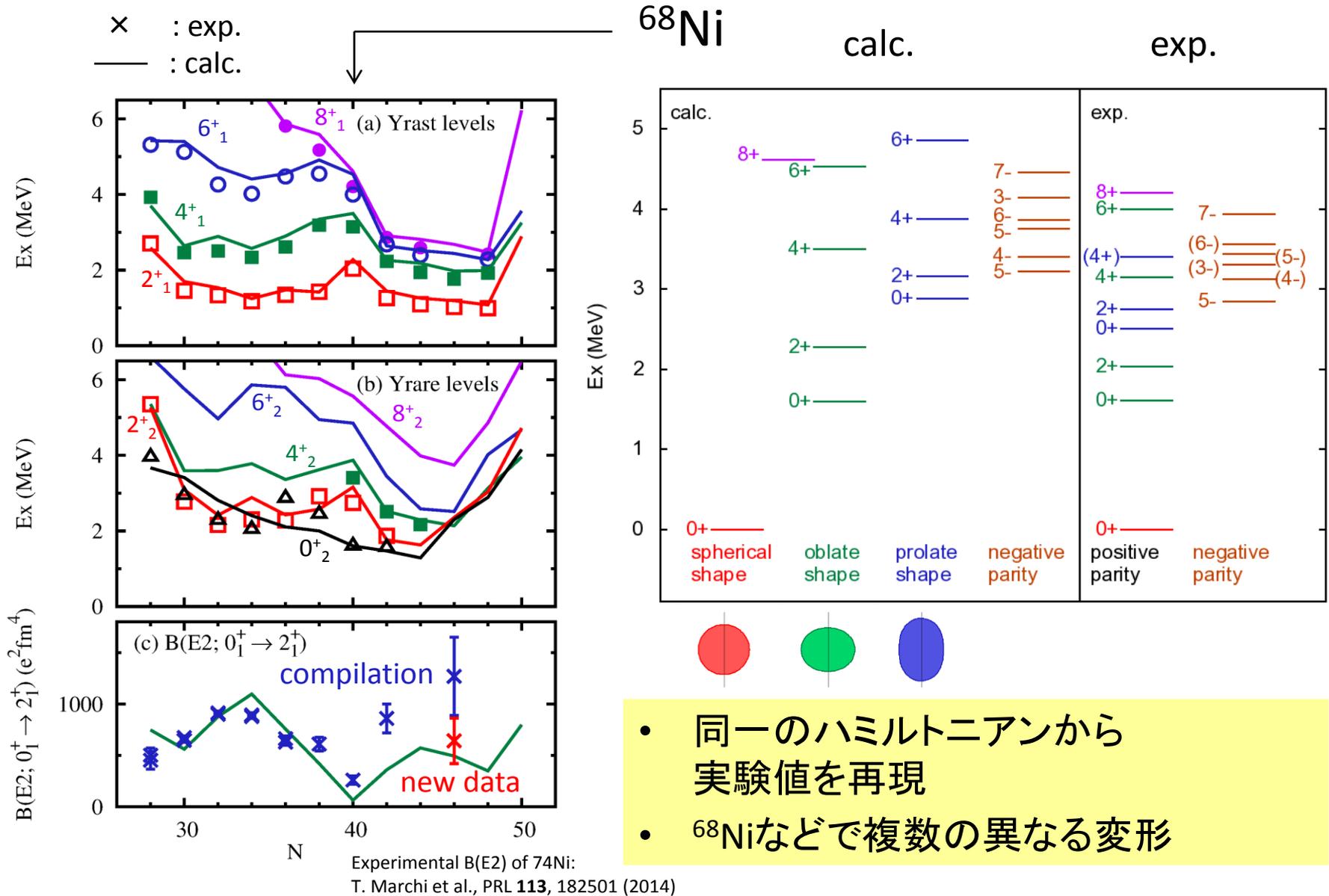
$$|\Psi_N\rangle = \sum_{n=1}^N \sum_{K=-J}^J f_{n,K}^{(N)} P_{MK}^{J\pi} |\psi_n\rangle$$

Slater行列式

MCSM基底から**原子核形状**の
情報を抽出(T-plot)

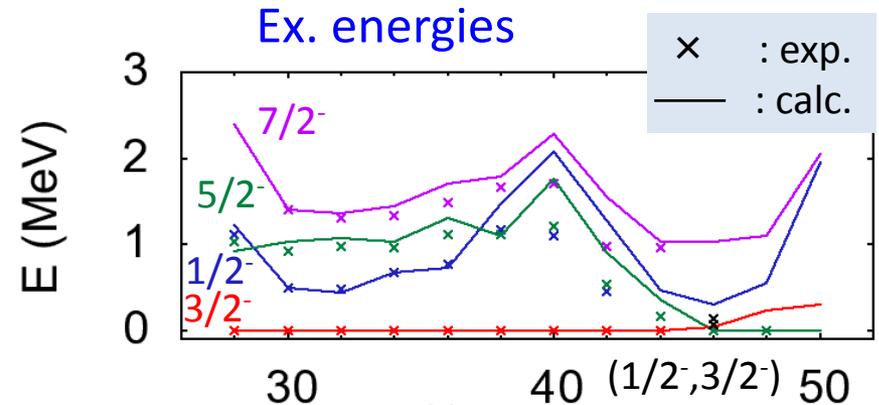
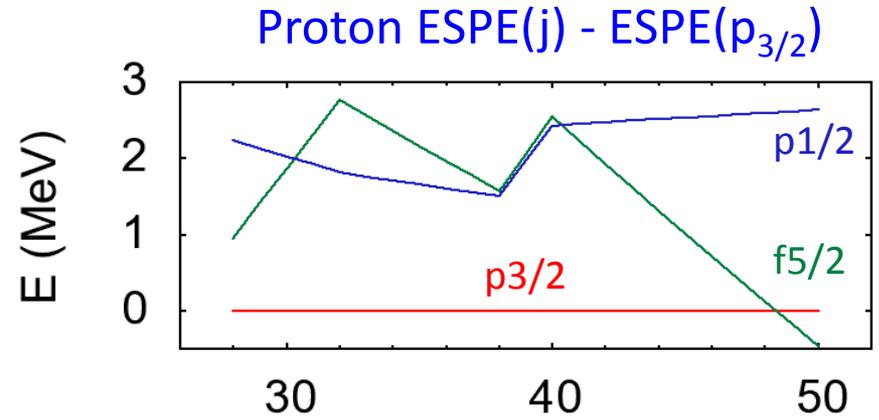
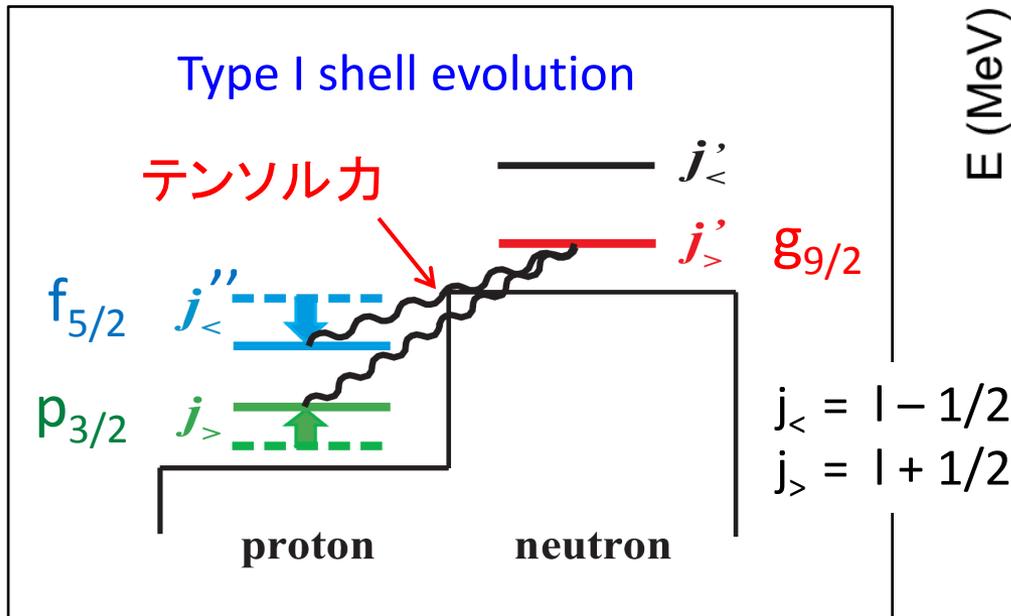
角運動量・
パリティ射影

Ni同位体(Z=28)の励起エネルギーとB(E2)

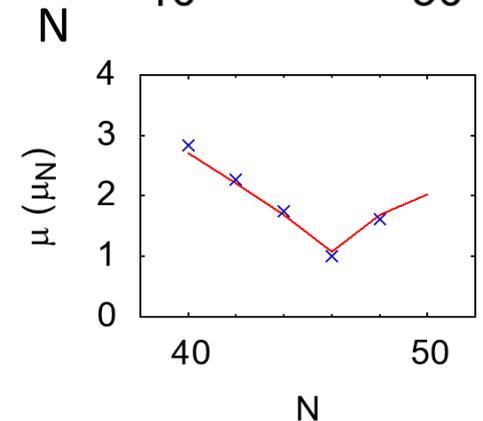


Cu isotopes (Z=29)

- Ni(Z=28)から増えた陽子の軌道の有効一粒子エネルギー(ESPE)により各状態のエネルギーが見積もれる
- 陽子の $p_{3/2}, f_{5/2}$ 軌道が N = 40からN = 50で入れ替わる (type I shell evolution)
- 計算した状態は 純粋な一粒子状態ではなく 実験と一致する

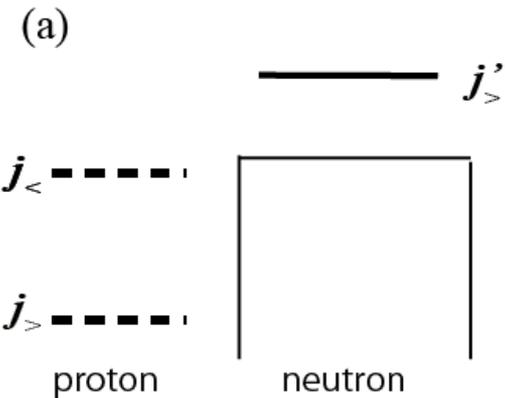


magnetic moments of g.s.



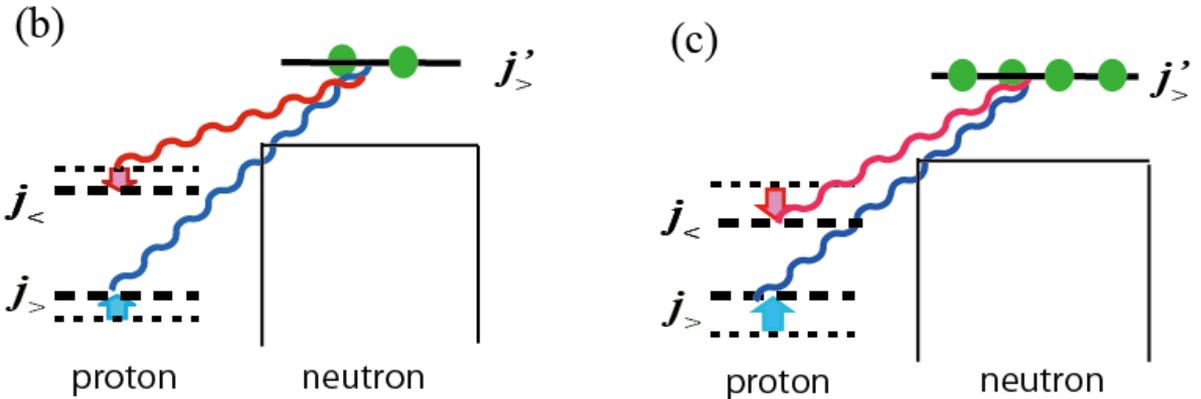
Type I and Type II Shell Evolutions

Type I Shell Evolution (第一種殻進化) : 異なる同位体

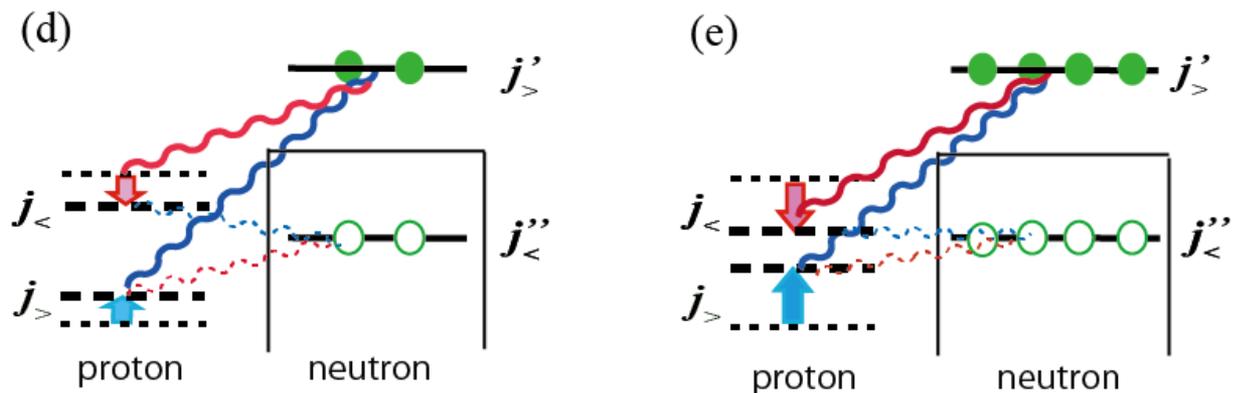


$$j_{<} = l - 1/2$$

$$j_{>} = l + 1/2$$

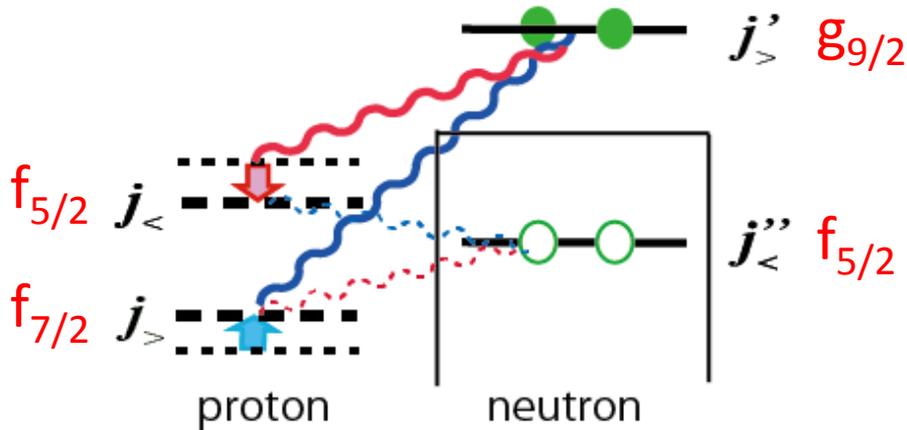


Type II Shell Evolution (第二種殻進化) : 同一の核種

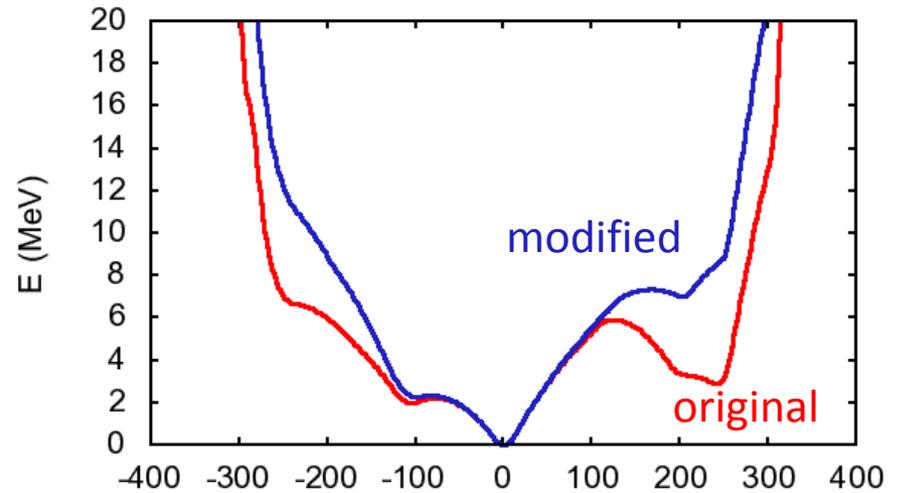


第二種殻進化と変形共存

^{68}Ni ($Z=28, N=40$)



PES of ^{68}Ni for axial deformation



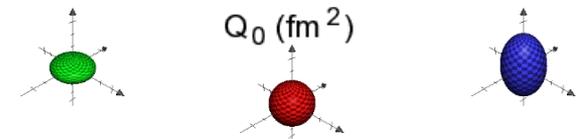
計算に用いた元の相互作用では
prolate状態で第二種殻進化が起こる

多数の核子が励起

殻ギャップが減少

変形エネルギーを得やすい

殻ギャップが大きく球形の相と
殻ギャップが小さく変形した相の
異なる相が存在



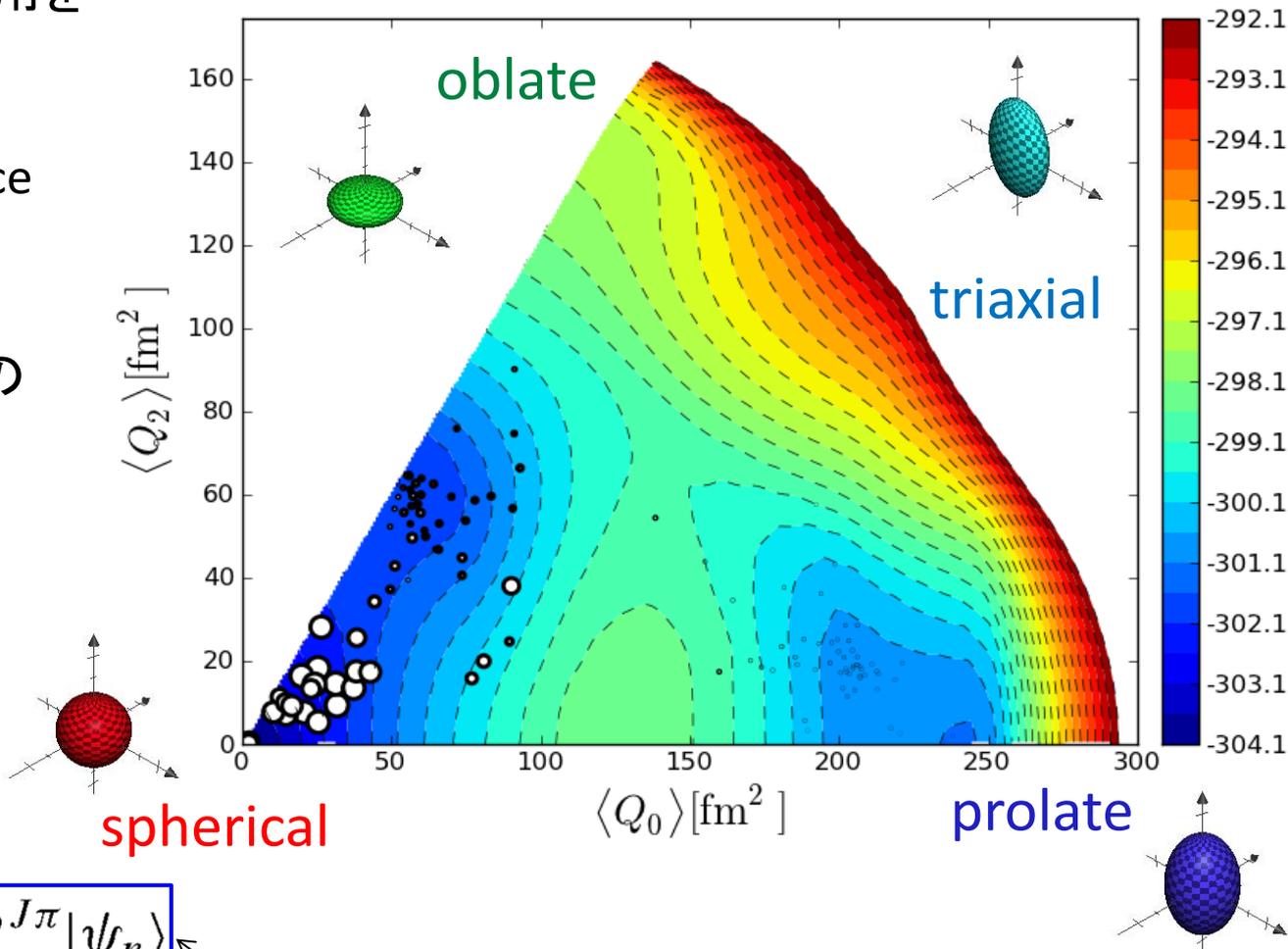
第二種殻進化が起こらないように
変更した相互作用では
prolate状態で高いエネルギーとなり
PESの谷がほぼなくなる

変形共存が第二種殻進化により安定する

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



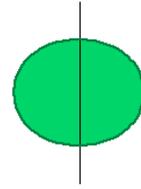
角運動量・パリティ射影

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

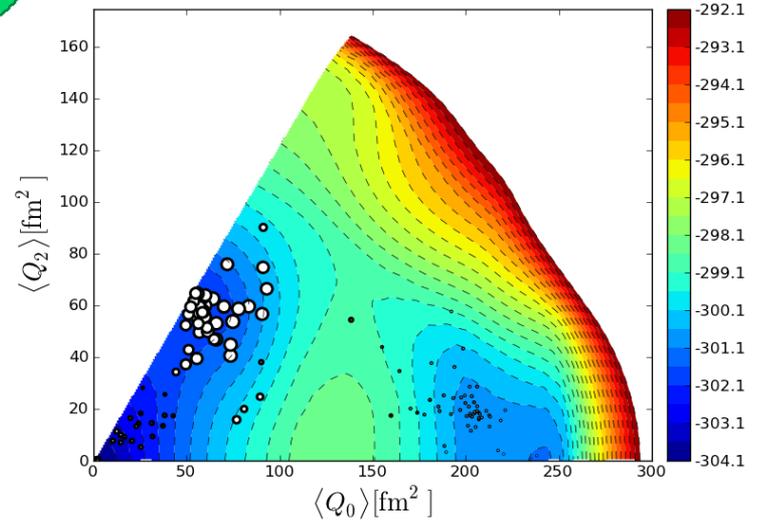
MCSM波動関数 MCSM基底 Slater行列式

^{68}Ni 0^+ 状態 \Leftrightarrow 異なる形状

- 白丸の異なる場所への分布は異なる変形状態に対応
- 0^+ 状態の形状をより直接的に調べることができる

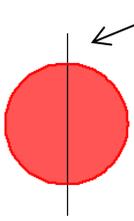


0^+_2 : oblate $\beta \sim -0.2$

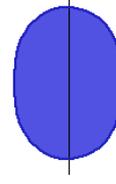
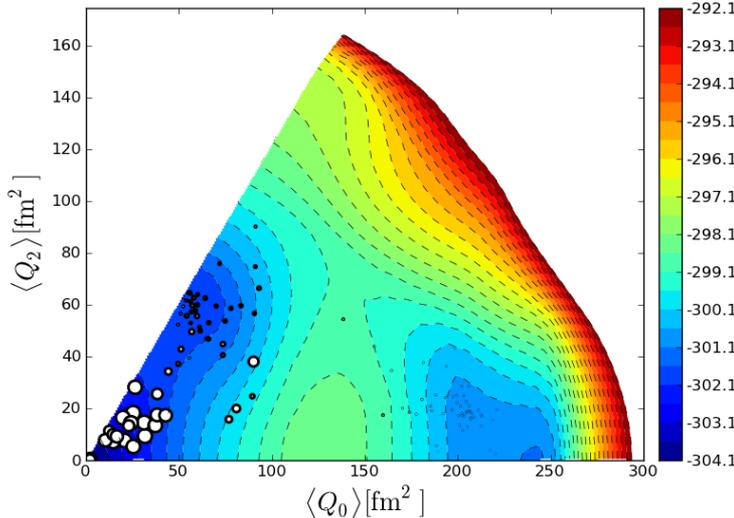


変形共存

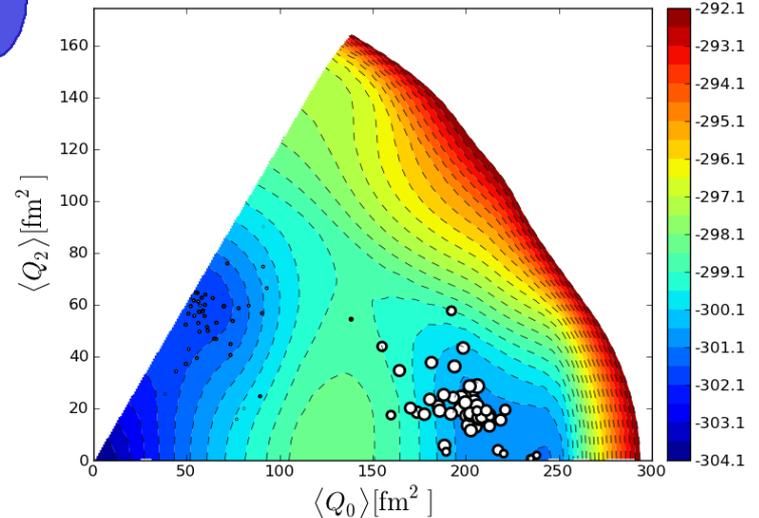
対称軸



0^+_1 : spherical $\beta \sim 0$



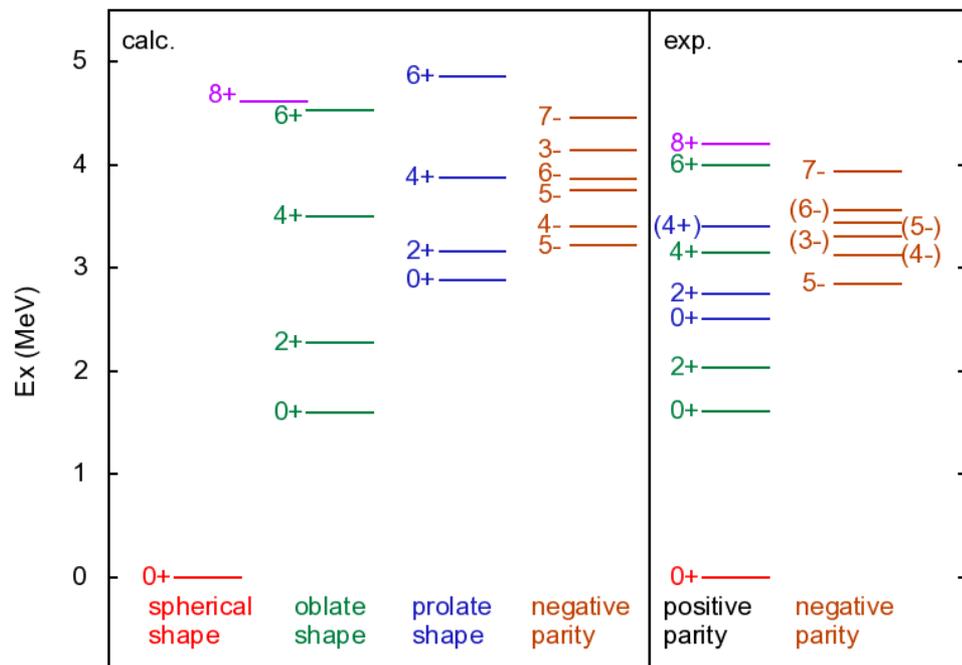
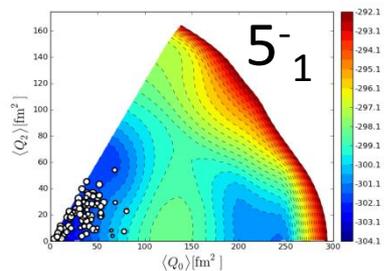
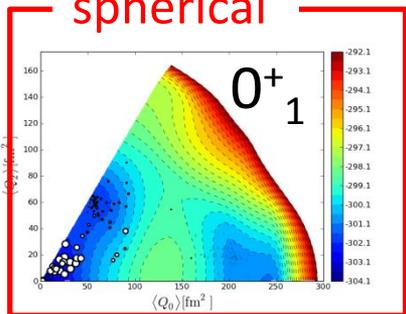
0^+_3 : prolate $\beta \sim +0.4$



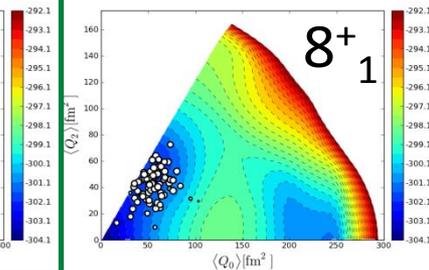
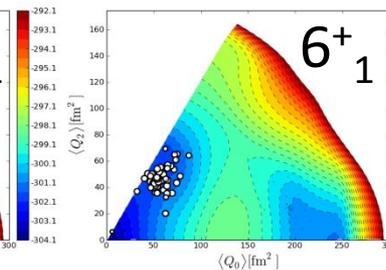
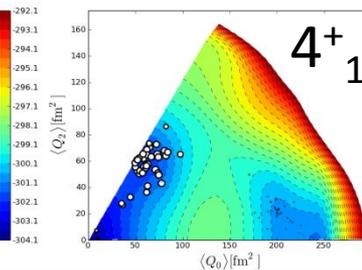
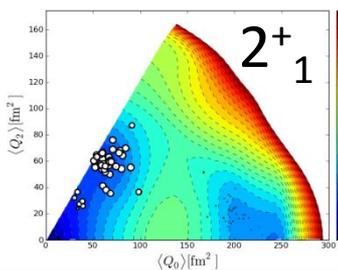
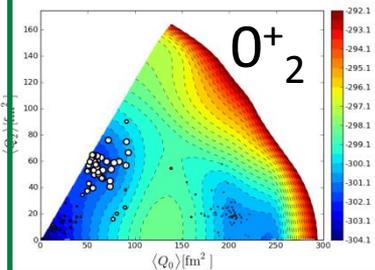
T-plots of ^{68}Ni

同じバンドの状態のT-plotは類似した分布

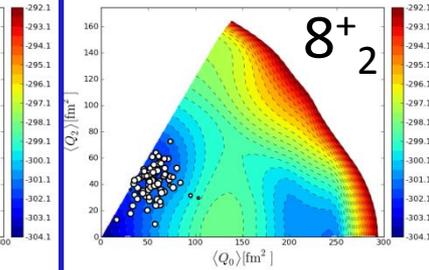
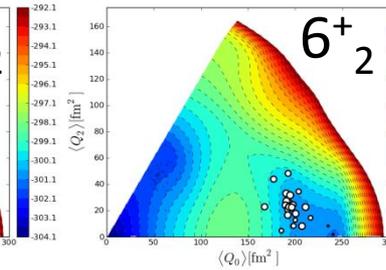
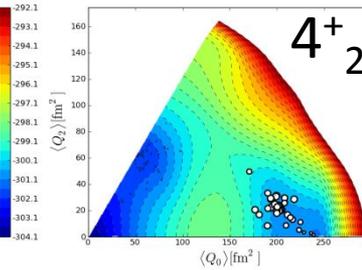
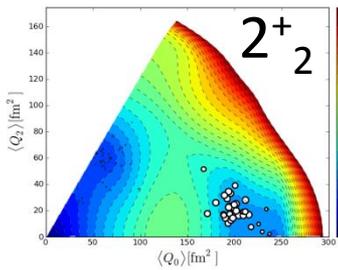
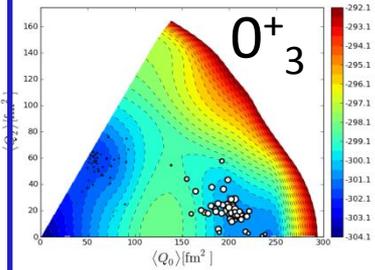
spherical



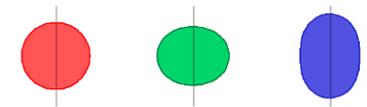
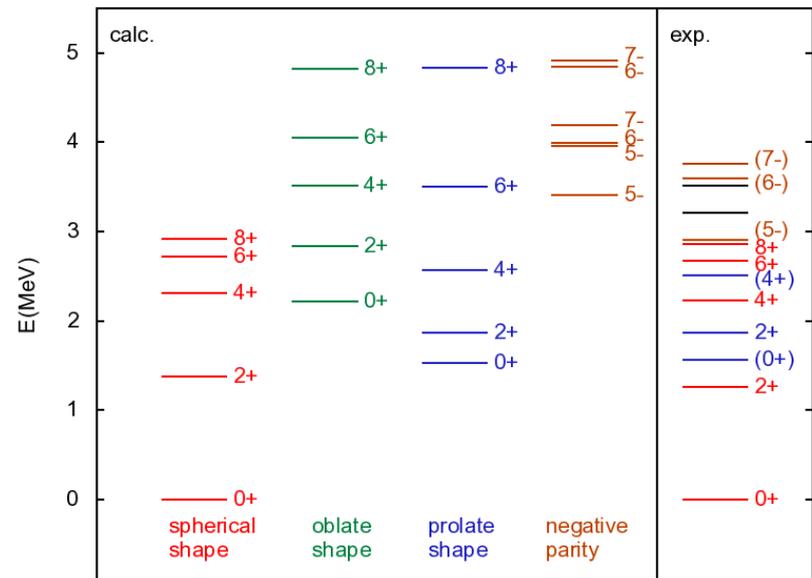
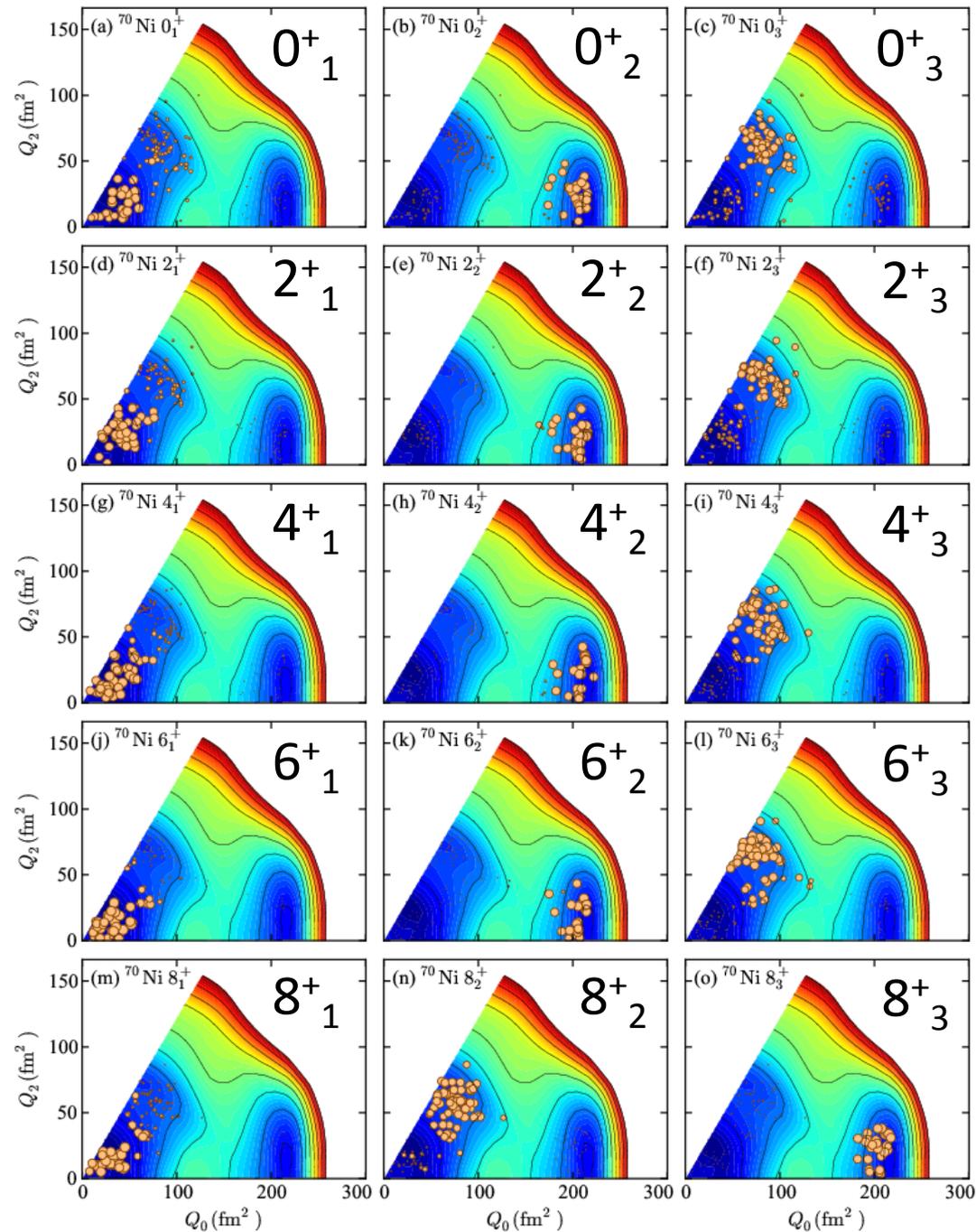
oblate



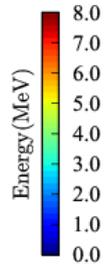
prolate



T-plots of ^{70}Ni

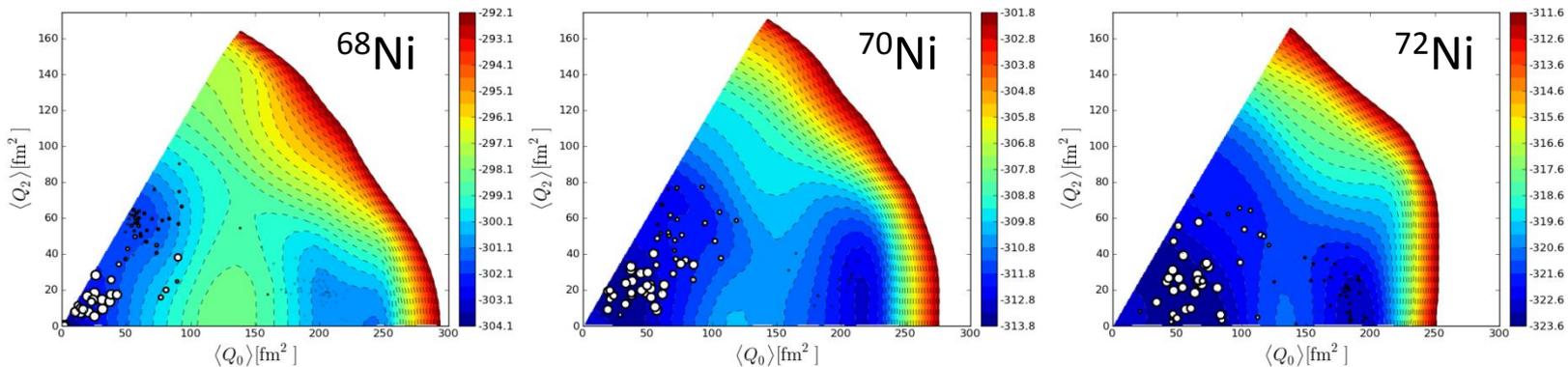


$0^+_2, 4^+_2$ のエネルギーが
 近年測定された
 PRC **91**, 044309(2015)
 PRC **92**, 061302(R) (2015)
 MCSM計算と一致

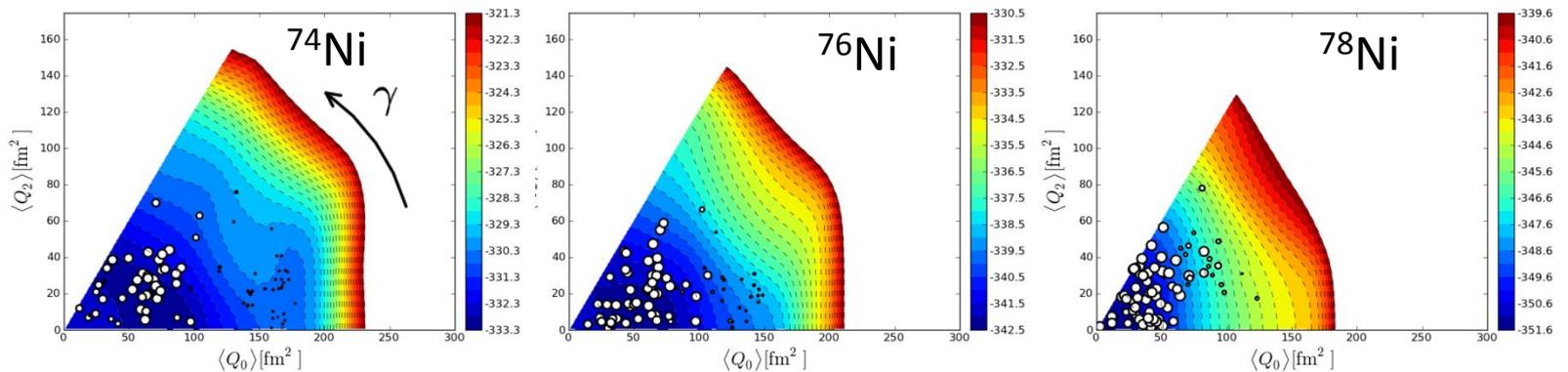


Ni同位体の形状の変化

0^+_1 states of $^{68-78}\text{Ni}$

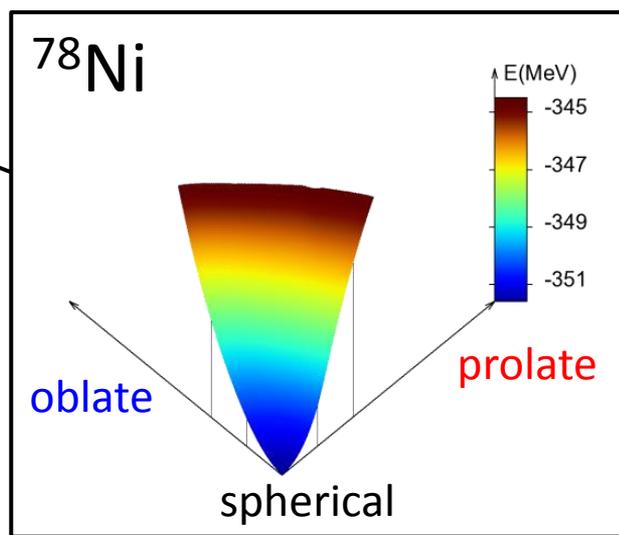
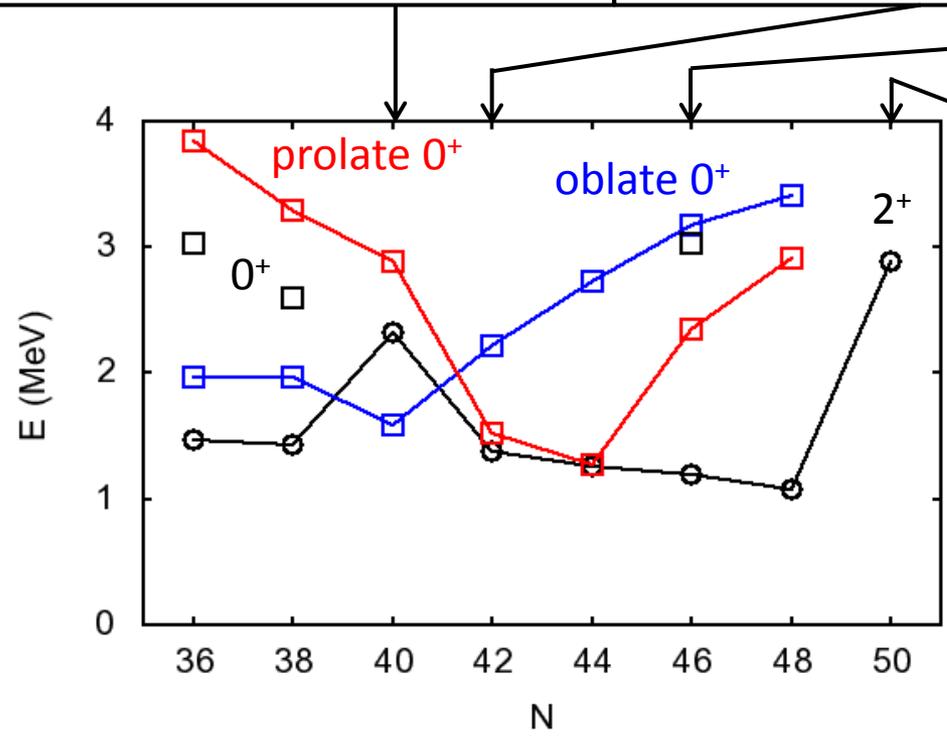
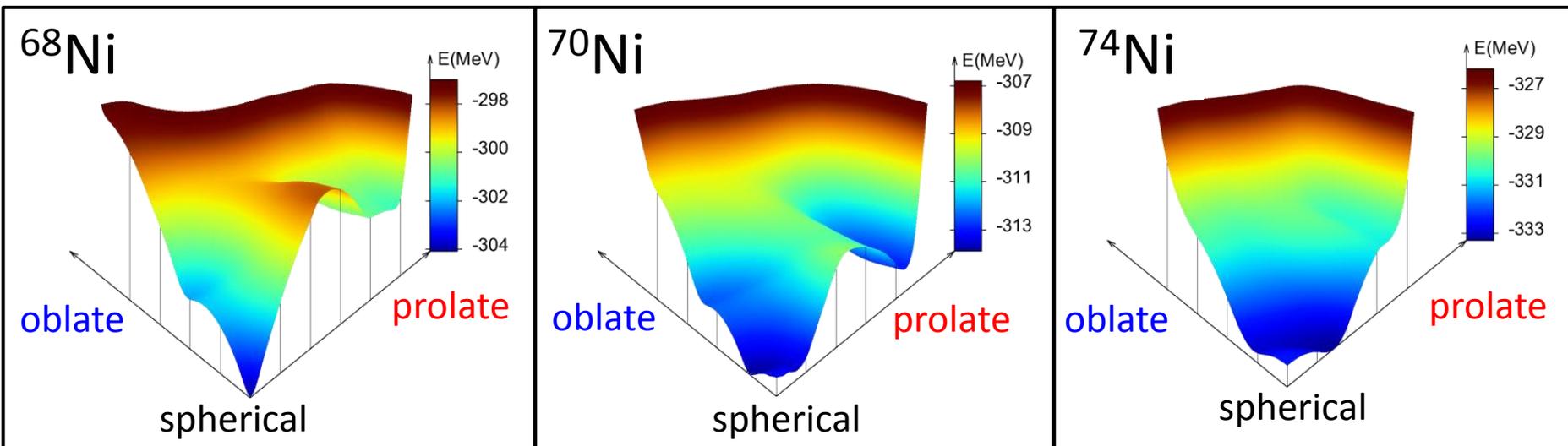


prolate状態のエネルギーが下がり
極小点の間のバリアが下がる



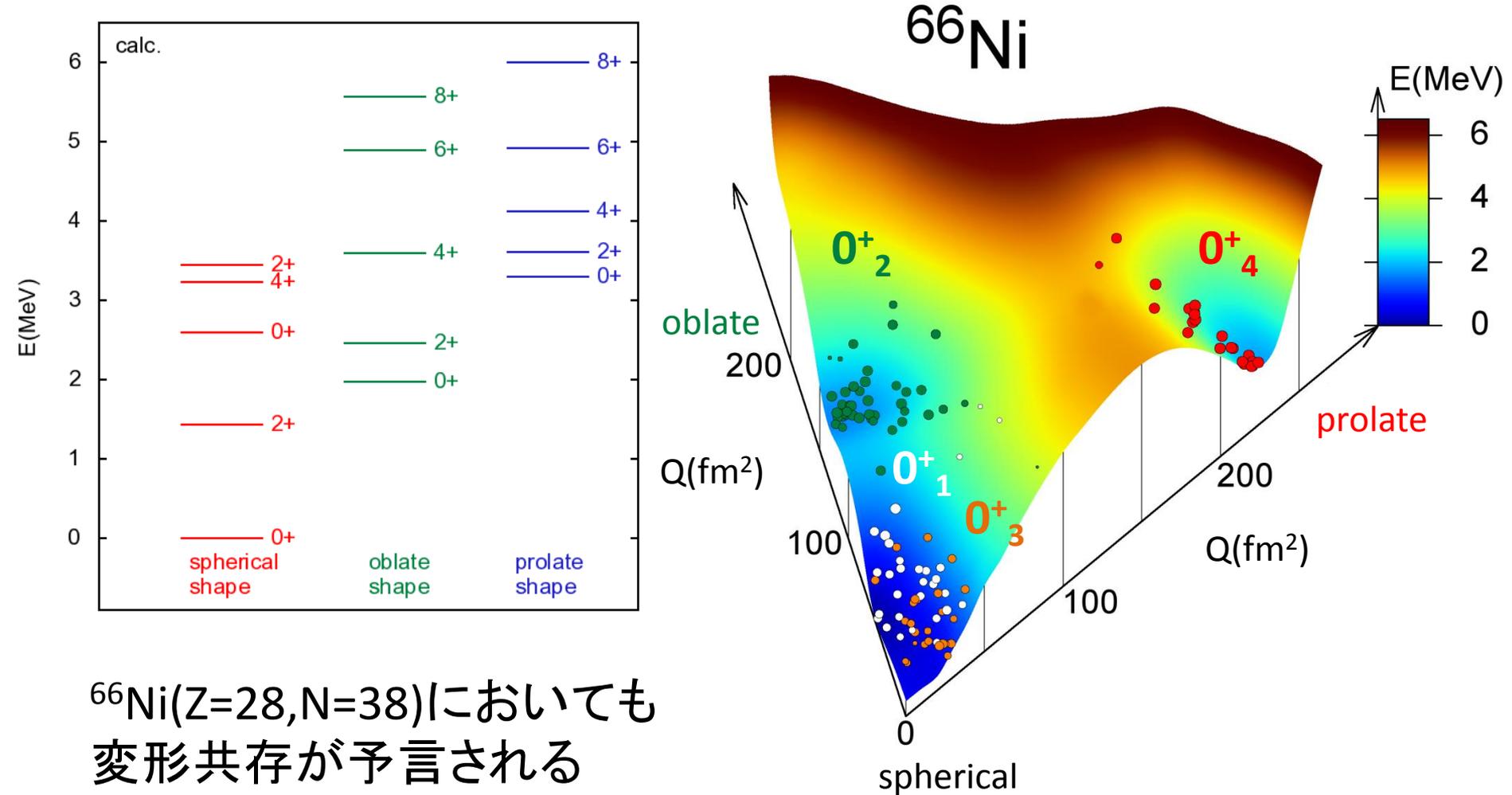
γ -soft変形
(γ 方向への大きな揺らぎ)

Ni同位体の形状の変化



PESで極小点がない場合にも T-plotで変形状態が見られる

^{66}Ni の変形共存



^{66}Ni ($Z=28, N=38$)においても
変形共存が预言される

実験グループとの共著論文: S. Leoni *et al.*, PRL **118**, 162502 (2017)

実験グループとの共同研究

Ni近傍の領域での共著論文

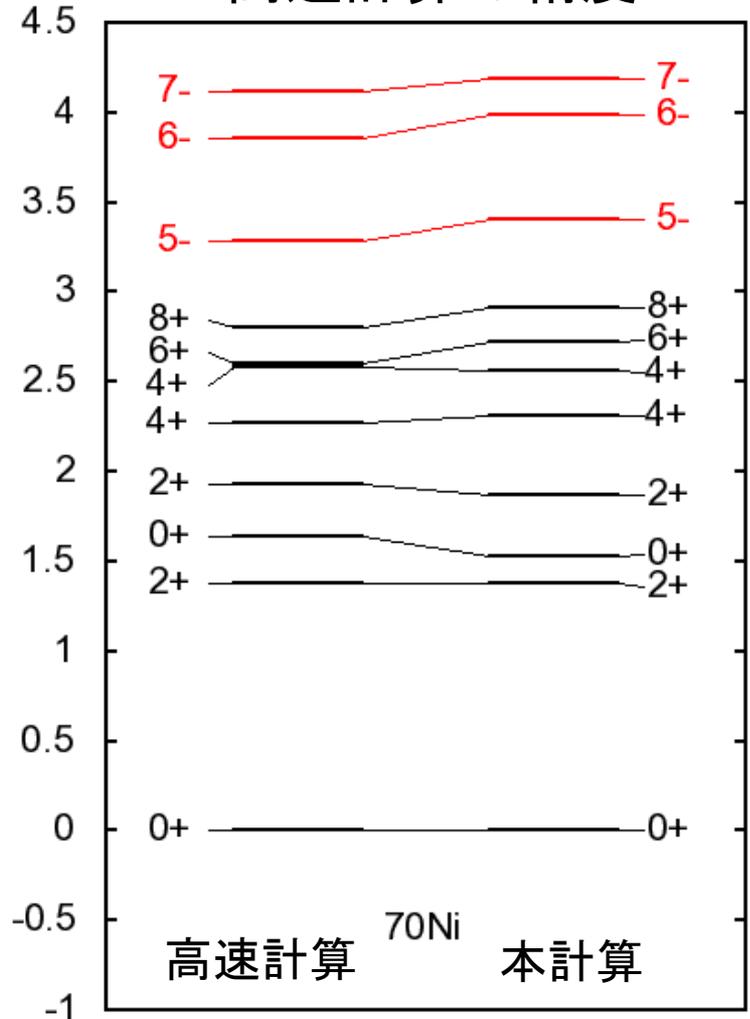
- ^{68}Ni S. Suchyta *et al.*, PRC **89**, 021301(R) (2014)
- ^{68}Ni F. Flavigny *et al.*, PRC **91**, 034310 (2015)
- ^{70}Ni C. J. Chiara *et al.*, PRC **91**, 044309 (2015)
- $^{80,82}\text{Zn}$ Y. Shiga *et al.*, PRC **93**, 024320 (2016)
- odd-A Mn C. Babcock *et al.*, PLB **760**, 387 (2016)
- odd-A Mn H. Heylen *et al.*, PRC **94**, 054321 (2016)
- ^{70}Ni , ^{70}Co A. I. Morales *et al.*, PLB **765**, 328 (2017)
- ^{66}Ni S. Leoni *et al.*, PRL **118**, 162502 (2017)
- ^{77}Cu E. Sahin *et al.*, PRL, accepted (2017)

その他複数の共同研究が進行中

広い領域での系統的計算

- 若干の精度を犠牲にしたより**高速**なMCSM計算により核図表の**広い**領域を計算
- fitによる改良で広い領域の性質を再現できる**予言力**の高い相互作用を構築

高速計算の精度

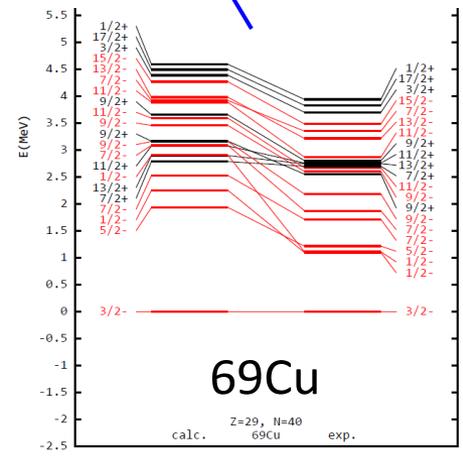
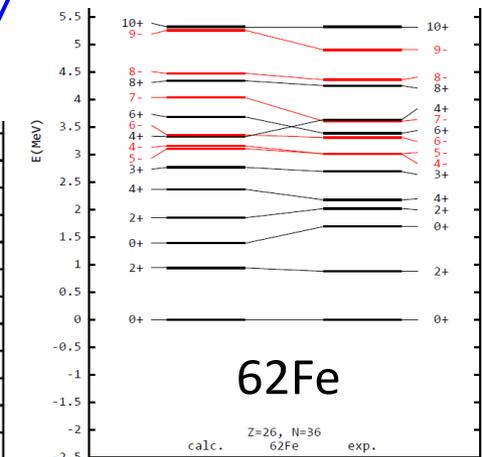
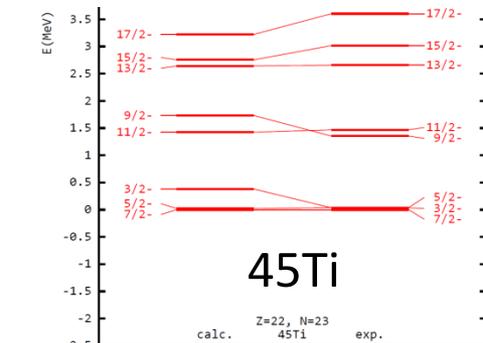
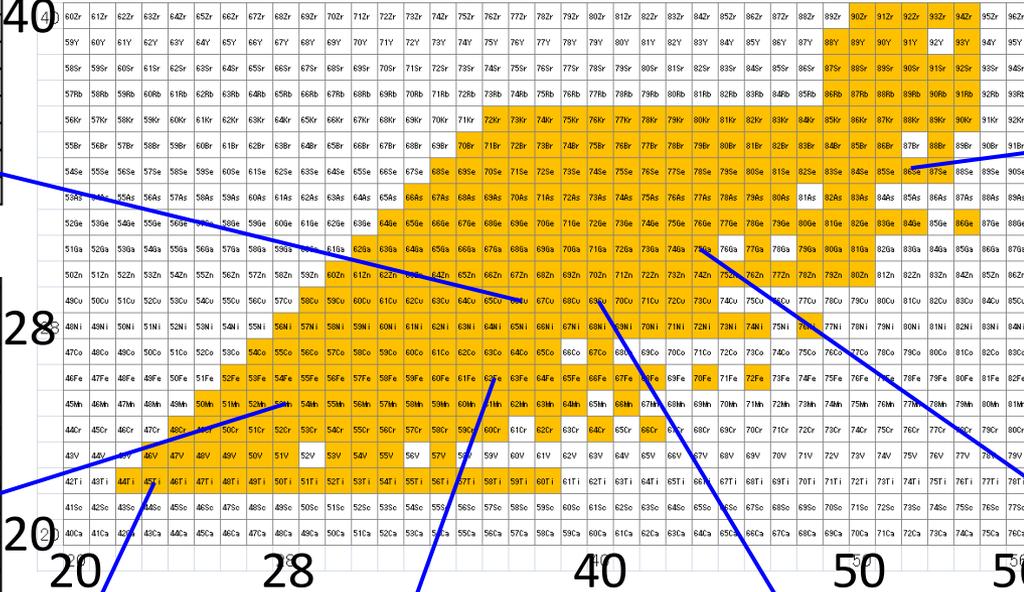
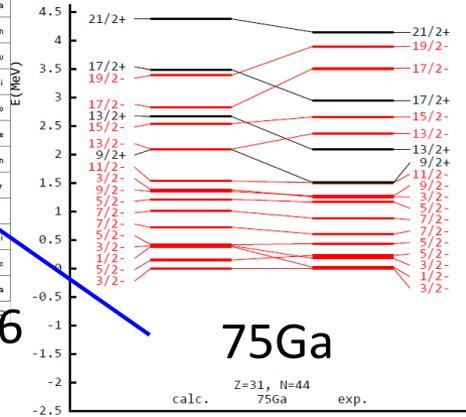
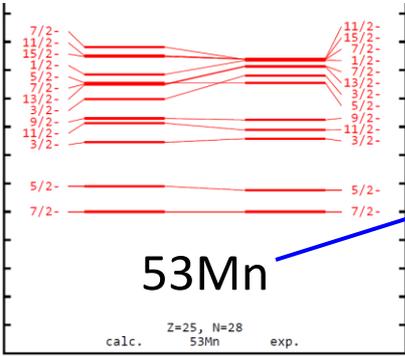
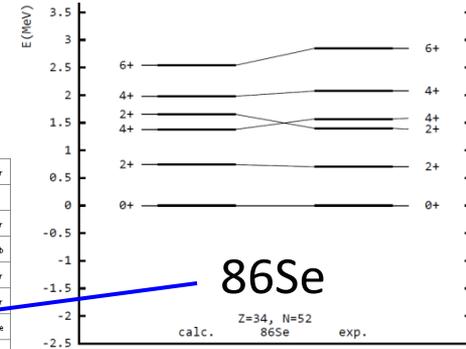
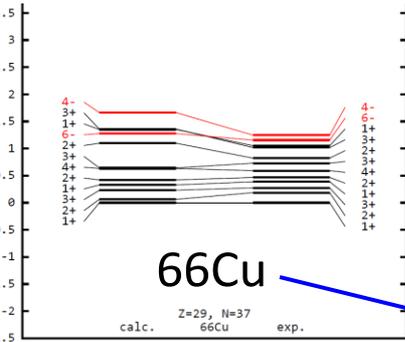


計算した核種を**色付き**で示す

40	60z	61z	62z	63z	64z	65z	66z	67z	68z	69z	70z	71z	72z	73z	74z	75z	76z	77z	78z	79z	80z	81z	82z	83z	84z	85z	86z	87z	88z	89z	90z	91z	92z	93z	94z	95z	96z																			
	59y	60y	61y	62y	63y	64y	65y	66y	67y	68y	69y	70y	71y	72y	73y	74y	75y	76y	77y	78y	79y	80y	81y	82y	83y	84y	85y	86y	87y	88y	89y	90y	91y	92y	93y	94y	95y																			
	58r	59r	60r	61r	62r	63r	64r	65r	66r	67r	68r	69r	70r	71r	72r	73r	74r	75r	76r	77r	78r	79r	80r	81r	82r	83r	84r	85r	86r	87r	88r	89r	90r	91r	92r	93r	94r	95r																		
	57q	58q	59q	60q	61q	62q	63q	64q	65q	66q	67q	68q	69q	70q	71q	72q	73q	74q	75q	76q	77q	78q	79q	80q	81q	82q	83q	84q	85q	86q	87q	88q	89q	90q	91q	92q	93q	94q	95q																	
	56p	57p	58p	59p	60p	61p	62p	63p	64p	65p	66p	67p	68p	69p	70p	71p	72p	73p	74p	75p	76p	77p	78p	79p	80p	81p	82p	83p	84p	85p	86p	87p	88p	89p	90p	91p	92p	93p	94p	95p																
	55o	56o	57o	58o	59o	60o	61o	62o	63o	64o	65o	66o	67o	68o	69o	70o	71o	72o	73o	74o	75o	76o	77o	78o	79o	80o	81o	82o	83o	84o	85o	86o	87o	88o	89o	90o	91o	92o	93o	94o	95o															
	54n	55n	56n	57n	58n	59n	60n	61n	62n	63n	64n	65n	66n	67n	68n	69n	70n	71n	72n	73n	74n	75n	76n	77n	78n	79n	80n	81n	82n	83n	84n	85n	86n	87n	88n	89n	90n	91n	92n	93n	94n	95n														
	53m	54m	55m	56m	57m	58m	59m	60m	61m	62m	63m	64m	65m	66m	67m	68m	69m	70m	71m	72m	73m	74m	75m	76m	77m	78m	79m	80m	81m	82m	83m	84m	85m	86m	87m	88m	89m	90m	91m	92m	93m	94m	95m													
	52l	53l	54l	55l	56l	57l	58l	59l	60l	61l	62l	63l	64l	65l	66l	67l	68l	69l	70l	71l	72l	73l	74l	75l	76l	77l	78l	79l	80l	81l	82l	83l	84l	85l	86l	87l	88l	89l	90l	91l	92l	93l	94l	95l												
	51k	52k	53k	54k	55k	56k	57k	58k	59k	60k	61k	62k	63k	64k	65k	66k	67k	68k	69k	70k	71k	72k	73k	74k	75k	76k	77k	78k	79k	80k	81k	82k	83k	84k	85k	86k	87k	88k	89k	90k	91k	92k	93k	94k	95k											
	50j	51j	52j	53j	54j	55j	56j	57j	58j	59j	60j	61j	62j	63j	64j	65j	66j	67j	68j	69j	70j	71j	72j	73j	74j	75j	76j	77j	78j	79j	80j	81j	82j	83j	84j	85j	86j	87j	88j	89j	90j	91j	92j	93j	94j	95j										
	49i	50i	51i	52i	53i	54i	55i	56i	57i	58i	59i	60i	61i	62i	63i	64i	65i	66i	67i	68i	69i	70i	71i	72i	73i	74i	75i	76i	77i	78i	79i	80i	81i	82i	83i	84i	85i	86i	87i	88i	89i	90i	91i	92i	93i	94i	95i									
28	48h	49h	50h	51h	52h	53h	54h	55h	56h	57h	58h	59h	60h	61h	62h	63h	64h	65h	66h	67h	68h	69h	70h	71h	72h	73h	74h	75h	76h	77h	78h	79h	80h	81h	82h	83h	84h	85h	86h	87h	88h	89h	90h	91h	92h	93h	94h	95h								
	47g	48g	49g	50g	51g	52g	53g	54g	55g	56g	57g	58g	59g	60g	61g	62g	63g	64g	65g	66g	67g	68g	69g	70g	71g	72g	73g	74g	75g	76g	77g	78g	79g	80g	81g	82g	83g	84g	85g	86g	87g	88g	89g	90g	91g	92g	93g	94g	95g							
	46f	47f	48f	49f	50f	51f	52f	53f	54f	55f	56f	57f	58f	59f	60f	61f	62f	63f	64f	65f	66f	67f	68f	69f	70f	71f	72f	73f	74f	75f	76f	77f	78f	79f	80f	81f	82f	83f	84f	85f	86f	87f	88f	89f	90f	91f	92f	93f	94f	95f						
	45e	46e	47e	48e	49e	50e	51e	52e	53e	54e	55e	56e	57e	58e	59e	60e	61e	62e	63e	64e	65e	66e	67e	68e	69e	70e	71e	72e	73e	74e	75e	76e	77e	78e	79e	80e	81e	82e	83e	84e	85e	86e	87e	88e	89e	90e	91e	92e	93e	94e	95e					
	44d	45d	46d	47d	48d	49d	50d	51d	52d	53d	54d	55d	56d	57d	58d	59d	60d	61d	62d	63d	64d	65d	66d	67d	68d	69d	70d	71d	72d	73d	74d	75d	76d	77d	78d	79d	80d	81d	82d	83d	84d	85d	86d	87d	88d	89d	90d	91d	92d	93d	94d	95d				
	43c	44c	45c	46c	47c	48c	49c	50c	51c	52c	53c	54c	55c	56c	57c	58c	59c	60c	61c	62c	63c	64c	65c	66c	67c	68c	69c	70c	71c	72c	73c	74c	75c	76c	77c	78c	79c	80c	81c	82c	83c	84c	85c	86c	87c	88c	89c	90c	91c	92c	93c	94c	95c			
	42b	43b	44b	45b	46b	47b	48b	49b	50b	51b	52b	53b	54b	55b	56b	57b	58b	59b	60b	61b	62b	63b	64b	65b	66b	67b	68b	69b	70b	71b	72b	73b	74b	75b	76b	77b	78b	79b	80b	81b	82b	83b	84b	85b	86b	87b	88b	89b	90b	91b	92b	93b	94b	95b		
	41a	42a	43a	44a	45a	46a	47a	48a	49a	50a	51a	52a	53a	54a	55a	56a	57a	58a	59a	60a	61a	62a	63a	64a	65a	66a	67a	68a	69a	70a	71a	72a	73a	74a	75a	76a	77a	78a	79a	80a	81a	82a	83a	84a	85a	86a	87a	88a	89a	90a	91a	92a	93a	94a	95a	
20	40c	41c	42c	43c	44c	45c	46c	47c	48c	49c	50c	51c	52c	53c	54c	55c	56c	57c	58c	59c	60c	61c	62c	63c	64c	65c	66c	67c	68c	69c	70c	71c	72c	73c	74c	75c	76c	77c	78c	79c	80c	81c	82c	83c	84c	85c	86c	87c	88c	89c	90c	91c	92c	93c	94c	95c

広い領域での系統的計算

(preliminary)



左: 計算
右: 実験

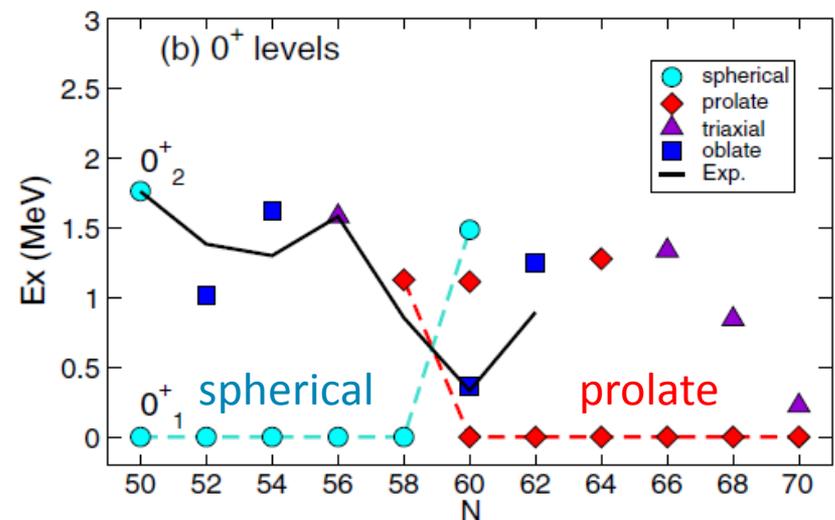
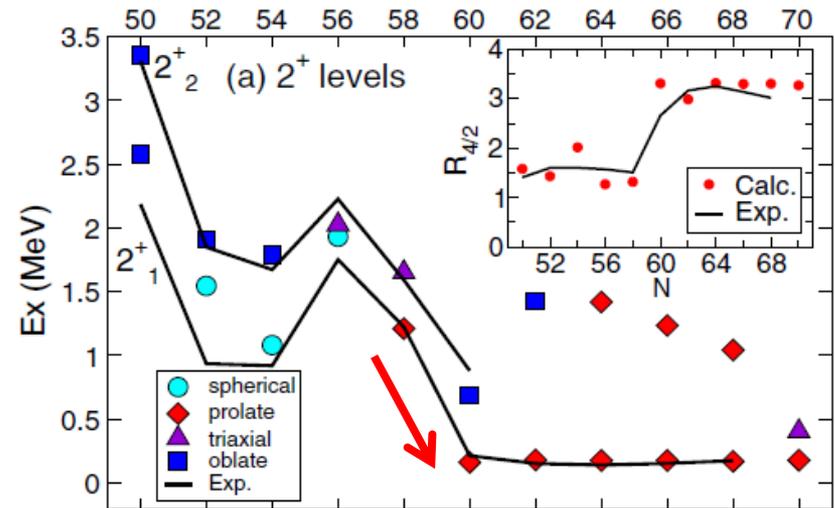
黒: 正パリティ
赤: 負パリティ

— 1 MeV

Zr同位体(Z=40)の形の相転移

T. Togashi, YT, T. Otsuka, N. Shimizu, PRL **117**, 172502 (2016)

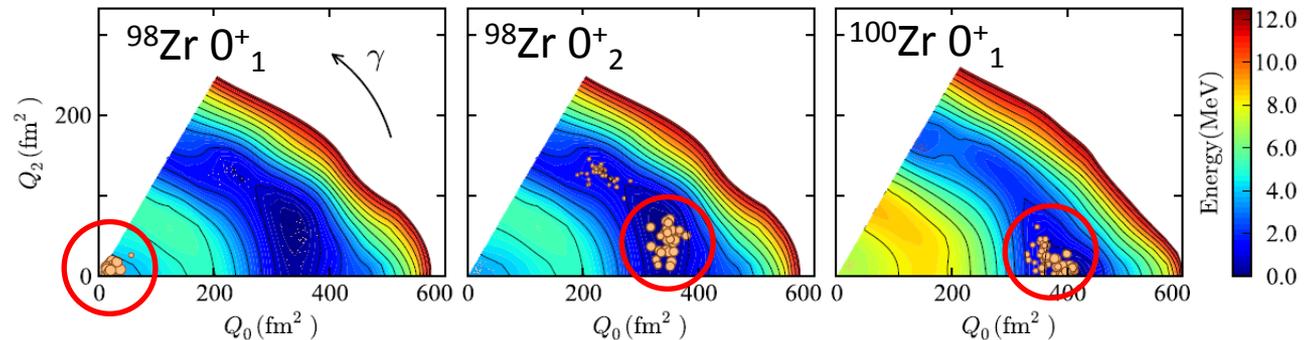
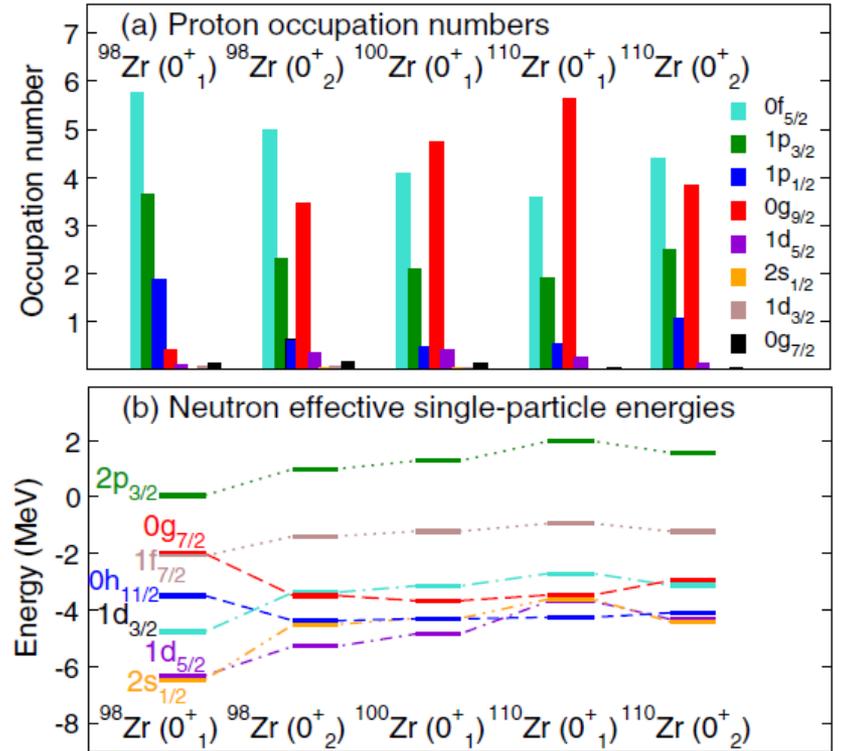
- ^{98}Zr から ^{100}Zr で
2+状態のエネルギーが
急激に減少
- 球形相から変形相への
量子相転移と考えられる
- MCSM計算により
実験を再現し、
T-plotにより
原子核形状を解析した



Zr同位体での第二種殻進化

T. Togashi, YT, T. Otsuka, N. Shimizu, PRL **117**, 172502 (2016)

- $^{98}\text{Zr } 0^+_2$ 状態では陽子が $g_{9/2}$ に励起
- 中性子のESPEが変化し軌道間のギャップが縮まる
- 変形エネルギーを得やすくなる
- $^{100}\text{Zr } 0^+_1$ は $^{98}\text{Zr } 0^+_2$ と類似した性質を示す

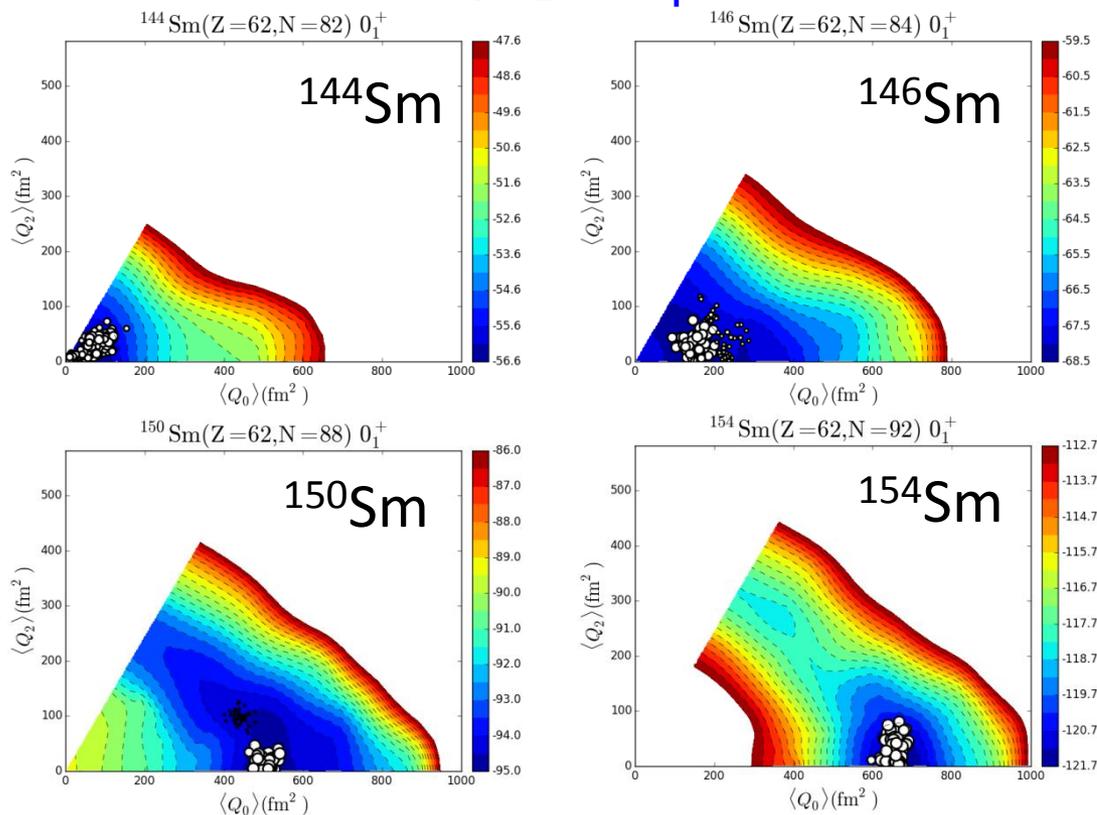


Sm同位体(Z=62) (preliminary)

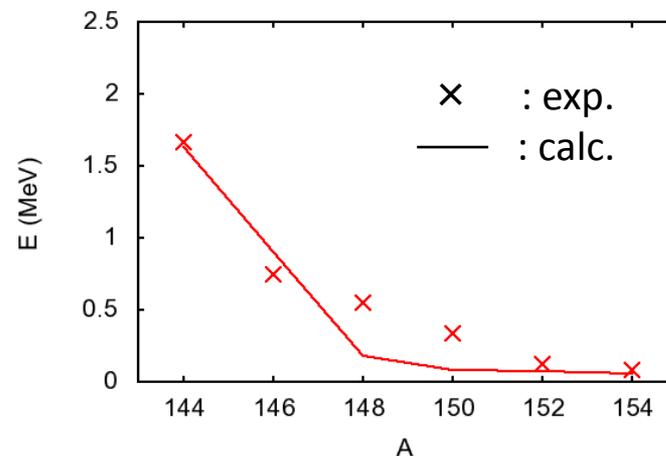
YT, T. Otsuka *et al.*

- ^{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

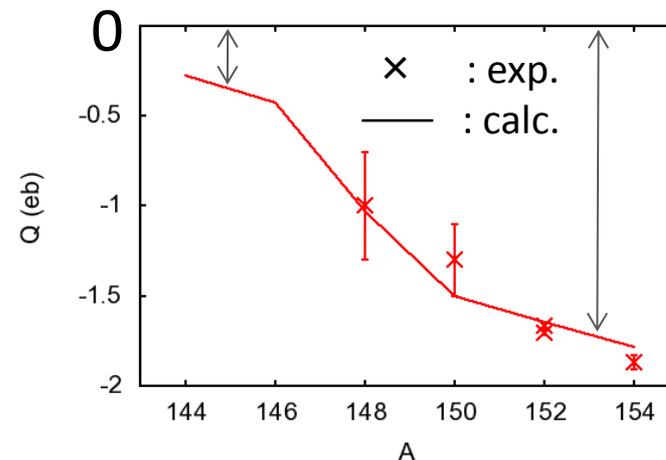
基底状態のT-plot



2+状態の励起エネルギー



2+状態のQ moment

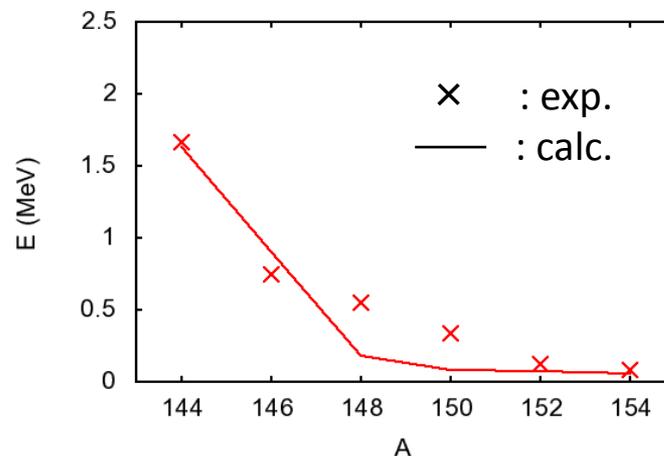


Sm同位体(Z=62) (preliminary)

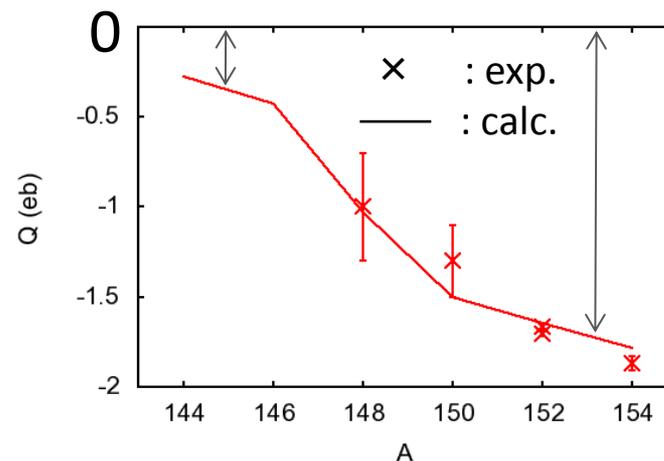
YT, T. Otsuka *et al.*

- 模型空間
陽子: $sdg, 0h_{11/2}, 1f_{7/2}, 2p_{3/2}$
中性子: $pfh, 0i_{13/2}, 1g_{9/2}, 2d_{5/2}, 3s_{1/2}$
- Brown (PRL **85**, 5300)の相互作用と
 V_{MU} 相互作用(PRL **104**, 012501)
による二体力を組み合わせて計算
- 球形から変形への変化が
記述できている
- $^{148,150}\text{Sm}$ で 2^+ 状態の
励起エネルギーが実験より低いが
Q momentは実験と合っている

2+状態の励起エネルギー



2+状態のQ moment



Summary

- pfg9d5空間でNi($Z=28$)近傍の核種をMCSM計算で記述
- MCSMの特性を用いたT-plotによる原子核形状の解析
- 第二種殻進化の概念を用いた変形共存の説明
- Ni同位体のShape Evolutionと変形共存
- 理論計算に基づいた実験との共同研究
- 広い領域の核種の系統的計算(preliminary)
- Zr($Z=40$), Sm($Z=62$)など、
他の領域での変形の解明を目指す