

サブ課題B原子核の最近の進展

東大CNS 清水則孝

阿部喬(東大CNS)、宇都野穰(原研)、
大塚孝治(理研仁科)、角田直文(東大CNS)、
角田佑介(東大CNS)、吉田亨(RIST)、
吉田聡太(東大物理)

サブ課題B原子核

- 原子核構造計算手法・コード開発
 - 原子核殻模型計算コードの開発・公開
 - 準粒子真空基底モンテカルロ殻模型
 - ベイズ統計による相互作用パラメータ由来の誤差評価
 - Gaussian process による外挿の評価
- 軽い核の第一原理的殻模型計算
 - 水素からネオン20までの系統的計算
 - 炭素12のホイール状態
- 中重核の殻模型計算
 - 加速器実験との連携
 - 中性子過剰領域へのフロンティア
 - 高励起・高スピンのフロンティア
 - 鉛近傍領域、超重核のフロンティアへ

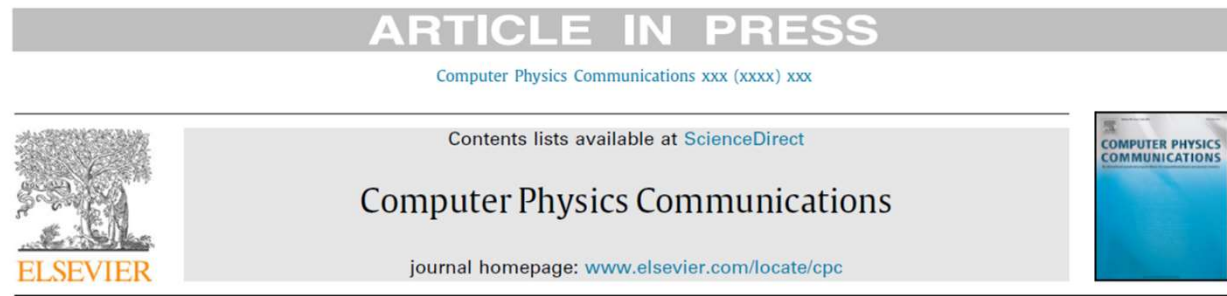
核構造計算手法(殻模型/配位混合計算) の発展

- ランチョス法による殻模型計算コードの導入
- 準粒子真空基底によるモンテカルロ殻模型の開発
- ベイズ統計による相互作用パラメータ由来の誤差の評価
- Gaussian process の外挿手法への応用
- 制限ボルツマンマシンによる量子状態の記述
- Complex Langevin Method の殻模型補助場量子モンテカルロへの応用の検討 (w/ KEK西村さん)

殻模型計算コード“KSHELL”出版

- 1000億次元の疎行列の固有値問題を解く
Massive parallel computer
- 固有値問題解法のアルゴリズム
 - Thick-restart block Lanczos method, Sakurai-Sugiura method, Stochastic estimation of eigenvalue

- 高励起・高
エンス的ア
- 実験研究



Thick-restart block Lanczos method for large-scale shell-model calculations^{☆,☆☆}

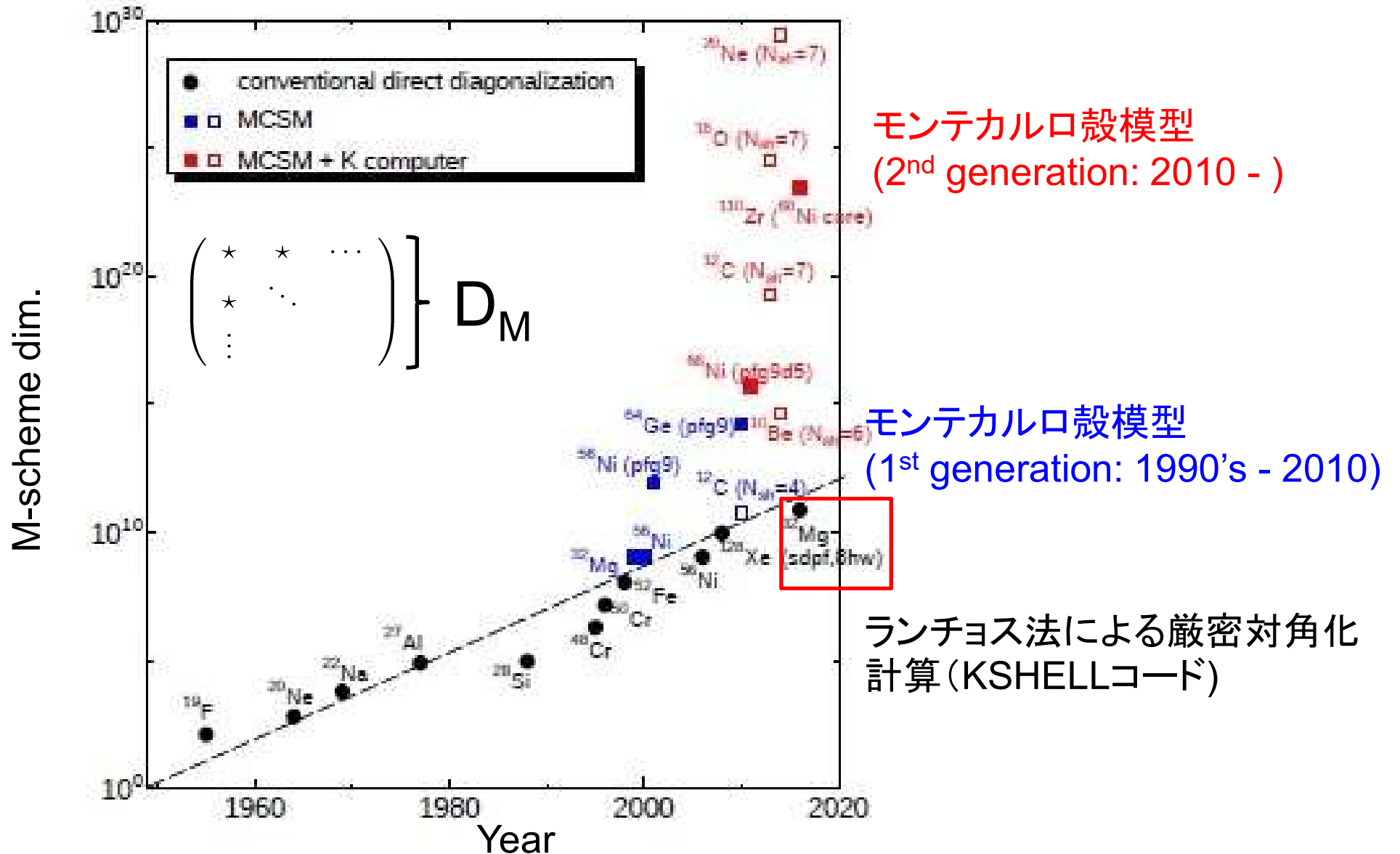
Noritaka Shimizu^{a,*}, Takahiro Mizusaki^b, Yutaka Utsuno^{c,a}, Yusuke Tsunoda^a

^a Center for Nuclear Study, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

^b Institute of Natural Sciences, Senshu University, 3-8-1 Kanda-jinbocho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8425, Japan

^c Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan

殻模型計算の発展



Bogoliubov準粒子基底によるモンテカルロ殻模型 (MCSM)

これまでのモンテカルロ殻模型波動関数:

$$|\Psi\rangle = \sum_{K,i=1}^{N_b} f_{i,K} P_{KM}^J P^\pi |\phi_i(D_i)\rangle$$

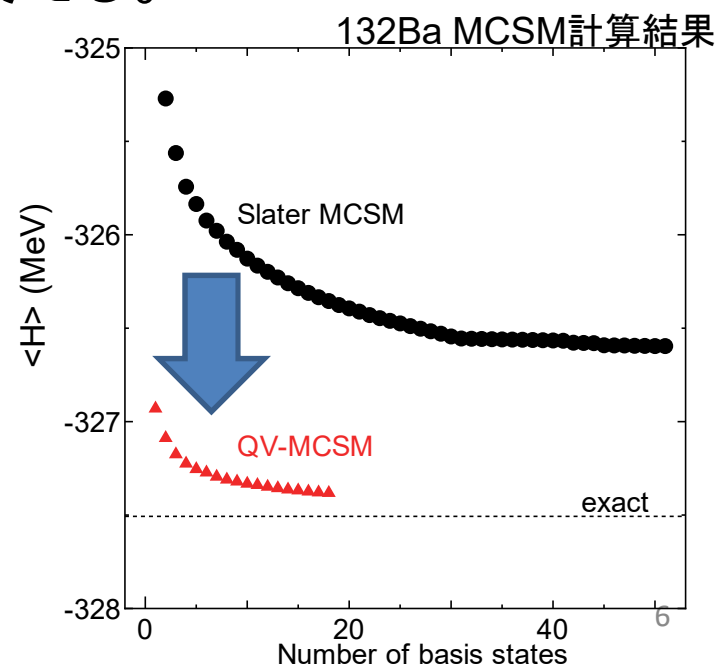
$$|\phi_i(D_i)\rangle = \prod_k a_k^{(i)\dagger} |-\rangle, \quad a_k^{(i)\dagger} = \sum_l D_{lk}^{(i)} c_l^\dagger$$

$|\phi_i(D_i)\rangle$ は変形スレーター行列式だが、対相関の記述に不利。
準粒子真空基底 + 粒子数射影に置き換える。

$$\beta_k |\Phi\rangle = 0$$

$$\beta_k^\dagger \equiv \sum_l U_{lk} c_l^\dagger + V_{lk} c_l = \sum_l c_l^\dagger U_{lk} + c_l V_{lk}$$

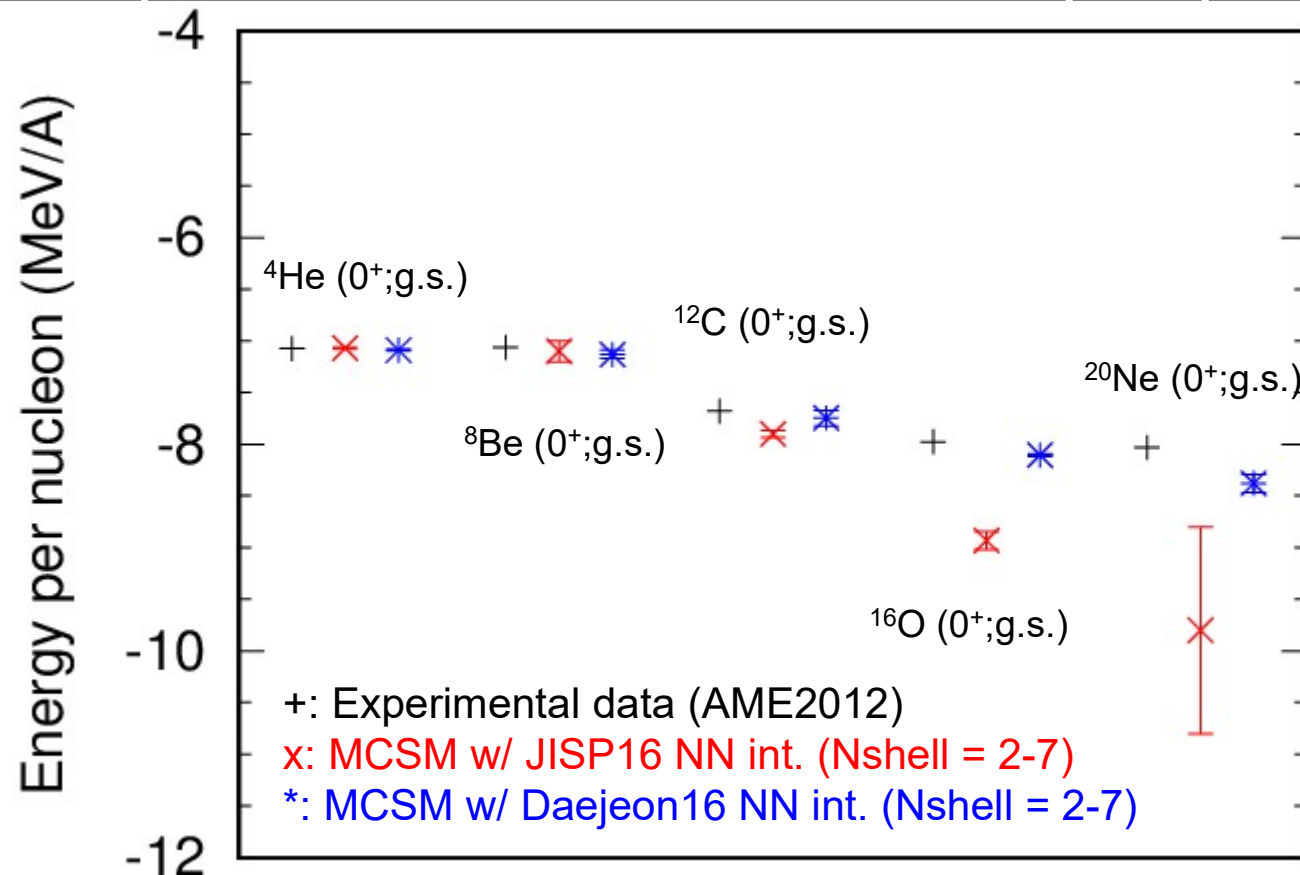
$$\beta_k \equiv \sum_l V_{lk}^* c_l^\dagger + U_{lk}^* c_l = \sum_l V_{kl}^\dagger c_l^\dagger + U_{kl}^\dagger c_l,$$



サブ課題B原子核

- 原子核構造計算手法・コード開発
 - 原子核殻模型計算コードの開発・公開
 - 準粒子真空基底モンテカルロ殻模型
 - ベイズ統計による相互作用パラメータ由来の誤差評価
 - Gaussian process による外挿の評価
- 軽い核の第一原理的殻模型計算
 - 水素からネオン20までの系統的計算
 - 炭素12のホイル状態
- 中重核の殻模型計算
 - 加速器実験との連携
 - 中性子過剰領域へのフロンティア
 - 高励起・高スピンのフロンティア
 - 鉛近傍領域、超重核のフロンティアへ

Comparison of MCSM results w/ experiments



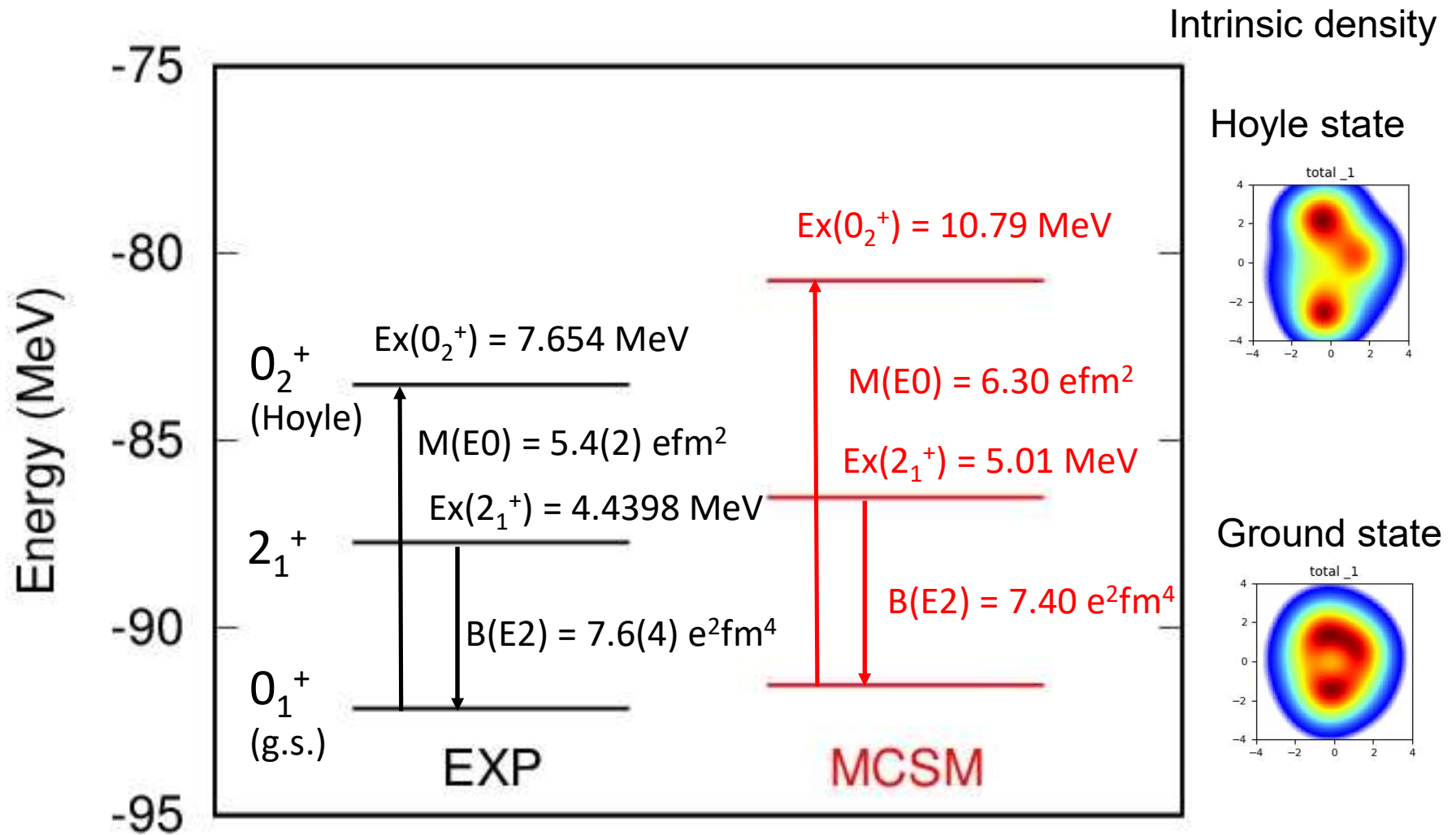
Preliminary

MCSM results are obtained using K computer by traditional extrapolation w/ optimum harmonic oscillator energies.

JISP16 results show good agreements w/ experimental data up to ¹²C, slightly overbound for ¹⁶O, and clearly overbound for ²⁰Ne.

Daejeon16 results show good agreements w/ experimental data up to ²⁰Ne.

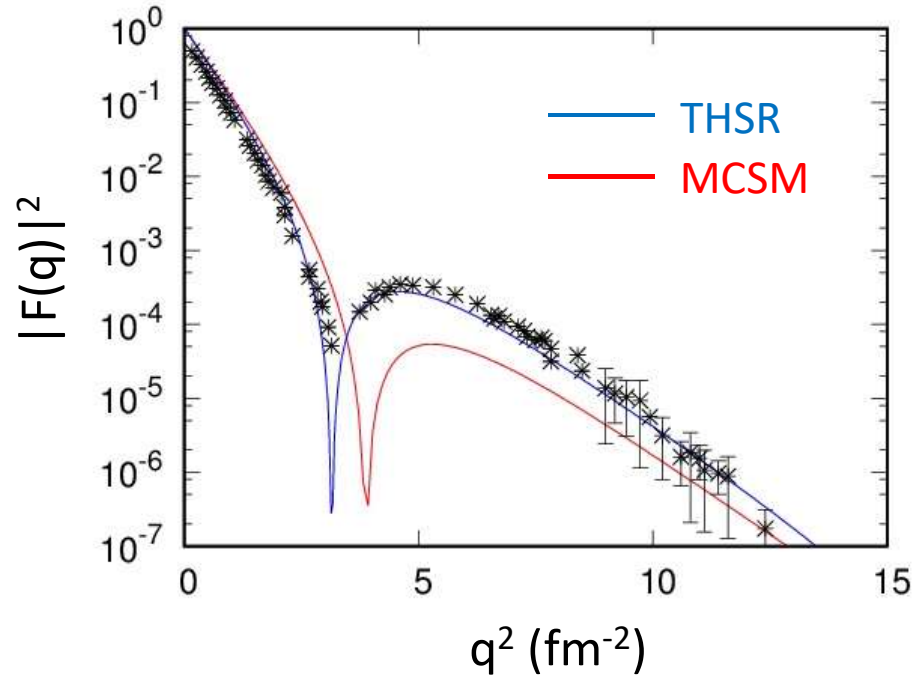
Excitation spectrum of ^{12}C



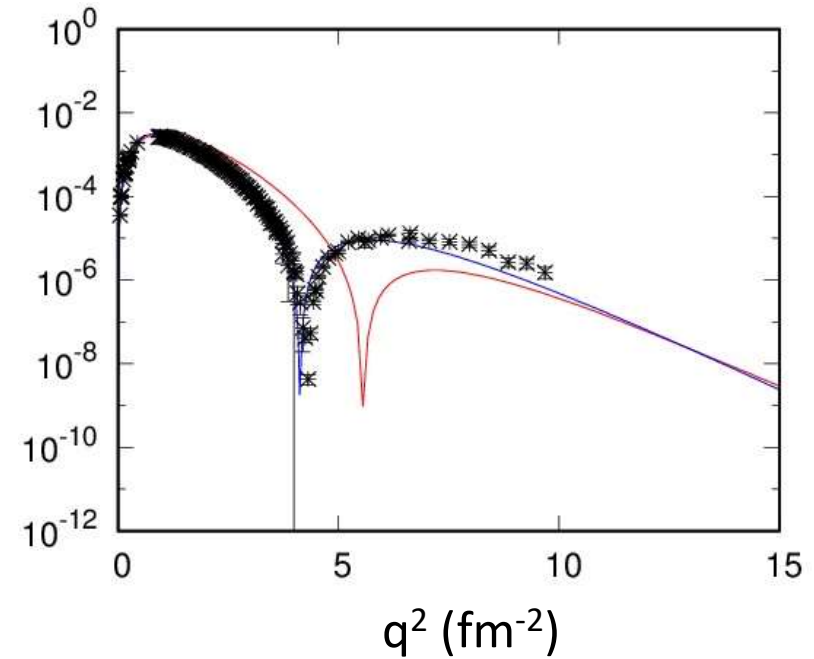
Daejeon16 NN, $N_{\text{shell}} = 7$, $hw = 20 \text{ MeV}$

Elastic/Inelastic form factors

Elastic form factor ($0^+_{\underline{1}} \rightarrow 0^+_{\underline{1}}$)



Inelastic form factor ($0^+_{\underline{1}} \rightarrow 0^+_{\underline{2}}$)



Daejeon16 NN, $N_{\text{shell}} = 7$, $hw = 20$ MeV

$$|F(q)|^2 = \frac{4\pi}{12^2} \left| \int_0^\infty \rho_{J,0_1}^{(J)}(r) j_J(qr) r^2 dr \right|^2 \exp\left(-\frac{1}{2} a_p^2 q^2\right).$$

$$\rho_{J,0_1}^{(J)}(r) = \langle \Psi_{\lambda=k}^{JM} | \sum_{i=1}^{12} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) | \Psi_{\lambda=1}^{J=0} \rangle / Y_{JM}^*(\hat{\mathbf{r}}), \quad (2)$$

THSR & experimental data:
 Provided by Y. Funaki et al.,
 Eur. Phys. J. A28 (2006) 259-263.

サブ課題B原子核

- 原子核構造計算手法・コード開発
 - 原子核殻模型計算コードの開発・公開
 - 準粒子真空基底モンテカルロ殻模型
 - ベイズ統計による相互作用パラメータ由来の誤差評価
 - Gaussian process による外挿の評価
- 軽い核の第一原理的殻模型計算
 - 水素からネオン20までの系統的計算
 - 炭素12のホイール状態
- **中重核の殻模型計算**
 - 加速器実験との連携
 - 中性子過剰領域へのフロンティア
 - 高励起・高スピンのフロンティア
 - 鉛近傍領域、超重核のフロンティアへ

実験グループとの共同研究成果 (赤字は理研RIBFの実験)

(理論のみの論文は除く)

Ni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)
- odd-A Zn C. Wraith *et al.*, PLB **771**, 385 (2017)
- ^{77}Cu E. Sahin *et al.*, PRL **118**, 242502 (2017)
- $^{73-78}\text{Cu}$ R. P. de Groote *et al.*, PRC **96**, 041302(R) (2017)
- ^{61}Zn M. Queiser *et al.*, PRC **96**, 044313 (2017)
- $^{82,84}\text{Zn}$ C. M. Shand *et al.*, PLB **773**, 492 (2017)
- ^{79}Cu L. Olivier *et al.*, PRL **119**, 192501 (2017)
- ^{71}Zn S. Bottoni *et al.*, PLB **775**, 271 (2017)
- ^{73}Zn X. F. Yang *et al.*, PRC **97**, 044324 (2018)
- $^{72,74}\text{Ni}$ A. I. Morales *et al.*, PLB **781**, 706 (2018)
- ^{66}Mn , ^{66}Fe , ^{66}Co , ^{66}Ni M. Stryjczyk *et al.*, PRC **98**, 064326 (2018)
- ^{75}Cu Y. Ichikawa *et al.*, Nat. Phys. **15**, 325 (2019)
- ^{78}Ni R. Taniuchi *et al.*, Nat. **569**, 53 (2019)
- $^{62-80}\text{Zn}$ L. Xie *et al.*, in prep.
- ^{75}Cu F. L. Bello Garrote *et al.*, in prep.

Zr領域での共著論文

- ^{96}Zr C. Kremer *et al.*, PRL **117**, 172503 (2016)
- ^{110}Zr N. Paul *et al.*, PRL **118**, 032501 (2017)
- $^{94,96,98}\text{Sr}$ J.-M. Régis *et al.*, PRC **95**, 054319 (2017)
- $^{98,100,102}\text{Zr}$ S. Ansari *et al.*, PRC **96**, 054323 (2017)
- ^{98}Zr P. Singh *et al.*, PRL **121**, 192501 (2018)
- ^{96}Zr Ł. W. Iskra *et al.*, PLB **788**, 396 (2019)

理化学研究所
仁科加速器研究センター
RIビームファクトリ(RIBF)加速器

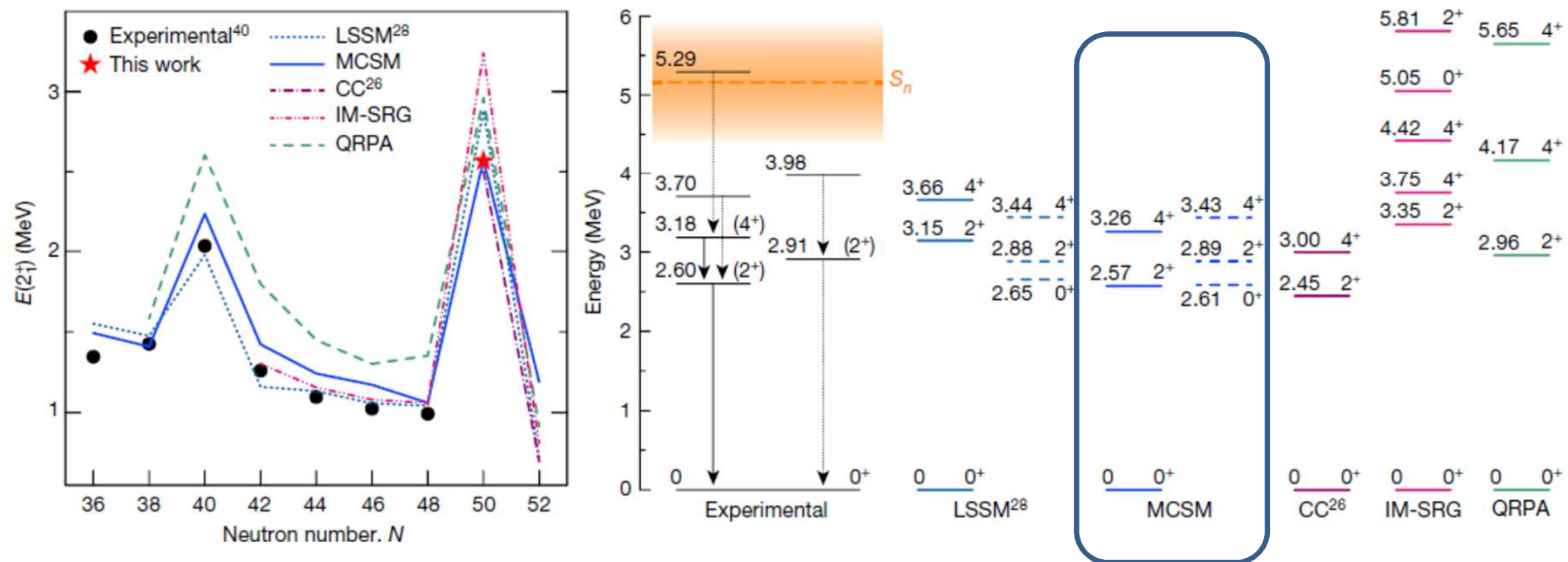


その他質量領域での共著論文

- ^{27}Ne C. Leoliu *et al.*, PRL **121**, 262501(2018)
- ^{30}Mg B. Fernandez-Dominguez *et al.*, PLB **779**, 124(2018)
- ^{31}Na , ^{31}Mg H. Nishibata *et al.*, PRC **99** 024322 (2019)
- ^{35}Mg S. Momiyama *et al.*, PRC **96**, 034328 (2017)
- ^{27}Al T. Shizuma *et al.* PRC accepted.
- ^{34}Al Z. Xu *et al.* PLB **782**, 619 (2018).
- $^{39,40}\text{Si}$ V. Tripathi *et al.*, PRC **95**, 024308 (2017)
- ^{132}Sn D. Rosiak *et al.*, PRL **121**, 252501 (2018)
- ^{135}La Md. S. R. Laskar *et al.*, PRC **99** 014308 (2019)
- ^{136}Ba , ^{138}Ce C. Petrache *et al.*, in prep.
- $^{177-186}\text{Hg}$ B. A. Marsh *et al.*, Nat. Phys. **14**, 1163 (2018)
- $^{177-186}\text{Hg}$ S. Sels *et al.*, PRC **99**, 044316 (2019)

^{78}Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation

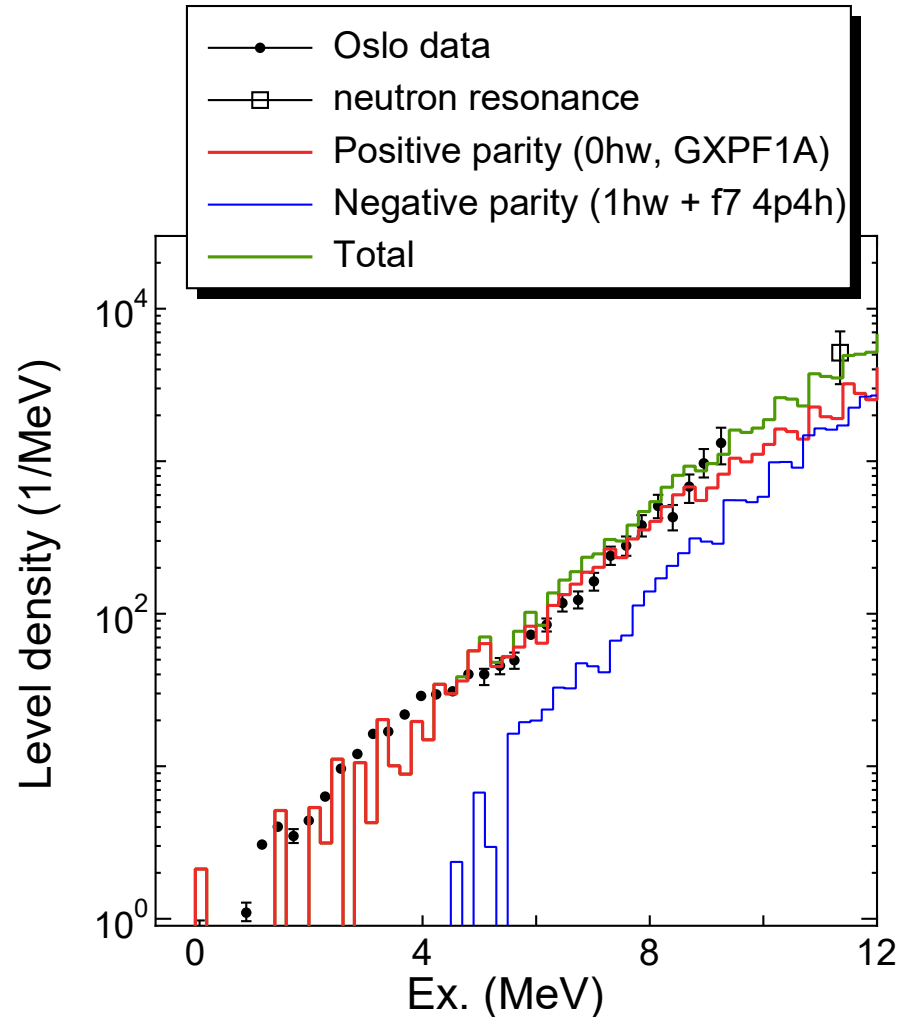
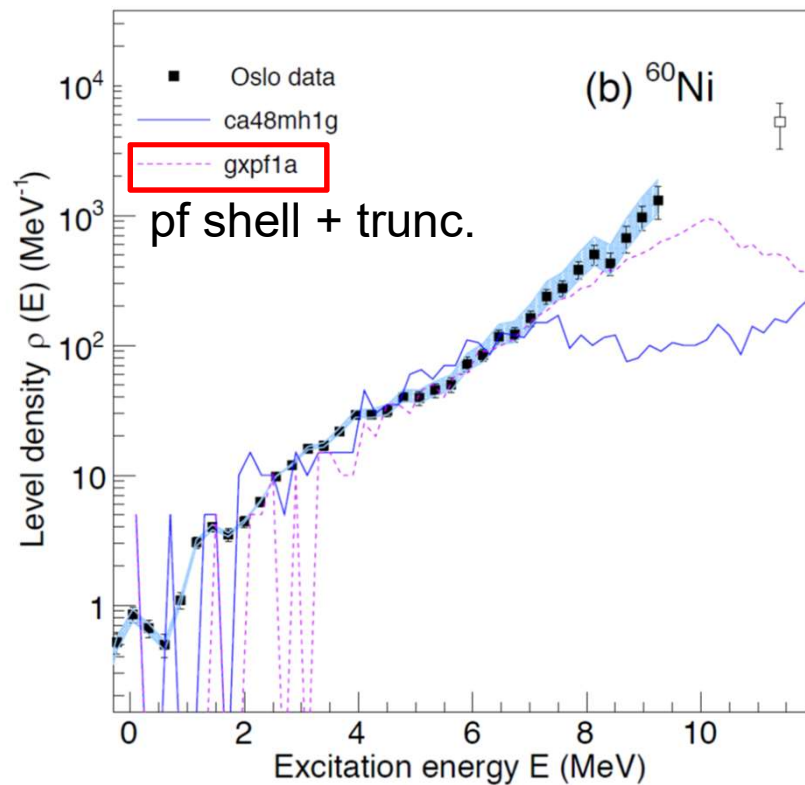
R. Taniuchi^{1,2}, C. Santamaria^{2,3}, P. Doornenbal^{2*}, A. Obertelli^{2,3,4}, K. Yoneda², G. Authélet³, H. Baba², D. Calvet³, F. Château³, A. Corsi³, A. Delbart³, J.-M. Gheller³, A. Gillibert³, J. D. Holt⁵, T. Isobe², V. Lapoux³, M. Matsushita⁶, J. Menéndez⁶, S. Momiyama^{1,2}, T. Motobayashi², M. Niikura¹, F. Nowacki⁷, K. Ogata^{8,9}, H. Otsu², T. Otsuka^{1,2,6}, C. Péron³, S. Péru¹⁰, A. Peyaud³, E. C. Pollacco³, A. Poves¹¹, J.-Y. Rousse³, H. Sakurai^{1,2}, A. Schwenk^{4,12,13}, Y. Shiga^{2,14}, J. Simonis^{4,12,15}, S. R. Stroberg^{5,16}, S. Takeuchi², Y. Tsunoda⁶, T. Uesaka², H. Wang², F. Browne¹⁷, L. X. Chung¹⁸, Z. Dombradi¹⁹, S. Franchoo²⁰, F. Giacompo²¹, A. Gottardo²⁰, K. Hadyńska-Klęk²¹, Z. Korkulu¹⁹, S. Koyama^{1,2}, Y. Kubota^{2,6}, J. Lee²², M. Lettmann⁴, C. Louchart⁴, R. Lozeva^{7,23}, K. Matsui^{1,2}, T. Miyazaki^{1,2}, S. Nishimura², L. Olivier²⁰, S. Ota⁶, Z. Patel²⁴, E. Şahin²¹, C. Shand²⁴, P.-A. Söderström², I. Stefan²⁰, D. Steppenbeck⁶, T. Sumikama²⁵, D. Suzuki²⁰, Z. Vajta¹⁹, V. Werner⁴, J. Wu^{2,26} & Z. Y. Xu²²



⇒ 元素合成r過程の理解にむけて

高励起状態の統計的取り扱い: ^{60}Ni の核準位密度

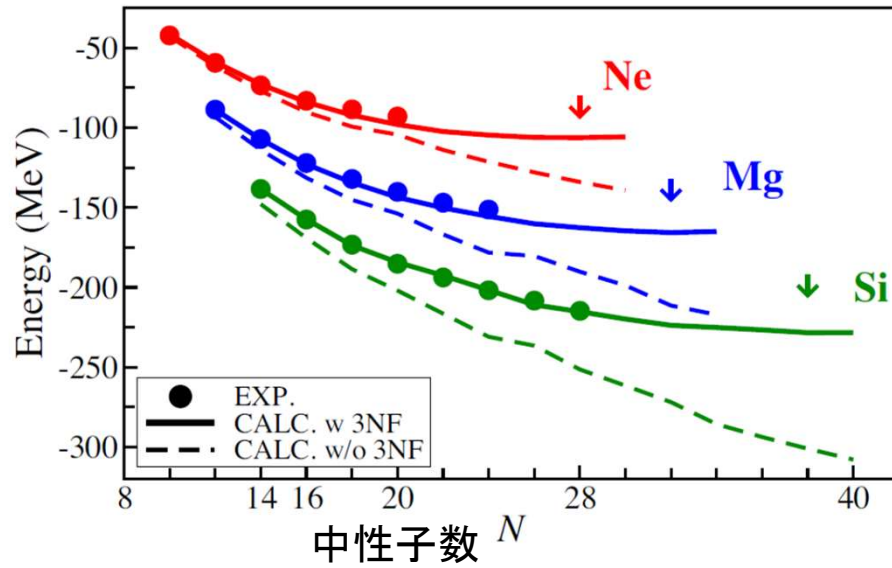
準位密度: 中性子捕獲反応の理解に
キーとなる物理量



Ref. T. Renstrøm *et al.*, arXiv:1804.08086

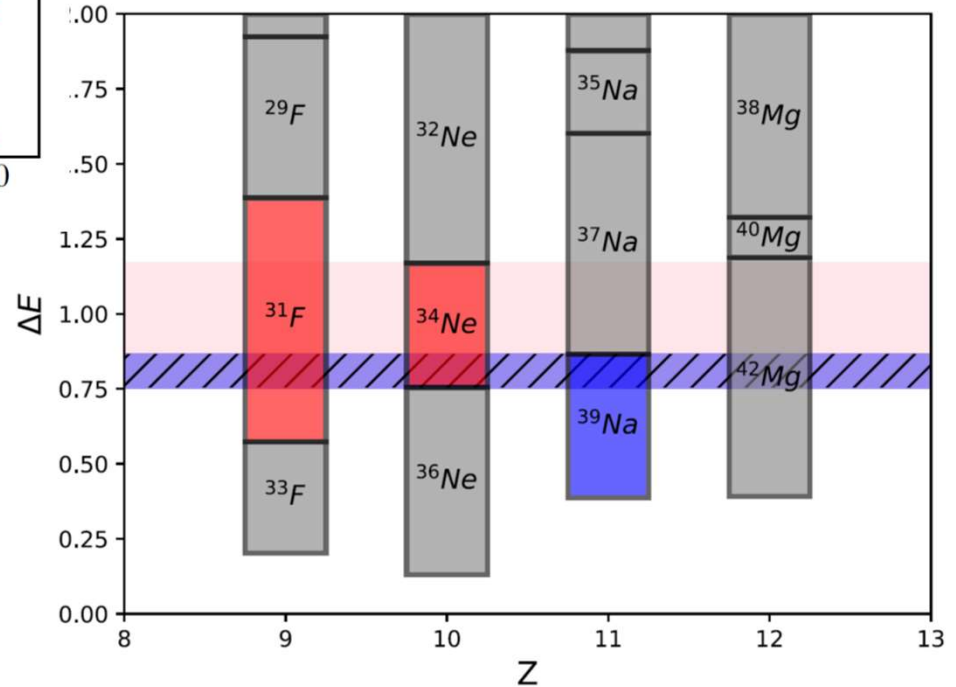
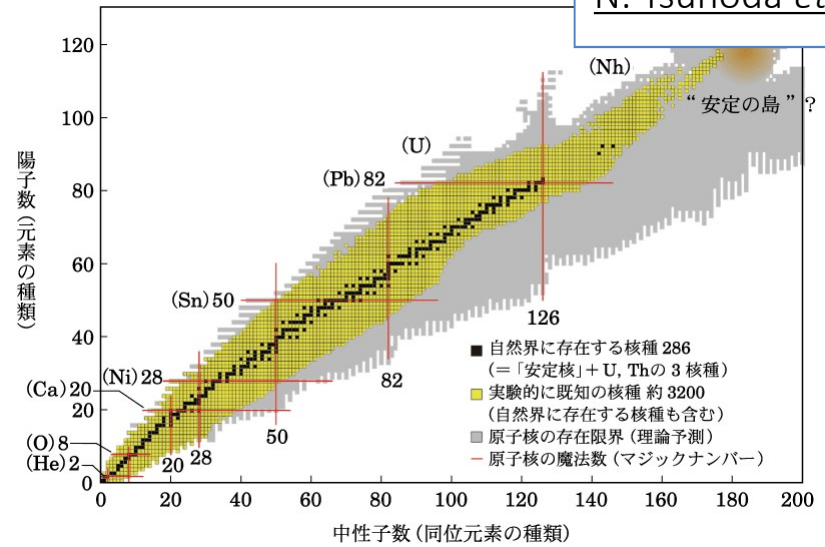
Stochastic estimation of
eigenvalue density

“反転の島”領域の殻構造と 中性子過剰核の存在限界



N. Tsunoda *et al.*, PRC 95,
021304 (2017)

N. Tsunoda *et al.*

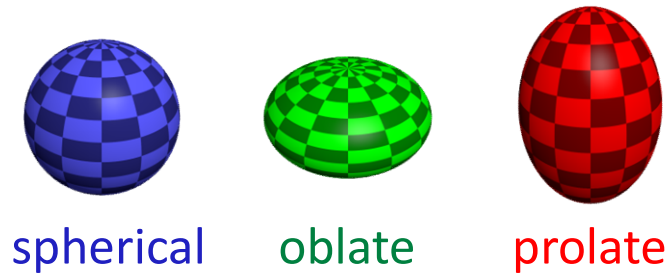


^{42}Mg が存在限界であることを予言

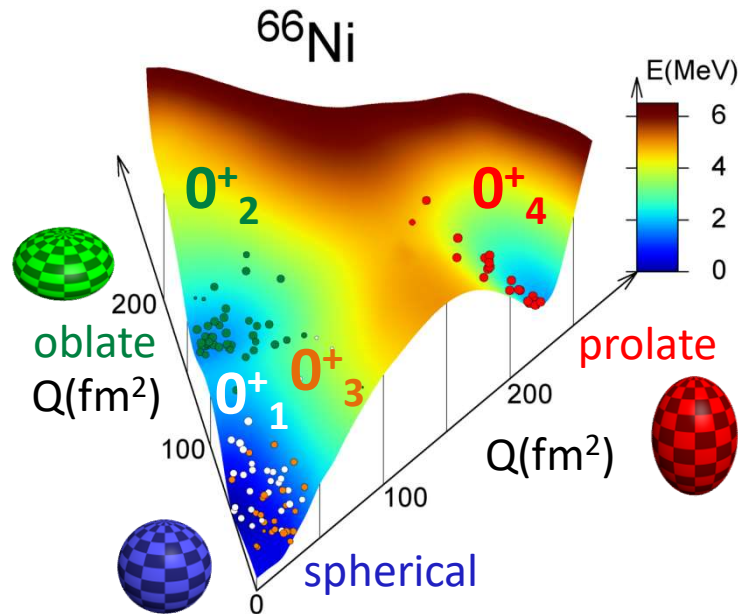
原子核の「形」と変形共存

Y. Tsunoda *et al.*

原子核の形状:

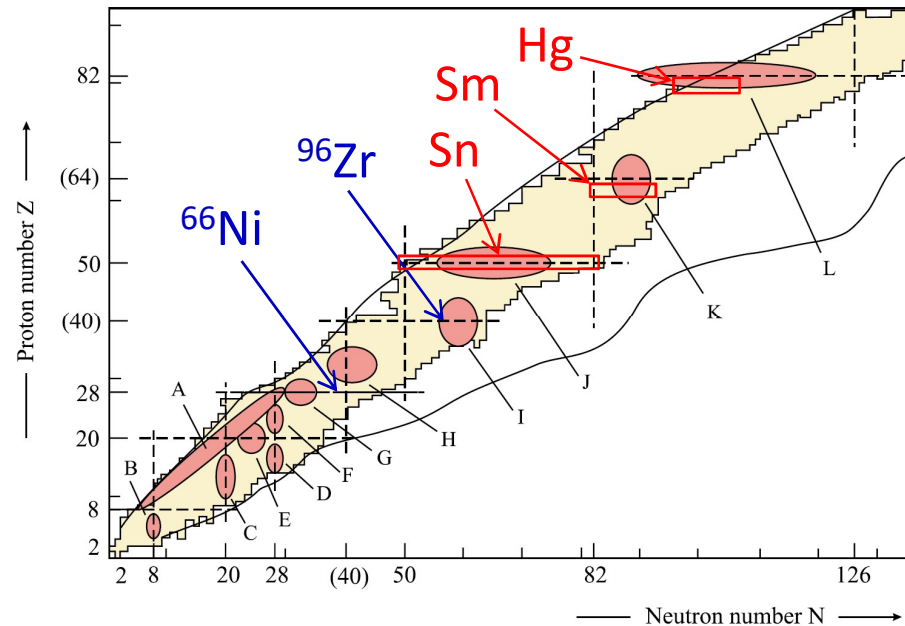


一部の核種では異なる形状を持つ固有状態が近いエネルギーに現れる(変形共存)



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

変形共存の領域

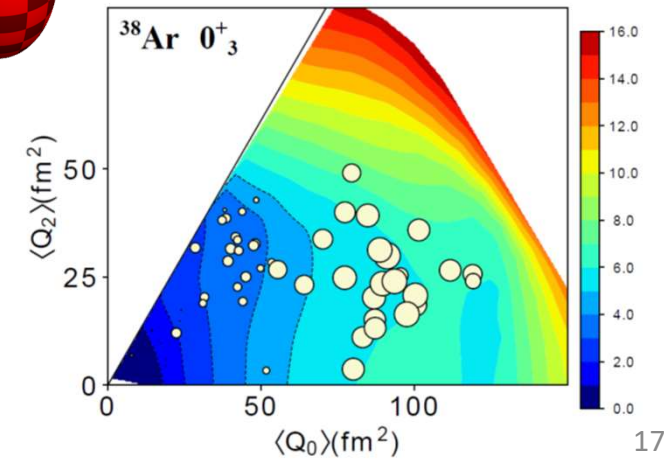
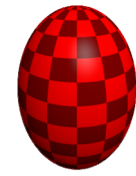
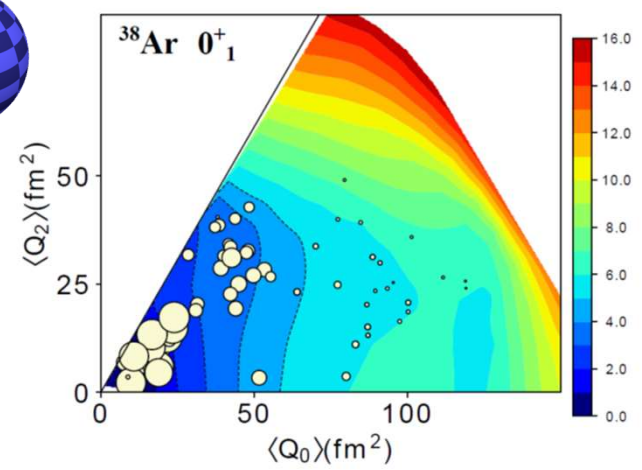
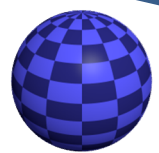
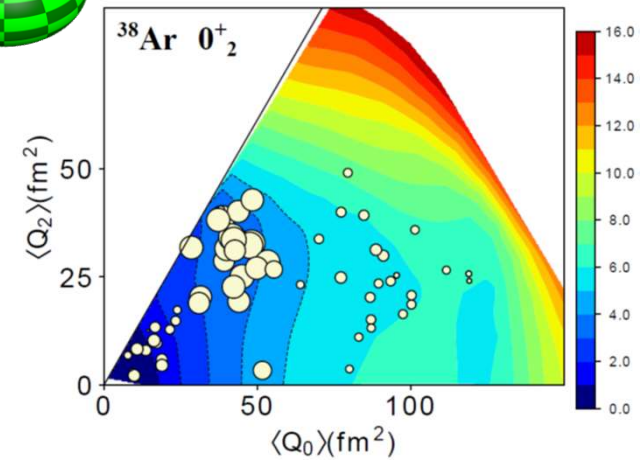
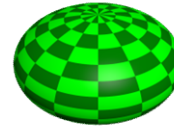
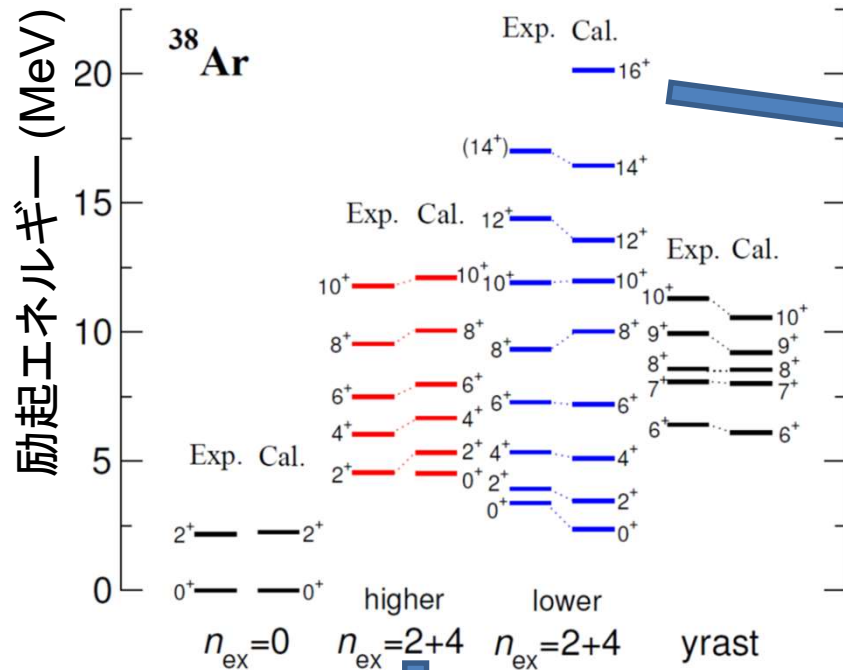


Heyde *et al.*, Rev. Mod. Phys. **83**, 1467 (2011)

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

高スピン状態の記述:カルシウム近傍原子核の超変形状態

T. Ichikawa, Y. Utsuno *et al.*



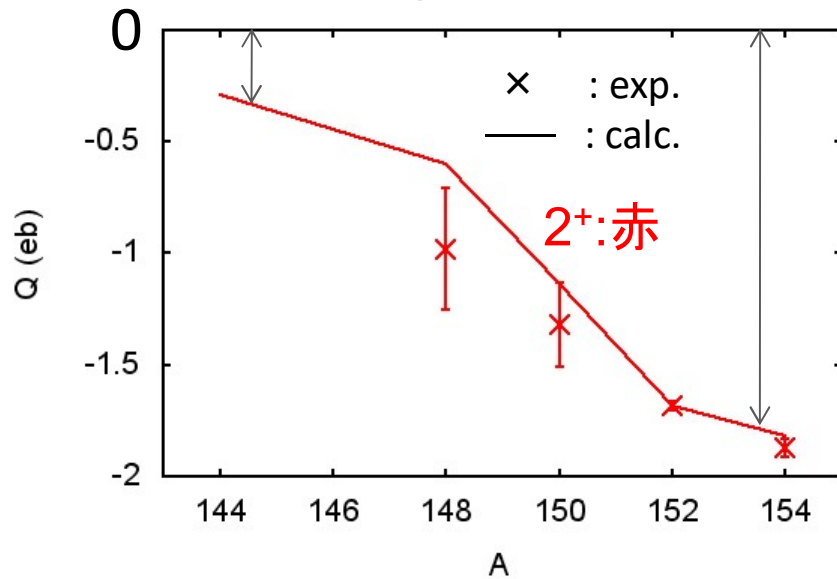
Sm 同位体 (Z=62)

Y. Tsunoda *et al.*

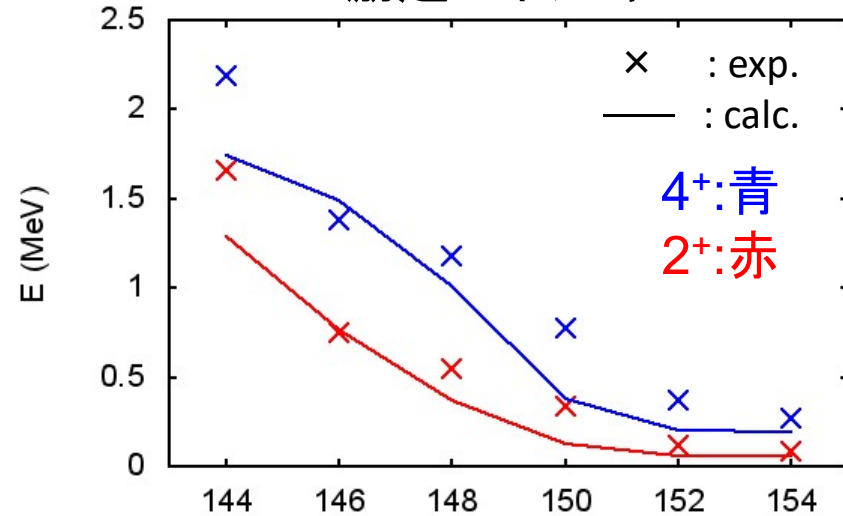
- ^{144}Sm (N=82で魔法数)で球形
- 中性子数が増えると大きく変形
- Zr同位体と比べて、球形から変形へ連続的に変化



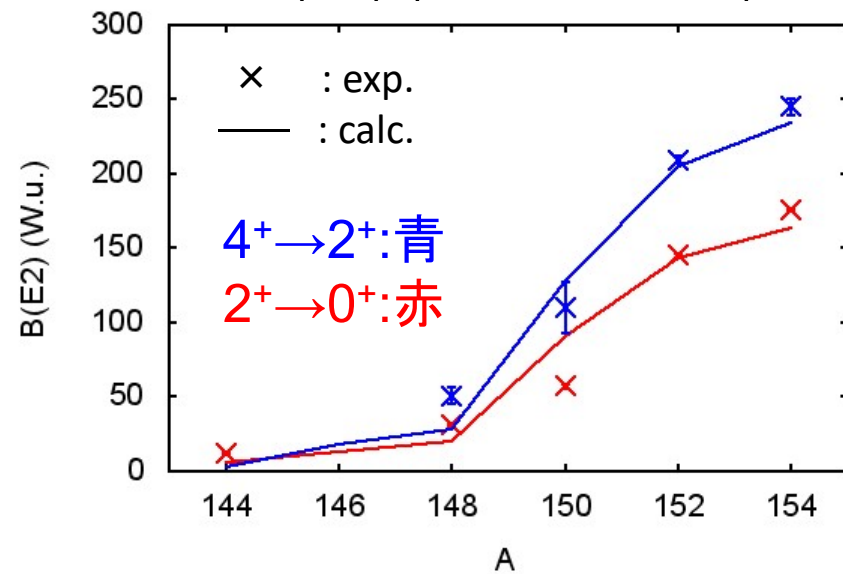
四重極モーメント



励起エネルギー

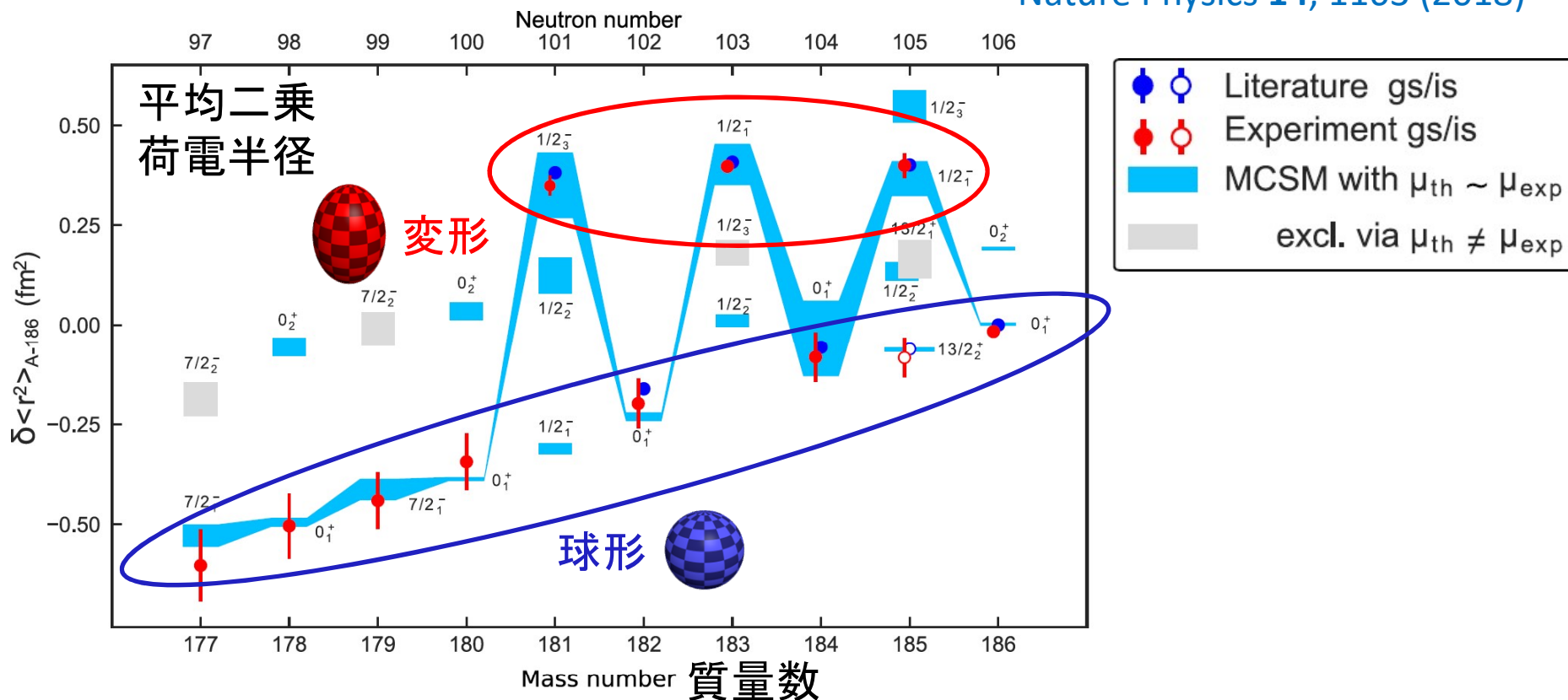


B(E2) (換算遷移確率)



Hg同位体 (Z=80)

B. A. Marsh, Y. Tsunoda *et al.*,
Nature Physics **14**, 1163 (2018)



- 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

Summary

- 量子多体計算手法としての殻模型計算の進歩
- 軽い核の第一原理計算は、系統的計算と炭素12のホイール状態研究にめど
- 「反転の島」領域の中性子過剰存在限界の検証、カルシウム同位体の超変形状態、ニッケル78、「形の共存」と相転移現象
- 質量数200領域の計算を開始、「富岳」にて本格計算・超重核へ
- 加速器実験グループとの連携を引き続き推進
- ニュートリノレス二重ベータ崩壊の核行列要素や原子核電気双極子モーメント、シッフモーメントの計算の高精度化を目指す