

モンテカルロ殻模型による 二重ベータ崩壊の 核行列要素の計算

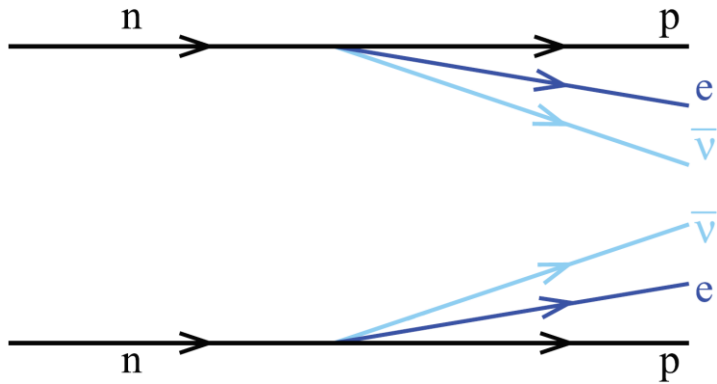
東京大学原子核科学研究センター(CNS)

角田佑介

共同研究者: 大塚孝治(理研仁科セ)
Javier Menéndez (バルセロナ大)
清水則孝(東大CNS)

二重ベータ崩壊

2νββ

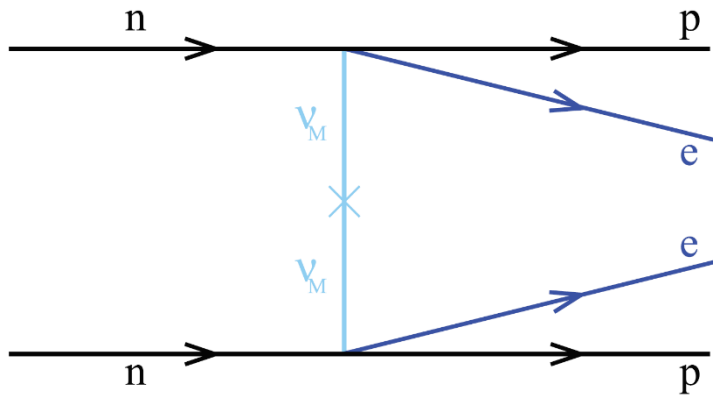


ニュートリノレス二重ベータ崩壊を議論する
半減期:

$$[T_{1/2}^{0\nu}(0_i^+ \rightarrow 0_f^+)]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \left(\frac{\langle m_{\beta\beta} \rangle}{m_e}\right)^2$$

↑ 位相因子
 ↑ 核行列要素 (NME)
 ↑ ニュートリノ有効質量

0νββ (ニュートリノレス)



closure近似を用いて核行列要素は

$$M^{0\nu} = \langle 0_f^+ | \hat{O}^{0\nu} | 0_i^+ \rangle = M_{\text{GT}}^{0\nu} - \frac{g_V^2}{g_A^2} M_{\text{F}}^{0\nu} + M_{\text{T}}^{0\nu}$$

Gamow-Teller
 Fermi
 Tensor

と表される

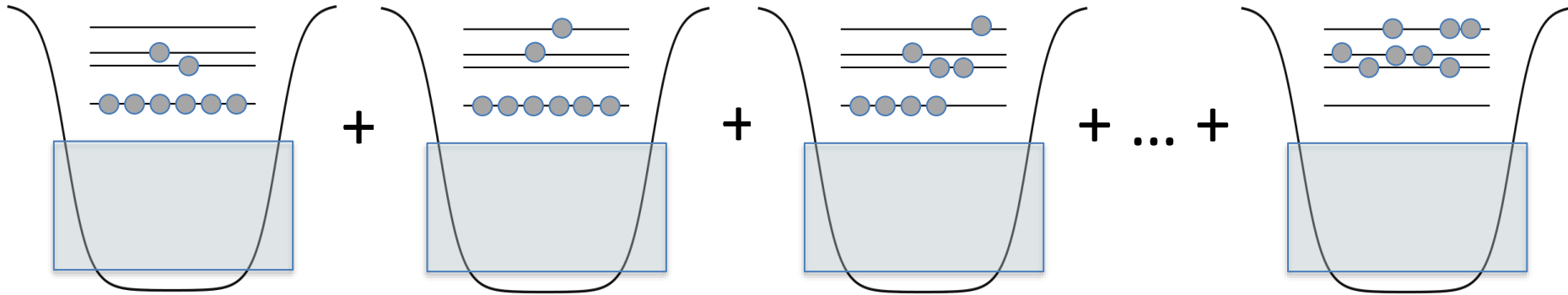
研究対象の原子核:

^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{124}Sn ,
 ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd など

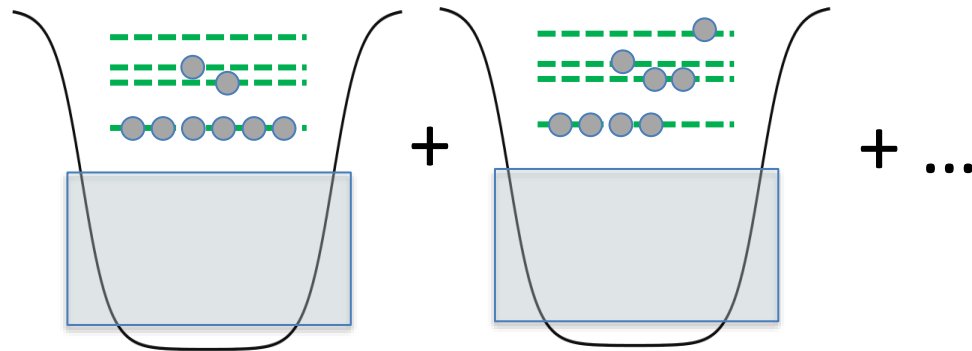
本研究では ^{76}Ge , ^{136}Xe を扱う

殻模型とモンテカルロ殻模型(MCSM)

殻模型計算では各一粒子軌道に様々な核子の詰め方をした配位を考え、それらの線形結合で波動関数を表す



MCSMでは一粒子軌道を様々なパラメータで線形変換し、それらの軌道に核子を詰めた少数(~100)の基底の線形結合で波動関数を表す



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

広い模型空間では
直接対角化は不可能

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

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

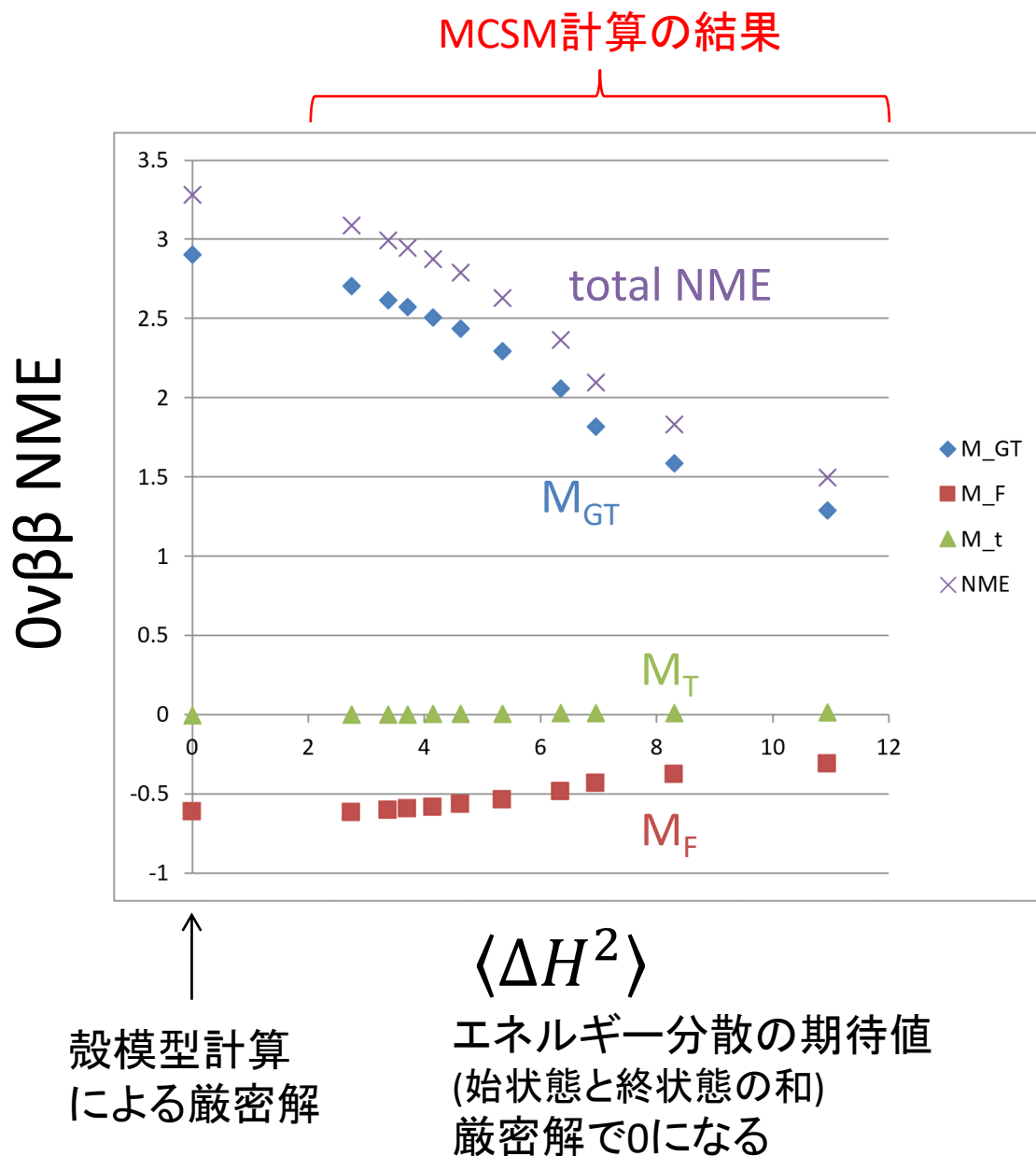
$$|\Psi_N\rangle = \sum_{n=1}^N \sum_{K=-J}^J f_{n,K}^{(N)} P_{MK}^{J\pi} |\psi_n\rangle$$

Slater行列式

角運動量・パリティ射影

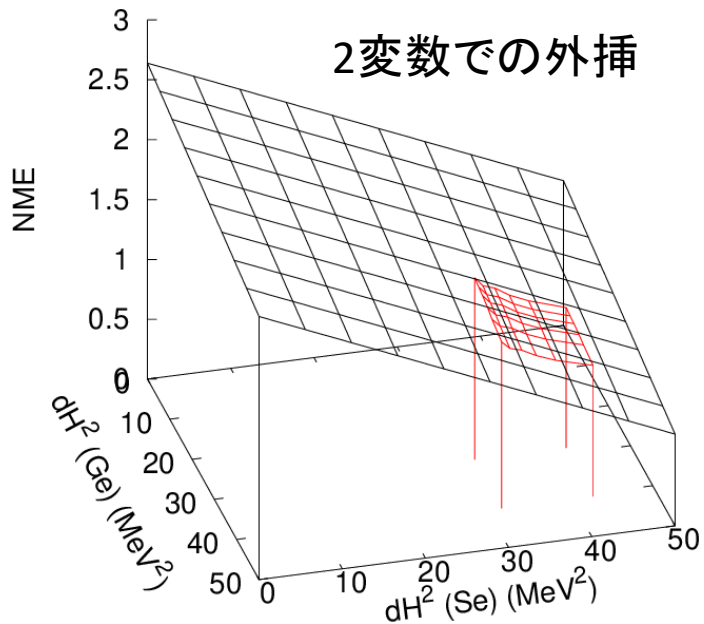
^{76}Ge (JUN45有効相互作用)

- JUN45有効相互作用は
模型空間が小さく
厳密解が計算できる
- MCSM計算の精度を
上げると
 $\langle \Delta H^2 \rangle$ が小さくなり
厳密解の値に近づく
- 精度の高い外挿は難しい

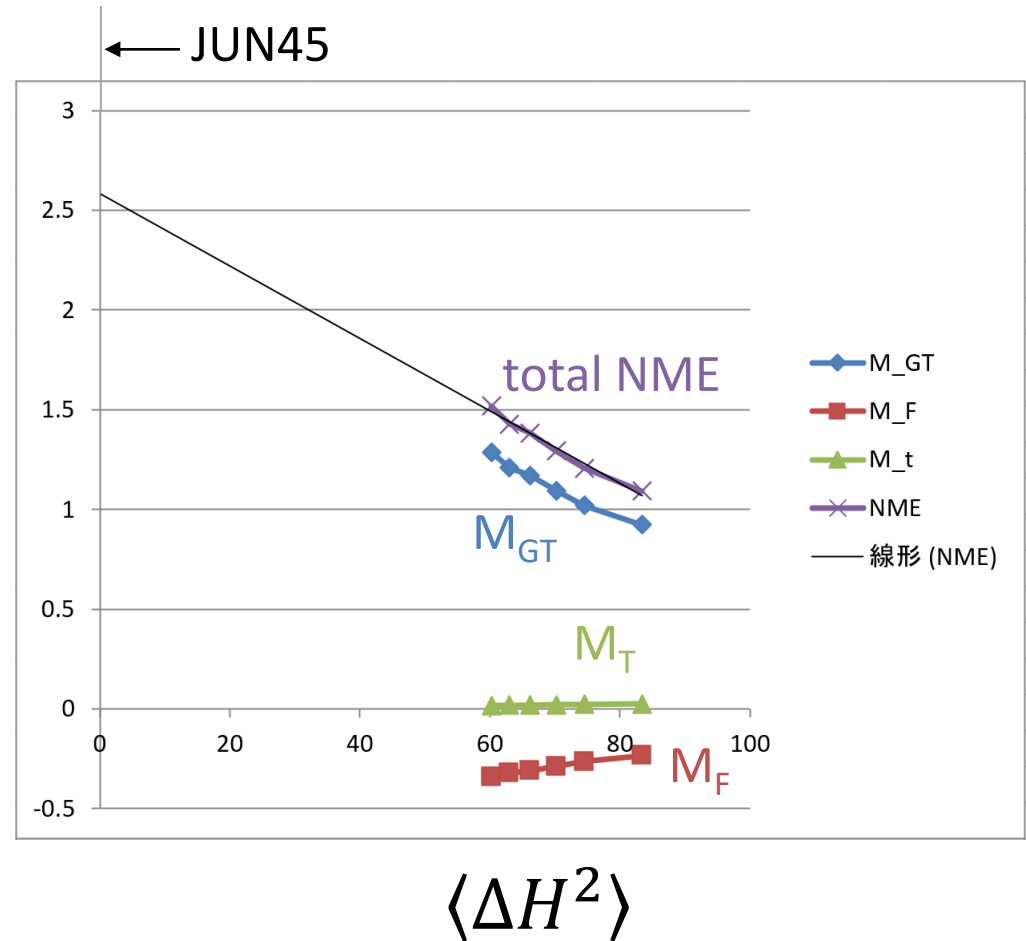


^{76}Ge (A3DA-m有効相互作用)

- より模型空間が大きく
厳密解は計算できない
- 精度の高い外挿は難しい
- 2変数で外挿しても
同程度の値
- A3DA-m有効相互作用
YT *et al.*, PRC **89**, 031301 (2014)



$0\nu\beta\beta$ NME



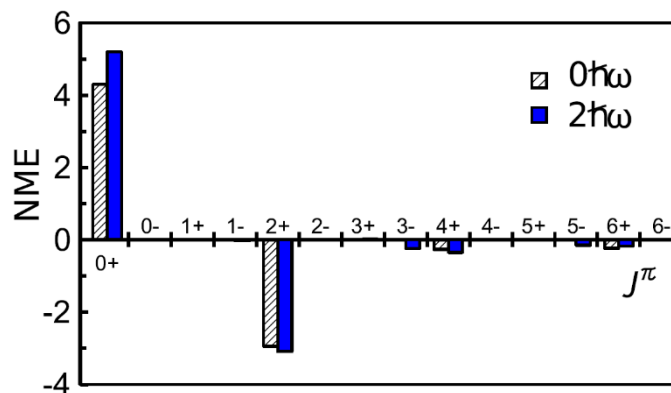
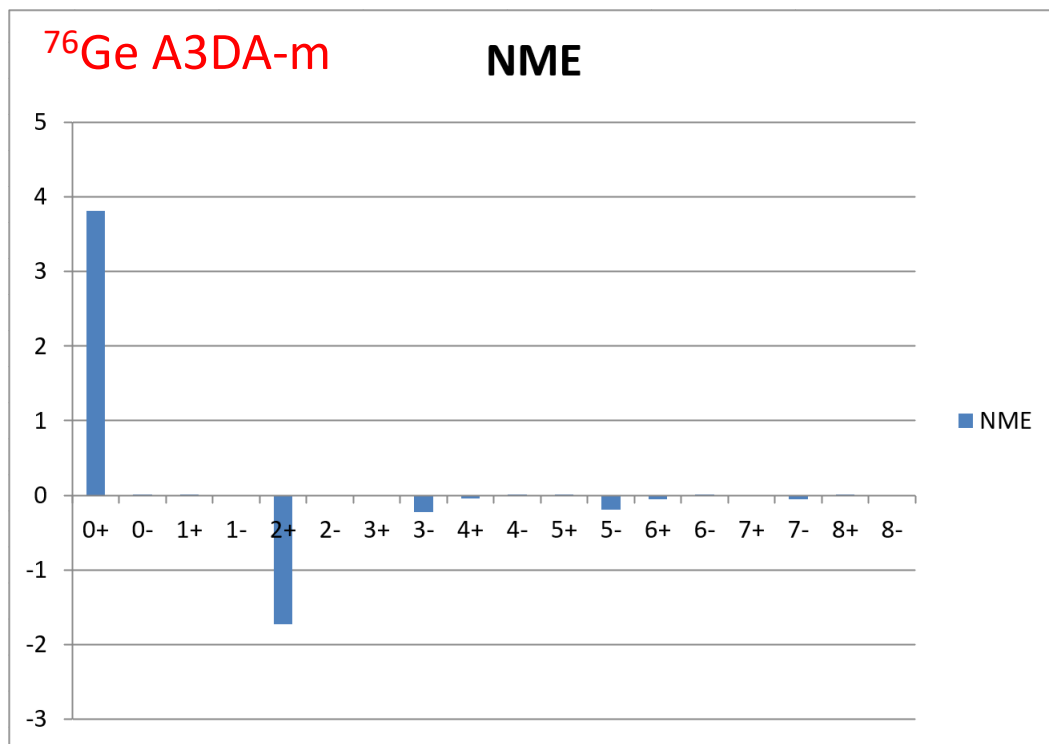
角運動量・パリティによるNMEの分解

- NMEは2体行列要素の和として表される

$$M^{0\nu} = \sum_J \langle 0_f^+ | \sum_{i \leq j, k \leq l} M_{ij,kl}^J [(\hat{a}_i^\dagger \hat{a}_j^\dagger)^J (\hat{a}_k \hat{a}_l)^J] | 0_i^+ \rangle$$

protons neutrons

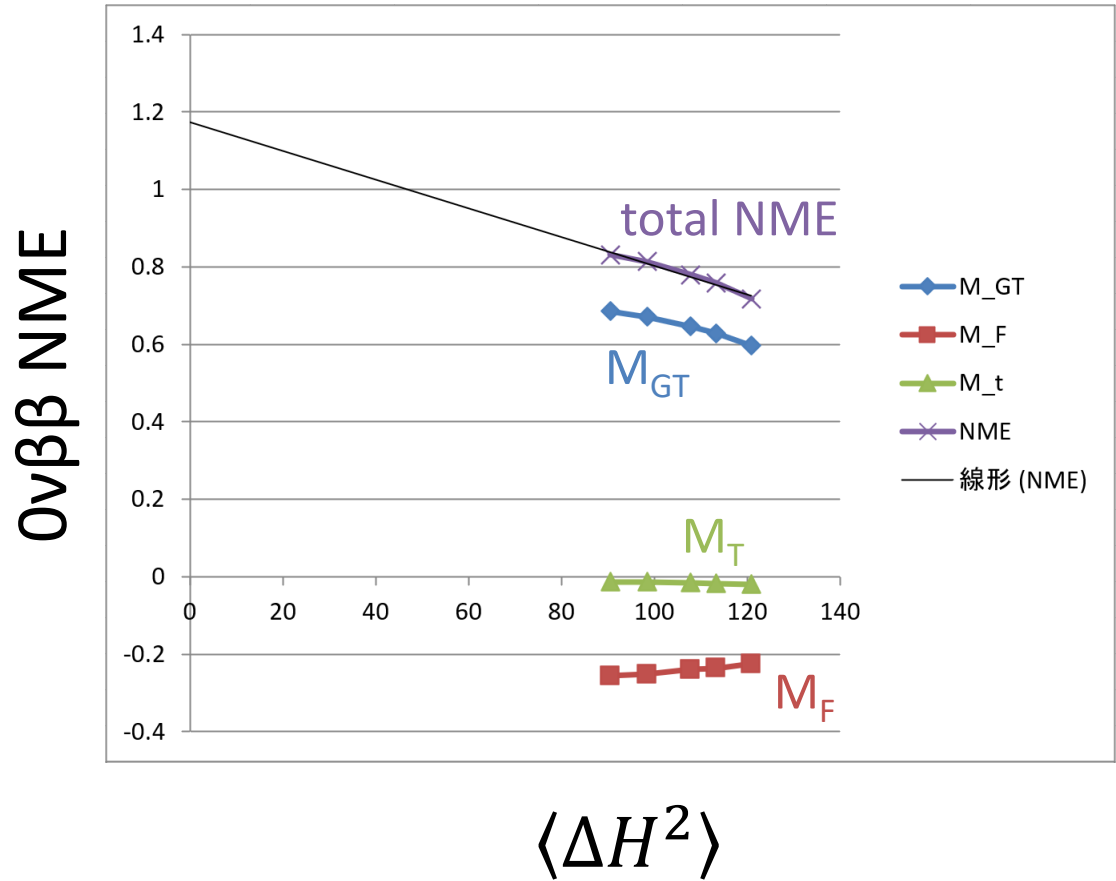
- 崩壊する中性子2個の角運動量・パリティでNMEを分解する
- 0^+ の寄与が大きく、主に 2^+ によりcancellationが起こる
- 他の計算でも同様にcancellationが起こる



⁴⁸Ca
Iwata *et al.*,
PRL **116**, 112502 (2016)

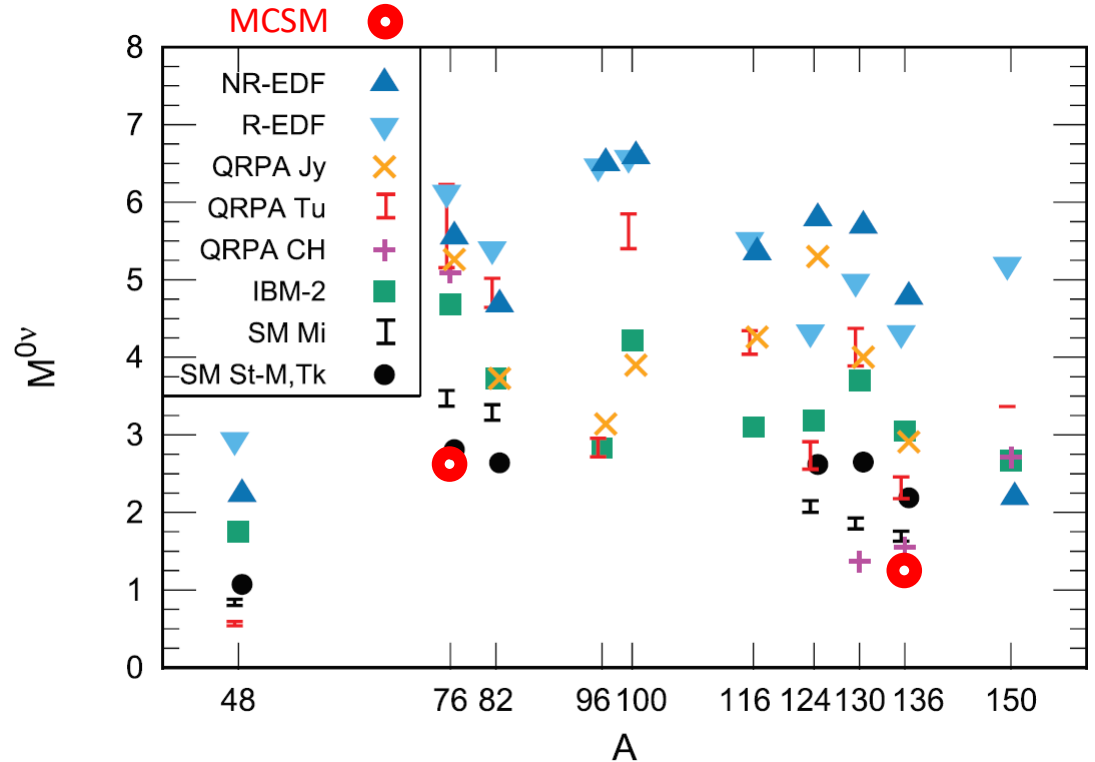
^{136}Xe

- Togashi *et al.*, PRL **121**, 062501 (2018)
でSnの計算に用いた
有効相互作用による計算



他の計算との比較

- 様々な手法による核行列要素の計算を比較
- 核行列要素の計算値には大きなばらつきがある
- 密度汎関数法(EDF)は値が大きい傾向がある
- 殻模型計算(SM)は値が小さい傾向がある
- MCSMによる核行列要素の計算値の精度はまだあまり良くないが、殻模型計算と同様に小さい値となっている



Engel & Menéndez, Rep. Prog. Phys. **80**, 046301 (2017)

Summary

- モンテカルロ殻模型により ^{76}Ge , ^{136}Xe のニュートリノレス二重ベータ崩壊の核行列要素の計算を行った
- モンテカルロ殻模型による核行列要素の計算値は殻模型計算と同様に小さめの値となっている
- 他の計算と同様に、核行列要素の 0^+ と 2^+ の成分のcancellationが起きている
- 核行列要素の計算値の収束には、通常の核構造計算と比べて高い精度の波動関数が必要であり、多くの計算資源が必要となる
- ^{150}Nd についても計算を進めている