

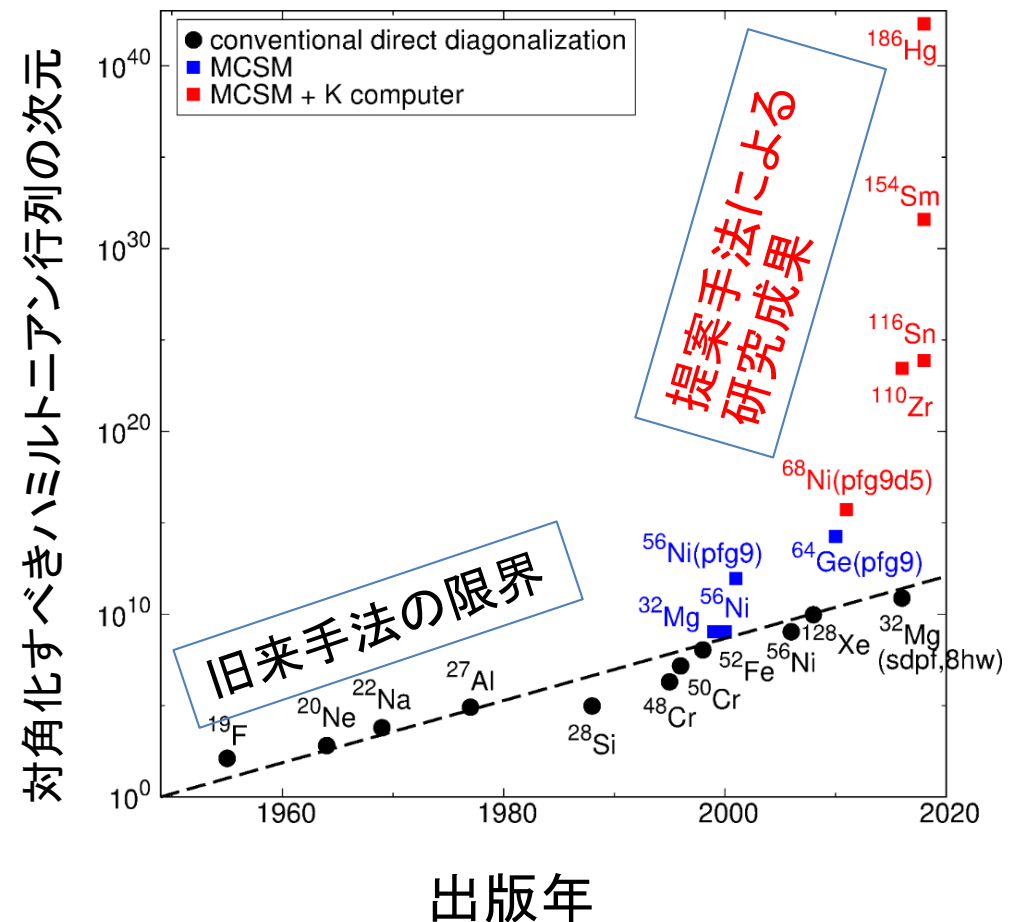
成果創出加速プログラム
「シミュレーションで探る基礎科学：
素粒子の基本法則から元素の生成まで」
「富岳」を用いた大規模量子多体計算による
核構造研究：

- ①ネオジウム150のニュートリノレス二重ベータ崩壊核行列要素
- ② 第一原理計算による炭素12のホイール状態

阿部喬(理研仁科)、大塚孝治(理研仁科)、
清水則孝(東大CNS)、角田佑介(東大CNS)、
吉田亨(RIST)

原子核構造計算とモンテカルロ殻模型、その発展

- 原子核構造計算: 陽子と中性子を自由度として原子核の波動関数を大規模量子多体計算によって求める。
- 大次元のハミルトニアン行列の計算手法として、モンテカルロ殻模型(MCSM)と、その発展である準粒子真空殻模型(QVSM)を開発、従来の限界を超えた大規模計算を行っている。

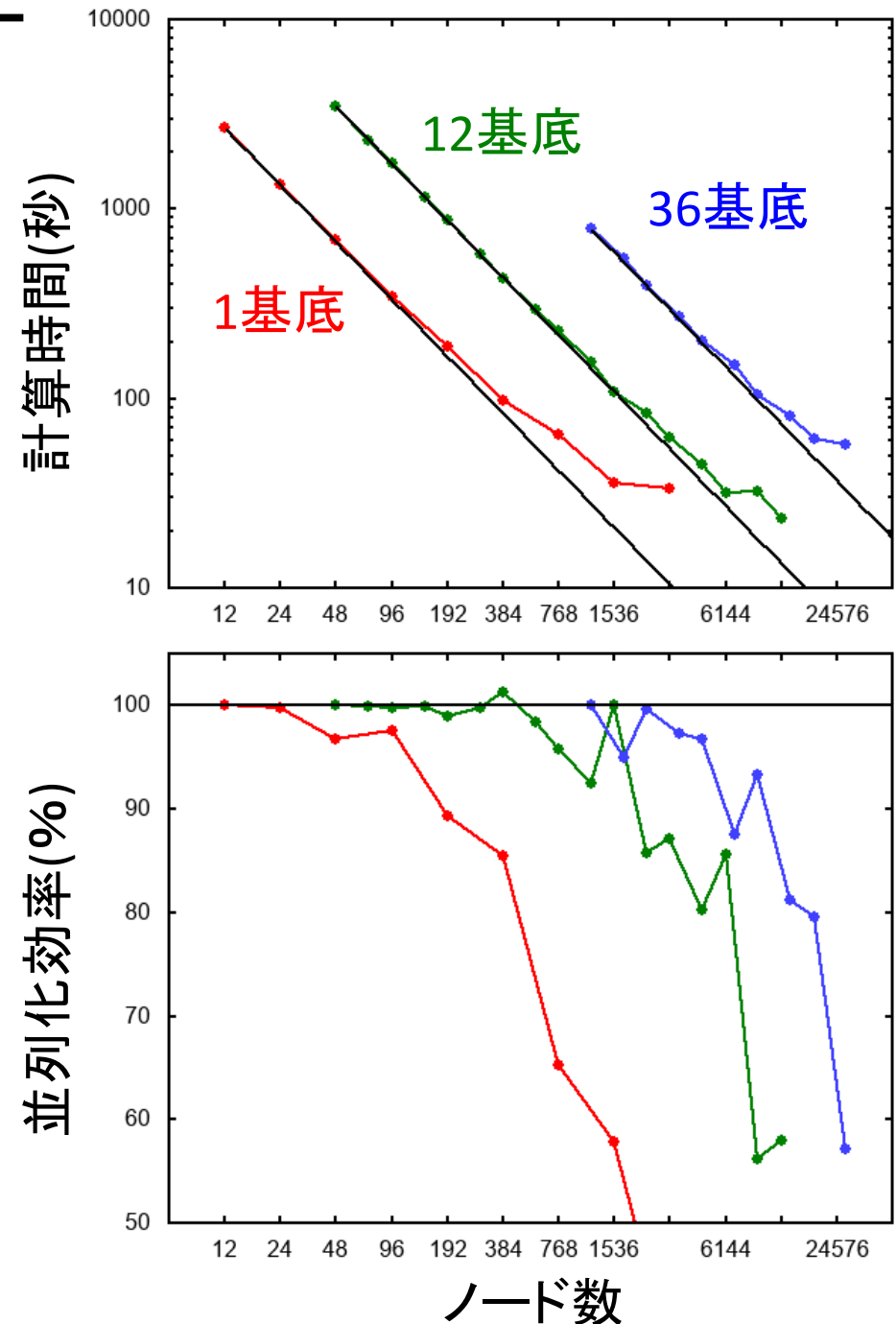


QVSM計算コードの開発と 富岳での並列性能

- 準粒子真空殻模型(QVSM)という新たな計算手法を開発し ^{150}Nd の二重ベータ崩壊の核行列要素を計算
- 初期化を除いた計算時間のストロングスケールリングを測定
- 問題規模(基底数)が大きい場合、9216ノード利用で90%程度と、高い並列化効率を達成

富岳共用前評価環境における評価結果は、スーパーコンピュータ『富岳』の共用開始時の性能・電力等の結果を保証するものではありません。

ストロングスケールリング

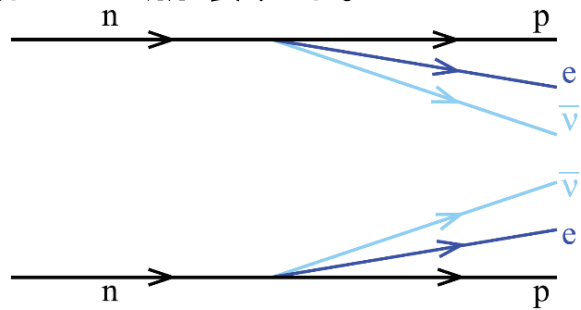


①ネオジウム150のニュートリノレス二重ベータ崩壊核行列要素

ニュートリノレス二重ベータ崩壊とは

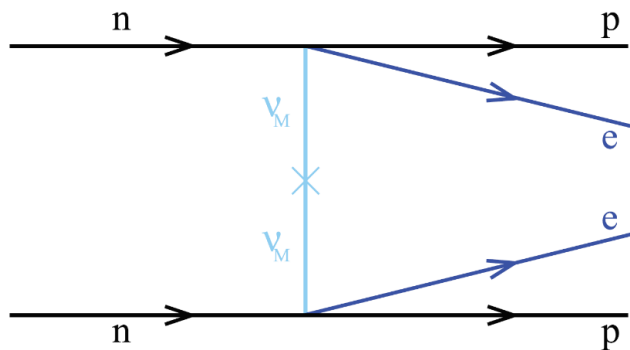
通常の二重ベータ崩壊 ($2\nu\beta\beta$)

限られた特別な原子核は、
2つのニュートリノと2つの電子を
放出して崩壊する。



ニュートリノレス 二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$)

ニュートリノを放出しない特別なモード
存在は未確認。



ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験が
世界中で行われているが、いまだ発見され
ていない。半減期が計測されたとすると、そ
の値からニュートリノ有効質量を求めるには
、原子核構造計算によって核行列要素と呼
ばれる物理量を精密に求める必要がある。

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

ニュートリノ粒子の性質を明らかにし、標準
模型を超える物理探索に関する
学際的にも重要な研究テーマ

探索実験の対象となっている原子核:

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

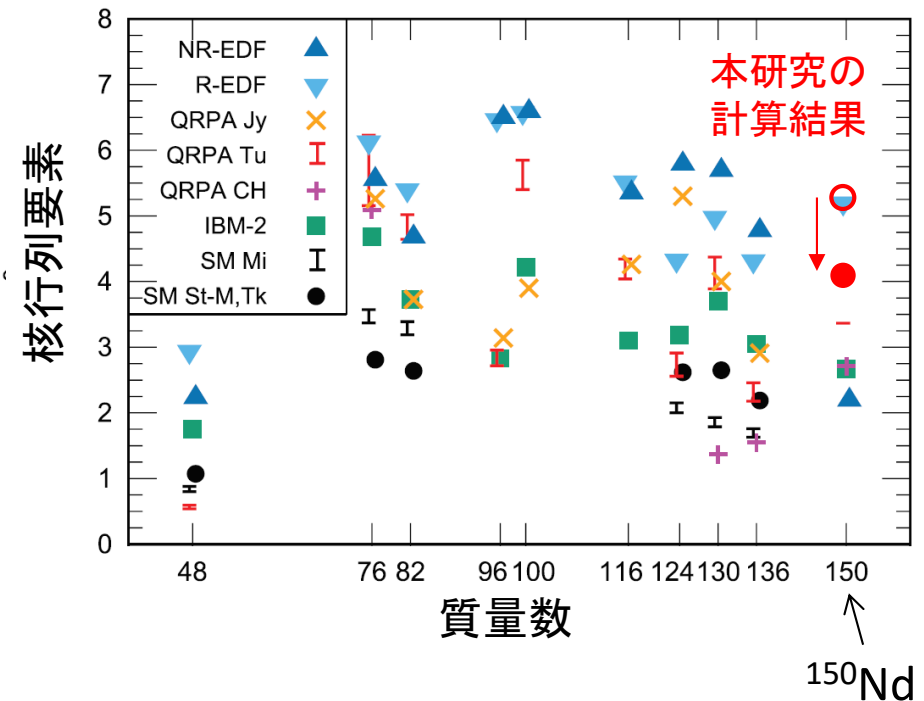
^{150}Nd の二重ベータ崩壊の核行列要素の計算

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

半減期 位相因子 **核行列要素 (NME)** ニュートリノ有効質量

- 核行列要素は、さまざまな計算手法によって求められているが、不定性が大きく結論が出ていない。(右図参照)
- 本研究と富岳の利用によって、はじめて原子核殻模型計算に基づいた ^{150}Nd の核行列要素の計算が可能になった。
- で示した小規模のテスト計算に比べて、
●で示した富岳による大規模の計算ではNMEが小さくなる (予備的な計算結果)

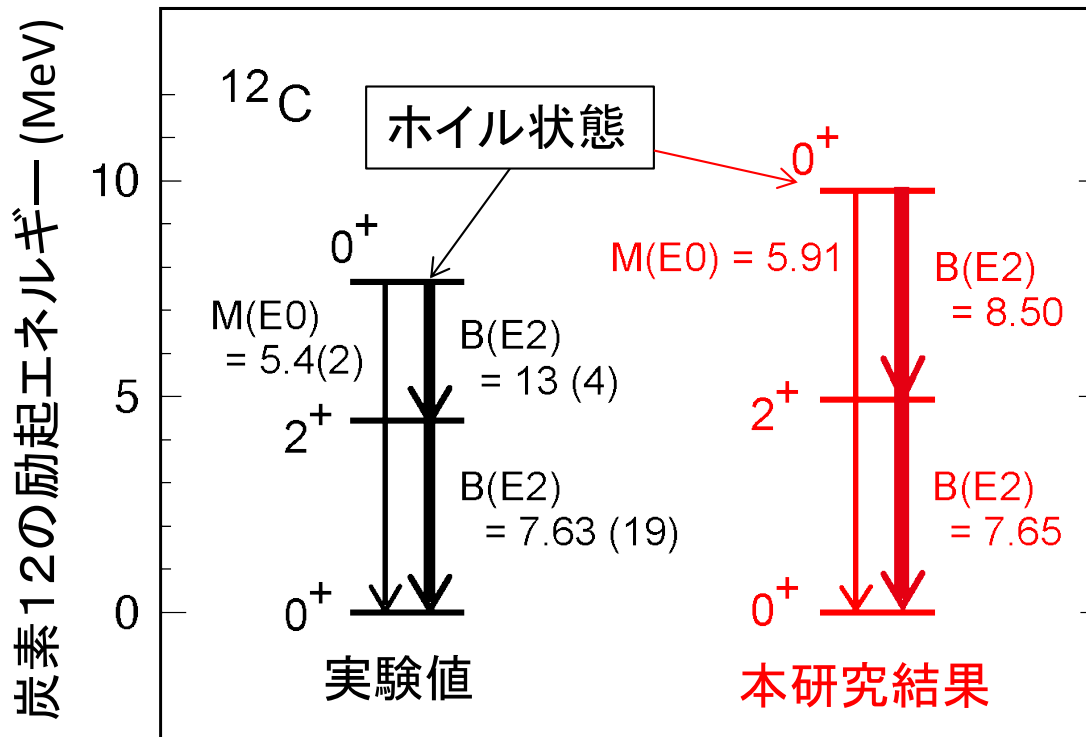
様々な理論計算による核行列要素



② 炭素12原子核のホイル状態 の第一原理計算

第一原理計算による炭素12原子核のホイル状態の解明

- ホイル状態: 炭素12(6陽子・6中性子)の共鳴状態の一つで、 α クラスター(2陽子・2中性子からなる塊)が3つ集まり、ひと塊になっている状態である。未解明な点が多い。
- 恒星内の元素合成において鍵となるトリプルアルファ反応の理解に重要

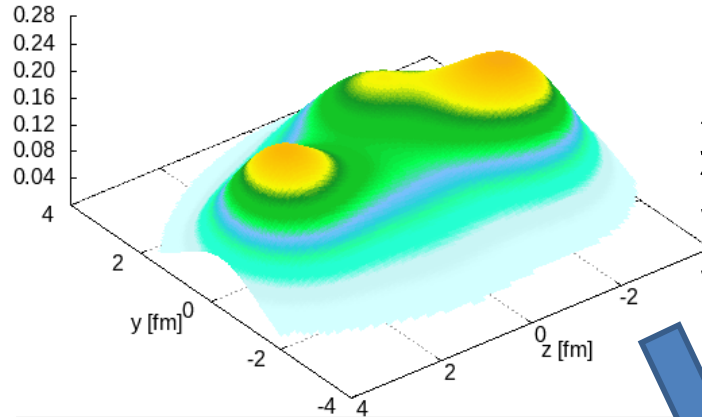


$B(E2)$, $M(E0)$ は各状態間の換算遷移確率。(単位は各々 efm^2 , $e^2\text{fm}^4$)
第一原理計算による本研究結果は良く実験を再現している。

富岳を用いた計算によって得られた炭素12の励起スペクトル

第一原理計算による炭素12原子核の基底状態・ホイル状態の密度分布(予備的な計算結果)

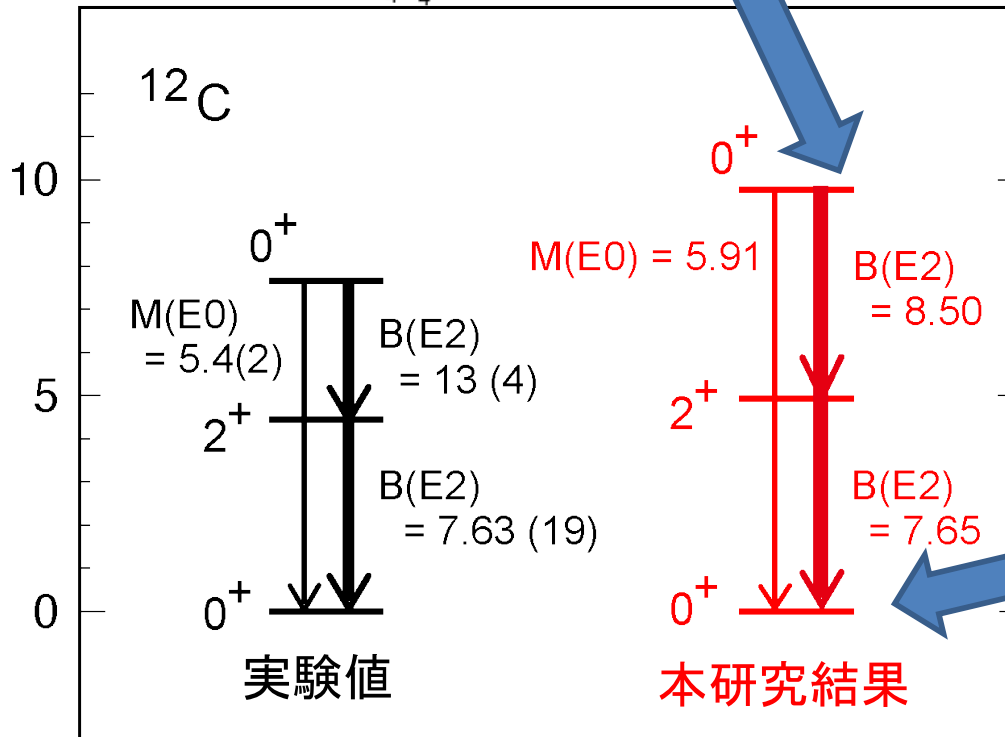
ホイル状態の密度分布



原子核形状が単純な球形とはなっておらず、基底状態にくらべて、 α クラスター間の距離が広がっている

yz平面による断面図で縦軸は核子密度を表す。

炭素12の励起エネルギー (MeV)



基底状態の密度分布

