

生成座標法による
二重ベータ崩壊原子核行列要素の評価
(A01 公募研究)

日野原 伸生

筑波大学計算科学研究センター



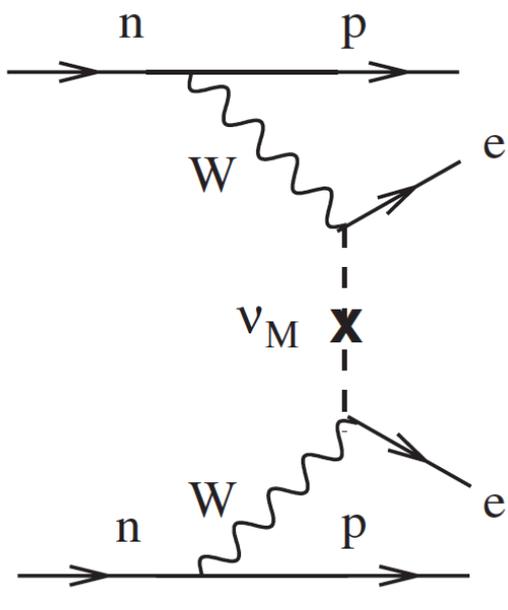
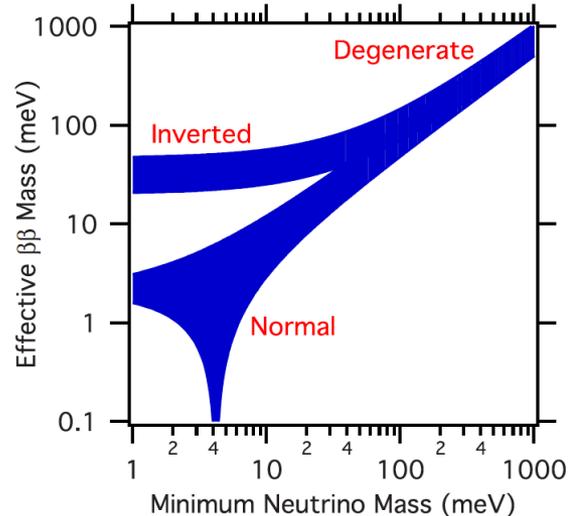
二重ベータ崩壊原子核行列要素

Avignone et al. Rev. Mod. Phys. **80**. 481. (2008)

ニュートリノレス二重ベータ崩壊の半減期

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G_{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

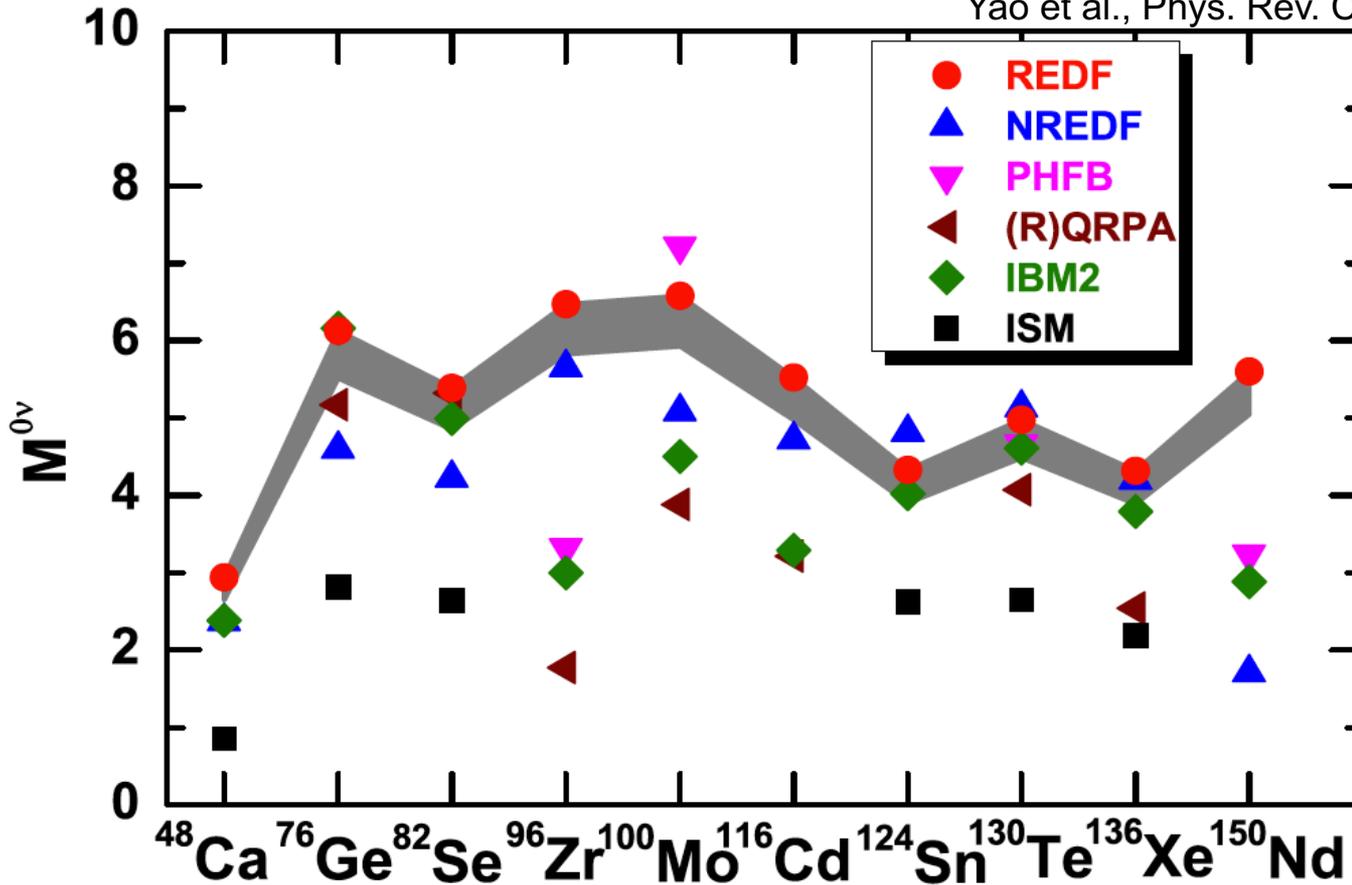
$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1}$: $0\nu\beta\beta$ 半減期 (実験で測定)
 $G_{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z)$: 位相因子
 $|M_{0\nu}|^2$: 電子ニュートリノ有効質量
 $\langle m_{\beta\beta} \rangle^2$: 電子ニュートリノ有効質量



ニュートリノの有効質量決定のためには原子核行列要素の正確な評価が不可欠

原子核行列要素の理論計算の現状

Yao et al., Phys. Rev. C **91**, 024316 (2015)



- REDF: 相対論的密度汎関数(GCM)
- NREDF: 非相対論的密度汎関数(GCM)
- PHFB: 射影Hartree-Fock-Bogoliubov
- (R)QRPA: 準粒子乱雑位相近似
- IBM2: 相互作用するボソン模型
- ISM: 殻模型

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G_{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

研究グループ、理論によって値がバラバラ(2~3倍のずれ)

原子核行列要素の値が異なる理由

研究グループによって行列要素の値が異なる理由は？

- 二重ベータ崩壊演算子の違い
- 量子多体理論(理論模型)による違い
- 一粒子模型空間の違い
- 核子間相互作用の違い

$$M_{0\nu} \approx M_{0\nu}^{\text{GT}} - \frac{g_A^2}{g_V^2} M_{0\nu}^{\text{F}} + M_{0\nu}^{\text{T}}$$

- Closure approximation: 10~15%程度の誤差
- テンソル行列要素: 多くて10%程度の寄与
- 二核子カレント
- g_A のクエンチング
- 短距離相関(SRC)

原子核行列要素の値が異なる理由

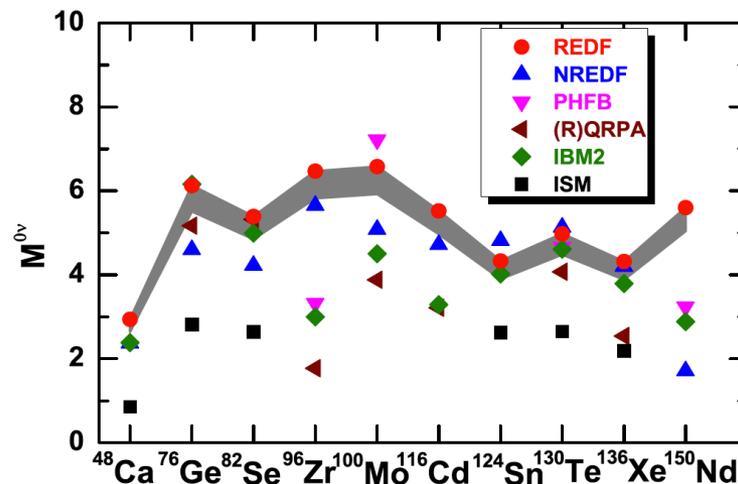
研究グループによって行列要素の値が異なる理由は？

- 二重ベータ崩壊演算子の違い
- 量子多体理論(理論模型)による違い
- 一粒子模型空間の違い
- 核子間相互作用の違い

殻模型(ISM) 周辺の実験データを系統的に再現する精密な有効相互作用
完全な多体相関
狭い一粒子模型空間 → 二重ベータ崩壊演算子に繰り込みが必要？
原子核行列要素は小さめの傾向

GCM
(REDF/NREDF) 集団相関を選択的に取り込む(四重極相関)
広い一粒子模型空間
相転移で問題が起きない
原子核行列要素は大きめの傾向

QRPA 相関を二準粒子励起の重ね合わせに限定
広い一粒子模型空間
相転移近傍で計算が破綻



原子核行列要素の値が異なる理由

研究グループによって行列要素の値が異なる理由は？

- 二重ベータ崩壊演算子の違い
- 量子多体理論(理論模型)よる違い
- 一粒子模型空間の違い
- **核子間相互作用の違い**

核子間相互作用

模型空間のサイズに合わせて決定

中性子一陽子対相関

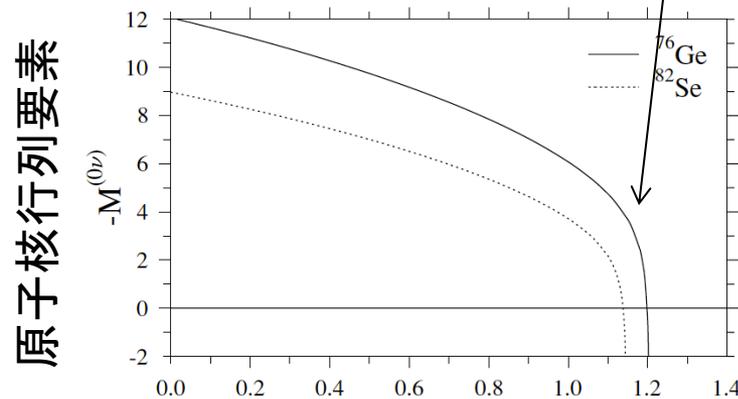
QRPA:

中性子一陽子対相関をEDFに導入

GCM(REDF/REDF):

中性子一陽子対相関をEDFに入れていない

相転移で破綻



QRPAでは中性子一陽子対相関は行列要素を抑制
中性子一陽子対相関の原子核構造への影響は限定的
結合定数はよくわかっていない

中性子一陽子対相関結合定数の強度
Kortelainen and Suhonen
Phys. Rev. C **75**, 051303(R) (2007)

研究の目的

研究グループによって行列要素の値が異なる理由は？

- 二重ベータ崩壊演算子の違い
- 量子多体理論(理論模型)よる違い
- 一粒子模型空間の違い
- 核子間相互作用の違い

他の条件をできるだけ同一にして、
原子核行列要素の値のばらつきの原因を明らかにする

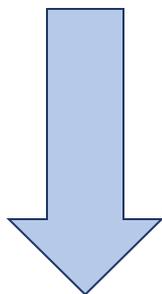
以前の成果：生成座標法に中性子-陽子対相関を導入

従来の生成座標法

NH and J. Engel, Phys. Rev. C **90**, 031301(R) (2014)

(Generator Coordinate Method: GCM)

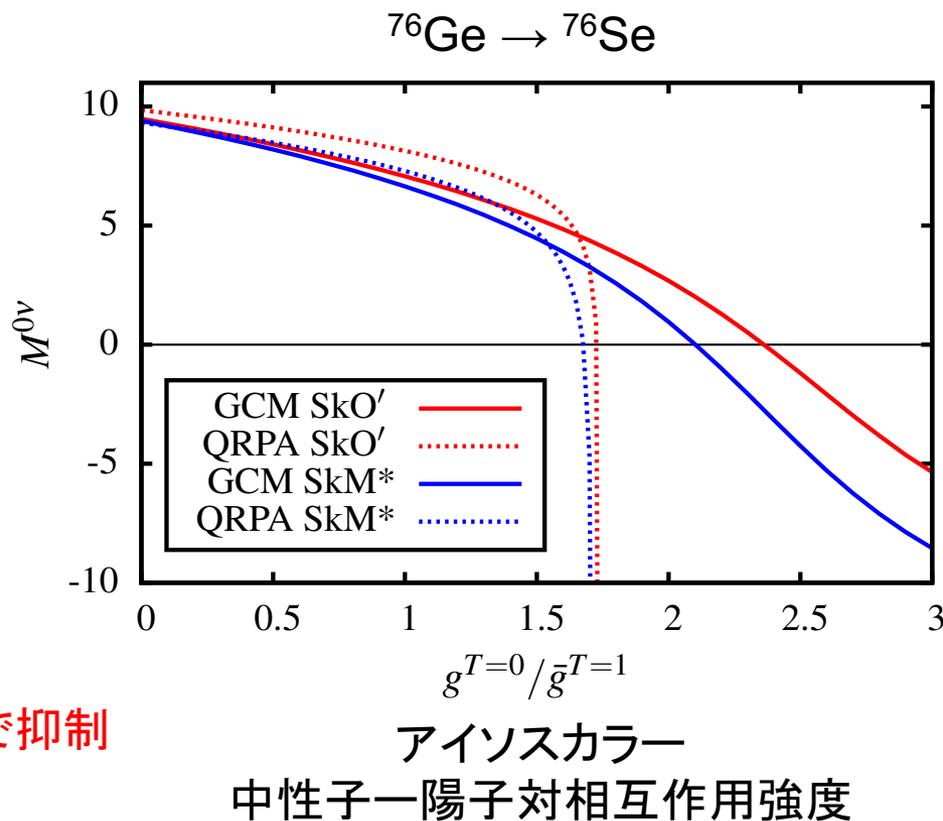
- ❑ 集団相関を選択的に取り込む(四重極相関など)
- ❑ 広い模型空間
- ❑ 中性子-陽子対相関が入っていない
- ❑ 相転移で問題が起きない
- ❑ 原子核行列要素は大きめになる傾向



pnGCM

- ❑ 集団相関を選択的に取り込む
- ❑ (四重極相関、**中性子-陽子対振幅**)
- ❑ 広い模型空間
- ❑ 相転移で問題が起きない
- ❑ **原子核行列要素は中性子-陽子対相関で抑制**

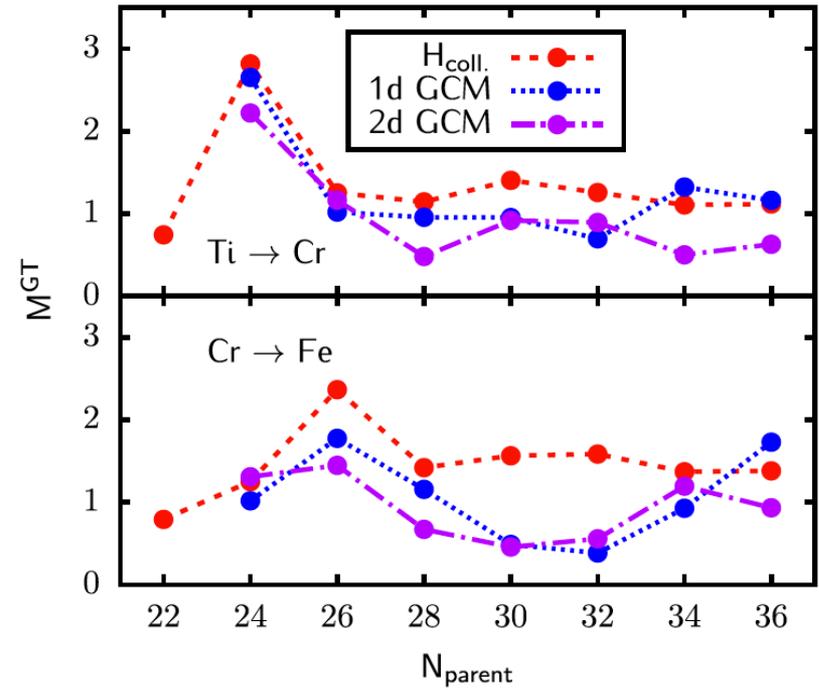
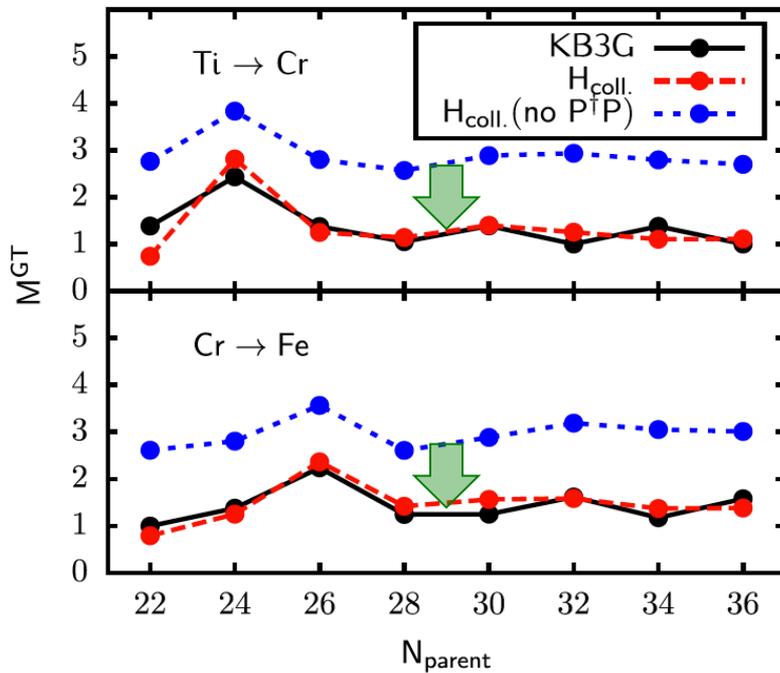
原子核行列要素



以前の成果：ISMとのpnGCMの行列要素の比較(pf殻)

Menéndez, NH et al., Phys. Rev. C**93**, 014305 (2016)

- 殻模型(ISM)とpnGCM、同一相互作用・一粒子模型空間を用いた比較
- pf殻模型空間：殻模型の厳密対角化が可能
- 相互作用：Dufour and Zukerの処方で分離型集団HamiltonianをKB3Gから導出
Dufour and Zuker, Phys. Rev. C**54**, 1641 (1996)
- GCM: 中性子一陽子対振幅のみ(1dGCM)、十四重極変形(2d GCM)

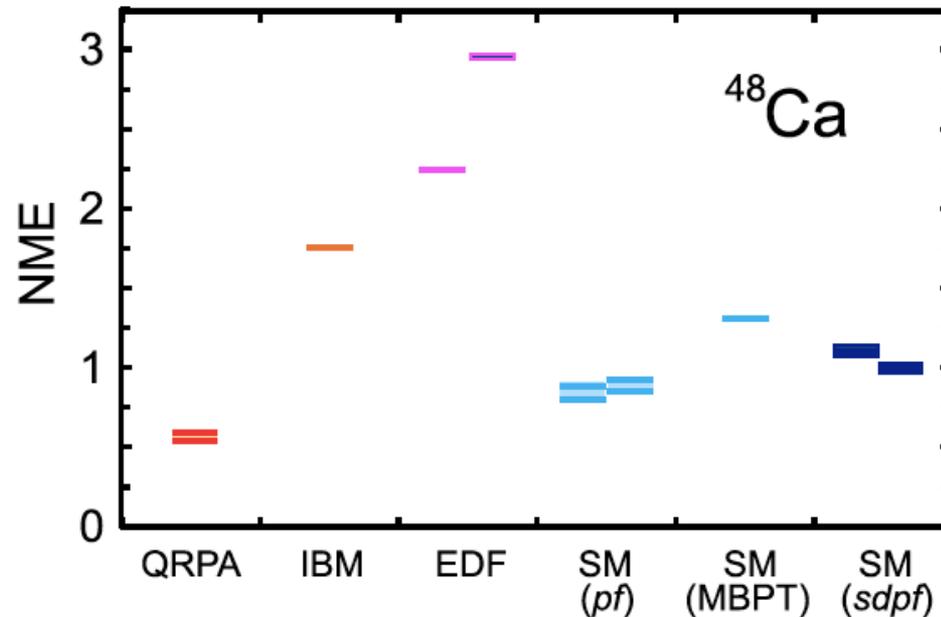


- 殻模型相互作用に中性子一陽子対相関が含まれており原子核行列要素は抑制
- pnGCMはISM厳密解の良い近似 → 中重核でISMの代用

2017年度計画： ^{48}Ca の分析

^{48}Ca 行列要素の大規模殻模型計算 (Iwata et al. Phys. Rev. Lett. **116**, 112502 (2016))

EDF(密度汎関数を使ったGCM)はISMの2~3倍の値



研究計画

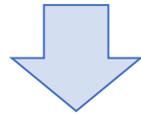
- 同様の相互作用を用いて異なった理論模型で計算
 - 殻模型相互作用から導出した分離型相互作用でpnGCM計算

行列要素の値はISM, GCM(EDF)のどちらに近いかな？

- 中性子-陽子対相関のみ切った場合は？
- 分離型相互作用でQRPA計算

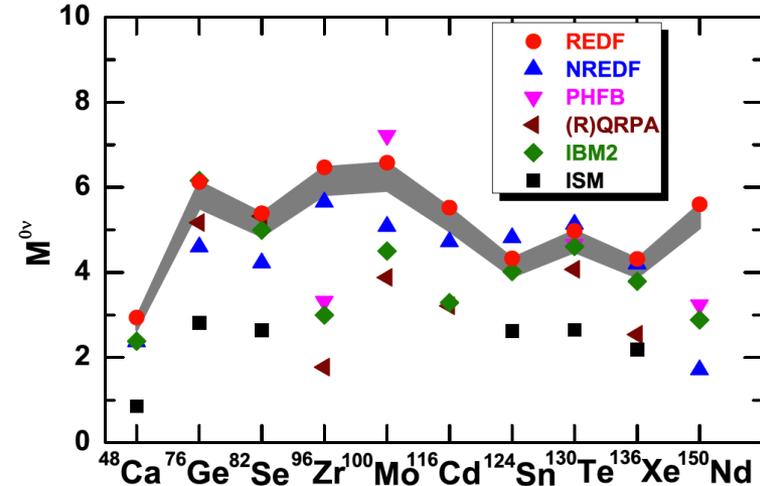
2018年度計画：中重核(^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd など)

質量数とともに中性子・陽子の自由度が飛躍的に増大



十分なサイズの模型空間を用いたISM計算は不可能
GCM(EDF)の行列要素はQRPAより大きい傾向

QRPA: ^{150}Nd : Terasaki, Phys. Rev. C **91**, 034318 (2015)



研究計画

- 同一の相互作用を用いてpnGCM計算とQRPA計算の行列要素を比較
 - 中性子一陽子対相関の効果？結合定数依存性
 - 四重極変形の効果(^{150}Nd)？
- pnGCM計算で模型空間のサイズを変更
 - pnGCMがISMに近いと仮定して、模型空間サイズ依存性を分析

まとめ

- 原子核行列要素は研究グループによって2~3倍程度のばらつき
- 原因と考えられるのは
 - 二重ベータ崩壊の演算子
 - 理論模型
 - 一粒子模型空間
 - 核子間相互作用(中性子-陽子対相関) などの違い
- 中性子-陽子対相関を取り入れた生成座標法(pnGCM)を用いて、条件を一つずつ変えて計算を比較、ばらつきの原因を解明を目的とする
- ^{48}Ca の分析 → 中重核(^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd)の分析へ

研究協力者

Jonathan Engel (Univ. North Carolina, Chapel Hill, USA)

使用計算機

COMA(PACS-IX), 筑波大学計算科学研究センター
学際共同利用重点課題推進/HPCI一般課題、計800,000コア時間(2017年度)

