

$0\nu\beta\beta$ 崩壊半減期の原子核構造計算の現状と展望

日野原 伸生

筑波大学計算科学研究センター



ニュートリノレス二重β崩壊

- ニュートリノはマヨラナ粒子か？
- ニュートリノの質量階層は？



ニュートリノレス二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$)
(light-neutrino exchange)

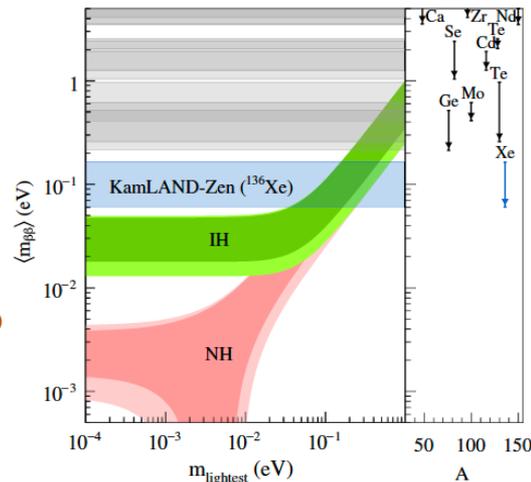
$0\nu\beta\beta$ 半減期

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

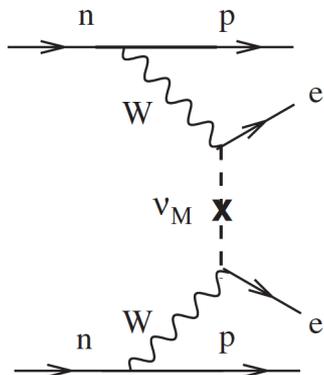
位相空間因子

原子核行列要素 (NME)

電子ニュートリノの有効質量

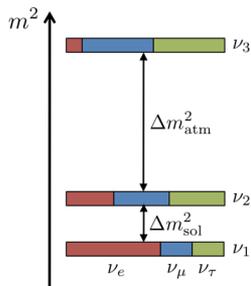


Gando et al., Phys. Rev. Lett. 117, 082503 (2016)

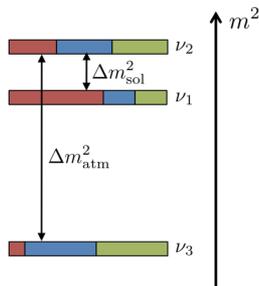


Avignone et al., Rev. Mod. Phys. 80, 481 (2008)

normal hierarchy (NH)



inverted hierarchy (IH)



JUNO collaboration

測定される半減期からニュートリノの質量を出すためには
位相空間因子と原子核行列要素の理論値が必要

位相空間因子

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

位相空間因子

- 位相空間因子: 放出電子が終状態核のクーロン場内で位相空間
- 複数グループによる計算がおおよそ一致

TABLE 2 | PSF for $0\nu\beta^-\beta^-$ decays to final g.s.

Nucleus	$Q_{g.s.}^{\beta^-\beta^-}$ (MeV)	$G_{0\nu}^{\beta^-\beta^-}$ (g.s.) (10^{-15} yr^{-1})					
		[39]	[11]	[3, 35, 36]	[5]	[47]	[46]
^{48}Ca	4.267	24.65	24.81	26.1	26.0	24.83	24.55
^{76}Ge	2.039	2.372	2.363	2.62	2.55	2.37	2.28
^{82}Se	2.996	10.14	10.16	11.4	11.1	10.18	9.96
^{96}Zr	3.349	20.48	20.58		23.1	20.62	20.45
^{100}Mo	3.034	15.84	15.92	18.7	45.6	15.95	15.74
^{110}Pd	2.017	4.915	4.815			4.83	4.66
^{116}Cd	2.813	16.62	16.70		18.9	16.73	16.57
^{128}Te	0.8665	0.5783	0.5878	0.748	0.671		
^{130}Te	2.528	14.24	14.22	19.4	16.7	14.25	14.1
^{136}Xe	2.458	14.54	14.58	19.4	17.7	14.62	14.49
^{150}Nd	3.371	61.94	63.03	85.9	78.4	63.16	66.0
^{238}U	1.144	32.53	33.61				

原子核行列要素(NME)

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

原子核行列要素

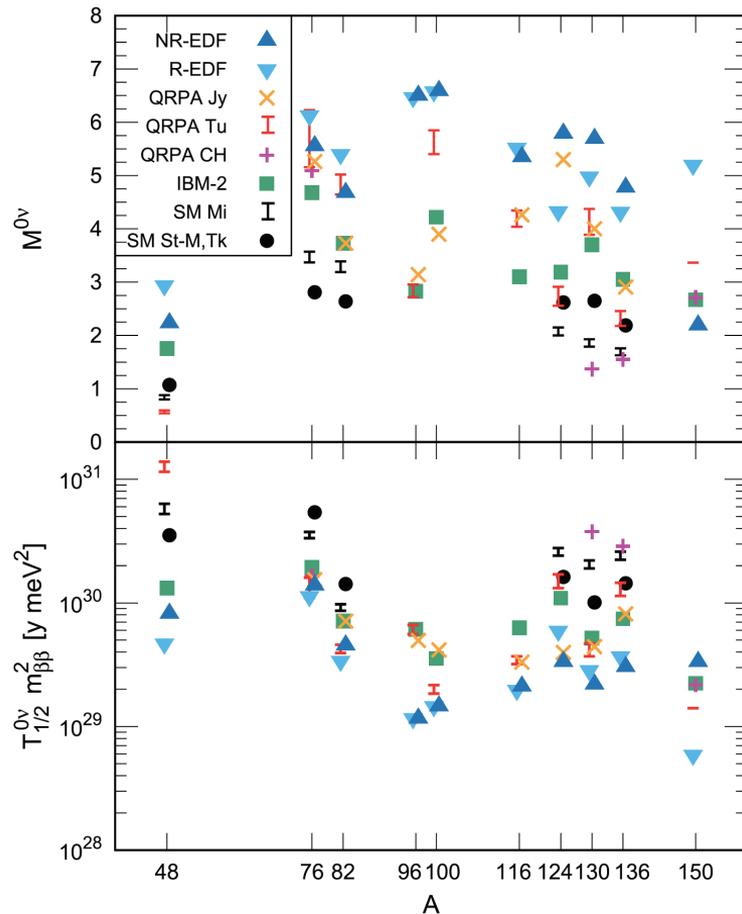
原子核行列要素とは

$$M_{0\nu} = \langle f | \hat{M}_{0\nu} | i \rangle$$

- ❑ 崩壊の始状態核(N,Z)と終状態核(N-2,Z+2)の遷移振幅
- ❑ 実験値がないので理論計算をするしかない

❑ 行列要素値はグループによって2-3倍のずれ

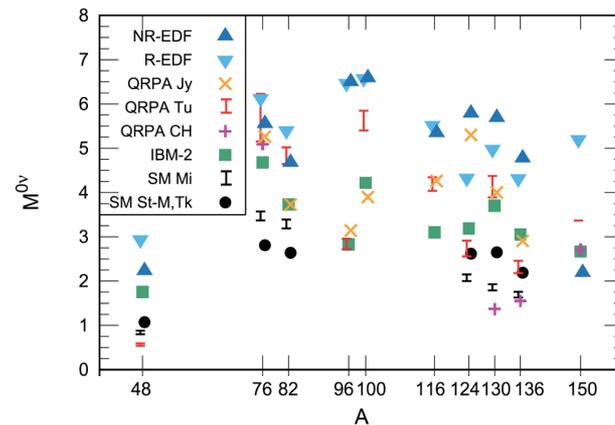
- ❑ 用いる崩壊演算子の違い
- ❑ 始・終状態原子核を記述する多体理論の違い
- ❑ 一粒子模型空間の違い
- ❑ 原子核内の有効相互作用の違い



原子核行列要素の精密計算に向けて

g_A^{eff} に起因する不定性

- g_A : 軸性ベクトル結合定数 ($g_A \sim 1.27$)
- 核内で起きる二重ベータ崩壊の結合定数 g_A の値は異なる
- 行列要素の比較の図では $g_A \sim 1.27$ に統一



g_{pp} に起因する不定性

- 中性子-陽子間の対相互作用アイソスカラー型(アイソスピン0、スピン1)の結合定数 (のアイソベクトル型(アイソスピン1、スピン0)との強度比)
- 他の核子間有効相互作用と異なり基底状態の情報で決定できない
- 原子核行列要素の値と強く相関(g_{pp} で値は強く抑制される)

g_A クエンチング

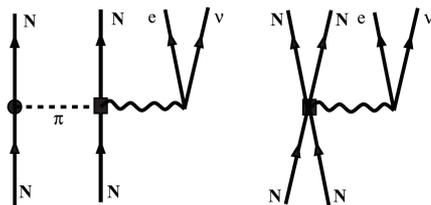
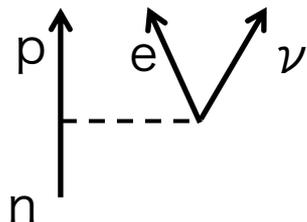
ベータ崩壊

ベータ崩壊のガモフ・テラー演算子 $\hat{M}_\beta = g_A \sum_i \vec{\sigma}_i \tau_i^-$

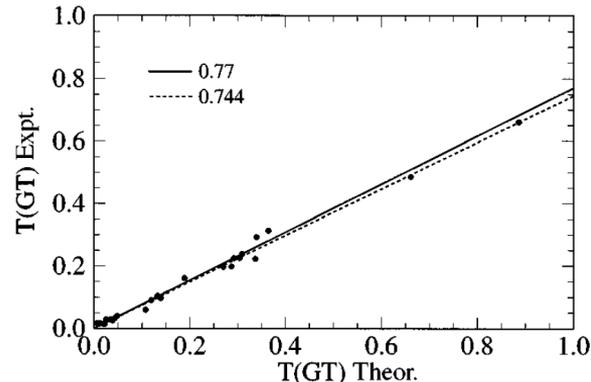
$g_A \sim 1.27$ ではベータ崩壊の半減期が説明できない。
70-80%のクエンチングが必要 $g_{A\text{eff}} \sim 0.7-0.8 g_A \sim 1$

クエンチングの理由

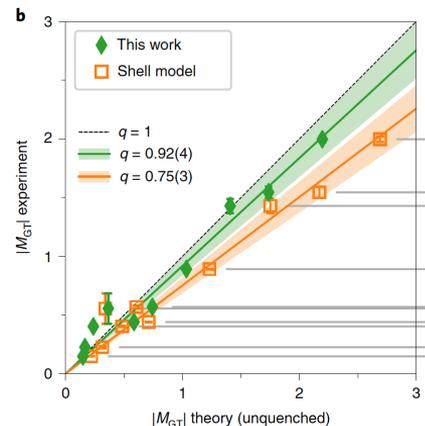
- 理論の枠組みに入っていない多体相関など
- 多体カレント



Menendez, et al., PRL107, 062501 (2011)



Martinez-Pinedo et al., Phys. Rev. C 53, R2602 (1996)



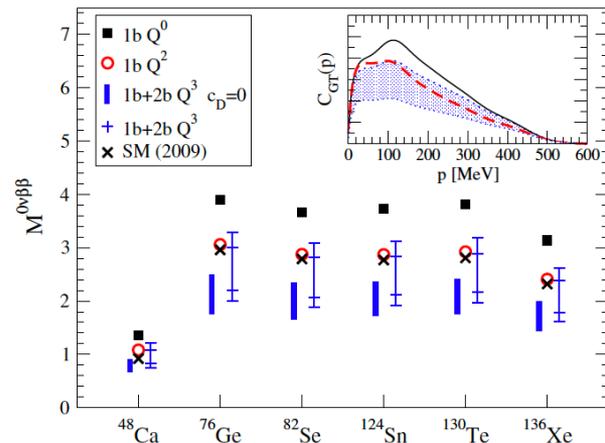
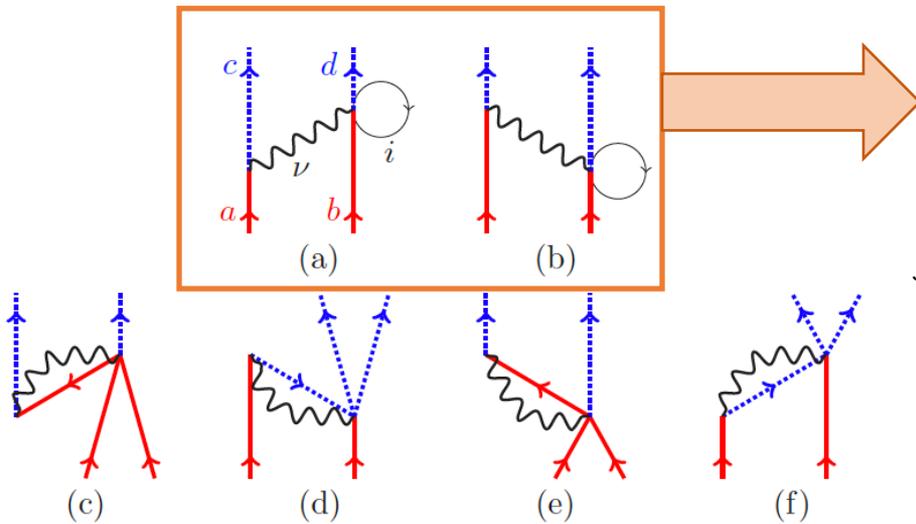
Gysbers et al., Nature Physics 15, 428 (2019)

ベータ崩壊については二体カレントでクエンチングの大部分を説明

g_A クエンチング

二重ベータ崩壊

Chiral EFTからの二体カレント



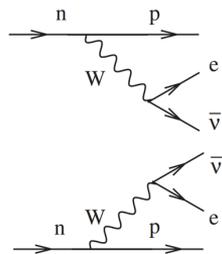
J. Menéndez et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 062501 (2011)

-35% to 10% contribution

full inclusion of chiral two-body current:
10% quenching

L-J. Wang et al., Phys. Rev. C **98**, 031301(R) (2018)

2νββからg_A^{eff}への制限



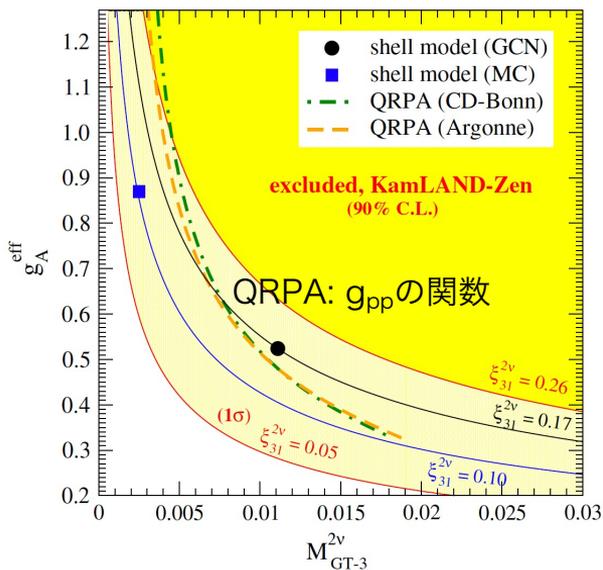
2νββ半減期

$$[T_{1/2}^{2\nu}]^{-1} = (g_A^{\text{eff}})^4 |M_{\text{GT}}^{2\nu}|^2 [G_0^{2\nu} + \xi_{31}^{2\nu} G_2^{2\nu}]$$

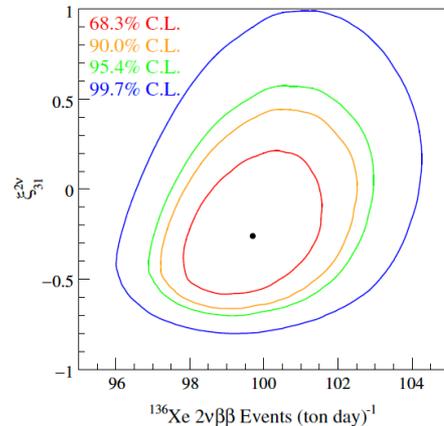
$$\xi_{31}^{2\nu} = M_{\text{GT}-3}^{2\nu} / M_{\text{GT}}^{2\nu}$$

位相空間因子G₀とG₂はレプトンエネルギー依存が異なる

ξ₃₁^{2ν} の範囲を実験で制限



$$\xi_{31}^{2\nu} < 0.26 \text{ (KamLAND-Zen)}$$



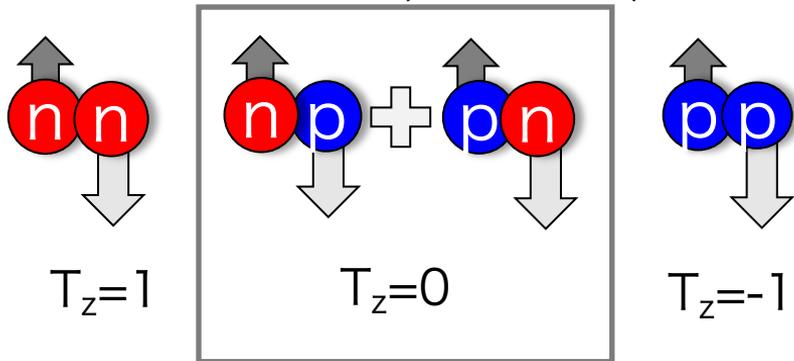
Simkovic et al., Phys. Rev. C **97**, 034315 (2018)
Gando et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 192501 (2019)

- 理論を実験データから制限
- 2νββのg_Aクエンチングと0νββのg_Aクエンチングは同じか？

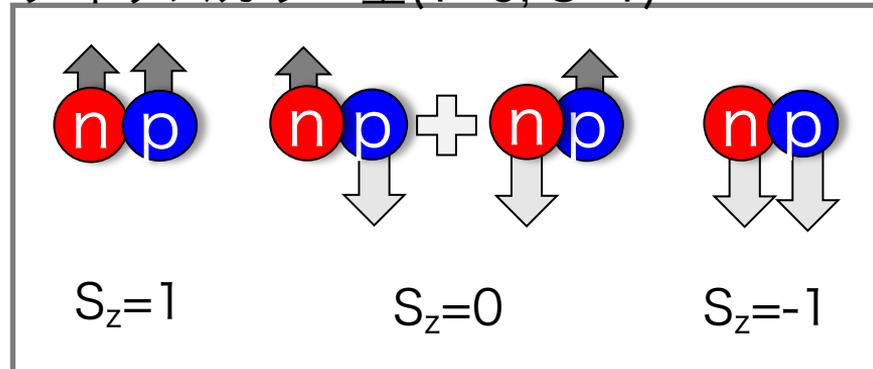
g_{pp} とは？

核子間の対相関(引力の有効相互作用)

アイソベクトル型($T=1, S=0$)



アイソスカラー型($T=0, S=1$)



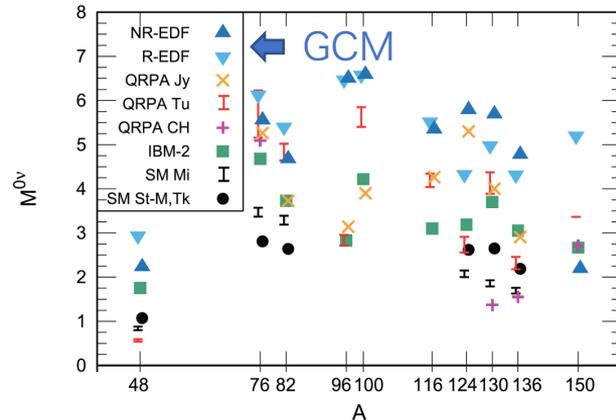
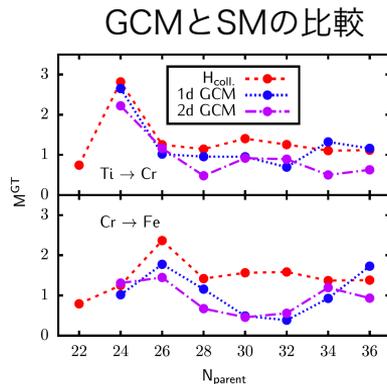
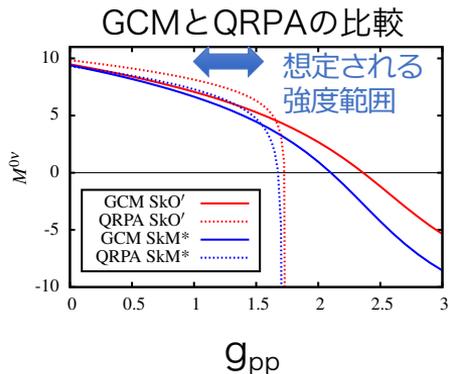
対相関の相互作用強度

- nn, pp: 対凝縮(基底状態でクーパー対形成)するので基底状態データで強度を決められる
- アイソベクトルnp: あまりよくわかっていないが核力のアイソスピン対称性からnn, ppと同程度の強度
- アイソスカラーnp: 対凝縮するかどうかはわからない(二重ベータ崩壊核($N>Z$)では対凝縮しない)
- g_{pp} : アイソスカラー型対相関とアイソベクトル型対相関の強度比。値はよくわかっていない
- アイソスカラーnpはベータ崩壊・二重ベータ崩壊の行列要素と強く相関する

原子核行列要素と g_{pp}

同じ相互作用・模型空間を使った異なる理論の比較

NH and Engel, Phys. Rev. C **90**, 031301(R) (2014)
 Menéndez, NH, et al., Phys. Rev. C **93**, 014305 (2016)



- ❑ GCMとQRPA：類似した g_{pp} 依存性
- ❑ GCMとSM： g_{pp} が入っているハミルトニアンで近い行列要素の値

原子核行列要素値のばらつきの理由：中性子-陽子対相関の異なる取り扱いが主要因

原子核行列要素値の不定性を減らすには

- ❑ 相互作用にアイソスカラー中性子-陽子対相関(g_{pp})に対応するものが入っている
- ❑ 多体理論としてその相関を取り込めるようになっている
- ❑ g_{pp} の値をどうやって決めるか？

原子核構造理論での中性子-陽子対相関の取り扱い

殻模型(SM)

g_{pp} が入っているかどうかは相互作用による。
実験データを再現するように現象論的に決めた相互作用では入っている

QRPA

g_{pp} による行列要素の抑制をはじめに指摘
 g_{pp} の値は $2\nu\beta\beta$ の半減期を再現するように核ごとに決定

GCM

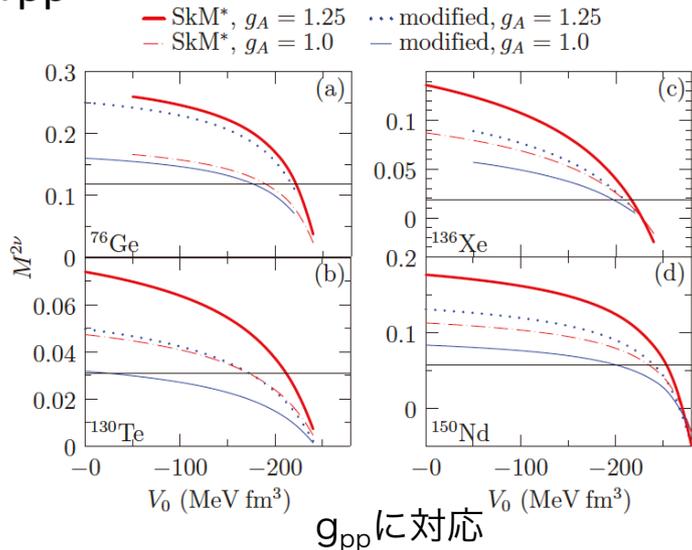
エネルギー-密度汎関数(EDF)に基づいたものは中性子-陽子対相関(g_{pp})なし

QRPAと g_{pp}

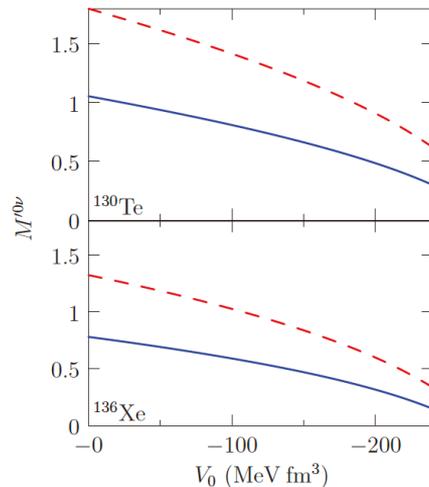
- QRPAでは従来 $2\nu\beta\beta$ のNME (半減期) を合わせるように原子核ごとに g_{pp} を調整
- 1つの実験データを1パラメータでfit → QRPAの近似精度起因のものもすべて g_{pp} に。overfittingでは？
- $2\nu\beta\beta$ が測られていない原子核では g_{pp} が決められない($2\nu\beta\beta$ 半減期の予言ができない)

QRPAの計算例

$2\nu\beta\beta$



$0\nu\beta\beta$



QRPAによる $2\nu\beta\beta$ 行列要素の予言

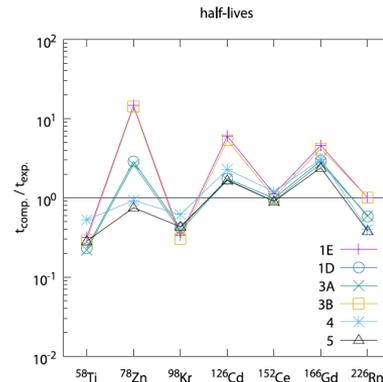
□ g_{pp} をどのように決めるか？

□ β 崩壊の半減期で g_{pp} を合わせたEDFによるQRPA計算 → $2\nu\beta\beta$ NME値の予言が可能

NH and Engel, Phys. Rev. C **105**, 044314 (2022)

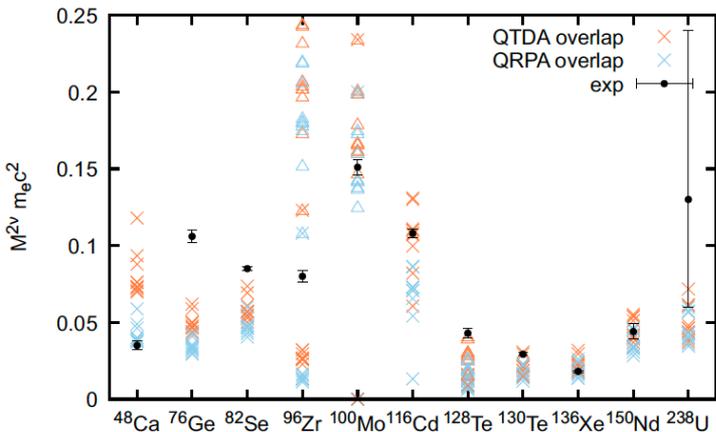
β -decay half-lives

^{48}Ar , ^{60}Cr , ^{72}Ni , ^{82}Zn , ^{92}Kr , ^{102}Sr , ^{114}Ru , ^{126}Cd , ^{134}Sn , ^{148}Ba
^{52}Ti , ^{74}Zn , ^{92}Sr , ^{114}Pd , ^{134}Te , ^{156}Sm , ^{180}Yb , ^{200}Pt , ^{226}Rn , ^{242}U
^{52}Ti , ^{72}Ni , ^{92}Sr , ^{114}Ru , ^{134}Te , ^{156}Nd , ^{180}Yb , ^{204}Pt , ^{226}Rn , ^{242}U
^{58}Ti , ^{78}Zn , ^{98}Kr , ^{126}Cd , ^{152}Ce , ^{166}Gd , ^{204}Pt
^{58}Ti , ^{78}Zn , ^{98}Kr , ^{126}Cd , ^{152}Ce , ^{166}Gd , ^{226}Rn



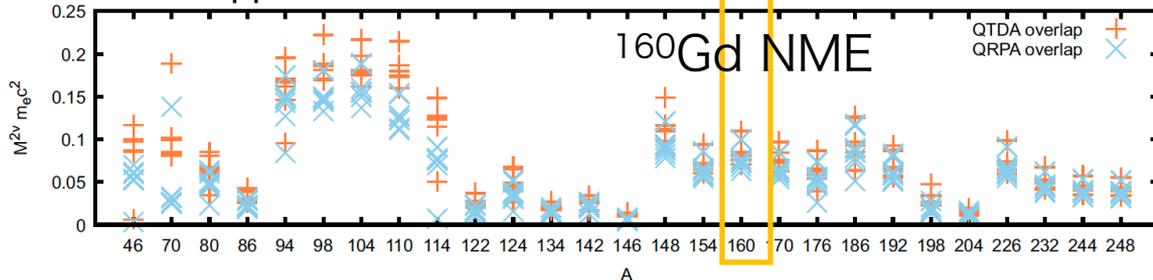
Mustonen and Engel, Phys. Rev. C **93**, 014304 (2016)

$2\nu\beta\beta$ NMEの実験値との比較



$A > 130$ ではEDF依存性が少ない

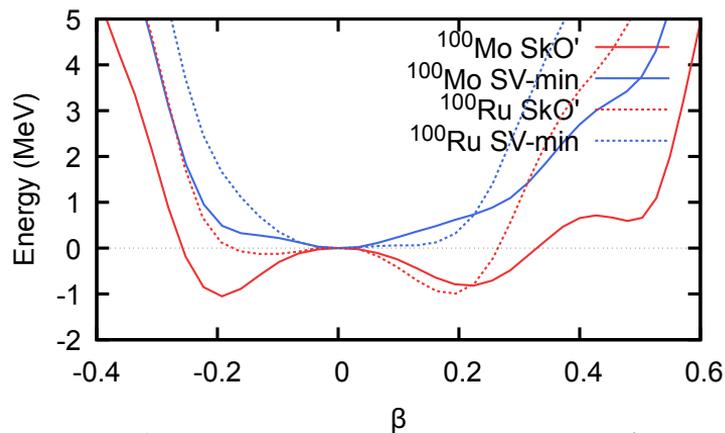
未測定の $2\nu\beta\beta$ NME値の予言



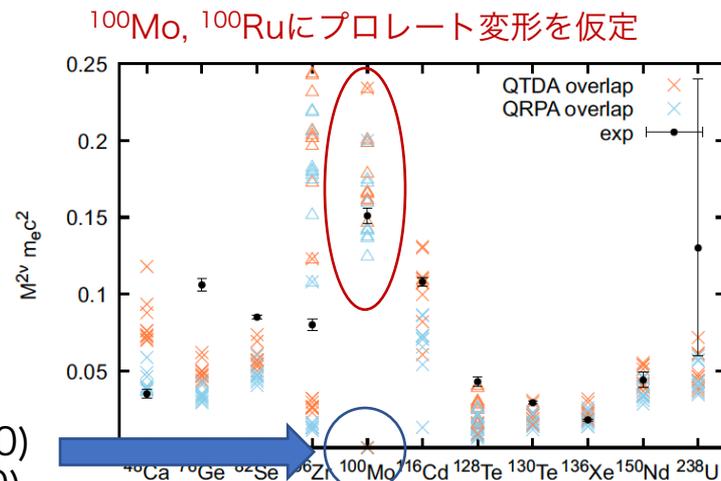
^{160}Gd のNME: 以前の予言値 0.0455 MeV^{-1} (Hirsch et al., PRC**66**(2002))
 QRPA(EDF): $0.12 - 0.21 \text{ MeV}^{-1}$ → PIKACHU実験

QRPA計算による展望

- 同一の相互作用で全原子核の計算が可能
- β 崩壊の半減期で g_{pp} を合わせたEDFによる $0\nu\beta\beta$ のQRPA計算
- 二重電子捕獲(ECEC)の行列要素計算
- QRPA近似の問題。始状態と終状態があまりに異なると近似が破綻



SkO'最低エネルギー状態 ^{100}Mo (始状態) : オブレート変形 ($\beta < 0$)
 ^{100}Ru (終状態) : プロレート変形 ($\beta > 0$)

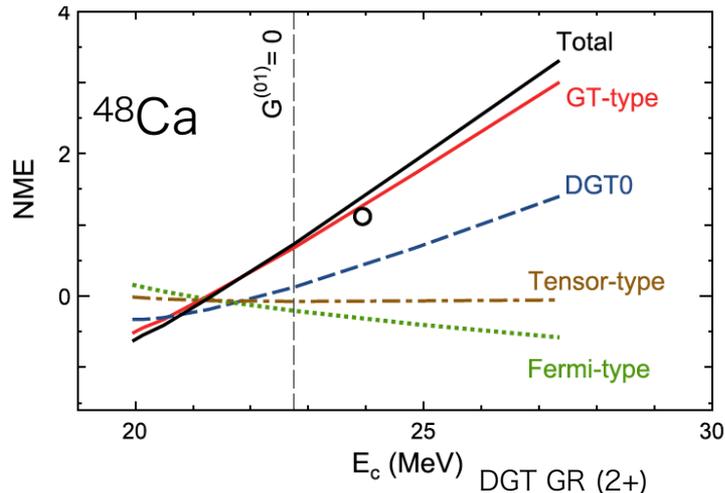
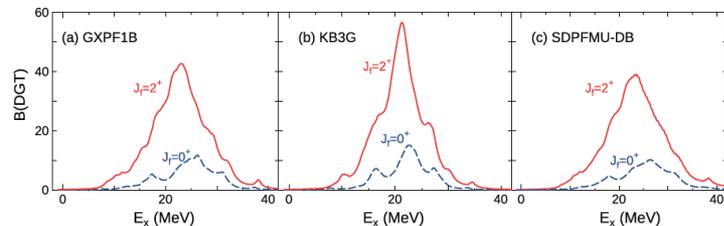


QRPAとGCMを組み合わせたハイブリッド理論が必要？

二重ガモフテラー遷移

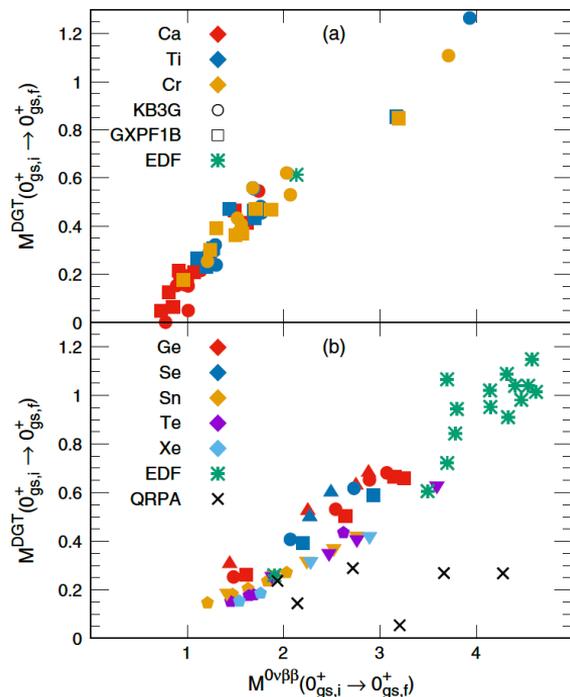
0νββ NMEを二重ガモフテラー遷移から制限

二重ガモフテラー巨大共鳴 (DGTGR) ($^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$)



アイソベクトル対相関：DGTGRエネルギーと相関
 アイソスカラー対相関(g_{pp}): DGTGR幅と相関

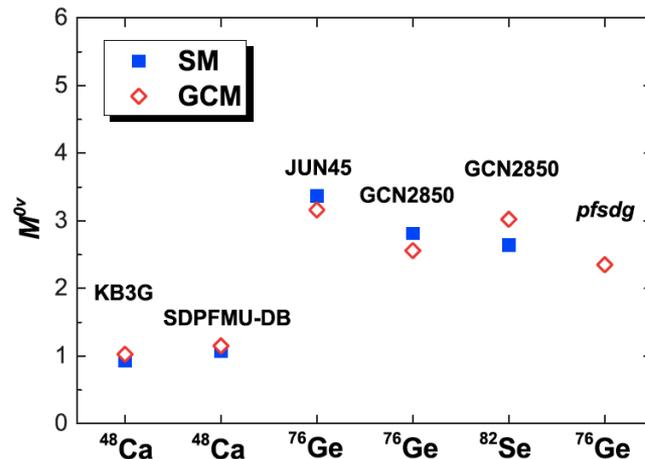
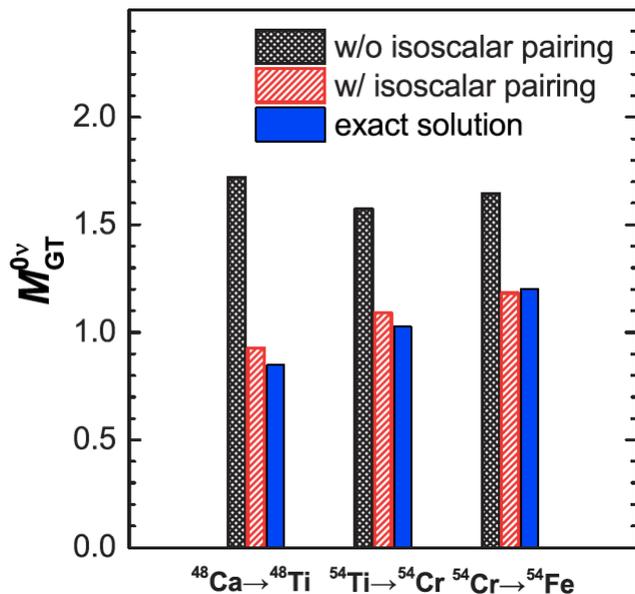
基底状態への遷移



GCM+Shell Model

Jiao et al., Phys. Rev. C 96, 054310 (2017)

- EDFに基づいたGCM計算では g_{pp} が入っておらず行列要素値の値は大きい
- GCMで殻模型ハミルトニアンの問題を解く
- 生成座標(波動関数に取り入れる相関)：四重極変形、アイソスカラー中性子-陽子対振幅



- NMEの値は殻模型厳密解とGCMによる解でよく一致
- 殻模型厳密解が求められない非常に大きな模型空間の場合(pfsdg)でもGCMで計算可能
- 相互作用(g_{pp})をどのように決めるかという問題は残る

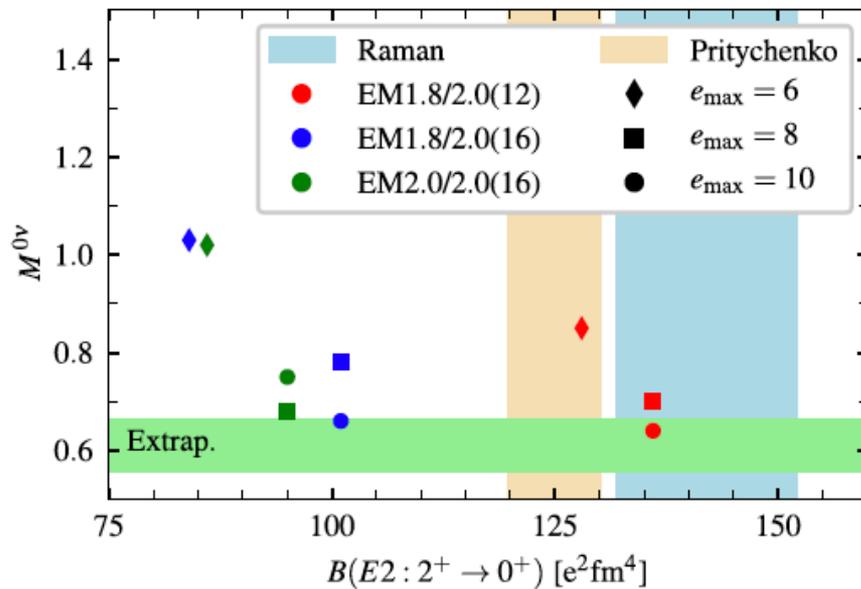
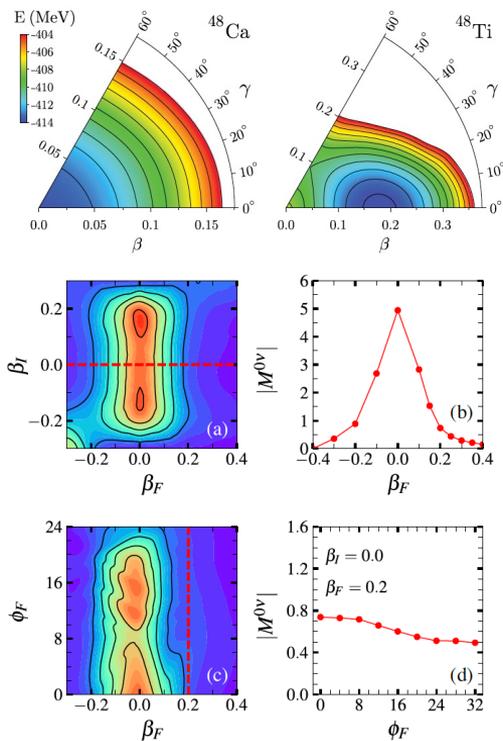
GCM波動関数を用いた第一原理計算

Yao et al. Phys. Rev. C **98**, 054311 (2018)

Yao et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 232501 (2020)

chiral EFTとin-mediums Similarity Renormalization Groupに基づいた第一原理計算

IMSRGとGCMを組み合わせることで四重極変形(β)とアイソスカラー対振幅(ϕ)に関する相関を波動関数に入れる



$^{48}\text{Ca } M^{0\nu} = 0.61$

まとめ

- ニュートリノレス二重ベータ崩壊：マヨラナニュートリノ・質量階層
- ニュートリノの質量決定のためには原子核行列要素の計算が必要
- 原子核行列要素の不定性と関連する量
 - g_A^{eff} : 二重ベータ崩壊の有効軸性ベクトル結合定数
 - 二体カレントからの寄与を取り入れた説明
 - g_{pp} : アイソスカラー型中性子-陽子対相関の結合定数
 - ベータ崩壊で決めた g_{pp} による二重ベータ崩壊原子核行列要素計算
 - 第一原理計算から導出した相互作用による計算