

ニュートリノ質量決定に不可欠なデータをスーパーコンピュータ「京」で計算

平成28年3月14日

(於 東京大学理学部1号館338号室)

東京大学大学院理学系研究科
日本原子力研究開発機構

出席者

大塚孝治	東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授 同研究科附属 原子核科学研究センター長
清水則孝	同センター 特任准教授
岩田順敬	同センター 特任助教
宇都野穰	日本原子力研究開発機構 研究主幹 同センター 講師(客員准教授))

ニュートリノ質量の測定 + スーパーコンピュータ「京」

サイエンスの先端にあるが、関係は無さそうなこの2つがどう関わっているのか？

発表のポイント

未知の量であるニュートリノの質量は、ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊の半減期の測定データから求めることができる。半減期から質量を求めるのに必要になる核行列要素を、最高精度で計算

スーパーコンピュータ「京」等を用いての大規模な数値シミュレーションにより、20億次元の行列の対角化を行った。その結果、これまで適切に取扱うことができなかったプロセスを精度よく扱い、信頼性の大幅な向上につながった。

ニュートリノの質量測定を目的として世界中で先端大型実験装置が建設されている。本研究結果により、先端大型実験装置での実験意義を高めることが期待される。

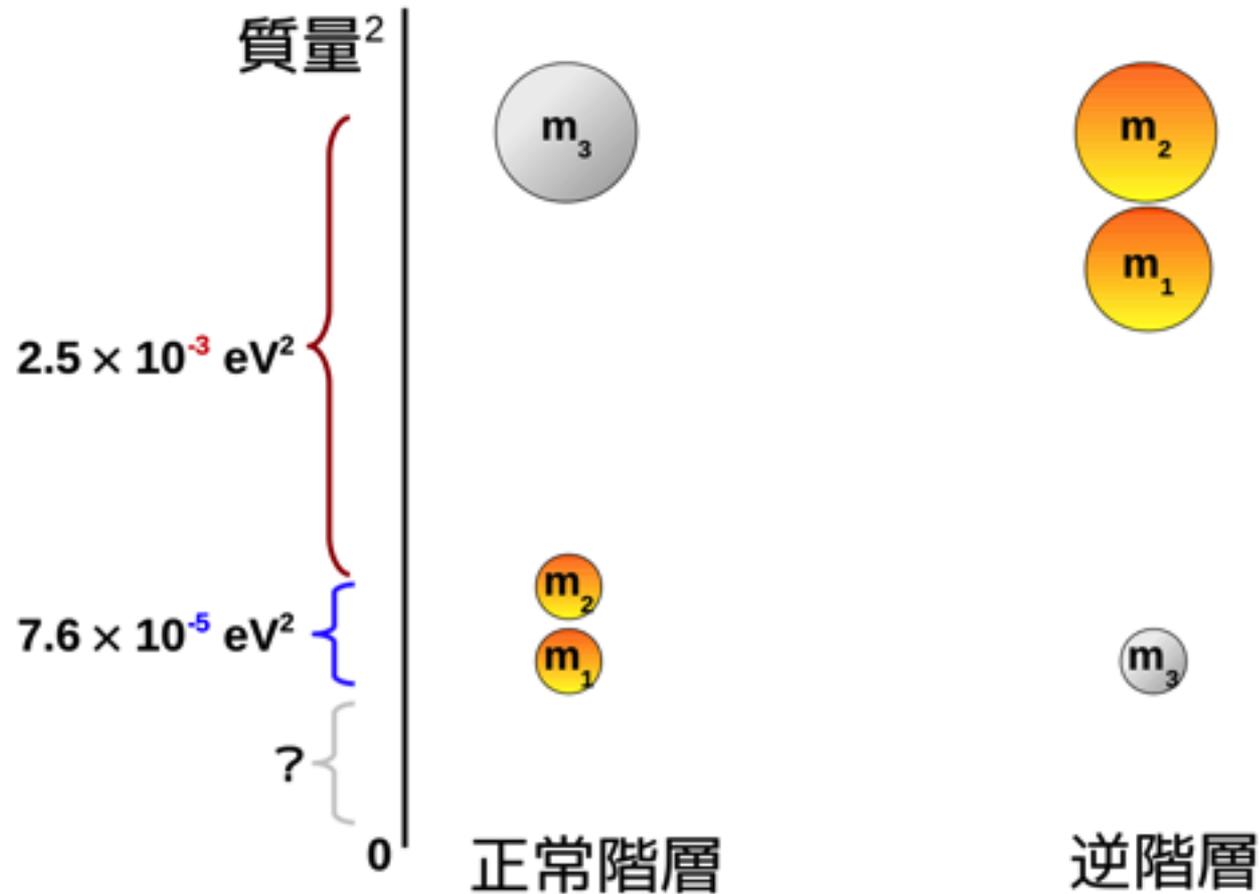
ニュートリノ質量

- 極めて小さいが存在（ニュートリノ振動現象、梶田博士ノーベル賞）
- 宇宙の有り様などにも関係
- ゼロではないが値は未知、これまでの実験では上限は分かっている

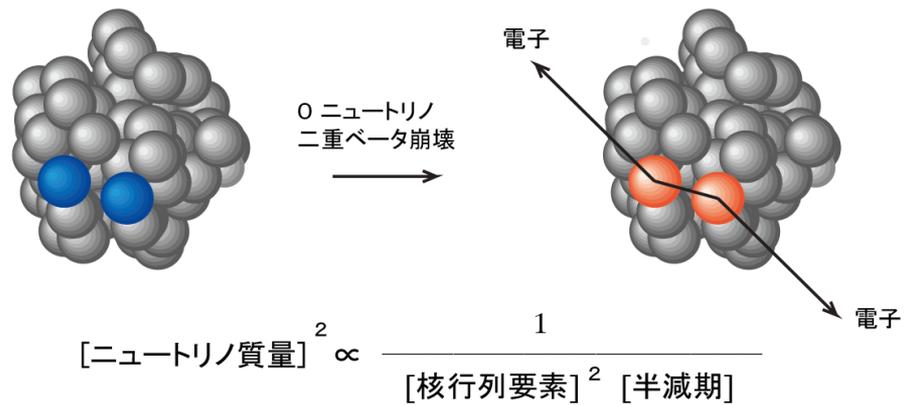
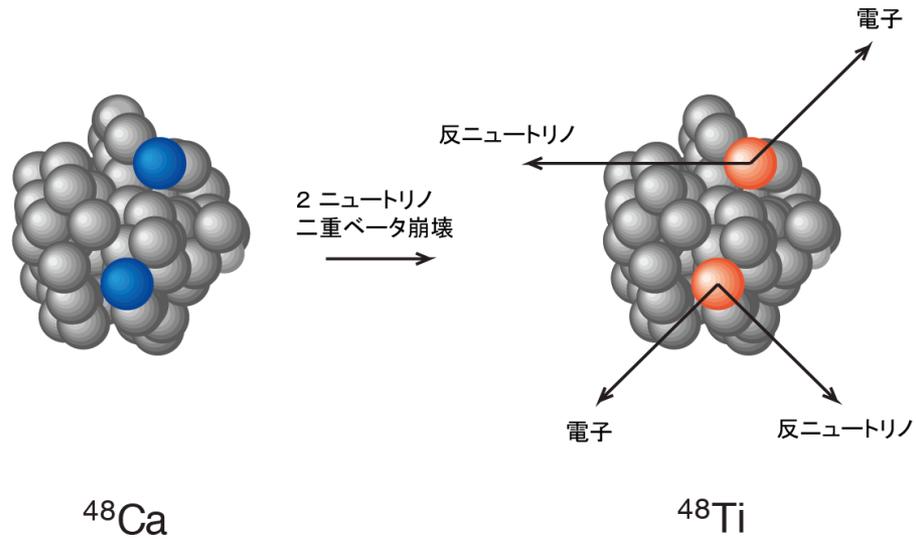
ニュートリノ質量の測定

- トリチウムのベータ崩壊 KATRIN計画(ドイツ)
- 宇宙論からの制限
- ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊の半減期 今回の発表
(マヨラナ ニュートリノの場合)

スーパーカミオカンデの実験から少なくとも(以下の図で?がゼロの場合)
0.05 eV 以上の質量を持つニュートリノがあることは分かっている。



二重ベータ崩壊模式図



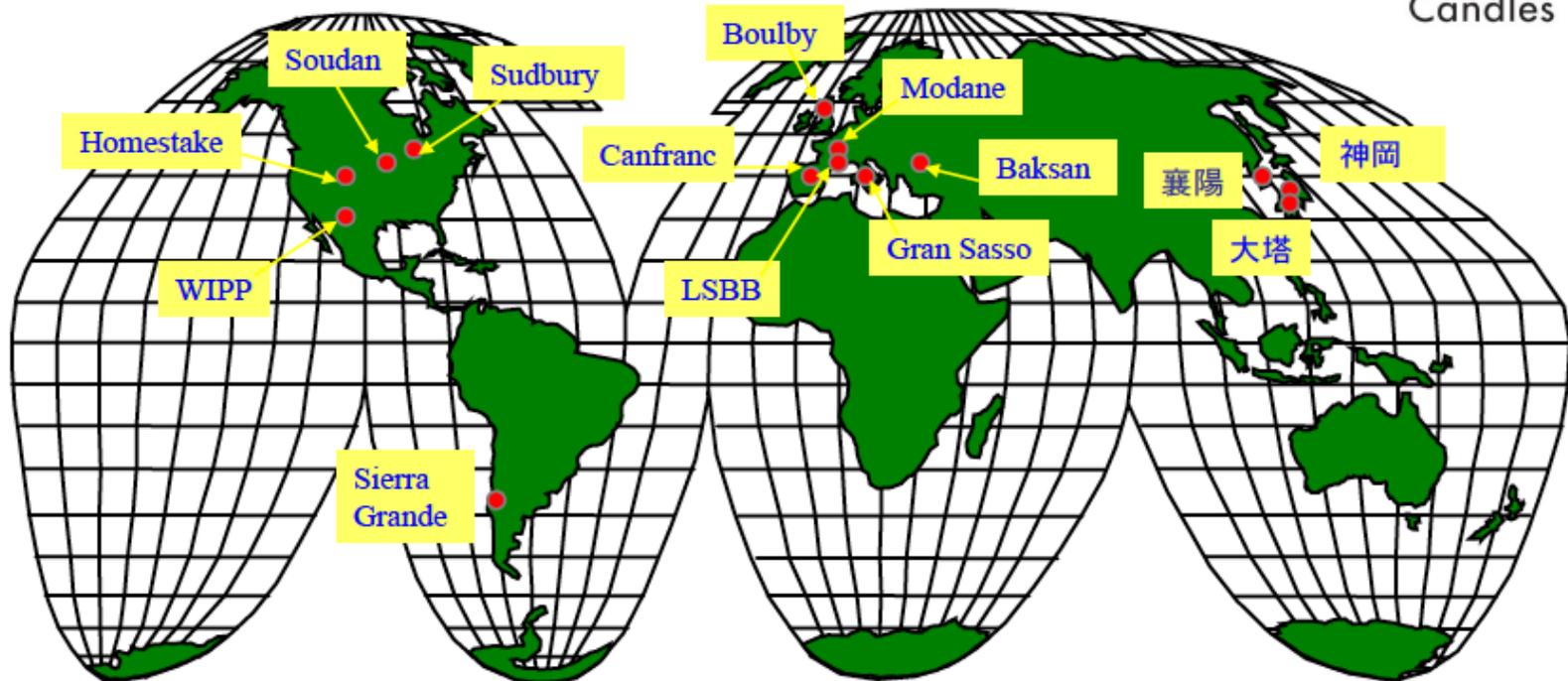
2007年

世界の地下実験施設

2重ベータ崩壊の研究
ダークマターの探索



Candles



比較のため水中での深さに換算

- ・ **大塔コスモ観測所** 奈良県, 日本, 1400 m水深相当
- ・ **神岡鉱山** 岐阜県, 日本, 3000 m水深相当
- ・ SUF スタンフォード, 米国, 17 m水深相当
- ・ Boulby 鉱山 イングランド, 英国, 3000 m水深相当
- ・ LSM Frejus, フランス
- ・ Canfranc ピレネー, スペイン, 2450 m水深相当
- ・ LNGS グラン=サッソー, イタリア, 3400 m水深相当
- ・ Sierra Grande リオ=ネグロ, アルゼンチン, 1000 m水深相当

スーパーコンピュータ「京」



- 2012年6月に完成した世界最速（現在世界4位）のスーパーコンピュータ
- 一秒間に1京回の演算を実行できる。（10.62 PFLOPS）
- 「京」を最大限活用するため、HPCI戦略プログラムが開始された。（次ページ）



写真とロゴ：

理化学研究所計算科学研究機構ウェブページより

HPCI戦略プログラム

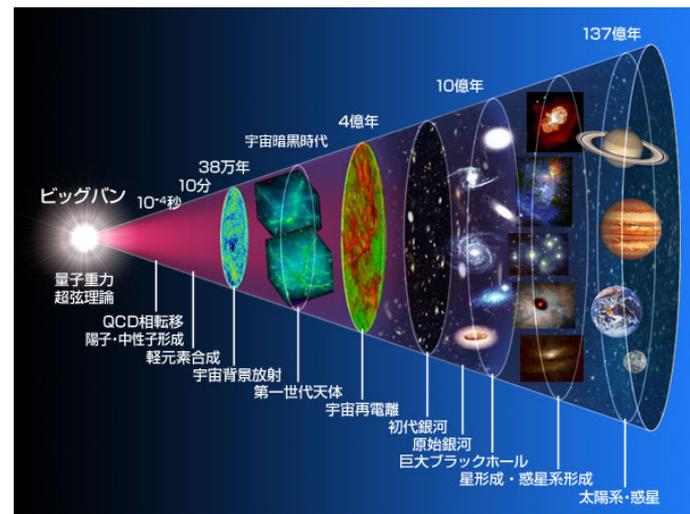
- 「京」を中核とするHPCIを最大限活用し、①画期的な成果創出、②高度な計算科学技術環境を使いこなせる人材の創出、③最先端コンピューティング研究教育拠点の形成を目指し、戦略機関を中心に戦略分野の「研究開発」及び「計算科学技術推進体制の構築」を推進するプロジェクト。2011～2015年度。次の5つの分野から成る。

- 分野1 予測する生命科学・医療および創薬基盤
- 分野2 新物質・エネルギー創成
- 分野3 防災・減災に資する地球変動予測
- 分野4 次世代ものづくり

- 分野5 物質と宇宙の起源と構造

基礎物理分野(素粒子・原子核・宇宙)において成果創出を目指す。計算基礎科学連携拠点(東大原子核センターを含む8機関による研究組織)によって運営され、4つの研究開発課題を持つ。

本研究は研究開発課題2「大規模量子多体計算による核物性解明とその応用」の成果である。



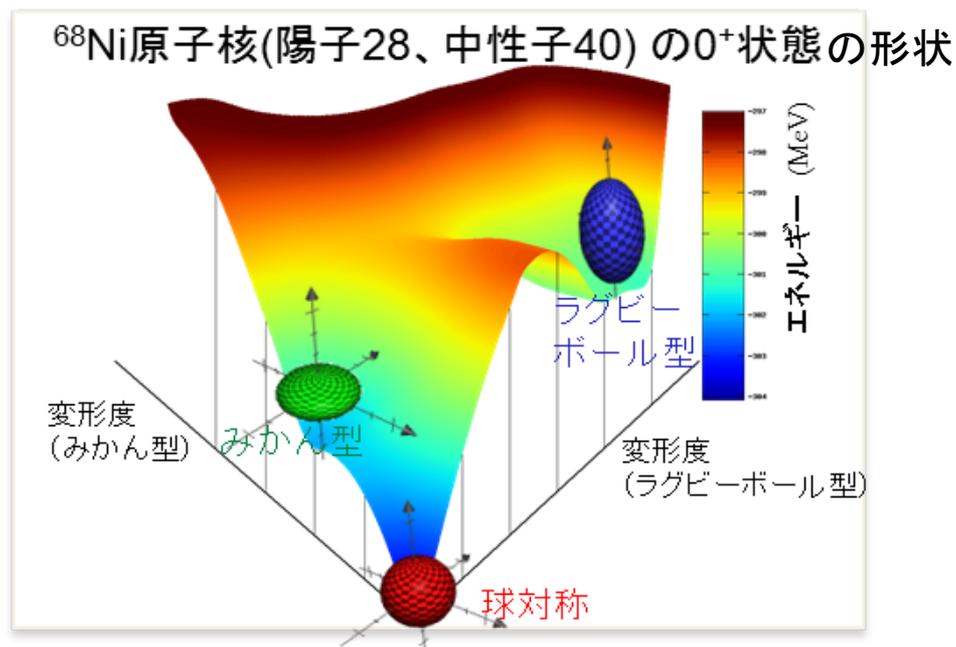
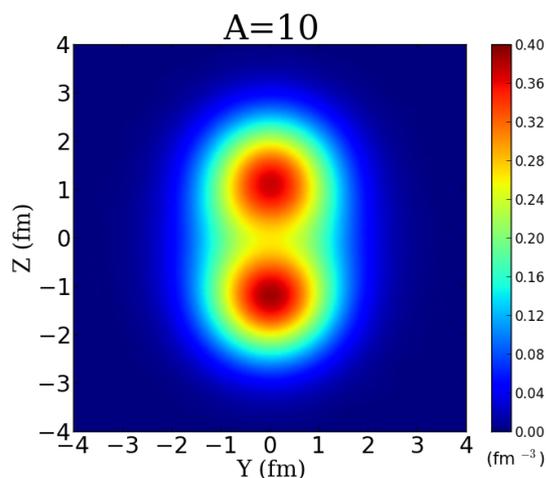
研究開発課題2「大規模量子多体計算による核物性解明とその応用」

- HPCI戦略プログラム分野5において原子核物理分野研究を担当
原子核物理に加え、学際的、社会的応用にも取り組む
- 東京大学理学系研究科附属原子核科学研究センターが中心と
なって推進。
- 陽子・中性子の間に働く力(核力)を出発点として、「京」を用いた大型シミュレーション(後述)を実行し、不安定核のエキゾチックな構造や、核廃棄物処理で課題になる核種の原子核構造計算を推進している。

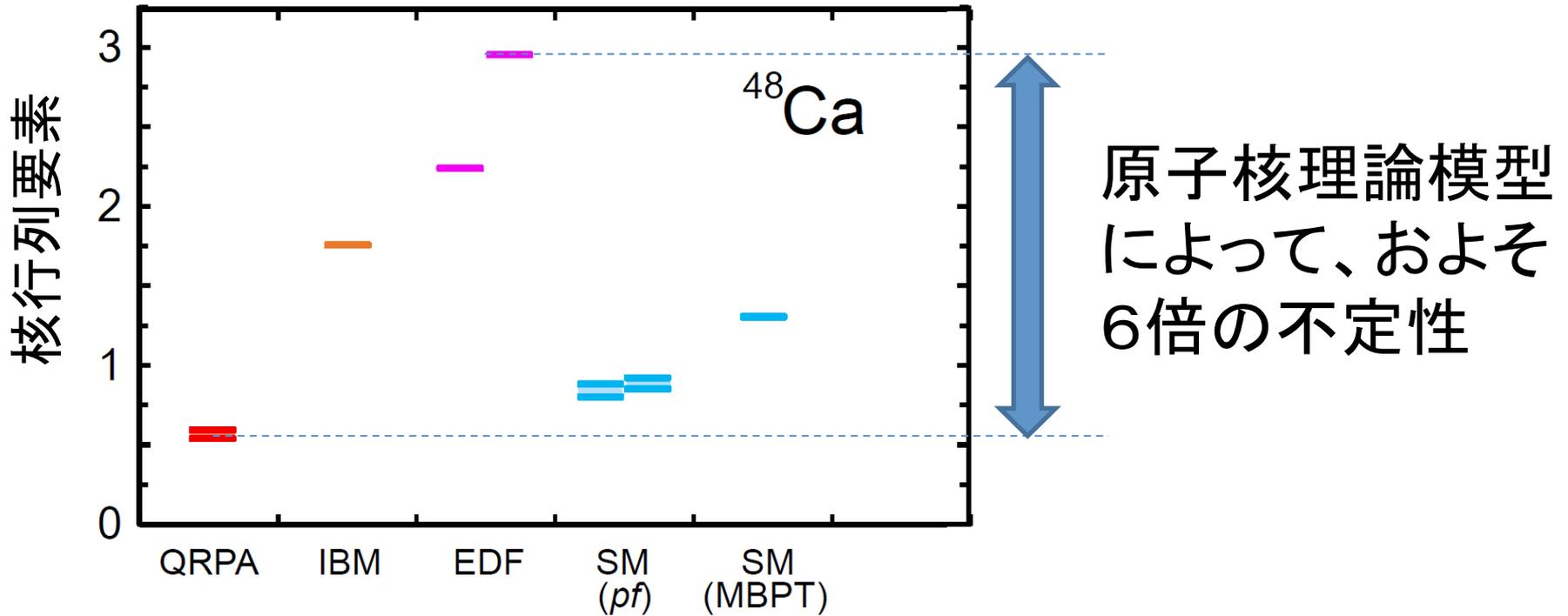


原子核科学
研究センター

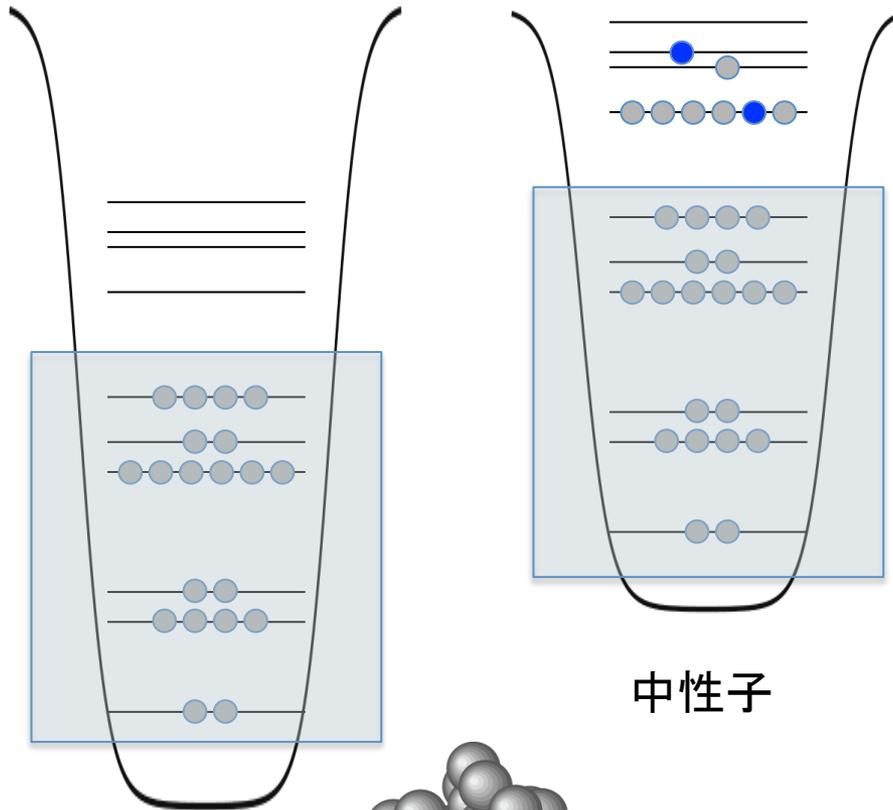
ベリリウム10原子核の密度分布



従来の核行列要素計算



- $[\text{ニュートリノの質量}]^2 \propto \frac{1}{[\text{核行列要素}]^2 [\text{半減期}]}$ から、
半減期が測定されたとしてもニュートリノの質量に
6倍の不定性が生じる。



陽子

中性子

^{48}Ca

原子核の中の陽子や中性子は入れ物
(ポテンシャル)の中で軌道運動
→ 量子論ではとびとびのエネルギー
(図中で水平方向の線)

それらの軌道に下から順番に陽子や
中性子を入れていく。
上の方の軌道では異なったパターンで
入ったものが混在する。
(図では1パターンのみが示されている)

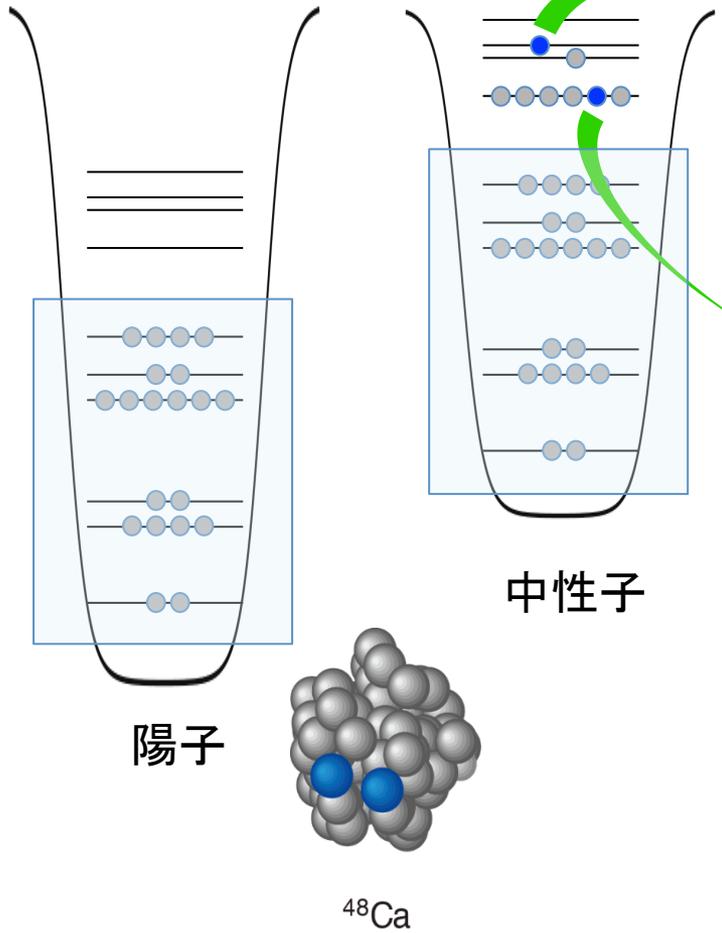
各軌道に入れる粒子数には上限があり、
その結果カルシウム48では左の図の
ようになっている

シェード部分は完全に詰まっていると
する近似
(以前に行われた計算に対応)

大型シミュレーション-2

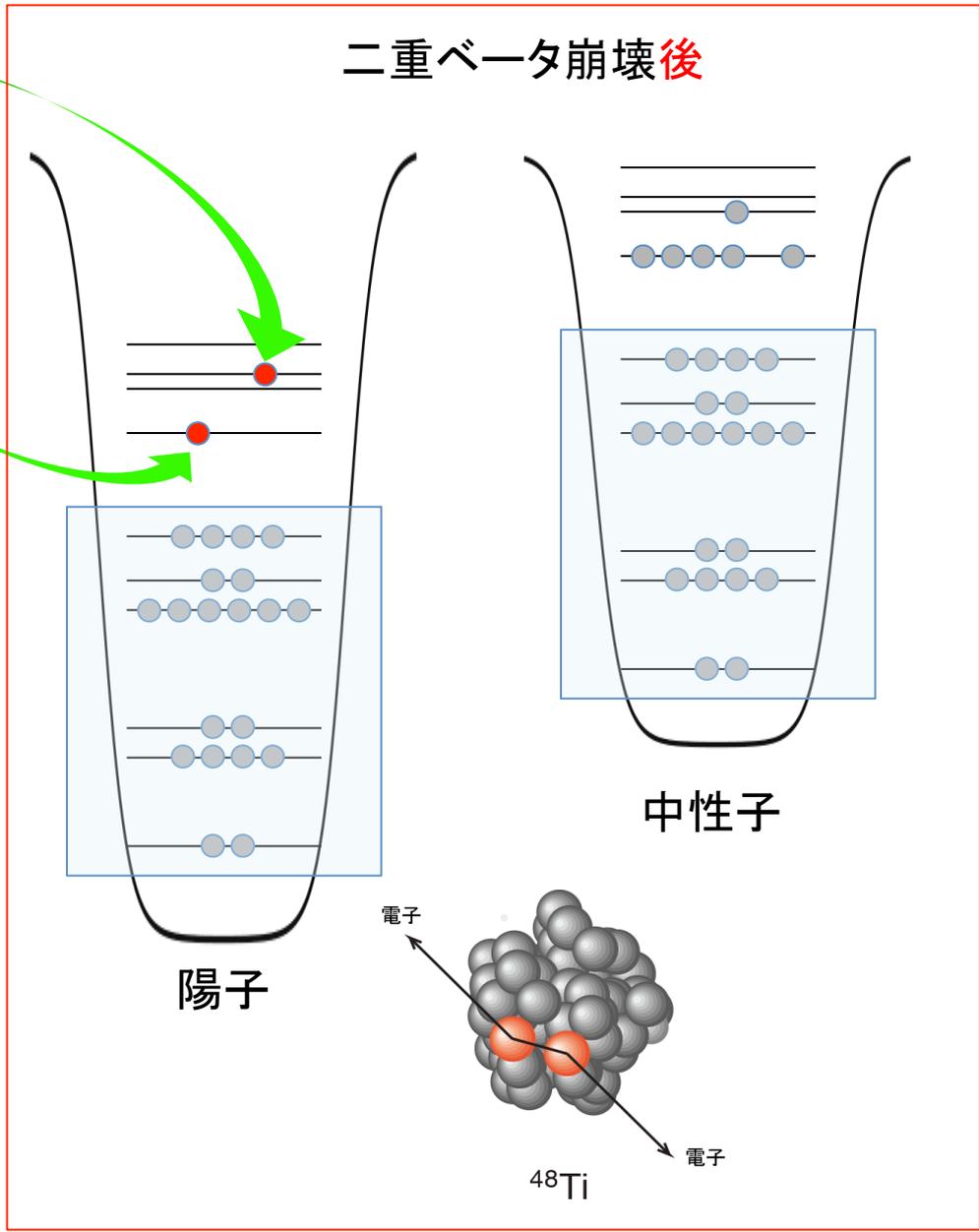
二重ベータ崩壊の起こり方

二重ベータ崩壊前



この部分が凍結
(不活性)

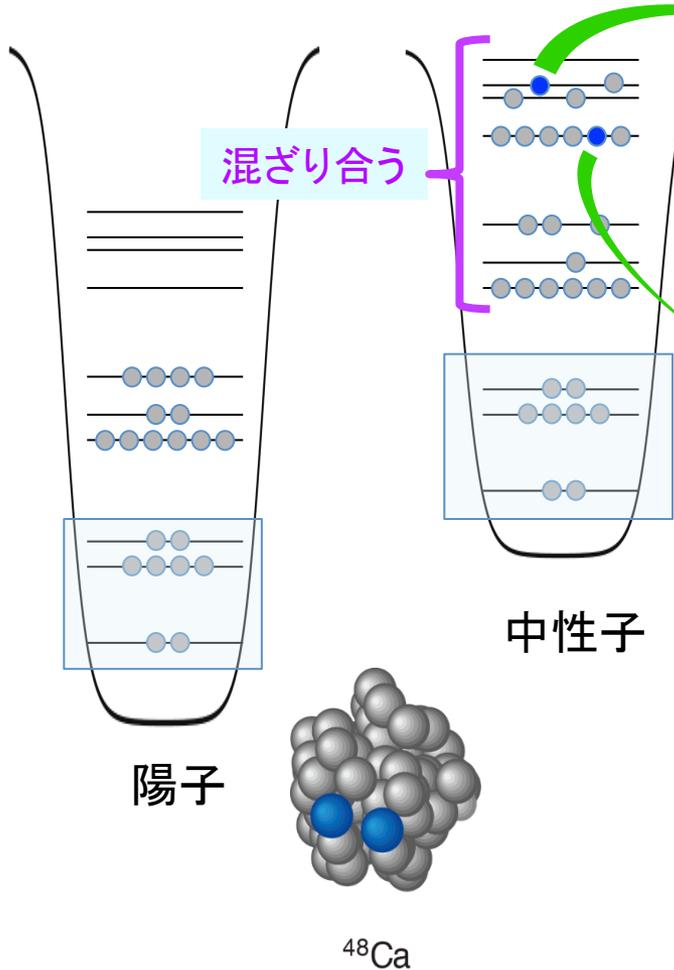
二重ベータ崩壊後



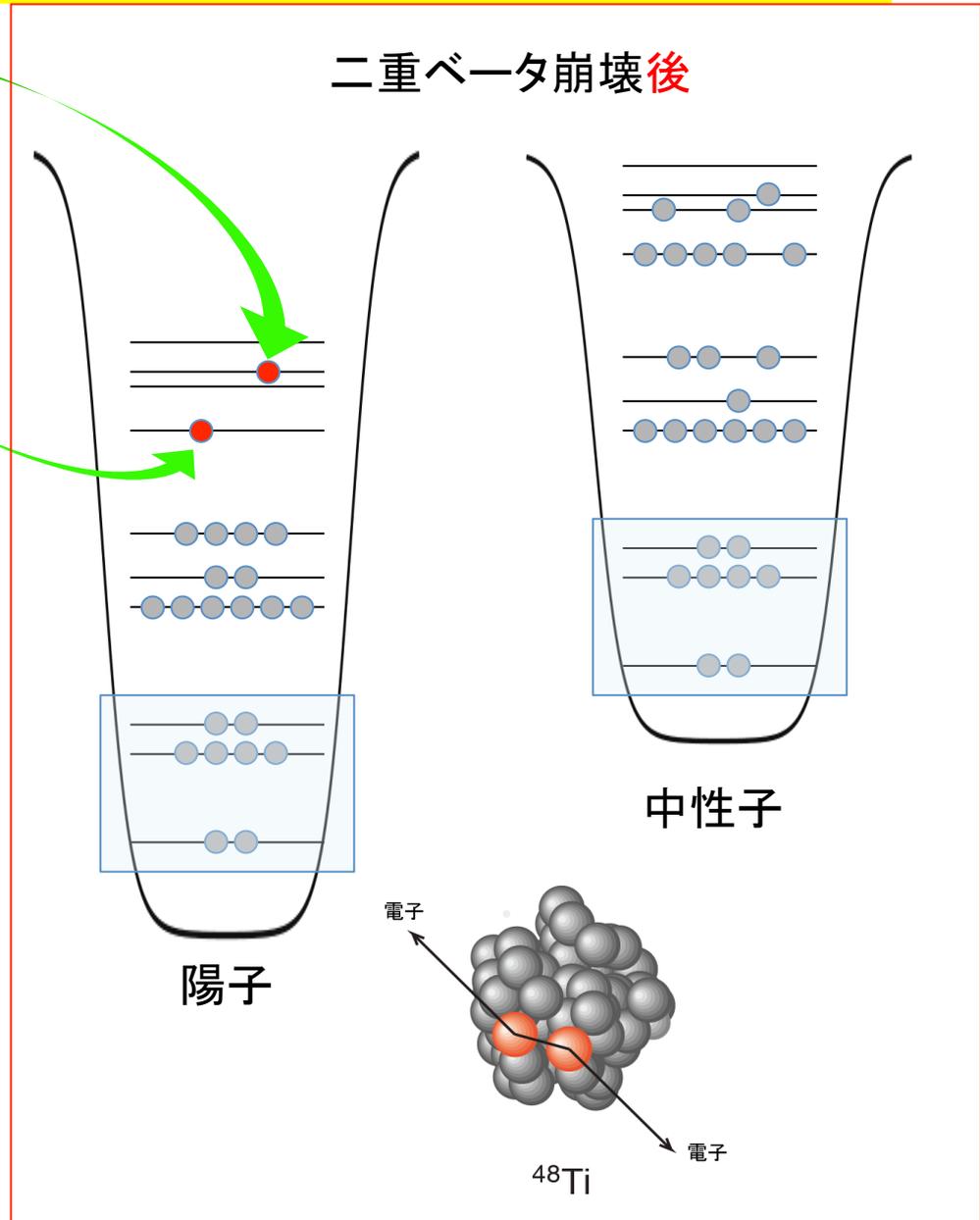
大型シミュレーション - 3

数値計算に於いて、より多くの陽子、中性子を活性化して二重ベータ崩壊の精度を向上

二重ベータ崩壊前



二重ベータ崩壊後



この部分が凍結
(不活性)

活性化は核力によって起こる

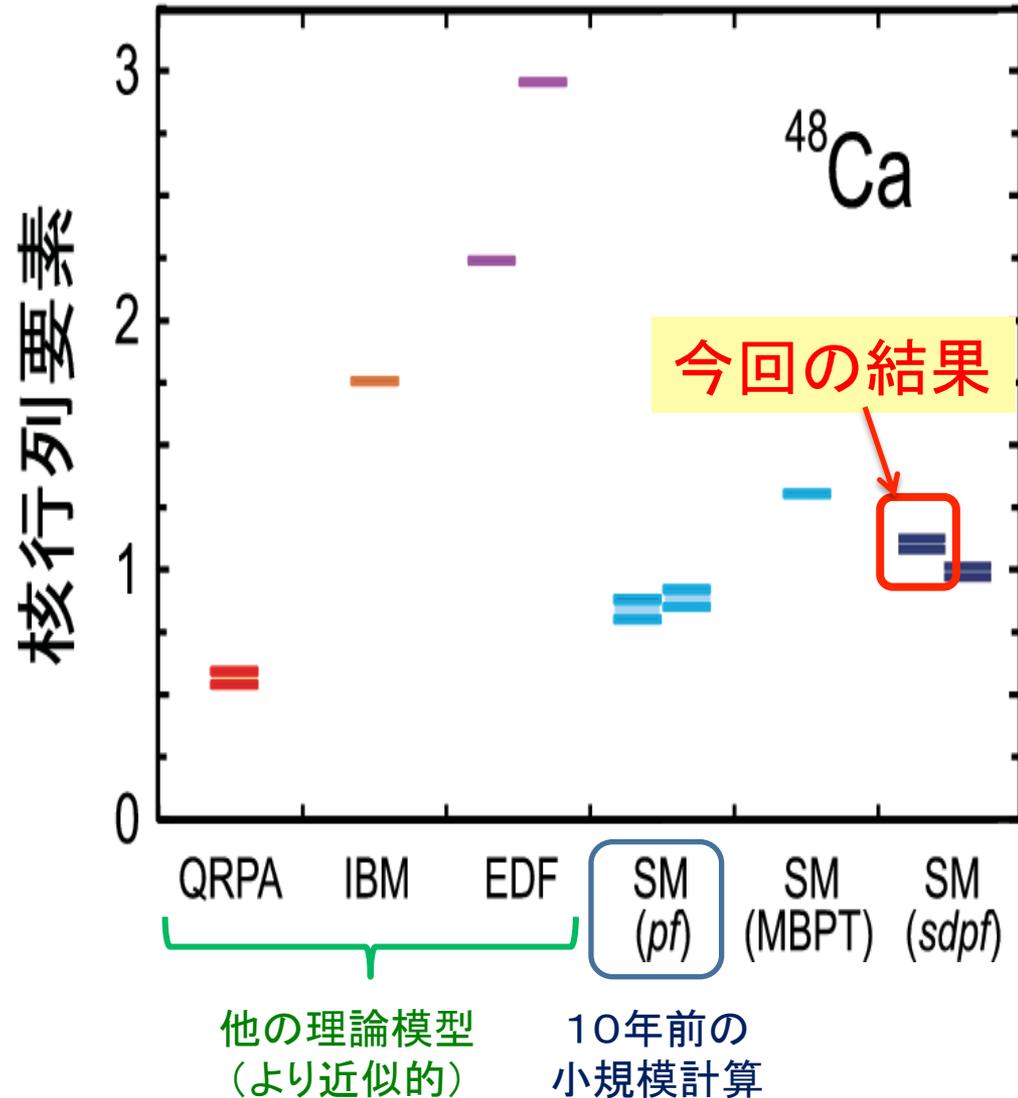
- 大次元(20億次元)の行列を計算し、対角化を行うことによって活性化の効果が分かる
- 大型計算なのでスーパーコンピュータ「京」が活躍

フランスのグループが10年前に行った小規模計算をはるかに凌ぐ規模

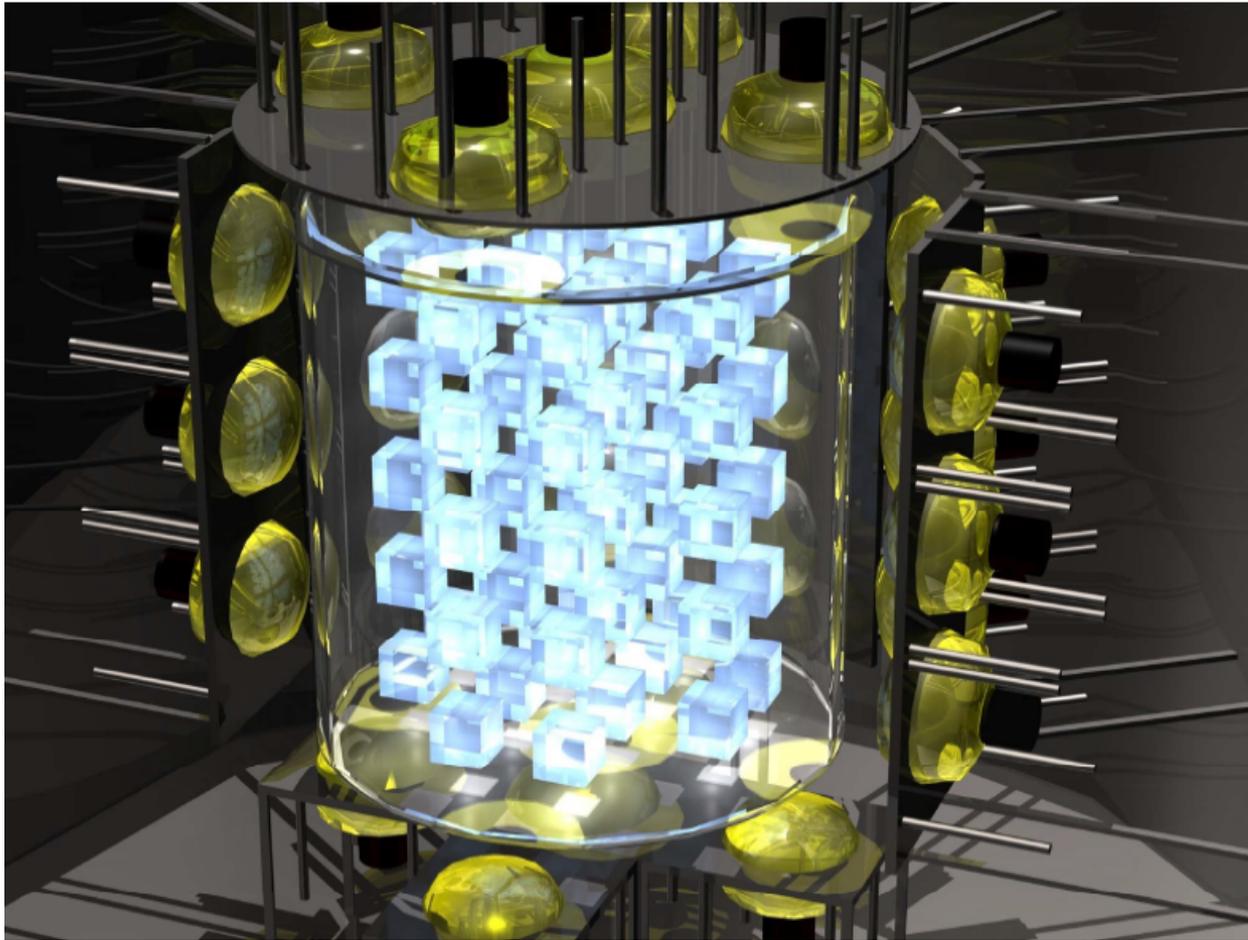
- 結果にどれ位の差が生じるかは事前には分からず核行列要素が増えるか、減るかも不明だった

計算結果とその意義

- 従来の殻模型計算に比べて核行列要素が約30%増大。
 - 半減期を約半分にする効果。
- **最も信頼度の高い値。**
 - 従来の計算に対する補正の主要部分を評価した。
 - 半減期が測定されれば、ニュートリノの質量をより高い精度で決められる。
 - 他の理論模型に対する高精度化を促す。



^{48}Ca からの二重ベータ崩壊の実験研究



我が国における
実験施設である
CANDLEs IV の
イメージ図

大阪大学グループ
により
宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子
研究施設内に建設中

先行施設は奈良県
大塔村の
ELEGANT 施設

大阪大学 岸本氏提供

他に ^{136}Xe からの二重ベータ崩壊研究が宇宙線研究所によって行われている

二重ベータ崩壊のシミュレーション研究の今後

より重い原子核での実験研究が世界各地で進展

^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd

対応する理論計算を行う。 ^{76}Ge と ^{82}Se に関しては始まっている。

ニュートリノ質量をより精確に知るには多くの実験を組み合わせる必要がある。稀少イベントなので誤差の減少には時間がかかる。

重い原子核での計算には**ポスト「京」コンピュータ**が力を発揮！

文部科学省 ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題
(重点課題) (9)「宇宙の基本法則と進化の解明」

<https://www.jicfus.jp/jp/research/project/jutenkadai9>

論文情報

雑誌名 : Physical Review Letters (フィジカル レビュー レターズ、アメリカ物理学会)

論文タイトル : Large-scale shell-model analysis of the neutrinoless $\beta\beta$ decay of ^{48}Ca

著者 : Y. Iwata, N. Shimizu, T. Otsuka, Y. Utsuno, J. Menendez, M. Honma, T. Abe

現在 校正中

オンライン出版予定 3月16日(米国時間)

掲載号 3月18日号の予定

解禁は3月17日午前0時(日本時間)を予定。
ただし印刷所との協議の結果変更の可能性がわずかにあります。
ご連絡するので連絡先を残してください。