

素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム 2016年3月30-31日(30日) ワテラスコモンホール、東京

HPCI からポスト「京」へ

東京大学大学院理学系研究科 大塚孝治













中性子(●)や陽子(●)がコアに束縛された 周回軌道を(量子論に従いながら)回る

2個の核子(中性子や陽子)の間に<mark>核力</mark>が 働き、軌道が変わる

ポテンシャルで束縛された一粒子軌道のエネルギーで表現すると...



コア

多数の核子が回っていて、それらが核力の作用によって軌道を変える → 様々な配位の状態の重ね合わせで原子核の構造は表される これを数値シミュレーションで求める



伝統的な殻模型計算:軌道のセットから得られる全ての配位を取り入れる(直接対角化)

賢くやると、	→ モンテカ	ルロ殻模型
	Η ≈	$ \left(\begin{array}{cccc} * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array}\right) $

ー粒子軌道同士を混ぜて、配位(スレーター行列式)を作る → 対角化の基底ベクトル

そのような基底ベクトルを量子モンテカルロ法と変分法で最適化 → 行列を大幅に小型化し、大きな量子システムを計算可能にする



Conjugate gradient taken from wikipedia



到達点の中から

Chiral EFT に基づいた有効相互作用による計算

重いエキゾチック原子核の計算

低励起の離散的スペクトルから高励起の(準)連続スペクトルへ 方法論的ブレークスルー

他に

軽い核の第一原理計算 阿部喬、吉田亨 二重ベータ崩壊 岩田順敬 核変換 富樫智章 子 清水則孝

江幡 修一郎(北大へ)、月山 幸志郎(non academic へ)

外部共同研究者 宇都宮穰(原研)、本間道雄(会津)、鈴木俊夫(日大)、高柳和雄(上智) M.H.-Janssen(MSU/Oslo), J. Menendez(東大)、J. Vary(Iowa), P.Marris(Iowa)、他



Input from chiral Effective Field Theory (EFT) of QCD



Novel method for in-medium correction

Kuo-Krenciglowa method * KK method

Divergence problem in multi-shell

$$H = H_0 + V$$

= $\begin{pmatrix} PH_0P & 0\\ 0 & QH_0Q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} PVP & PVQ\\ QVP & QVQ \end{pmatrix}$

$$\hat{Q}(E) = PVP + PVQ \frac{1}{E - QHQ} QVP$$

$$H = H'_0 + V'$$

= $\begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & QH_0Q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P\tilde{H}P & PVQ \\ QVP & QVQ \end{pmatrix},$

$$H_{\rm BH}(E) = PHP + PVQ \frac{1}{E - QHQ} QVP.$$

$$V_{\rm eff}^{(n)} = \hat{Q}(\epsilon_0) + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{Q}_k(\epsilon_0) \{V_{\rm eff}^{(n-1)}\}^k.$$

$$\tilde{H}_{\rm eff}^{(n)} = \tilde{H}_{\rm BH}(E) + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{Q}_k(E) \{\tilde{H}_{\rm eff}^{(n-1)}\}^k$$

^{*} E. M. <mark>K</mark>renciglowa and T. T. S. <mark>K</mark>uo, Nucl. Phys. A 235, 171 (1974). 角田直文 **

N. Tsunoda, K. Takayanagi, M. Hjorth-Jensen, and T. Otsuka, Phys. Rev. C 89, 024313 (2014).

EFT NN int. + Fujita-Miyazawa 3N int. with averaging (to be replaced by EFT N2LO 3N int.)

V low k : treatment of high-momentum components

EKK : in-medium correction (core polarization)

Shell model Hamiltonian



Effective single-particle energy (*N* or *Z* dependence of effects of monopole int.)

Energy levels, electromagnetic matrix elements (diagonalization of Hamiltonian matrix)

Shell Evolution: 設構造の進化 Island of Inversion での有効一粒子エネルギー



Shell evolution arises also from QCD

TO *et al*. Phys. Rev. Lett. 104, 012501 (2010)

同じハミルトニアンを対角化 sd + pf shell (従来の"G-matrix" 手法では発散)





新しい魔法数 N= 32 and 34 の出現と核力





中重核での系統的計算の例

形の共存 (shape coexistence)



Energy levels and B(E2) values of Ni isotopes



実験との共同研究(Niと近傍核の場合) ー 世界の実験コミュニティにも貢献 ー

MSU (アメリカ) での実験

S. Suchyta, S. N. Liddick, Y. Tsunoda, T. Otsuka, M. B. Bennett, A. Chemey, M. Honma, N. Larson, C. J. Prokop, S. J. Quinn, N. Shimizu, A. Simon, A. Spyrou, V. Tripathi, Y. Utsuno, and J. M. VonMoss, "Shape coexistence in 68Ni", Phys. Rev. C 89, 021301(R) (2014) http://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.89.021301

CERN-ISOLDE (スイス) での実験

F. Flavigny, D. Pauwels, D. Radulov, I. J. Darby, H. De Witte, J. Diriken, D. V. Fedorov, V. N. Fedosseev, L. M. Fraile, M. Huyse, V. S. Ivanov, U. K\"oster, B. A. Marsh, T. Otsuka, L. Popescu, R. Raabe, M. D. Seliverstov, N. Shimizu, A. M. Sj\"odin, Y. Tsunoda, P. Van den Bergh, P. Van Duppen, J. Van de Walle, M. Venhart, W. B. Walters, and K. Wimmer,

"Characterization of the low-lying 0+ and 2+ states in 68Ni via beta decay of the low-spin 68Co isomer", Phys. Rev. C 91, 034310 (2015)

http://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.91.034310

MSU (アメリカ) での実験

C. J. Chiara, D. Weisshaar, R. V. F. Janssens, Y. Tsunoda, T. Otsuka, J. L. Harker, W. B. Walters, F. Recchia, M. Albers, M. Alcorta, V. M. Bader, T. Baugher, D. Bazin, J. S. Berryman, P. F. Bertone, C. M. Campbell, M. P. Carpenter, J. Chen, H. L. Crawford, H. M. David, D. T. Doherty, A. Gade, C. R. Hoffman, M. Honma, F. G. Kondev, A. Korichi, C. Langer, N. Larson, T. Lauritsen, S. N. Liddick, E. Lunderberg, A. O. Macchiavelli, S. Noji, C. Prokop, A. M. Rogers, D. Seweryniak, N. Shimizu, S. R. Stroberg, S. Suchyta, Y. Utsuno, S. J. Williams, K. Wimmer, and S. Zhu,

"Identification of deformed intruder states in semi-magic 70Ni", Phys. Rev. C 91, 044309 (2015) http://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.91.044309

理研RIBF での実験

Y. Shiga, K. Yoneda, D. Steppenbeck, N. Aoi, P. Doornenbal, J. Lee, H. Liu, M. Matsushita, S. Takeuchi, H. Wang, H. Baba, P. Bednarczyk, Zs. Dombradi, Zs. Fulop, S. Go, T. Hashimoto, M. Honma, E. Ideguchi, K. Ieki, K. Kobayashi, Y. Kondo, R. Minakata, T. Motobayashi, D. Nishimura, T. Otsuka, H. Otsu, H. Sakurai, N. Shimizu, D. Sohler, Y. Sun, A. Tamii, R. Tanaka, Z. Tian, Y. Tsunoda, Zs. Vajta, T. Yamamoto, X. Yang, Z. Yang, Y. Ye, R. Yokoyama, and J. Zenihiro,

"Investigating nuclear shell structure in the vicinity of 78Ni: Low-lying excited states in the neutron-rich isotopes 80, 82Zn", Phys. Rev. C 93, 024320 (2016)

http://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.93.024320

理研RIBF、及び、CERN-ISOLDEでの実験の共同論文は多数準備中

⁶⁸Ni 原子核における球形な基底状態と回転バンドの共存



MCSM basis vectors on Potential Energy Surface

eigenstate $\Psi = \sum c_i P[J^{\pi}] \Phi_i$

- PES is calculated
 by CHF for the shellmodel Hamiltonian
- Location of circle : quadrupole deformation of unprojected MCSM basis vectors
- Area of circle :

overlap probability between each projected basis and eigen wave function



Slater determinant \rightarrow intrinsic shape

Called *T-plot* in reference to

Y. Tsunoda, TO, Shimizu, Honma and Utsuno, PRC 89, 031301 (R) (2014)

Shape assignment to various eigenstates of ⁶⁸Ni



Underlying mechanism of the appearance of low-lying deformed states : Type II Shell Evolution (→ Dual Quantum Liquid picture)

TO and Y. Tsunoda, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 43 (2016) 024009



40Zrアイソトープに於ける「形の転移」と「変形共存」

shape transition shape coexistence

96Zrにおける変形共存の例



中重核領域で計算した原子核 角田佑介、富樫智章

□ 二重魔法数核



ポスト京では、さらに重い領域を開拓 例えば、変形共存の最もきれいな例とされる 186Pb などを最新の核力で取り組む 新しい方法論的発展: MCSMによる(準)連続スペクトル記述 (E1励起を例にとって)



Photoabsorption cross section of ⁸⁸Sr(Z=38,N=50), ⁹⁰Sr(Z=38,N=52)



→ 詳細は清水氏の講演で

 まとめと展望
 精密な核力から出発した量子多体問題の解法

 (i) モンテカルロ法、(ii) 変分法、(iii) 外挿法

 の組み合わせ

従来の直接対角化法の限界を越え、スパコンの性能とともにフロンティアは先へ広がる

原子核物理学

基本核力や殻進化などのパラダイムと観測量である実験データを結びつけ

→ ポスト京では、より重い核へ

Dual Quantum Liquid や相転移に関わる基本概念の革新

→ ポスト京では、これらの検証

理研 RIBF などの世界各地の大型 RIビーム加速器による実験核物理との連携

→ ポスト京では、さらに広範囲に強化、応用にも関わる領域





Monopole effect of tensor force TO, Suzuki *et al.* PRL

One-dimensional collision model

TO, Suzuki *et al.* PRL 95, 232502 (**2005**) TO, Phys. Scr. T152, 014007 (2013)

At collision point: $\Psi \propto e^{ik_1x_1}e^{ik_2x_2} + e^{ik_2x_1}e^{ik_1x_2} = 2e^{iKX}\cos(kx)$



Photoabsorption cross section of ⁹⁰Zr(Z=40,N=50)

基底状態(20基底)

- => 演算子による生成(20基底x18演算子 = <u>360基底</u>)
 - + 演算子のvariational shift (15基底×10演算子×2 iteration = 300基底)
 - + MCSM変分(45状態, <u>100基底</u>) = <u>760基底</u>

