平成１４年度大型シミュレーション研究課題報告書

延与佳子（KEK 素核研），小野章（東北大理），古田　琢哉（東北大理）

受理番号

大型-93

研究課題名反対称化分子動力学による核構造と重イオン反応の研究

研究組織

	氏名	所属機関・部局	身分
研究責任者	延与佳子	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所	助手
研究従事者	小野章	東北大学 大学院理学研究科物理学専攻	助手
研究従事者	古田　琢哉	東北大学 大学院理学研究科物理学専攻	博士後期課程

研究内容

sd シェル領域原子核の基底状態および励起状態の研究

反対称化分子動力学による不安定核と安定核の励起状態の構造研究を行った．平成１４年度に開発した有限レンジ３体力を含む有効相互作用を、^{40}Ca などに適用し、低励起状態における変形共存と高励起状態に現れる分子的状態を統一的に記述することに成功した。^{40}Ca では最近のγ 線測定実験で数々の高スピン状態が発見され、低い励起エネルギー領域に非常に大きな変形をもつ超変形状態が見つかった。有限レンジ３体力を含む有効相互作用を用いた反対称化分子動力学（ＡＭＤ）の計算で、この超変形状態が ^{28}Si+^{12}C クラスター的な洋梨形（八重極変形）の奇妙な変形をもつ可能性を予言した。超変形状態は平均場的描像で 8 粒子-8 空孔の配位をもつと考えられているが、実際、ＡＭＤ計算で得られた結果においても 8 粒子-8 空孔的な成分が主要であることがわかり、平均場的性質とクラスター的性質が共存している可能性を示した。八重極変形の理論的予言を確かめる現象として、負パリティの回転帯、および、超変形の励起状態としての分子的状態について理論的研究を行った。その結果、超変形のクラスター励起状態として ^{28}Si+^{12}C 分子的状態が現れることを理論的に予言した。

他の sd シェル核について、^{28}Si, ^{32}S についても低エネルギー領域の変形共存と高励起状態における分子的構造を統一的に記述し、^{40}Ca の場合と同様に、分子的状態が低励起の変形状態のクラスター的励起状態として説明できることを示した。sd シェル核において、低エネルギーの変形共存と高励起の分子的状態を微視的理論に基づいて統一的に記述することは、これまで行われたことがなく、sd シェル核におけるクラスター的様相の重要性を示す独創的なな成果である。安定核だけでなく、sd シェルの不安定核においても、クラスター的性質を反映した現象が現れるかどうかは非常に興味深い問題である。今年度は、中性子過剰な Si アイソトープや Mg ア

イソトープについて研究し、ＡＭＤの結果は中性子過剰な sd シェル核において多様な分子的状態が現れる可能性を示唆している。

有限レンジ 3 体力を含む有効相互作用は、幅広い質量数の結合エネルギーや半径を系統的に再現できる相互作用として優れているが、より汎用性の高い相互作用として、ゼロレンジ密度依存項を含む有効相互作用の開発を進め、2 体力項部分の核力レンジが、励起状態や核物質の EOS の性質に影響を与えうることがわかった。

AMD による原子核の液相気相相転移の計算

一般に核衝突の研究を通じて様々な状況下の核物質の性質を探ることができると考えられるが，そのひとつとして液相気相相転移が興味を持たれている．通常 AMD のような微視的動力学模型は核衝突の時間発展を計算するために用いられるが，その一方で，AMD の時間発展を用いて理想的な熱平衡状態 (ミクロカノニカルアンサンブル) を作り出し，系の統計的性質を理論的に計算することも可能である．平成 15 年度は，主に後者の視点から，有限核子多体系における液相気相相転移を研究した．

AMD によりミクロカノニカルアンサンブルを作るためには，原子核反応の計算と比べると AMD 計算を長時間精度よく続ける必要がある．また，気体部分の核子を用いて温度を評価するため，核子の一体運動を特に注意して扱う必要があることもわかった．そこで従来の計算コードを改良し，信頼できる統計計算ができるようになった．

圧力一定下のカロリー曲線を描いたところ，圧力があまり高くない場合にはバックベンディングが見られ，液相気相相転移を示す結果が得られた．また，高圧ではバックベンディングはなくなるが，その境界が臨界点を与える．バックベンディングの形状や臨界点については，実験や他の理論の予想とよく似た結果が得られた．また，以前の計算に比べると，計算コードの改良により，バックベンディングの形状が改善された．

また，カロリー曲線の計算のほかに，圧力一定の線に沿ってフラグメントの質量数分布を調べた．その結果は，低エネルギーでは小さな原子核・核子のほかに大きな原子核がひとつある状況に対応する U 字型の質量数分布となり，エネルギーが増すにつれ，大きな原子核のピークが次第に小さくなってべき関数型に変わり，さらに指数関数型へと変化する様子が見られた．この質量分布の変化が，カロリー曲線に示される液相気相相転移とよく対応していることが確認された．

また，平成 14 年度の研究課題であった核衝突におけるアイソスピン効果に注目した研究については，計算結果の解析や物理的意味の解釈を進め，特に，フラグメントのアイソスピン組成とアイソスケーリングのパラメータから低密度・有限温度での核物質の対称エネルギーを抽出できることが明らかになった．

さらに，様々な微視的シミュレーション理論のコードを比較するための国際的共同研究に参加するため，入射エネルギー 100 MeV での Au + Au 衝突の計算を実施した．現在得られている結果では，様々な計算コードの結果の間にいくらかのばらつきはあるものの，ラピディティ分布やフローなど基本的な (フラグメントに関係ない) 量に関してはかなりよく一致しており，AMD の結果は様々なコードの結果の中間にあるようである．

研究成果発表

査読つき論文

- Y. Kanada-En'yo, Y. Akaishi, "NEW EFFECTIVE NUCLEAR FORCES WITH A FINITE RANGE THREE BODY TERM AND THEIR APPLICATION TO ANTISYMMETRIZED MOLECULAR DYNAMICS" Phys.Rev.C69,034306(2004)
- Y. Kanada-En'yo, M. Kimura , H. Horiuchi, "CLUSTERING IN STABLE AND UNSTABLE NUCLEI IN P SHELL AND SD SHELL REGIONS." to appear in Nucl.Phys.A. (*the proceedings of 8th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics* (CLUSTER03), Nara, Japan, 24-29 Nov 2003.)
- A. Ono, P. Danielewicz, W. A. Friedman, W. G. Lynch and M. B. Tsang, "Isospin fractionation and isoscaling in dynamical simulations of nuclear collisions", Phys. Rev. C **68** 051601(R) (2003).
- A. Ono and H. Horiuchi, "Antisymmetrized molecular dynamics for heavy ion collisions," to be published in Porg. Part. Nucl. Phys.
- A. Ono, P. Danielewicz, W. A. Friedman, W. G. Lynch and M. B. Tsang, "Isospin fractionation and isoscaling in dynamical nuclear collisions", *Proc. The 8th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Nara, November 24–29, 2003.* to be published in Nucl. Phys. A.

その他の論文

- Y. Kanada-En'yo, "SHAPE COEXISTENCE IN N = 14 ISOTONES: B-19, NE-24 AND SI-28." the proceedings of International Symposium on Frontiers of Collective Motions (CM 2002) 254-259.
- Y. Kanada-En'yo, M. Kimura , H. Horiuchi, "Clustering in stable and unstable nuclei in *sd*- and pf-shell regions" Proceedings of the VIII International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2003).
- T. Furuta and A. Ono, "Nuclear liquid-gas phase transition studied with antisymmetrized molecular dynamics", submitted to Phys. Rev. Letters.
- T. Furuta and A. Ono, "Nuclear liquid-gas phase transition studied with antisymmetrized molecular dynamics," *Proc. YITP Workshop on Nuclear Matter Under Extream Conditions, Kyoto, December 1–3, 2003.* to be published in Prog. Theor. Phys. Suppl.

口頭発表

- Y. Kanada-En'yo, M. Kimura , H. Horiuchi, "CLUSTERING IN STABLE AND UNSTABLE NUCLEI IN P SHELL AND SD SHELL REGIONS." 8th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (CLUSTER03), Nara, Japan, 24-29 Nov 2003.(Invited talk)

- Y. Kanada-En'yo, M. Kimura , H. Horiuchi, "Clustering in stable and unstable nuclei in sd- and pf-shell regions" the VIII International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2003), Moscow, Russia, 17-21 June, 2003.(Invited talk)
- A. Ono, "AMD Study of Nuclear Collisions with High Isospin Asymmetry," *The 8th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Nara, November 24–29, 2003.*
- T. Furuta, "Nuclear liquid-gas phase transition studied with antisymmetrized molecular dynamics," *The 8th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Nara, November 24–29, 2003.*
- T. Furuta, "Nuclear liquid-gas phase transition studied with antisymmetrized molecular dynamics," *YITP Workshop on Nuclear Matter Under Extream Conditions, Kyoto, December 1–3, 2003.*
- A. Ono, "AMD Studies of Nuclear Collisions and Phase Transition," *Workshop Consensus Initiative I: Dynamics and Thermodynamics with nucleonic degrees of freedom, Catania, January 19–24, 2004.*
- 延与佳子,「sdシェル核における変形状態と分子共鳴状態」日本物理学会 *(2004.3.27 – 30,* 九州大学，福岡*)*
- 小野章, P. Danielewicz, W. A. Friedman, W. G. Lynch, M. B. Tsang,「動的核衝突におけるアイソスケーリング」日本物理学会 *(2004.3.27 – 30,* 九州大学，福岡*)*