

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21540253

研究課題名（和文） 微視的理論による核物質の動的現象と熱力学的性質の研究

研究課題名（英文） Study of dynamical and thermodynamical properties of nuclear matter with microscopic approaches

研究代表者

小野 章 (ONO AKIRA)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：20281959

研究成果の概要（和文）：

重イオン衝突など励起した核子多体系の微視的動力学計算を総合的に推進し、そこに実現する核物質の現象と諸性質を解明するための研究を行なった。主に反対称化分子動力学（AMD）を用いたが、他の模型との比較からも有用な理解が得られた。特に、状態方程式（特にアイソスピン非対称な系における対称エネルギー）の効果やクラスター相関に着目した。重イオン衝突でのクラスター相関は非常に強く、それを記述するためにAMDに新しい理論的拡張を行い、格段に信頼性の高いの計算が可能となった。

研究成果の概要（英文）：

We performed systematic studies of phenomena and various properties in excited nuclear many-body systems such as those in heavy-ion collisions, employing microscopic dynamical models. Antisymmetrized molecular dynamics (AMD) is mainly employed but useful information was obtained by comparisons with other models. We paid special attention to the effects of equation of state (in particular the symmetry energy in isospin-asymmetric systems) and the cluster correlations. In order to describe the strong cluster correlations in heavy-ion collisions, we introduced a new theoretical extension into AMD, which enables calculations with much higher reliability.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：原子核物理学（理論）

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：重イオン衝突、破砕反応、状態方程式、対称エネルギー、液相気相転移、クラスター相関、反対称化分子動力学

1. 研究開始当初の背景

陽子・中性子などのハドロンにより構成される多体系を“物質”として捉え、その諸性質を解明することは、原子核物理学の基本課題のひとつである。密度・温度・組成（陽子中性子非対称度）を制御することにより様々な物質形態が現れる。核物質の性質は天体物理学的現象の理解にも必要である。高密度の状態方程式に加えて、低密度の不均一核物質も重要であり、液相気相転移としても興味を持たれている。

核物質を実験室で実現して諸相と性質を探るため、世界各国で重イオン衝突の実験研究が行われている。理研のRIBFでは、衝突で作られる中性子過剰核物質に関して、当面は諸外国の施設には真似のできない実験成果が期待され、実験の計画も進行中である。実験結果から十分な研究成果を引き出すためにも、理論研究を十分に発展させることが求められている。

2. 研究の目的

本研究では、重イオン衝突（核子当たり数十MeVから数百MeVのエネルギー領域）の理論研究を微視的動力学計算を中心として総合的に推進することにより、原子核反応の動的過程で起こる多彩な現象を定性的かつ定量的に理解するとともに、そこに実現される核物質の諸相と性質を明らかにする。特に陽子中性子比（アイソスピン）の自由度に着目して研究を行い、注目すべき現象や性質と実験での観測量との関係を明確にする。

状態方程式を測定・決定するための理論研究に加え、低密度での不均一核物質や液相気相転移、クラスター相関、フラグメント生成機構、熱平衡系と動的に時間発展する系の関連などの観点からも研究する。反応計算と同じ微視的計算を中性子星・原始中性子星の計算に適用することも視野に入れる。

3. 研究の方法

重イオン衝突では核子多体系の高励起状態が実現するが、依然として種々の量子効果は重要であり、かつ、無数の反応チャンネルが出現する。本研究ではそれを記述するのに適した微視的動力学理論として、主として反対称化分子動力学法（AMD）を用いる。必要な場合にはAMDの理論を拡張しつつ、AMDの反応計算の結果などを実験データと比較することにより、核物質の諸性質がいかにか現象に現れているかを解明していく。

また、フェルミ粒子分子動力学（FMD）

や確率的平均場理論（SMF）のような他の微視的動力学理論の結果をAMDと比較することにより、計算結果の相違を究明しつつ現象の理解を深める。そのため他の理論研究者との共同研究を行う。

4. 研究成果

重イオン衝突（入射エネルギー数十～数百MeV、衝突径数の小さい中心衝突）では、圧縮された一体となった系が膨張しながら、核子や小さいクラスターとともに多数の破砕片原子核が形成される。雑誌論文⑤では、この機構について、AMDとイタリアのM. ColonnaによるSMFの計算結果を比較した。両模型の起源は異なるが、それぞれの拡張により、現在では同様の要素が取り入れられている。ただし詳細な近似方法が異なり、SMFでは多体相関によるゆらぎが一部省略されているため、AMDの方が膨張の過程で密度ゆらぎが速く発達する。また、SMFの方が膨張過程での核子（気体）の放出が多く、それが破砕片原子核（液体）の陽子・中性子比にも大きく影響を及ぼすことがわかった。同時に、液体の陽子・中性子比が対称エネルギーの密度依存性を反映していることが各模型で確認できたが、実験データとの比較から対称エネルギーを導き出すためには、前平衡過程での核子放出を十分に理解することが重要課題であると言える。AMDとSMFはいずれも最終的な既存の実験観測量を再現できる模型である。したがって、この研究の結果は、重イオン衝突から核物質の性質を引き出すためには反応の中間段階をより良く理解することが必要であることを意味しており、今後の実験的・理論的研究を方向づけるものである。

重イオン衝突での系の膨張は、膨張速度が小さい極限では原子核の圧縮膨張振動（単極子振動）に接続すると考えられる。この観点からフランスの共同研究者（古田琢哉, F. Gulminelli）らとの共同研究にK. Hasnaouiとともに加わった[雑誌論文⑥]。AMDは核子波束の幅を固定する枠組みであるが、波束幅も力学変数とするFMDを用いた計算も行なった。振動周期と核物質の圧縮率との関係を確認したほか、振幅と振動周期との関係（振動の非調和性）や振動モードの分析を行い、興味深い結果が得られた。例えば、FMDでは波束幅の時間変化に対応する振動モードと波束中心の運動による振動モードの二つのモード存在することがわかり、AMDでは前者のモードは存在しないものの後者のモードを記述できていることがわかった。波束中心の運動による振動モードは大振

幅では重イオン衝突でのクラスター生成や破砕片形成につながるので、小振幅の集団運動と核物質の膨張・破砕とを関連付けて理解する上で重要な研究結果であると言える。また、現段階では核構造研究としては初期的なものであるが、今後精密化することができれば、原子核の単極子強度と重イオン衝突を統一かつ精密に理解する可能性が開拓できると思われる。

AMDとSMFの比較でも述べたように、AMDでの核子放出数はSMFより少ない。それにもかかわらず、通常のAMD計算での陽子放出数は実験データの倍以上である。質量数が百程度の原子核の衝突（核子あたり50 MeVの入射エネルギー）の実験では、放出される陽子は系全体の陽子のたった1割である。これを説明するには、従来の理論が主として考慮していた核子の独立粒子運動よりも、 α 粒子などのクラスターを作る相関が主要な役割を果たしているのだと考えるほうが自然である。その考えに基づいて、AMDにクラスター相関を適切に取り入れる理論的拡張を行なった[雑誌論文②]。具体的には、AMD計算での各々の二核子衝突の際に、衝突した核子が終状態で周囲の他の粒子とクラスター（重陽子、三重陽子、 α 粒子など）を作る過程を導入した。計算の結果では、反応の途中でクラスター相関は非常に強く現れ、クラスターを組んでいない核子の数は全核子の数割程度と少なくなった。また、並進運動の実質的な自由度が減るために各自由度に分配されるエネルギーが増え、膨張する核物質はクラスターから成る気体の様相を呈する。そのため、より重い破砕片原子核（液体）が過小となる。そこで、クラスターを作る相関だけでなく、複数のクラスターが結合する相関も重要なのだという着想が得られ、そのような量子力学的なゆるい結合を取り入れるための現象論的な拡張を行なった。その結果、上述の典型的な反応系だけでなく、数百MeVでの重い原子核の衝突でも、陽子・ α 粒子・より重い破砕片原子核の生成量などの実験データをよく再現することができた。また、ごく最近の研究では、複数クラスターの結合の方法を改善することにより、より低エネルギーの重イオン衝突も含めてよく記述できそうである。このクラスター相関の導入は、核子の独立粒子運動を主と考える従来の理解を転換するものであり、意義が大きい。これまで重イオン衝突の計算にクラスター相関を取り入れる試みは皆無ではないが、 α クラスターまで取り入れて計算を実現したのはAMDが初めてである。重イオン衝突で実現する核物質の物理的状态については、実験データと計算との比較から、

相当に励起しているにも関わらずクラスター相関が極めて強いと言える。また、実験データの総合的な記述（核子・クラスター・破砕片原子核への質量やエネルギーの分割）が大きく改善したことにより、状態方程式の研究についても信頼性が高まる。さらに、強いクラスター相関は液相気相転移や低励起状態の構造など核物質や原子核の性質にも影響すると考えられ、今後の重要な研究課題である。理論上は、クラスター相関と独立粒子運動との一貫した理解を得ることも今後の興味深い課題であろう。

重イオン衝突における陽子・中性子の特徴的な運動の解明と状態方程式との関連については、AMDとSMFの比較でも触れたが、その他にもAMDによる分析を行なった。入射核と標的核の間の陽子・中性子の移行（アイソスピン拡散）に関しては、衝突径数と対称エネルギーの密度依存性（いわゆるLパラメータ）に対する依存性について、AMDの結果を他の模型計算と比較した[学会発表⑩]。その結果、AMDの結果は他の模型と類似したL依存性を示したが、アイソスピン拡散の絶対値と衝突径数依存性にはモデルによるばらつきがあることが判明した。したがって、アイソスピン拡散以外の観測量にも注意して計算と実験の比較を進めていくべきである。このAMD計算はクラスター相関を導入する前のものであるが、クラスター相関の取り扱いが確立した後に、クラスター相関とアイソスピン拡散の関係を調べる予定である。また、クラスター相関を取り入れたAMDを用いては、中心衝突での圧縮・膨張・破砕片生成の過程における対称エネルギーのL依存性の分析を進めた[雑誌論文①など]。圧縮段階での高密度部分（すなわち中心付近）の陽子・中性子比は高密度での対称エネルギーを顕著に反映しているが、その後の膨張に伴い、次第に低密度での対称エネルギーが重要な役割を担うようになり、液相気相に分離する際の蒸留の度合いが決まっている。この解釈により最終的な破砕片（液体）の陽子・中性子比のL依存性が説明できる。また、三重陽子とヘリウム3の生成を記述できるのがこのAMD計算の特徴のひとつであるが、これらのクラスターのエネルギースペクトルは、陽子・中性子比のL依存性などの観点において、確かに系の気体部分の特徴を反映するものであることが確かめられた。ただし、これらの結果を実験データと比較してみると、データを再現するにはLパラメータが相当に小さい必要がある。すなわち、膨張段階で陽子の膨張速度が中性子の膨張速度よりも相当速いことを実験データが示唆していると考えられる。これが対称エネルギー

一によるものなのか、それとも他の要因によるものなのか、今後検討を進めていく必要がある。

非常に重い系への応用を念頭にAMD計算の高速化を図るため、ゼロレンジ相互作用であるスキーム力に特化した計算コードを開発した。スキーム力の場合、相互作用エネルギーを空間積分で表すことができ、その空間積分を数値計算することにより、従来のAMDの計算法より高速に計算できる可能性がある。コードのチューニングにより相当の高速化を達成した。これにより、重イオン反応では、従来用いられてきた近似（三重ループ近似）の必要がなくなり、数値誤差がない計算が可能となった。ただし、通常スキーム力による平均場の運動量依存性は、低エネルギーでしか妥当でない。高エネルギーまで適切な運動量依存性を持たせるため、相互作用（エネルギー汎関数）を修正する必要があるが、その方法を考案した。今後は核子あたり数百MeVの高エネルギー重イオン衝突においても、この新しいコードで高速な計算が可能である。また、この新しい計算アルゴリズムでは、核子が数千の系も計算可能となり、周期定期境界条件を課した無限系（中性子星や超新星爆発に現れる核物質）のシミュレーションが視野に入ってきた。そこで、本補助金で雇用した古田琢哉氏とともに、大きな系に周期的境界条件を課して完全な反対称化を行うための定式化を行なった [学会発表⑫]。相互作用のない系の計算を実施して反対称化の及ぶ距離を求めたところ、飽和密度程度では波束幅の約10倍であることがわかった。このことから、シミュレーションの体積は有限の大きさで十分であり、その値の選択の指針が決まったことになる。また、数値計算を容易にするため、シミュレーションの体積をより小さな単位で分割して波束の配置に周期性を仮定する方法も確立した。

このように、重イオン衝突などにおける励起した核物質について、状態方程式（対称エネルギー）の効果やクラスター相関などに関する一定の成果が得られ、さらに研究が進展しつつある。特に本研究を通じてクラスター相関をAMDの動力学に取り入れる方法が確立するなどの理論的進展があったことも重要な成果であり、関連する課題も含め励起した核子多体系の微視的アプローチによる研究を展開していく意義は大きいと考えている。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計7件）

- ① A. Ono, "Nuclear matter properties in fragmentation reactions", Journal of Physics: Conference Series 436 (2013) 012068 (5 pages). 査読有
doi:10.1088/1742-6596/436/1/012068
- ② A. Ono, "Cluster correlations in multifragmentation", Journal of Physics: Conference Series 420 (2013) 012103 (12 pages). 査読有
doi:10.1088/1742-6596/420/1/012103
- ③ Y. Kanada-En'yo, M. Kimura, A. Ono, "Antisymmetrized molecular dynamics and its applications to cluster phenomena", Prog. Theor. Exp. Phys. 2012 (2012) 01A202 (41 pages). 査読有
doi:10.1093/ptep/pts001
- ④ A. Ono, "Interplay between collision dynamics and nuclear matter properties from microscopic viewpoint", EPJ Web of Conferences 31 (2012) 00023 (10 pages). 査読無
doi:10.1051/epjconf/20123100023
- ⑤ M. Colonna, A. Ono, J. Rizzo, "Fragmentation paths in dynamical models", Phys. Rev. C 82 (2010) 054613 (10 pages). 査読有
doi:10.1103/PhysRevC.82.054613
- ⑥ T. Furuta, K.H.O. Hasnaoui, F. Gulminelli, C. Leclercq, A. Ono, "Monopole oscillations in light nuclei with a molecular dynamics approach", Phys. Rev. C 82 (2010) 034307 (10 pages). 査読有
doi:10.1103/PhysRevC.82.034307
- ⑦ T. Furuta, A. Ono, "Relevance of equilibrium in multifragmentation", Nucl. Phys. A 834 (2010) 555c--557c. 査読有
doi:10.1016/j.nuclphysa.2010.01.089

〔学会発表〕（計20件）

- ① 小野章, 「核反応と高励起核子多体系:分子動力学によるアプローチ」, 日本物理学会第68回年次大会 シンポジウム「微視的核反応論の最前線」, 2013年3月26日～29日, 広島大学東広島キャンパス.
- ② A. Ono, "Cluster correlations in multifragmentation", RIKEN HPCI Workshop on alpha-particle Condensation, Wako, November 13--19, 2012.
- ③ A. Ono, "Nuclear matter properties in fragmentation reactions", 10th

International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Debrecen, Hungary, September 24--28, 2012. (invited talk)

- ④ A. Ono, "Antisymmetrized molecular dynamics", APCTP School on Nuclear Transport, Pohang, Korea, July 4--7, 2012. (invited lecture)
- ⑤ A. Ono, "Cluster correlations in multifragmentation", 11th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions, San Antonio, Texas, USA, May 27 -- June 1, 2012. (invited talk)
- ⑥ 小野章, 「準位密度と状態方程式との関わり」, RCNP 研究会「リングサイクロトロン施設の将来」, 2012年3月21日--23日, 吹田.
- ⑦ 小野章, 「反対称化分子動力学による核物質と核衝突の研究」, 研究会「大規模計算による原子核研究の展開 -核子多体系を中心に-」, 2012年1月24日--25日, 和光.
- ⑧ A. Ono, "Interplay between nuclear collision dynamics and matter properties", YITP-KoRIA Workshop on Nuclear Symmetry Energy, Kyoto, November 10--12, 2011.
- ⑨ A. Ono, "Interplay between collision dynamics and nuclear matter properties from microscopic viewpoint", International Workshop on Multifragmentation and Related Topics, GANIL, Caen, France, November 2--5, 2011. (invited talk)
- ⑩ 小野章, 「重イオン衝突で探る状態方程式」, RIBF ミニワークショップ「中性子星の核物質」, 2011.9.13, 和光.
- ⑪ 小野章, 「AMD による核破砕反応シミュレーション」, RCNP 研究会「RCNP での核データ研究戦略検討会」, 2011.6.28--29, 吹田.
- ⑫ 古田琢哉, 小野章, K.H.O. Hasnaoui, F. Gulminelli, C. Leclercq, J. Olivier, 「反対称化分子動力学の無限核物質への応用」, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011.3.25, 新潟大学五十嵐キャンパス(ウェブ上での発表).
- ⑬ A. Ono, T. Furuta, "Relevance of equilibrium in multifragmentation", The 10th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions, Beijing, China, August 16 -- 21, 2009.
- ⑭ A. Ono, "Clustering in AMD", Workshop on Simulations of Low and Intermediate Energy Heavy Ion Collisions, ECT*, Trento, Italy, May 11 -- 15, 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 章 (ONO AKIRA)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：20281959