

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：15101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06413

研究課題名(和文)重イオン衝突におけるパイ中間子生成と高密度非対称核物質の性質

研究課題名(英文) Pion production in heavy-ion collision and high-density asymmetric nuclear matter

研究代表者

池野 なつ美 (Ikeno, Natsumi)

鳥取大学・地域学部・講師

研究者番号：30756086

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：低中エネルギーでの重イオン衝突によって生成される中間子を通して、対称エネルギーの密度依存性やカイラル対称性の部分的回復に関する情報を引き出すことを目的とし、反対称化分子動力学法(AMD)と微視的輸送模型(JAM)を連動させた輸送模型を用いて研究を行った。反応過程における陽子・中性子のダイナミクスとそこから生じる粒子や中間子の生成機構を理解することができ、さらに対称エネルギーの密度依存性やクラスター相関が中間子比に反映されることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To investigate the nuclear symmetry energy and the partial restoration of chiral symmetry at high density, we have studied the pion production in the intermediate-energy heavy-ion collisions using the transport model that combines antisymmetrized molecular dynamics (AMD) and a hadronic cascade model (JAM). We understood the mechanism how the emitted pions and delta resonances reflect the dynamics of neutrons and protons that is sensitive to the symmetry energy. We also found the effects of cluster correlations as well as of the high-density symmetry energy on the nucleon dynamics and consequently on the pion ratios.

研究分野：原子核理論

キーワード：パイ中間子 対称エネルギー 重イオン衝突 輸送模型 中性子過剰核 パイ中間子原子

1. 研究開始当初の背景

核子あたりの入射エネルギーが数百 MeV の中性子過剰原子核衝突によって生成される π 中間子は、高密度領域 (通常核密度の 2 倍程度) の対称エネルギーの振る舞いを制限できる観測量であると注目されている。そのため、国内外の理論研究者によって様々な輸送模型を用いて π 中間子と対称エネルギーの関係が研究されてきた。しかしながら、得られた理論結果は模型ごとに異なり不定性が大きい現状である。実験研究においては、理研 RIBF で中性子過剰核の衝突実験が計画され、実験結果から十分な研究成果を引き出すためにも、理論研究を進展させることが求められている。

また、 π 中間子原子の研究では、標準核密度以下の低密度領域における π 中間子の情報しか得られていない。線形密度近似を超えた密度依存性の議論を行うためには、高密度領域の情報が必要不可欠である。

2. 研究の目的

低中エネルギーでの重イオン衝突によって生成される π 中間子を通して、対称エネルギーの密度依存性とカイラル対称性の部分的回復に関する情報を引き出すことを目的としている。具体的には、反応過程における陽子・中性子のダイナミクスとそこから生じる Δ 粒子や π 中間子の生成機構を理解するとともに、それらの関係性を明らかにする。その上で、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、荷電 π 中間子の観測量から高密度な対称エネルギーの振る舞いを決定できるかどうかを結論付ける。重イオン衝突では、高密度な核媒質を実現できるため、核媒質中での π 中間子の性質を詳細に調べることから、カイラル対称性の部分的回復に関する密度依存性や非対称核物質の影響を明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

核子あたりの入射エネルギーが数百 MeV のエネルギー領域における重イオン衝突の理論研究を、微視的な輸送模型を用いて推進し、生成される π 中間子の性質を詳細に調べる。重イオン衝突で生成された π 中間子と対称エネルギーを結びつけるためには、原子核同士の衝突の時間発展を正しく解く理論 (輸送模型) が必要であり、本研究では、核子系の運動を記述する反対称化分子動力学 (AMD) 法と、反応過程において Δ 粒子や π 中間子などの生成崩壊などを実験データに基づいて記述する微視的輸送模型 (JAM) を連動させた輸送模型を用いる。

核子の平均ポテンシャルの有無 (AMD+JAM、JAM)、対称エネルギーが異なる 2 つの相互作

用 (硬い/軟らかい対称エネルギー)、反応過程でのクラスター生成の有無の場合について計算を行い、対称エネルギーの違いや核子のクラスター相関が、 π 中間子生成にどのような影響を与えるかを定量的に調べる。

さらに入射核・標的核の陽子・中性子数を変えた原子核の衝突や入射エネルギーを変えた場合についても系統的に計算し、どの実験条件が対称エネルギーの密度依存性の決定に最適であるかを検討する。

核媒質中の π 中間子の性質変化や深く束縛された π 中間子原子研究の相互作用を輸送模型に考慮して、カイラル対称性の部分的回復の密度依存性へと議論を進展させる。

4. 研究成果

(1) 理研 RIBF で実験が計画されている核子あたりの入射エネルギーが 300MeV での中性子過剰な $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 衝突について計算を行った結果、反応過程における陽子・中性子のダイナミクスとそこから生じる Δ 粒子や π 中間子の生成機構が密接に関係していることがわかった。対称エネルギーの密度依存性やクラスター相関は、核子のダイナミクス、特に高密度部分の陽子中性子比に反映されることが確認でき、その核子のダイナミクスが Δ 粒子と π 中間子にどのように影響するかを定量的に調べた結果、 Δ 粒子の生成比 (図 1) が、高密度・高運動量領域における陽子中性子の生成比 (図 2) とよく一致することが明らかになった。また、 Δ 粒子生成比と陽子中性子比は、 π 中間子の生成比と直接関係していることも分かってきた。重イオン衝突での π 中間子生成において、核子のクラスター相関の影響があるため、今後の研究として核子系のモデルの検証が必要となる。そのため、現時点では、終状態で得られる π 中間子の観測量だけではなく、クラスターの情報やフロー等の実験データを組み合わせることで、対称エネルギーの情報を引き出すことが必要であると思われる。

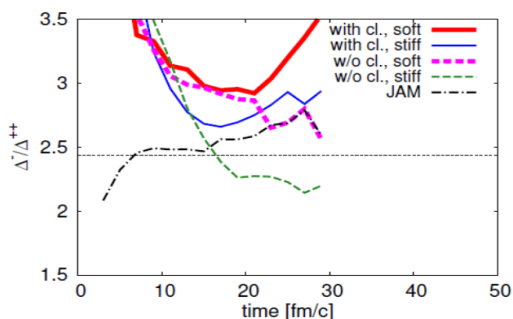


図 1: 入射エネルギーが 300MeV の $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ の系について反応過程において Δ 粒子の生成比の時間発展を計算した結果

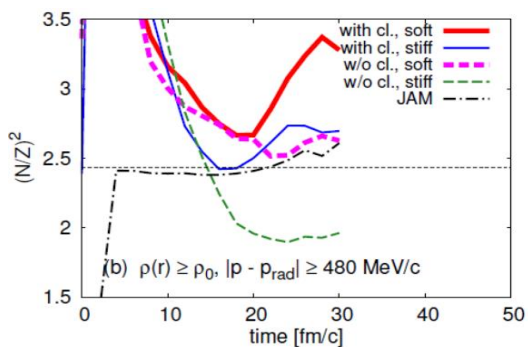


図2：高密度・高運動量領域における陽子中性子の生成比の時間発展を計算した結果

(2) 異なるエネルギーや異なる反応系について、重イオン衝突での π 中間子生成の系統的な計算を行った。陽子中性子数が異なる2種類の原子核衝突 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ と $^{108}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ の場合、入射エネルギーが 270MeV と 300MeV の場合、さらに衝突パラメータの依存性も考慮し、終状態における π 中間子の生成量や比の値の評価を行った。 π 中間子生成の理論的研究に関して、理研での実験データと比較できる準備が整った。今後、 π 中間子以外の観測量について、実験研究者との議論を通して、理論計算を進めていく必要がある。

(3) 重イオン衝突の反応計算において、 π 中間子や Δ 粒子の生成量や比に、これらの粒子が生成・吸収される際の核子のパウリ原理が影響していることがわかった。したがって、 π 中間子比を正しく計算するためには核子のパウリブロッキングも適切に扱う必要がある。パウリブロッキングの取り扱いについて研究を進めることができ、 π 中間子生成への影響や対称エネルギーの密度依存性との関係についてもわかってきた。

(4) 輸送模型比較の国際共同研究が、近年進展し、箱計算(周期的境界条件を課した箱の中の多核子系)での比較が進んでいる。 π 中間子生成を入れた箱計算について、JAMで計算を行い、模型比較に参加した。他の模型と比較することで、異なる理論結果の根源等が明らかになった。

(5) π 中間子原子の研究について、陽子過剰核における π 中間子原子や π 中間子-原子核の相互作用についての研究を行った。 π 中間子の強い相互作用を重イオン衝突反応に考慮するため、 π 中間子原子研究で用いる π 中間子-原子核間の相互作用についても研究を進め、今後模型に考慮する土台が整った。

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3件)

- ① N. Ikeno, J. Yamagata-Sekihara, H. Nagahiro, and S. Hirenzaki, "Formation of Deeply Bound Pionic Atoms and Pion Properties in Nuclei", JPS Conference Proceedings 13, 020016(1-4), 2017年, 査読有, DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.13.020016>
- ② M. Miyatani, N. Ikeno, H. Nagahiro and S. Hirenzaki, "Formation of η' (958) meson bound states by the $^6\text{Li}(\gamma, d)$ reaction", European Physical Journal A52, 193(1-10), 2016年, 査読有, DOI 10.1140/epja/i2016-16193-y
- ③ N. Ikeno, A. Ono, Y. Nara and A. Ohnishi, "Probing neutron - proton dynamics by pions", Physical Review C 93, 044612(1-13), 2016年, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.93.044612

[学会発表] (計8件)

- ① N. Ikeno, "Production of pions and clusters in HIC by AMD+JAM approach", Transport 2017: International Workshop on Transport Simulations for Heavy Ion Collisions under Controlled Conditions, 2017年3月28日、FRIB-MSU, East Lansing, Michigan (USA)
- ② N. Ikeno, "Production of pions and clusters in heavy-ion collisions by the AMD+JAM approach", International Symposium on Neutron Star Matter (NSMAT2016) -Recent Progress in Observations, Experiments and Theories-, 2016年11月21日、東北大学(宮城県仙台市)
- ③ N. Ikeno, " π^-/π^+ ratio in asymmetric heavy-ion collisions", NPCSM 2016: YIPQS long-term and Nishinomiya-Yukawa memorial workshop on "Nuclear Physics, Compact Stars, and Compact Star Mergers 2016", 2016年10月18日、京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)
- ④ N. Ikeno, "Structure and Formation of deeply bound pionic atoms", YITP workshop MIN2016 Meson in Nucleus, 2016年8月1日、京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)
- ⑤ N. Ikeno, "Formation of deeply bound

pionic atoms and pion properties in nuclei”, The 14th International Conference on Meson - Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2016), 2016年7月29日、京都大学（京都府京都市）

- ⑥ N. Ikeno, “Pion production in heavy-ion collisions by the AMD+JAM method”, The 6th International Symposium on Nuclear Symmetry (NuSYM2016), 2016年6月14日, Tsinghua University, Beijing (China)

- ⑦ 池野なつ美、小野章、奈良寧、大西明、「重イオン衝突における核子のダイナミクスと π 中間子生成」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学（宮城県仙台市）

- ⑧ 池野なつ美、「重イオン衝突における π 中間子原子生成と非対称核物質の性質」、滞在型研究会@JPARC「原子核媒質中のハドロン研究Ⅲ」2015年10月19日、KEK 東海キャンパス（茨城県那珂郡東海村）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池野 なつ美 (IKENO Natsumi)
鳥取大学・地域学部・講師
研究者番号：30756086