

Oral presentation | II. Radiation, Accelerator, Beam and Medical Technologies : 201-1 Nuclear Physics, Nuclear Data Measurement/Evaluation/Validation, Nuclear Reaction Technology

📅 Thu. Mar 17, 2022 2:45 PM - 4:25 PM JST | Thu. Mar 17, 2022 5:45 AM - 7:25 AM UTC | 🏠 Room A

[2A10-15] Nuclear Reaction Theory

Chair: Futoshi Minato (JAEA)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[2A10] Fission mechanism of Mendelevium isotopes studied by 4D Langevin model

*Jun Inagaki¹, Kazuya Shimada¹, Chikako Ishizuka¹, Fedir Ivanyuk², Satoshi Chiba¹ (1. Tokyo Institute of Technology, 2. Institute of Nuclear Research)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[2A11] Average total kinetic energy of different fission modes studied by the 4D Langevin model

*Kazuya Shimada¹, Chikako Ishizuka¹, Satoshi Chiba¹ (1. Tokyo Tech)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[2A12] Study of fission dynamics using five-dimensional Cassini parameters in actinide region

*Kazuki Okada¹, Takahiro Wada¹ (1. Kansai Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[2A13] Effect of triaxiality and pairing interaction for fission barrier using density-dependent relativistic mean-field theory

*Taiki Kouno¹, Chikako Ishizuka¹, Tsunenori Inakura¹, Satoshi Chiba¹ (1. Tokyo Tech)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[2A14] Research in spins, relative orbital angular momenta and their correlation of fission fragments by Antisymmetrized Molecular Dynamics

*Jingde Chen¹, Akira Ono², Masaaki Kimura³, Chikako Ishizuka¹, Satoshi Chiba¹ (1. Tokyo Institute of Technology, 2. Tohoku University, 3. Hokkaido University)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[2A15] Dependence of heavy-ion incident particle production cross sections on the mean-field model in antisymmetrized molecular dynamics calculations

*Yuta Mukobara¹, Jingde Chen¹, Chikako Ishizuka¹, Satoshi Chiba¹, Tsunenori Inakura¹ (1. Tokyo Tech)

4:15 PM - 4:25 PM JST | 7:15 AM - 7:25 AM UTC

Time reserved for Chair

4次元ランジュバン模型によるメンデレビウム同位体の核分裂機構の研究

Fission mechanism of Mendelevium isotopes studied by 4D Langevin model

*稲垣 潤¹, 島田 和弥¹, 石塚 知香子¹, F. A. Ivanyuk², 千葉 敏¹

¹東工大, ²キエフ原子核研究所

4次元ランジュバン模型に基づいてメンデレビウム同位体の核分裂片の質量数、全運動エネルギー、変形度等の分布の計算を行った。JAEA が測定したデータとの比較検討、質量数分布の二山から一山分布への変化の可能性を調べ、この質量数領域での核分裂機構の変遷についての情報を得た。

キーワード: 核分裂、メンデレビウム、4次元ランジュバン模型、核データ

1. 緒言

100番元素のフェルミニウムは257から258に中性子が一個増えると、質量非対称分布から質量対称分裂になることがわかっている^[1]。そこで一つ隣であり、最近 JAEA でデータが測定された 101 番元素のメンデレビウムの核分裂機構を調べた。

2. 方法

励起エネルギー10MeV と固定して、4次元ランジュバン模型^[2]によりメンデレビウム同位体の核分裂計算を行った。原子核の形状を二中心模型で表し、自由エネルギーに対する殻補正の温度依存性は文献^[3]に従って計算した。

3. 結果

図1のように²⁶⁴Mdは一山の質量数分布となった。また、図2に²⁶⁴Mdの核分裂生成物の質量と全運動エネルギー（TKE）の相関図を示す。図2から質量対称核分裂モードはTKEの大きいSupershortモードであり、さらに質量非対称核分裂モード（Standardモード）が共存しピークのWingを形成することがわかった。

4. 結論

²⁶⁴Mdは質量対称分裂と質量非対称分裂のどちらにも核分裂するが、主要成分はSupershortモードに対応する対称分裂である。当日は他の同位体に対する結果を含めて系統的な計算の結果とその解釈を議論する。

参考文献

[1] M. D. Usang et al., Scientific Report9, Article number1525 (2019)

[2] Chikako Ishizuka, et al., Phys. Rev. C 96, 064616 (2017)

[3] F.A.Ivanyuk, et al, Phys. Rev. C97, 0543331(2018)

*Jun Inagaki¹, Kazuya Shimada¹, Chikako Ishizuka¹, Fedir Ivanyuk², Satoshi Chiba¹

¹Tokyo Tech, ²Kiev Institute for Nuclear Research

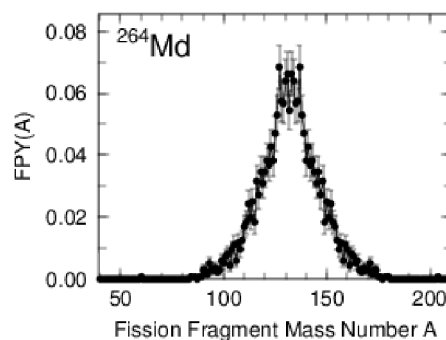


図1 ²⁶⁴Mdの核分裂収率

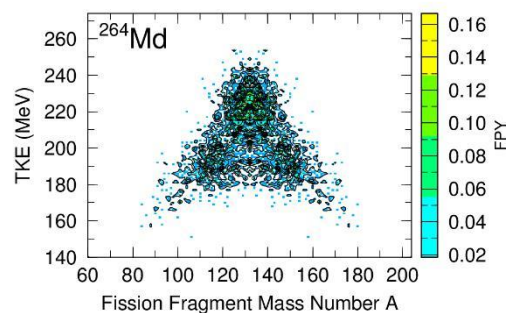


図2 ²⁶⁴Mdの核分裂生成物のTKE

4次元ランジュバン模型によるモード別核分裂片平均全運動エネルギーの研究

Average total kinetic energy of different fission modes studied by the 4D Langevin model

*島田 和弥¹, 石塚 知香子¹, 千葉 敏¹

¹東工大

ウランやプルトニウムの中性子誘起核分裂において Superlong モードと Standard モードの分類を行い、分裂片の平均全運動エネルギー (TKE) の計算を行った。モード分類の検討を詳細に行うことで、平均 TKE の入射中性子エネルギー依存性の背景が詳細に分析された。

キーワード: 核データ, 核分裂, ランジュバン模型, 運動エネルギー, フィッションモード

1. 緒言

核分裂において、入射中性子エネルギーが増加に伴い核分裂で生じる平均全運動エネルギーが減少する現象が実験的に知られている。我々の東工大 4 次元ランジュバン模型^[1]を用いた研究で、その原因は分裂時の重い fragment の変形度の増加であることが明らかにされた。しかし、従来の研究では、異なる TKE 分布を有する非対称分裂 (Standard mode) と対称分裂 (Superlong mode) の数の割合が変化するためと理解されてきた。本研究では、4 次元ランジュバン模型を用いて、それぞれのモードごとの平均 TKE の入射中性子エネルギー依存性を求め、全体の平均 TKE の入射中性子エネルギー依存性が何によって決定されているかを調べた。

2. 方法

ランジュバン計算の自由エネルギーは、2 中心模型に基づき微視的巨視的理論により計算された。加えて、Strutinsky 法と BCS ペアリングの微視的エネルギー補正、ネックパラメータ、ゼロ点振動数の自由度毎の設定を行った。

図 1 は $^{235}\text{U}+n$ 系の fragment の持つ質量数と TKE の 2 次元分布である。分布図を基に、入射中性子エネルギーごとに Standard mode (赤色) と Superlong mode (緑色) を楕円状と液滴状の閉曲線で分類した。領域に含まれる fragment の TKE の値から、それぞれのモードの平均 TKE を計算した。

3. 結果

$^{236}\text{U}(n+^{235}\text{U})$ 系のそれぞれのモード別 TKE 入射中性子エネルギー依存性は図 2 のようになった^{[2][3]}。入射中性子エネルギー増加に伴い、Standard mode の TKE (赤線) は減少するのに対し、Superlong mode の TKE (緑線) は増加した。黒線で示される全体の TKE は Standard mode の TKE に近く、そのエネルギー依存性がほぼ Standard mode によって決定されていることが分った。水色の破線はマルチチャンス核分裂の効果を含む計算結果である。

4. 結論

Standard mode と Superlong mode それぞれの TKE のエネルギー依存性を調べることで、全平均 TKE のエネルギー依存性が従来の解釈と異なり、主として Standard mode によって決定されていることが分った。

参考文献

- [1] Chikako Ishizuka, *et al.*, Phys. Rev. C 96, 064616 (2017)
- [2] P.P.D'yachenko, *et al.*, Soviet Journal of Nuclear Physics, Vol.8, p.165 (1969)
- [3] Duke, Dana Lynn, "Fission Fragment Mass Distributions and Total Kinetic Energy Release of 235-Uranium and 238-Uranium in Neutron-Induced Fission at Intermediate and Fast Neutron Energies", Los Alamos, 2015, Ph.D. thesis.

*Kazuya Shimada¹, Chikako Ishizuka¹ and Satoshi Chiba¹

¹Tokyo Tech

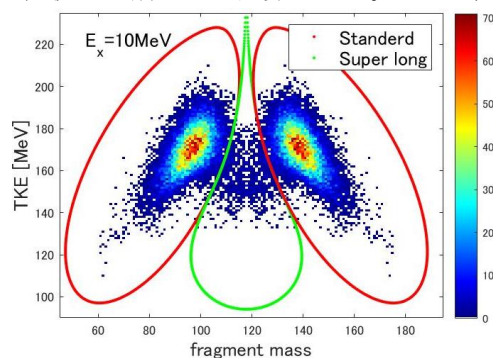


図 1 $^{235}\text{U}+n$ 系, $E_n=10\text{MeV}$ での fragment の持つ TKE の 2 次元分布

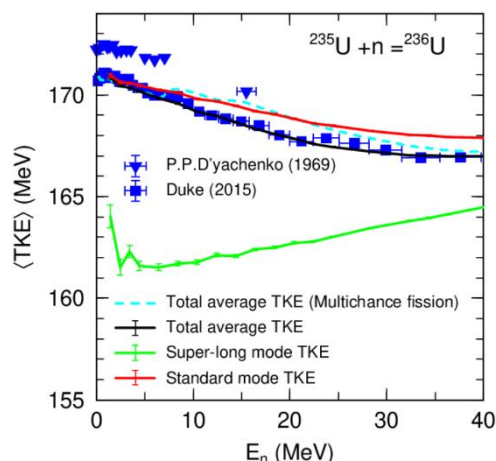


図 2 モード別 ^{236}U の核分裂片 TKE の実験データと計算結果の比較

5次元 Cassini パラメータを用いたアクチノイド領域における核分裂動力学の研究

Study of fission dynamics using five-dimensional Cassini parameters in actinide region

*岡田 和記¹, 和田 隆宏¹

¹関西大

Cassini パラメータは多様な変形核形状を再現できることから、Langevin 方程式を用いた核分裂動力学計算が望まれている。本研究ではアクチノイド領域における質量分布や運動エネルギー分布について、5 次元 Cassini パラメータを用いた Langevin 計算結果を報告する。

キーワード：核分裂動力学, Langevin 方程式, 核データ, Cassini パラメータ

1. 緒言

多次元 Langevin 方程式による核分裂動力学の研究は、分裂機構の解明や核データ精度の向上に重要な役割を担っている。Cassini パラメータは分裂過程の原子核形状をフレキシブルに描写できることから[1]、Langevin 計算への適用が期待されている。

2. 研究手法

Cassini パラメータを用いた核分裂描像では、分裂片の形状を描写するのに有効である a , a_1 , a_4 を採用するのが基本であり[2]、それぞれ原子核全体の伸び、質量非対称性、分裂片の四重極変形に対応する。2021 年秋の学会において、非対称分裂が特徴である ^{236}U 核分裂では、 a_3 を追加した 4 次元 Langevin 方程式を解くことで、分裂片の質量分布の再現性が向上することを報告した。 a_3 は分裂片の形状非対称性に対応しており、分裂片の一方が球形で、もう一方が伸長した形状を描く。また Fm 同位体の核分裂では、 a_3 ではなく分裂片の八重極変形(a_6)を追加した 4 次元 Langevin 方程式によって、super-short 対称分裂という特徴的な分裂様相を再現した。これらの結果から、 a , a_1 , a_4 に a_3 と a_6 を加えた 5 つが、アクチノイド核分裂を扱う上で重要なパラメータであると考えられる。

本研究では、 $\{a, a_1, a_3, a_4, a_6\}$ の 5 次元 Langevin 方程式を用いた核分裂計算を実施する。分裂片の質量分布や運動エネルギー分布といった Langevin 計算結果について、 $\{a, a_1, a_4\}$ の 3 次元計算や、 $\{a, a_1, a_3, a_4\}$ 及び $\{a, a_1, a_4, a_6\}$ の 4 次元計算と 5 次元計算との比較を行う。様々なアクチノイド核に対して適用することで、Langevin 計算の 5 次元化による核分裂計算の定量性の向上について議論する。

3. 結論

Cassini パラメータを用いた核分裂研究では、 $\{a, a_1, a_3, a_4, a_6\}$ の 5 次元 Langevin 計算が大きな役割を果たす。核種によって多様な変形が見られるアクチノイド領域を扱う上で、このパラメータセットは重要である。また 5 次元 Cassini パラメータは超変形も表現できることから、超重核分裂に適していると考えられる。今後 5 次元 Langevin 方程式を用いた核分裂計算手法を向上させ、超重核分裂への適応を目指す。

参考文献

- [1] V. V. Pashkevich, Nucl. Phys. A **169**, 275 (1971).
- [2] N. Carjan *et al.*, Nucl. Phys. A **942**, 97 (2015).

*Kazuki Okada¹, Takahiro Wada¹

¹Kansai Univ.

密度依存型相対論的平均場理論を用いた核分裂障壁に対する 三軸非対称性と対相互作用の効果

Effect of triaxiality and pairing interaction for fission barrier using
density-dependent relativistic mean-field theory

*河野 大樹¹、石塚 知香子¹、稲倉 恒法¹、千葉 敏¹

(1. 東京工業大学)

軸対称変形に比べて核分裂障壁の値を下げる効果が指摘されている三軸非対称性の効果を密度依存型相対論的平均場理論によって検証した。三軸非対称変形により核分裂障壁の再現性を改善できることが判明したが実験値に比べると依然として数 MeV 程度の誤差が生じる場合があることが判明した。この様な場合、さらに対相関力強度を調整することが効果的であることを確認した。

キーワード:核データ、相対論的平均場理論、核分裂障壁、アクチノイド、三軸非対称性、対相関

1 緒言

原子核を記述する微視的理論の中でも、相対論的模型は核子と中間子の相互作用を顕に取り入れたラグランジアン密度より様々な物理量を統一的に導出できるだけでなく、原子核構造を記述する際に重要なスピン軌道相互作用が自然に導かれる強力な理論モデルである [1]。また、従来より核分裂障壁の理論予測は計算コストが抑えられるという観点から軸対称性を仮定して行われており、その際、対相関力強度を調整することが有効であると確認された [2]。一方で、相対論的模型の 1 モデルである PC-PK1 で三軸非対称性を課す事で軸対称性に比べて核分裂障壁が 2MeV 程度改善されることが報告されており、その効果を見逃す事はできない [3]。そこで、本研究では密度依存型相対論的平均場理論 [4–6] を用いてアクチノイド領域核種の核分裂障壁が受ける三軸非対称性の影響を系統的に調査し、さらに文献 [2] と同様、対相関力強度の調整を行うことで核分裂障壁の再現性を改善できることを確認し、軸対称性で構築された手法の有効性を示すことを目的とした。

2 計算方法

密度依存型相対論的平均場理論は、核子核子散乱のデータから結合定数を決定し真空中の 2 体核子相互作用を用いて核物質を記述する、相対論的ブルックナーハートリーフォック (RBHF) [7, 8] の結果を再現する様に相対論的ハートリーフォックの結合定数に密度依存性を持たせたものである [4–6]。また、本研究では軸対称性・三軸非対称性による核分裂障壁を、核子間距離を有限レンジで扱う DD-ME2 とゼロレンジで扱う DD-PC1 の 2 つのモデルによって計算した。数値計算は公開されている計算コード [4] を用いて行った。

3 結果

右図は U 同位体の核分裂障壁を軸対称・三軸非対称で計算した結果を実験値と比較したものである。いずれのモデルでも軸対称計算 (青丸) に比べて三軸非対称性で計算 (赤四角) することで改善される傾向にある事が分かる。しかし、DD-ME2 による計算では一部核種に誤差が 1MeV 程度あり再現できていないとも言える。講演では、Pu 同位体と Cm 同位体における同様の結果も示し実験値との誤差が大きい核種に対しては対相関力強度を調整することが核分裂障壁、原子核質量、対回転エネルギーの再現性向上に有効であることを報告する。

参考文献

- [1] B. D. Serot and J. D. Walecka, Adv. Nucl. Phys. 16 (1986)
- [2] T. Kouno, C. Ishizuka, T. Inakura, and S. Chiba, PTEP (in press) arXiv:2112.08612v1 [nucl-th]
- [3] B. N. Lu, E. G. Zhao, and S. G. Zhou, Phys. Rev. C 85(2012) 011301(R)
- [4] T. Niksic, D. Vretenar, N. Paar, and P. Ring, Comput. Phys. Commun 185 (2014) 1808–1821
- [5] G. A. Lalazissis, T. Niksic, D. Vretenar, and P. Ring, Phys. Rev. C **71**, 024312 (2005)
- [6] T. Niksic, D. Vretenar, and P. Ring, Phys. Rev. C **78**, 034318(2008)
- [7] C. J. Horowitz and B. D. Serot, Nucl. Phys. A **464**, 613 (1987)
- [8] T. Katayama and K. Saito, Phys. Rev. C **88**, 035805 (2013)
- [9] R. Capote et al., Nucl. Data Sheets 110 (2009) 3107.
- [10] S. Bjørnholm, J. E. Lynn, Rev. Mod. Phys. 52 (1980) 725.

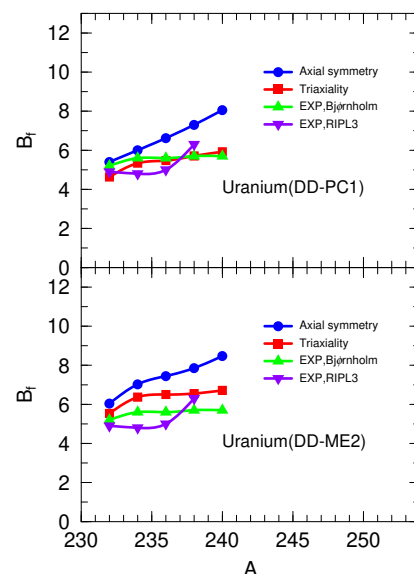


図1 ウラン同位体における核分裂障壁の計算値と実験値 [9, 10]

*Taiki Kouno¹, Chikako Ishizuka¹, Tsunenori Inakura¹ and Satoshi Chiba¹

¹Tokyo Institute of Technology

AMD による核分裂片のスピンの、相対軌道角運動量及びそれらの相関の研究

Research in spins, relative orbital angular momenta and their correlation of fission fragments
by Antisymmetrized Molecular Dynamics

*陳 敬徳¹, 小野 章², 木村 真明³, 石塚 知香子¹, 千葉 敏¹

¹東京工業大学, ²東北大学, ³北海道大学

反対称化分子動力学 (AMD) とブーストモデルを用いて ^{236}U , ^{240}Pu , ^{252}Cf の対称核分裂反応をシミュレートし、分裂片のスピンの相対軌道角運動量、それらの相関を計算した。それにより、従来の議論で仮定されたさまざまな回転モードの生起確率について検討した。

キーワード：反対称化分子動力学, 核分裂, スピン, 相対軌道角運動量, 分裂片の回転運動

1. 緒言

核分裂過程は複合核から進行する原子核変形の進化、ネックの形成とその後生起する断裂に至る過程である。この一連の過程は有限量子多体系の大振幅集団運動として非常に複雑であり、十分に理解されていない。このため核分裂片の持つスピンについて定量的に予測することは困難である。一方、分裂片のスピンはその後の統計崩壊に大きく影響を与えるため、実用上はその予測が不可欠である。最近、分裂片の放出する γ 線スペクトルを統計模型で解析した結果から、核分裂片のスピンの即発中性子多重度と同様の鋸歯構造をしていることや、それが分裂核の質量数のみによることが Nature 誌で報告された [1]。理論的には時間依存密度汎関数法と角運動量射影を組み合わせることで分裂片のスピンを計算する手法が提案された [2]。我々は AMD [3] という有限核子集団の量子効果を取り込んだ分子動力学模型で核分裂を記述しようと試みている。本研究では、前回紹介したブーストモデルのさらなる拡張を行い、AMD 計算からスピンを導出し、分裂片それぞれのスピンと相対軌道角運動量、それら間の角度を計算し、分裂片の回転モードについての議論を行う。

2. 手法

ブーストモデル [4] では基底状態の原子核を elongation 方向に変形させるために、原子核中の核子に左右対称に運動量を与え、誘起核分裂の過程を模擬する。有効相互作用としては SLy4 を用いた。今回は、前回の拡張として、まず Boost をかけた直後の原子核全体の全軌道角運動量を 0 にし、回転を止めた状態からブーストさせることとした。また、このモデルの与えるスピンを求めるために AMD 波動関数の持つ軌道角運動量の期待値と分裂片同士の相対軌道角運動量を計算した。これによって、核分裂によってできるフラグメントのスピン分布などを議論できるようになった。それから、計算したスピンと相対軌道角運動量を他の理論計算値と比較し、解析する。

3. 結論

図 1 に ^{252}Cf に 53MeV のブースト運動量を与えた対称分裂 256 回の核分裂片同士のスピンの角度を求めた図を示す。ヒストグラムが AMD の計算結果、SKM* および SeaLL1 は文献 [2] で用いられた密度汎関数法の結果、 Δ は FREYA で用いられている値である。このようにいろいろな理論は異なる結果を与えている。AMD と密度汎関数理論の結果は 90 度～130 度あたりにピークとなっています。これらと核分裂片の回転モード [5] についての議論を行う。

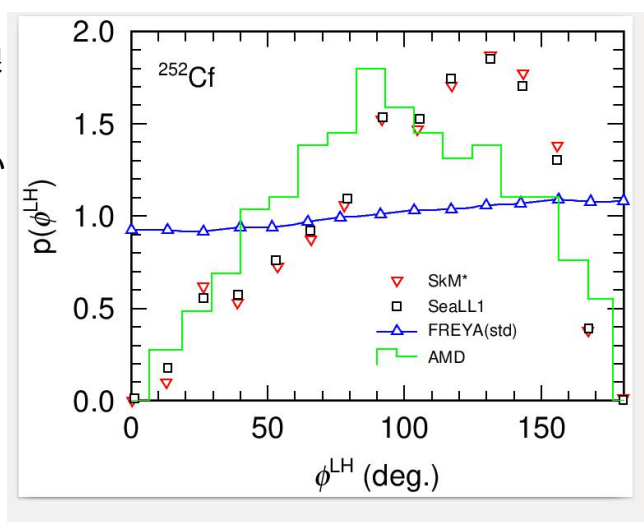


図 1 ^{252}Cf の対称ブースト分裂で発生する核分裂片スピンの角度（横軸）と角度の各確率（縦軸）の関係

参考文献

- [1] J. N. Wilson et al., Nature, 590:566–570 (2021).
- [2] A. Bulgac et al., arXiv:2108.03763v1 [nucl-th] (2021)
- [3] A. Ono et al., Prog. Theor. Phys. 87, 1185–1206 (1992).
- [4] A. Etori et al., JAEA-CONF-2018-001 (2018)
- [5] L. G. Moretto et al., Phys. Rev. C 21, 204 (1980).

*Jingde Chen¹, Akira Ono², Masaaki Kimura³, Chikako Ishizuka¹, Satoshi Chiba¹

¹Tokyo Tech., ²Tohoku Univ., ³Hokkaido Univ.

反対称化分子動力学計算による重イオン入射粒子生成断面積の平均場模型依存性

Dependence of heavy-ion incident particle production cross sections on the mean-field model in antisymmetrized molecular dynamics calculations

*向原 悠太¹, 陳 敬徳¹, 石塚 知香子¹, 千葉 敏¹, 稲倉 恒法¹

¹東工大

本研究では、 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ の衝突計算を反対称化分子動力学 (AMD) + 統計カスケード崩壊計算で複数の平均場模型を用いて行った。結果として、異なる平均場模型によりエネルギースペクトルやそれぞれの質量数での積分断面積に違いが生じた。

キーワード : 反対称化分子動力学, 粒子生成, 平均場, 2 核子衝突, 核データ

1. 緒言

重イオン入射核反応は、近年がん治療や遺伝子変異の誘発、創薬等に用いられ、基礎と応用ともに盛んに研究がされている。しかし核子や軽イオン入射反応と異なり、標準となる計算手法が確立しておらず様々な計算コードが多種多様な模型を用いている。その中でも反対称化分子動力学^[1]はフェルミ粒子多体系としての性質に加え、平均場効果と 2 核子衝突の効果が含まれる優れた模型である。本研究では重粒子線治療で用いられる ^{12}C が生体構成物質 ^{16}O に入射する反応を例にとって異なる平均場模型が粒子生成の予測にどのような違いをもたらすかを調べた。

2. 方法

本研究では AMD 計算の後、統計カスケード崩壊^[2]の計算を行い、エネルギースペクトルと積分断面積を求めた。AMD 計算では Skyrme 相互作用を有効相互作用として用い、平均場模型を複数用意し比較できるようにした。この際、入射 ^{12}C のエネルギーは 72MeV と 1200MeV とした。入射および標的核の基底状態を求めた後、乱数により様々な初期配置から衝突計算を 30000 イベント行い、計算結果に統計カスケード崩壊の計算を行うことで、実験で測定される物理量を導出した。

3. 結果

AMD 計算+統計カスケード崩壊による放出される質量数 4 のエネルギースペクトルは図 1 となり、質量数と積分断面積の関係は図 2 となった。図 1 は赤が Skyrme 力の密度依存項の冪パラメータ $\sigma = 0.167$ であり、その他の値の場合青としている。エネルギーが低い範囲では青の方がエネルギースペクトルにばらつきがあり、高いエネルギーでは赤の方がばらついている。図 2 より、陽子と中性子放出に関しては平均場模型による差は小さいが、質量数によっては積分断面積に約 5 倍以上の差が生じたことがわかる。

4. 結論

AMD 計算+統計カスケード崩壊計算に複数の平均場模型を導入した。平均場模型により粒子生成の予測は違いが生じ、平均場模型は粒子生成に大きな影響を与えることがわかった。

参考文献

[1] Akira Ono, *et al.*, Phys. Rev. C 47, 2652 (1993).

[2] F. Piiirrhofer, Nucl. Phys. A 280, 267 (1977).

*Yuta Mukobara¹, Jingde Chen¹, Chikako Ishizuka¹, Satoshi Chiba¹ and Tsunenori Inakura¹

¹Tokyo Tech

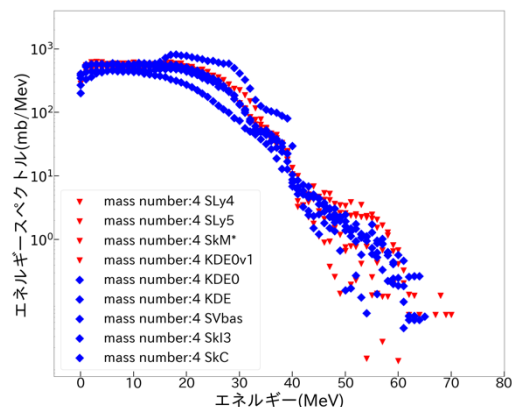


図 1 入射 ^{12}C のエネルギー 72MeV での質量数 4 の放出粒子のエネルギースペクトルの平均場依存性

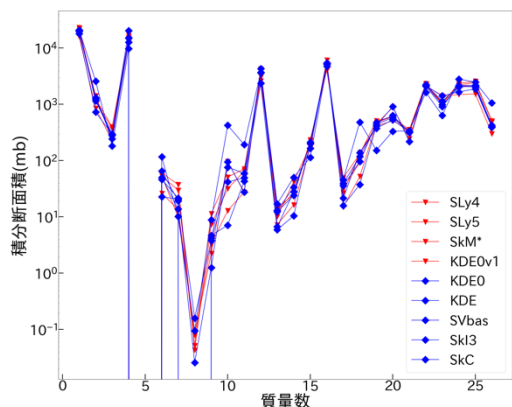


図 2 入射 ^{12}C のエネルギー 72MeV での積分断面積の平均場依存性