

平成 21 年 1 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：平成 18 年度～平成 20 年度
 課題番号：18540268
 研究課題名 (和文) 融合阻害と超重元素合成理論

研究課題名 (英文) Fusion Hindrance and Theory for Synthesis of Superheavy Elements

研究代表者
 阿部 恭久 (ABE YASUHISA)
 大阪大学・核物理研究センター・協同研究員
 研究者番号：80000868

研究成果の概要：

1. 重イオン核融合に於ける「融合阻害」(クーロン障壁を遙かに超える入射エネルギーを与えても融合しない)の機構を明らかにした。
2. 超重元素合成について、冷核融合経路及び熱核融合経路を統一的にひとつの理論の枠組みで記述できることを示した。この理論は、クーロン障壁越えのみを考慮する従来の理論とは違って、融合が揺動或いは拡散によって起こるとする革命的なものであったが、現在では標準的方法としてこの分野の研究者に広く受け入れられている。
3. 2原子核系から単一の複合核形成への動力的過程での、Neck 及び質量非対称自由度の役割を、スモルコウスキー方程式を解析的に解くことによって解明した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	570,000	3,870,000

研究分野：数物系科学

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：超重元素、重イオン核融合反応、散逸揺動動力学、統計崩壊理論、核分裂

1. 研究開始当初の背景

- (1) 超重元素の残留断面積は非常に小さいので、実験は困難で長い時間が要求される。それにもかかわらず、
- (2) 信頼に足る理論は存在しなかったため、経験的に入射チャンネルや、入射エネルギーを設定していた。物理的根拠のある定量的理論予言が強く望まれていた。

2. 研究の目的

- (1) 重イオン核融合反応機構、特に、「融合阻害」の機構を明らかにする。これを基礎に、超重元素合成理論を構築し、超重元素合成の系統的理論研究を可能にする。
- (2) さらに、最適入射系、最適入射エネルギーに関する理論予言を行い、実験計画の策定に寄与する。

3. 研究の方法

- (1) 集団運動に対して、散逸揺動動力学 (Langevin, Kramers, Smoluchowski 方程式等) を適用し、まず融合反応に於いて、実験的によく知られている、「融合阻害」の機構を理論的に明らかにし、融合確率の定量的計算を可能にする。
- (2) さらに統計崩壊理論 (電算機コードは申請等により作成済み) による生き残り確率とあわせて、残留断面積の定量的予言を行う。

4. 研究成果

- (1) 重イオン核融合における所謂「阻害」の機構を明らかにした。{ 発表論文 2, 6, 13, 16 他 }
 重イオン衝突で形成される 2 原子核配位から丸い複合核形成過程には、クーロン障壁を超えることに加えて、内側の鞍点を越えることが必要である。なぜなら、重い系では、入射系の形成する 2 原子核配位が複合核としては大きな変形をもち、分裂に対する鞍点の外側にあるからである。さらに、これを越えるエネルギーを、容易には与えることができない。なぜならば、与えた入射エネルギーは核力は働きによって直ちに多体系としての原子核の内部励起エネルギーに変換されるからである。すなわち、集団的運動エネルギーの散逸である。しかし、このことは、同時に対応する揺動が存在し、わずかな確率で鞍点を越えることを可能にする。これを求めることによって、融合確率が得られる。この機構は、軽いイオン間の場合で知られているものとはちがって、融合反応に対するまったく新しい機構である。数学的枠組みとして Langevin 方程式あるいは Smoluchowski 方程式を用いる所以である。
 動径方向の 1 次元の問題で、鞍点のまわりのポテンシャルを逆放物線で近似すると、融合確率を解析的に求めることができる。以下の図 1 で与えられているように、確率が入射エネルギー、エネルギー散逸を決める摩擦係数及び系の温度の関数で表される。この式は、正に実験で観測されている「融合阻害」の特徴、クーロン障壁に加えてさらにエネルギーが必要であり、入射エネルギー依存が大変緩やかであることを説明している。又、これを単純化した表式は、Swiatecki 等

によって 冷融合反応に使われた。ここでは、熱活性化反応でよく知られている Arrhenius 因子で表される。

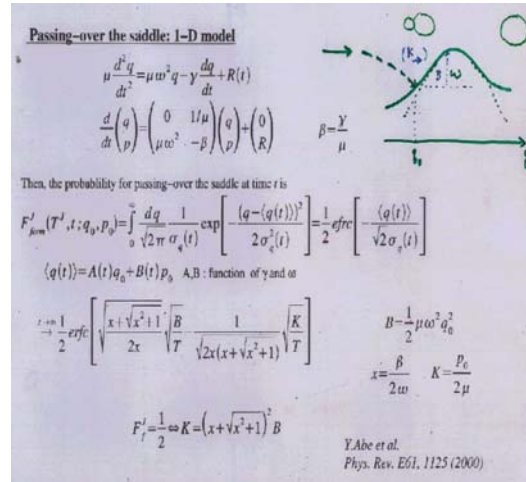
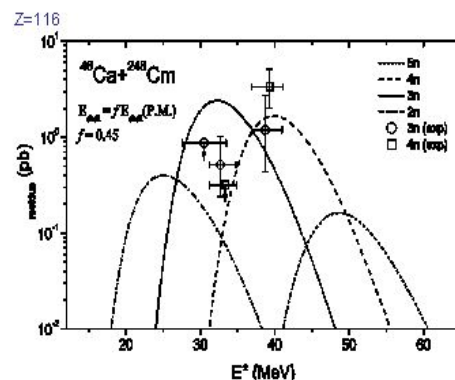
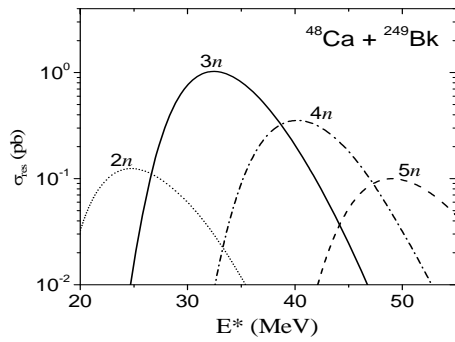


図 1

- (2) 超重元素合成における 冷核融合経路及び熱核融合経路を統一的に記述する理論を構築した。{ 1, 4, 8, 13 }
 図 2 に、熱核融合経路、すなわち 48Ca を入射イオンとする超重元素合成に対する残留断面積の励起関数の理論計算結果を Z=116, 117, 118 について与える。Z=116 については、既存の測定値と比較されている。なお、図 2 の真ん中の系 (Z=117)、すなわち Bk を標的とする実験は、現在 Dubna (Russia) で実行されている。まもなく、われわれの理論的予言が検証される。



C. Shen, Y. Abe, D. Boilley, G. Kosenko and E. Zhao
 Isospin Dependence of reactions 48Ca+248-251Bk
 Intern J. Mod. Phys. E 17 (2008) 66



Z=118

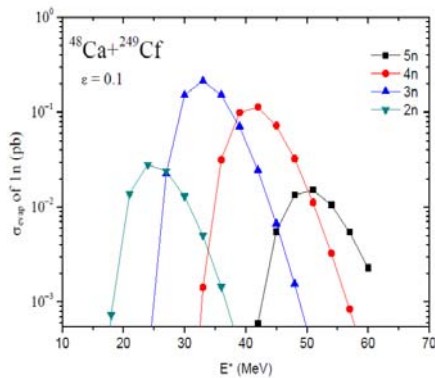


図 2

(3) 統計崩壊理論に基づいて、作成した電算機コード KEWPIE のベンチマークテストを行った。さらに改良を加え、より使いやすくした。{5, 11, and A. Marchix, PhD thesis, Univ. Caen, 2007}

(4) 重イオン衝突で形成される 2 原子核配位からの複合核形成過程の動力的機構を明らかにした。Neck のくぼみの埋まりの時間発展を記述する分布関数を解析に求めることによって為された。

Neck の埋まりが他に比べ早く、大変形の複合核がまず形成されること明らかになった。今後の詰めが期待される。{2, 4, 7, 10}

以下の図 3 に、Neck の初期のデルタ関数分布から 時間と共にどのように、平衡分布に近づくかが示されている。

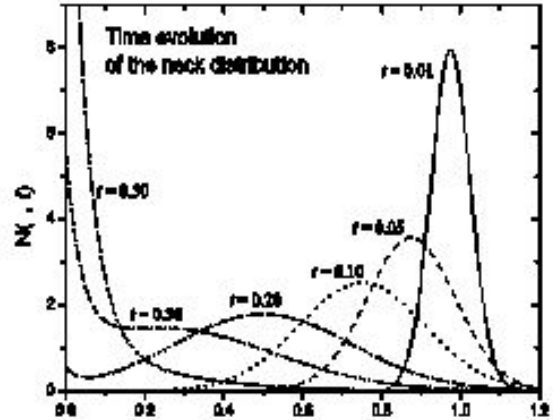


図 3

ここで 時間の単位は、 \hbar bar/MeV で、融合を直接記述する 動径方向の運動の時間は この単位で 1 から数 である。従って、Neck は 融合の時間より 1 桁早く平衡に達することを示している。従って、2 原子核系は、まず瓢箪型から瓜がたになり、その後、平均的には再分離 (分裂) へと向かう。しかし、揺動により、わずかの確率で鞍点を越える。これが、融合阻害の下での融合である。同様の分析を質量非対称変数についても行うことができる。結果は、平衡化に要する時間が はるかに長く、ほぼ動径方向の融合時間と同じ程度であることが知られた。このことは、融合確率を得るためには、1 次元ではなく、少なくとも 2 次元での動力学を解かねばならないことを示している。実際、われわれは Langevin 方程式を用いてそのようにして計算してきた。我々の従来の取り扱いを解析的に正当化したことになる。

(5) さらに 図 1 の結果を用いて、融合阻害が起きる系 (求められた確率が 1 より小さい) と通常の系 (確率が 1) との境界を、対称な入射系について 簡単に求めることができる。{文献 6} 図 4 に結果を示す。二つの黒丸はそれぞれ Mo-Mo 及び Pd-Pd 系をあらわし、前者は、黒線の内側に 後者は 外側にあり、それぞれ 融合阻害が無い場合と有る場合に対応することがわかり、観測事実と良く対応する。Neck 分布の解析から、Neck の値は、平衡値の 0.1 を使うのが 妥当である、すなわち、黒の実線が境界を表す。質量非対称入射系についても、同様の分析が可能であり、 現在進行中である。

Border between Normal and Hindered Fusions

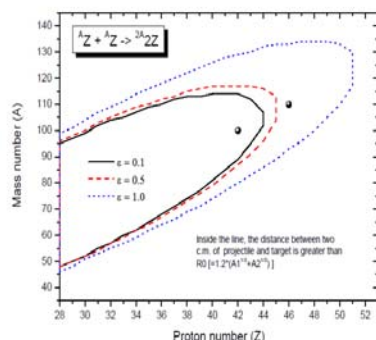


図 4

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 16 件)

1. Analysis of the Fusion Hindrance in Mass-Symmetric Heavy Ion Reactions, C. Shen, Y. Abe, Q. Li and D. Boilley, *Science in China Ser. G* **52**, No. 10, 2009, 1458-1463. 査読有
2. Compound Nucleus Theory for Synthesis of Super-Heavy Elements, Y. Abe, C. Shen, D. Boilley and B. G. Giraud, to appear in *Eur. Phys. J. A*, 2008, 査読有
3. Mechanism of Fusion Hindrance and Predictions of Super-Heavy Elements Production, Y. Abe, C. Shen, D. Boilley, B. G. Giraud and G. Kosenko, to appear in *Nucl. Phys. A*, 2008, 査読有
4. Resonances of Nuclear Molecules $28\text{Si}+28\text{Si}$, E. Uegaki and Y. Abe, to appear in *Nucl. Phys. A*, 2008, 査読有
5. Heavy-Ion Fusion Mechanism and Predictions of Super-Heavy Element Production, Y. Abe, C. Shen, D. Boilley B. G. Giraud and G. Kosenko, *AIP Conf. Series* **1165**, 2009, 128-131. 査読無
6. On predictions of the models for the Super-Heavy Elements, D. Boilley, Y. Abe, C. Shen and B. Yilmaz, to appear in *Intern' J. Mod. Phys. E*, 2008, 査読有
7. From Di-Nucleus to Mono-Nucleus: Neck Evolution in Fusion of Massive Systems, Y. Abe, D. Boilley, C. Shen and B. G. Giraud, to appear in *Intern' J. Mod.*

Phys. E, 2008, 査読有

8. Isospin dependence of reactions $48\text{Ca}+248-249\text{Bk}$,

C. Shen, Y. Abe, D. Boilley G. Kosenko and E. Zhao, to appear in *Intern' J. Mod. Phys. E* **17** 2008, 66-79. 査読有

9. Molecular Resonances in $28\text{Si}+28\text{Si}$ System, E. Uegaki and Y. Abe, *Intern' J. Mod. Phys. E* **17**, 2008, 2034-2039. 査読有

10. Di-Nucleus Dynamics toward Fusion of Heavy Nuclei,

Y. Abe, C. Shen, G. Kosenko, D. Boilley and B. G. Giraud, to appear in *Intern' J. Mod. Phys. E* **17** 2008, 2214-2220. 査読有

11. What can we learn from the fission time of the super-heavy elements, D. Boilley, A. Marchix, D. Wilgenbus, Y. Lallouet, F. Gimbert and Y. Abe, *Intern' J. Mod. Phys. E* **17** 2008, 1681-1693. 査読有

12. Non-Markovian diffusion over a parabolic potential barrier: influence of the friction-memory function, B. Yilmaz, S. Ayik, Y. Abe and D. Boilley, *Phys. Rev. E* **77**, 2008, 011121-9. 査読有

13. Dynamics of Massive Systems and Synthesis of Superheavy Elements, Y. Abe et al., *Intern' J. Mod. Phys. E* **15**, 2006, 491-501, 査読有

14. Tomonaga and Nuclear Physics, T. Suzuki and Y. Abe, *AAPPS Bulletin* **16**, No. 4, 2006, 8-10. 査読無

15. Method for numerical simulation of two-term exponentially correlated colored noise, B. Yilmaz, S. Ayik, Y. Abe, A. Gokalp and O. Yilmaz, *Phys. Rev. E* **73**, 2006, 046114-7. 査読有

16. Fusion Hindrance and Synthesis of Superheavy Elements, Y. Abe et al., *Physics of Atomic Nuclei* **69**, No. 7, 2006 1101-1109, 査読有

[学会発表] (計 1 件)

1. Y. Abe From Di-Nucleus to Mono-Nucleus: Neck Evolution in Fusion of Massive Systems
Japan-France Symposium on New Paradigms in Nuclear Physics
Sept. 1, 2008
Paris

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 恭久 (ABE YASUHISA)

大阪大学核物理研究センター
協同研究員
研究者番号：80000868

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 海外協力研究者

D. Boilley,
Associate Prof.
GANIL/ Univ. Caen, Caen,
France

C. Shen,
Prof.
School of Science, Teachers
College, Huzhou,
China

B. G. Giraud,
Senior Scientist
Institut Physique Theorique,
CEN-Saclay,
France

G. Kosenko,
Prof.
Department Physics,
Univ. Omsk, Omsk
Russia