

核データ部会・「シグマ」特別専門委員会合同企画セッション

核データ研究の更なる発展に向けて

— 核反応理論の最前線と核データへの要求 —

日本原子力学会「2008 年秋の大会」、2008 年 9 月 5 日、高知工科大学

(1) 連続状態離散化チャネル結合法による核反応解析と応用

九州大学 大学院理学研究院

緒方 一介

ogata@phys.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

2008 年 9 月、日本原子力学会の企画セッションにおいて、原子核反応論の最近の進展状況と、天体核物理及び核データ研究への応用計画についてお話する機会を頂いた。本稿は、その内容を簡単に纏めたものである。研究内容の詳細については、末尾に掲げる文献を参照されたい。

筆者は、大学院生の頃より 10 年強にわたって原子核反応の理論的研究に携わってきた。主な研究テーマは、単純な 1 次の歪曲波ボルン近似 (Distorted Wave Born Approximation: DWBA) では記述できない、いわゆる多段階過程 (反応を引き起こす残留相互作用が 2 回以上作用する過程) の記述である。この研究の柱は、取り扱いの難しい複雑な反応過程を考慮して、より信頼性の高い原子核反応モデルを構築するというものであり、その目的は、端的に言えば、原子核反応を定量的に記述することにある。この“定量的”あるいは“定量性”という言葉は、これと表裏一体にある“予言性”という言葉と共に、原子核反応の理論的研究の重要なキーワードになるものと思われる。本稿では、この観点に基づき、筆者が行ってきた最近の核反応研究の紹介と今後の展望について述べることにしたい。

第 2 節では、核反応研究に定量性が要請された例として、太陽内の元素合成反応のひとつ ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ の反応率を決定した仕事を紹介する。第 3 節では、この仕事と並行して開

発が進められた、不安定原子核の系統的反応解析を実現する新しい核反応模型について述べる。第 4 節では、これまでに構築した核反応の研究手法を天体核物理学に応用する計画を紹介し、第 5 節では核データ研究への応用計画について触れる。最後に第 6 節で全体を纏める。

2. 不安定核の分解反応を利用した天体物理学的因子 S_{17} の決定

地上で盛んに観測されている太陽ニュートリノの生成源である ${}^8\text{B}$ 原子核を形成する反応、 $p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$ (図1) は、ニュートリノ振動現象 (もともとはいわゆる太陽ニュートリノ問題) の定量的理解にとって本質的に重要な反応として、これまで約 40 年にわたり多くの注目を集めてきた。この反応の反応率の指標として用いられているのが、天体物理学的因子 S_{17} と呼ばれる物理量である (正確には S_{17} はエネルギー依存性を持つ。参照値とされるのは S_{17} のゼロエネルギー極限值である)。

この S_{17} を決定するために、これまで様々な試みがなされてきた。中でも近年注目されているのが、天然には存在しない

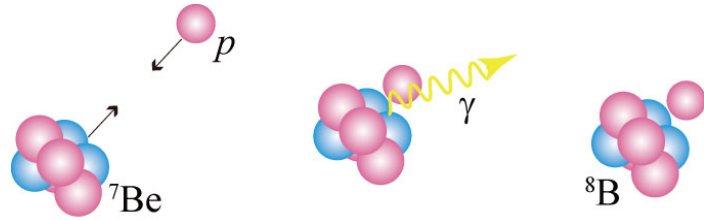


図 1

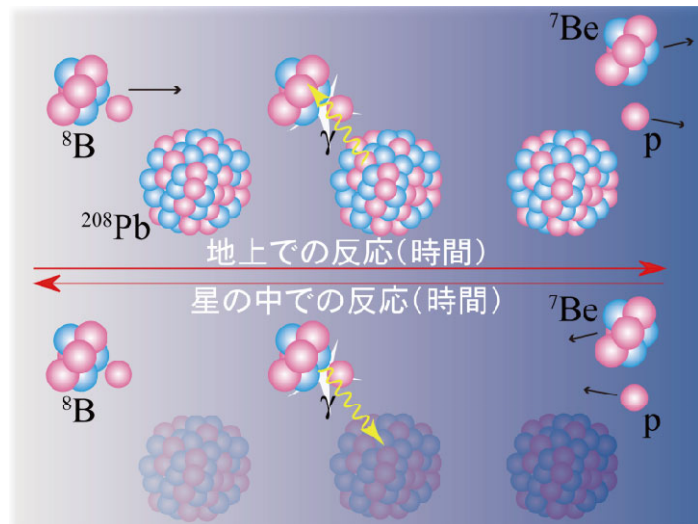


図 2

不安定核 (安定な原子核と比べて、陽子と中性子の数のバランスが崩れている短寿命原子核) の分解反応を利用した、間接測定法である (図 2)。この方法では、不安定核 ${}^8\text{B}$ を電荷の大きい原子核 (典型的には ${}^{208}\text{Pb}$) に入射させ、その分解断面積を測定する。この反応を、クーロン相互作用 (仮想光子 γ の吸収) による 1 段階の分解過程と解釈すると、その断面積は、求めたい反応 (順反応) $p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$ の逆反応のそれに他ならない。従って、その結果に微細平衡の原理を適用すれば、順反応の断面積を得ることができる。これが、間接測定法の骨子である。この手法は、 ${}^8\text{B}$ 生成反応に限らず、直接測定することが難しい、低エネルギーにおける原子核反応を間接的に測定する手法として広く用い

られてきた。

一方、不安定核実験技術の向上に伴い、近年では $p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$ の精密実験が可能となっており、その結果は、最も信頼性の高い S_{17} の値として認識されている。ところがこの直接測定の結果は、上述の間接測定の結果と有意に異なる値を取っている (図 3)。このことは、単に S_{17} の物理に留まらず、天体核反応に対す

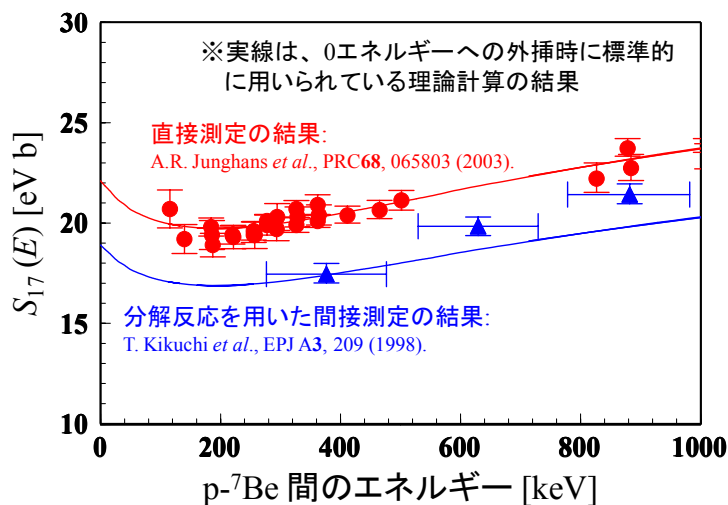


図 3

る間接測定法そのものの信頼性に疑問を投げかける、重大な問題であると考えられる。

前述の通り、間接測定法では、不安定核の分解反応に対して単純な反応機構を仮定している。裏を返せば、間接測定法の正否は、仮定した反応機構の精度で決まっていると言える。そこで筆者らの研究グループは、 ${}^8\text{B}$ の分解反応を正確に記述することによって、間接測定法の精密な検証を行った。

検証にあたっては、分解反応を最も正確に記述できる反応モデルのひとつである、連続状態離散化チャネル結合法 (Continuum-Discretized Coupled-Channels method: CDCC) [1] を採用した。CDCC は 1981 年に九大核理論グループが提唱したモデルであるが、本稿のタイトルになっていることからわかるように、筆者らが展開している物理の中核となる研究手法である。CDCC はチャネル結合法的一种であり、強く結合した状態間の遷移を無限次のオーダーまで取り入れることができる。通常のチャネル結合法との違いは、連続状態も含めたチャネル結合を取り入れることができる点である。CDCC では、無数に存在し、かつ無限の広がりを持つ連続状態を、適当な方法を用いることにより、有限個のコンパクトな離散的状態で表現する。この定式化の過程で CDCC が一貫して想定しているのは、実験の観測量を、要求される精度で記述するために必要な模型空間は、ヒルベルト空間のごく一部に過ぎないということである。この考えこそ、CDCC の本質であると言っても決して過言ではない。CDCC はこれまで数多くの反応解析に適用され、物理量の定量的再現に高い成功を収めてきた。なお、CDCC の理論的基礎付けは、歪曲波ファデーエフ法 (3 体反応の厳密解法) との対応に基づいてなされている[2]。

本研究が対象とする ${}^8\text{B}$ 分解反応では、分解を引き起こす相互作用の主成分が、極めて長いレンジを持つ双極子型クーロン相互作用であるため、その解析は困難を極める。具体的には、約 100 チャネルのチャネル結合を取り入れつつ、散乱波を 1,000fm 程度まで求

める必要がある。今、散乱波の波長は約 0.5fm であるから、これは、2,000 回ほどの振動を数値的に求めなければならないことを意味する。また、部分波展開の上限（部分波の数）は、10,000 を越える。筆者らは、このような大規模チャネル結合計算を実行するべく、既存の CDCC コードを拡張した上で、幾何光学近似を取り入れた新しい CDCC、Eikonal-CDCC (E-CDCC) [3]を開発した。E-CDCC の詳細については割愛するが、これにより、純量子力学的計算と計算精度的に等価で、かつ

計算時間が 1/10 程度で済む、正確かつ簡便な分解反応の計算手法が確立された。

この新しい手法を用い、以前の計算では無視されていた、核力分解や多段階過程の寄与といった高次の反応自由度を取り入れつつ、 ^8B の分解反応の解析を行ったところ、直接測定で得られた S_{17} と整合する結果が得られることがわかった[4]。また、詳細な分析の結果、 S_{17} の直接測定値と従来の間接測定値の差は、上述の高次の反応自由度に起因するものであることも確認された（図 4）。このことは、不安定核の分解反応を定量的に解析する際には、高精度の反応計算が不可欠であることを明確に示している。これは裏を返せば、正確な反応解析を行いさえすれば、天体核物理学において重要な反応の反応率を、分解反応実験によって定量的に決定できるということであり、天体核反応の間接測定法に対して、明確な信頼性を付与した極めて重要な研究成果であると考えられる。

3. 4 体 CDCC による不安定核反応研究

前節で紹介した E-CDCC と並んで重要な CDCC の進展として、4 体反応系への応用がある。4 体反応系とは、近似的に 3 体模型で表現できる原子核と、安定な標的核の、合わせて 4 体からなる系のことである。図 5 に示したのは、核図表で質量数が小さい領域を拡大したものであるが、安定核（黒）から遠く離れた不安定核の多く（赤）は、比較的安定なコアと 2 つの余剰核子という 3 体系で記述されることがわかる。従って、そのような原子核の分解反応を記述できる模型の開発は、今後の不安定核物理の展開において、極めて重要な意味を持つものと考えられる。ところが、2 粒子系の連続状態は容易に計算することができるのに対し、3 粒子系のそれを求めることは、一般に極めて難しい。そこで我々は、3 体系の連続状態を離散化する際に、ガウス型基底関数変分法[5]を活用するこ

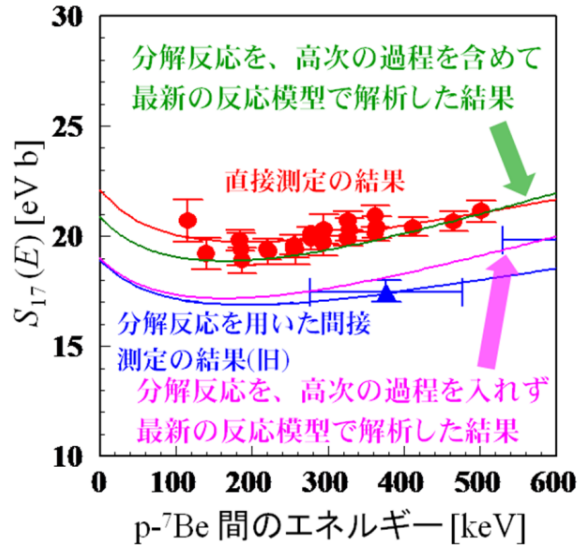


図 4

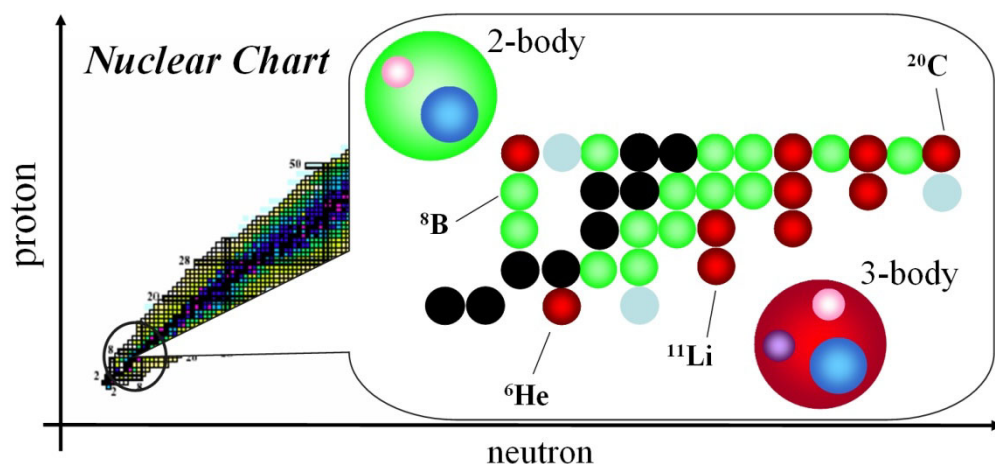


図 5

とにより、既存の CDCC と同じ枠組みで 4 体反応を記述することに成功した。このモデルを 4 体 CDCC[6]と呼ぶ。理研仁科センターの松本琢磨氏を中心として開発されたこの 4 体 CDCC は、これまでどの反応モデルも再現することができなかった、 ${}^6\text{He}$ と ${}^{209}\text{Bi}$ の低エネルギーにおける弾性散乱断面積を再現することに成功し（図 6）、現在、世界最先端の反応モデルとして広く認識されている。

既存の CDCC と同様、4 体 CDCC 計算の結果得られるのは、離散化された連続チャネルへと遷移する確率である。従って、これを実験で得られる連続スペクトルと比較するためには、CDCC の結果に対して何らかの平滑化の処理を施す必要がある。本来、この処理には 3 体系の連続状態の正確な波動関数が必要であり、ファデーエフ計算を行わなければならない。しかし、我々が用いる波動関数は、CDCC 計算で設定している模型空間の範囲内で正確でありさえすれば良く、必ずしも真の正解である必要はない。この考えに基づいてごく最近開発されたのが、模型空間内平滑化法[7]という新しい平滑化の方法であり、これによって、4 体 CDCC による連続的な分解スペクトルの計算が可能となった。

こうして完成した 4 体 CDCC は、今後の不安定核反応解析において中

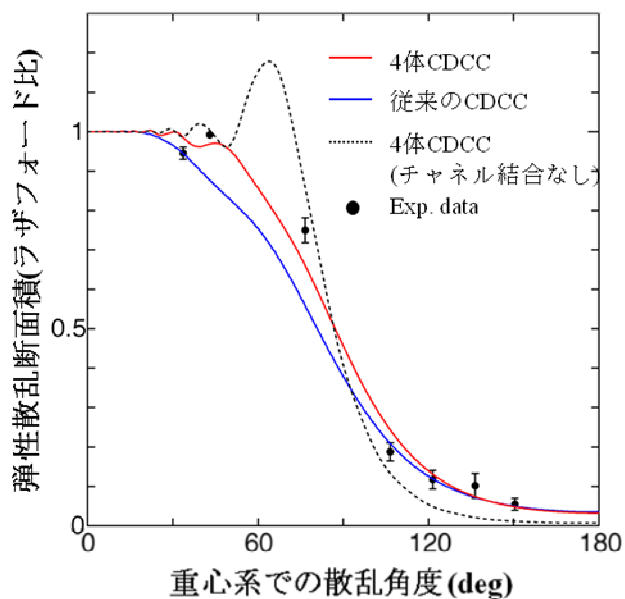


図 6

核的な役割を果たして行くものと期待される。

4. 天体核物理への応用

上で述べたように、我々は、不安定核の反応解析を目的として CDCC の拡張を行ってきた。その成果として開発された E-CDCC や 4 体 CDCC (また、両者を組み合わせたもの) が、最も正確な計算手法のひとつとして、不安定核反応の解析に利用されていくであろうことは想像に難くない。しかしながら、今後の不安定核実験が主として中間エネルギー領域 (核子あたり 200 から 300 MeV 程度) で行われていくこと、このエネルギー領域では多段階過程の寄与は一般に小さいことを考慮すると、CDCC という高精度の計算が必要となるのは、断面積の絶対値が本質的に重要である場合に限られることが予想される。従って我々としては、どのような場合に CDCC が本質的な役割を果たすかを事前に想定しておく必要がある。

定量性が重んじられる物理としてまず考えられるのが、天体核物理である。第 1 節で述べた S_{17} の物理は、まさにその典型例であり、これと類似する天体核反応断面積の間接測定は、今後もますます盛んに行われるものと期待される。ただし、一般に宇宙元素合成過程には膨大な数の反応が関与するため、特定の反応の断面積が重要となるのは稀であるという点には留意しておく必要がある。現在、重元素の生成過程の有力候補として注目されている r 過程 (速い中性子捕獲過程) の鍵になる反応がいくつか提案されており、その断面積 (中性子捕獲断面積) を、重陽子による中性子移行反応を利用して間接的に測定する計画が進められている。この計画では、移行反応の解析には DWBA を用いるとされているが、得られる結果に定量的信頼性を持たせるためには、CDCC による解析が不可欠であると考えられる。

一方、天体核反応研究で普遍的に成立する、新しい元素生成シナリオを提唱することも核反応屋の重要な役割であると考えられる。これについては、これまで定量的には評価されていない、非共鳴 3 粒子融合反応が鍵になるのではないかと筆者は考えている。例えば ^{12}C は、2 つの連続する 2 粒子共鳴反応で生成されると考えられているが (図 7)、非共鳴過程を正確に取り入れるることにより、低温領域で ^{12}C 生成断面積が劇的に (数 10 桁) 増大することが、CDCC を用いた予備的な計算によって示されている。この物理の今後の拡がりに、大きな期待が寄せられている。

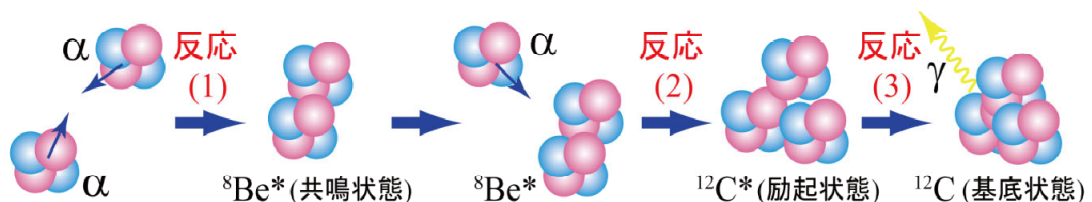


図 7

5. 核データ研究への応用

CDCC による定量的反応計算のもうひとつの応用先として、核データ研究がある。断面積を絶対値まで説明すること、また、断面積を予言することが要求されるこの分野は、定量的反応計算の極めて重要な応用先であると考えられる。

最近、九大エネルギー理工学グループ及び日本原子力研究開発機構の研究グループと共同で推進しているのが、 ${}^6,7\text{Li}$ 標的に重陽子を入射し、中性子が放出される反応の定量的解析である。この反応は、核融合炉用材料照射試験に用いる大強度加速器中性子源の開発計画（International Fusion Material Irradiation Facility: IFMIF 計画）において、中性子源として最も注目されている反応である。重陽子は陽子と中性子の弱束縛系であり、連続状態との結合が一般に強いため、これを正確に取り入れた CDCC 計算によって ${}^6,7\text{Li}(d,np)$ 反応の断面積を計算するというのが計画の柱である[8]。ただし、既存の CDCC で計算できるのは、反応後の標的核が基底状態にいる過程のみであるため、その条件が課されていない、いわゆる包括的断面積に対応する実験データを説明するためには、計算の拡張が必要である。

これについては、現在、包括的中性子生成反応の記述に定評のあるグラウバー模型と既存の CDCC を組み合わせて実験データを説明する試み（図 8）と、CDCC の枠組みを用いて、終状態における標的核の状態を問わずに中性子生成反応断面積を計算する試みが並行して進められている。

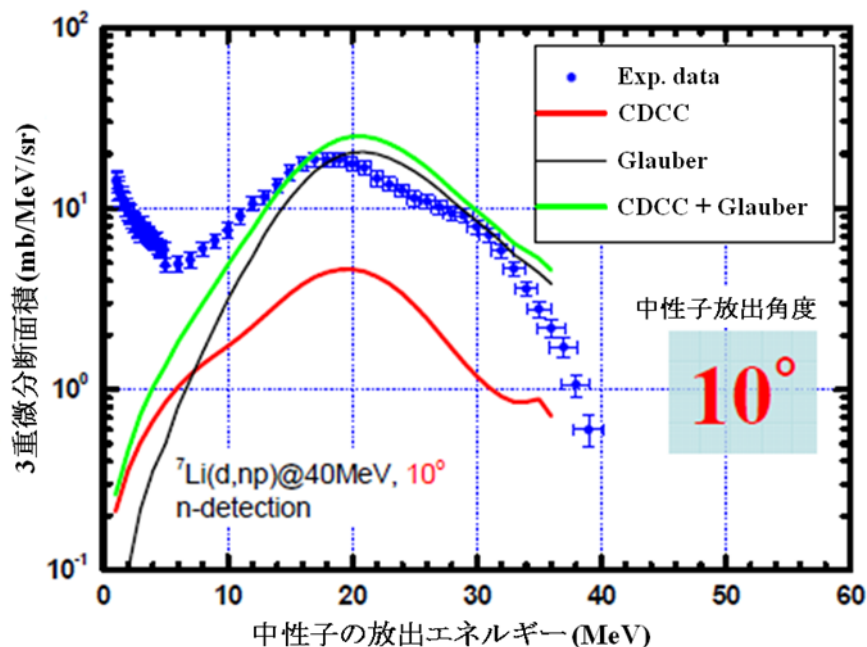


図 8

6. まとめ

不安定核物理の発展を契機として、連続状態離散化チャネル結合法 (CDCC) は、より系統的な反応、そしてより広い模型空間を扱うことができる新しい模型へと進化した。この新しい手法は、今後の不安定核物理の推進において本質的な役割を果たすものと期待されるが、これと並行して、定量的反応計算が真に活かされる研究分野である天体核物理や核データ研究への応用を常に意識しつつ、CDCC の物理を展開していきたいと考えている。

本稿で紹介した内容は、九州大学理学院の八尋正信氏、上村正康氏、江上智晃氏、九州大学総合理工学研究院の渡辺幸信氏、叶涛氏、理研仁科センターの松本琢磨氏、千葉経済短大の井芹康統氏、日本原子力研究開発機構の千葉敏氏、橋本慎太郎氏との共同研究に基づくものである。これらの方々の協力に感謝したい。なお本研究の数値計算は、九州大学情報基盤研究開発センターの研究用計算機システムを利用して行った。最後に、今回日本原子力学会で講演する貴重な機会を与えてくださった渡辺幸信氏及び関係各氏に心より感謝したい。

参考文献

- [1] M. Kamimura *et al.*, Prog. Theor. Phys. Suppl. **89**, 1 (1986); N. Austern *et al.*, Phys. Rep. **154**, 125 (1987).
- [2] N. Austern, M. Yahiro and M. Kawai, Phys. Rev. Lett. **63**, 2649 (1989); N. Austern, M. Kawai and M. Yahiro, Phys. Rev. C **53**, 314 (1996).
- [3] K. Ogata, M. Yahiro, Y. Iseri, T. Matsumoto and M. Kamimura, Phys. Rev. C **68**, 064609 (2003).
- [4] K. Ogata, S. Hashimoto, Y. Iseri, M. Kamimura and M. Yahiro, Phys. Rev. C **73**, 024605 (2006).
- [5] E. Hiyama, Y. Kino, and M. Kamimura, Prog. Part. Nucl. Phys. **51**, 223 (2003).
- [6] T. Matsumoto, E. Hiyama, K. Ogata, Y. Iseri, M. Kamimura, S. Chiba, and M. Yahiro, Phys. Rev. C, 061601(R) (2004); T. Matsumoto, T. Egami, K. Ogata, Y. Iseri, M. Kamimura and M. Yahiro, Phys. Rev. C **73**, 051602(R) (2006).
- [7] T. Egami, T. Matsumoto, K. Ogata and M. Yahiro, arXiv: 0812.3693 [nucl-th] (2008).
- [8] Tao Ye, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata and Satoshi Chiba, Phys. Rev. C **78**, 024611 (2008).