

|             |  |
|-------------|--|
| 氏名・(本籍)     | かさぎ じろう た<br>笠 木 治 郎 太   |
| 学 位 の 種 類   | 理 学 博 士  |
| 学 位 記 番 号   | 理 博 第 3 7 8 号  |
| 学位授与年月日     | 昭和 4 9 年 3 月 2 6 日   |
| 学位授与の要件     | 学位規則第 5 条第 1 項該当   |
| 研究科専門課程     | 東北大学大学院理学研究科<br>(博士課程) 原子核理学専攻修了   |
| 学 位 論 文 題 目 | ${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, dp){}^4\text{He}$ , ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, dd){}^4\text{He}$ 反応<br>における準自由核子移行反応過程の研究 |
| 論 文 審 査 委 員 | (主査)<br>教 授 森 田 右 教 授 石 松 敏 之<br>助教授 藤 平 力   |

## 論 文 目 次

|         |  |
|---------|--|
| 第 I 章   | 序 論                                      |
| 第 II 章  | Quasifree transfer reaction process について |
| 第 III 章 | 実験方法                                     |
| 第 IV 章  | 結果及び議論                                   |
| 第 V 章   | 結 論                                      |

## 論文内容要旨

### 第I章 序 論

軽い核の cluster 構造を調べるため, quasifree elastic scattering (q.e.s.) 反応を用いた研究が数多くなされてきている。この q.e.s. process は, target 核が比較的大きな cluster probability を持っているとき, incident particle は target 中のいずれかの cluster とのみ相互作用し, 両者が弾性的に散乱されていくと仮定され, cross section は残ったもう一方の cluster のもちだす momentum の関数となる。

最近では, elastic scattering process 以外の quasifree reaction process と名付けられる反応が二, 三報告されている。これは, q.e.s. とほぼ同じ mechanism であるが, target 中の cluster と incident particle が, elastic scattering を生ずるのではなく, 両者とも異った particle になる reaction を生ずる過程である。この process の研究はまだ始まったばかりで, これから実験 data が蓄積されていく段階にある。特に興味深い transfer reaction process では, その寄与が定性的に指摘されているだけである。

我々は, q.e.s. により, よく調べられている  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$  を target にして, quasifree transfer reaction (q.t.r.) process を調べた。考えられる process は,  ${}^6\text{Li}$  中の deuteron cluster,  ${}^9\text{Be}$  中の  ${}^5\text{He}$  cluster から ( ${}^3\text{He}, \alpha$ ) という pick up 反応で one neutron を transfer する process である。それぞれ, 終状態が3体となる  ${}^6\text{Li}$  ( ${}^3\text{He}, \alpha p$ )  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^9\text{Be}$  ( ${}^3\text{He}, \alpha \alpha$ )  ${}^4\text{He}$  反応の中にその寄与が考えられる。

この研究の目的は次の点にある。

1.  ${}^6\text{Li}$  ( ${}^3\text{He}, \alpha p$ )  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^9\text{Be}$  ( ${}^3\text{He}, \alpha \alpha$ )  ${}^4\text{He}$  反応の中に, 考えている q.t.r. process の寄与を見出すこと。
2. q.t.r. から, 核内 cluster 間の相対運動に関する information を得るとともに, q.e.s. で得られているものと比較すること。
3. この反応により, cluster 中の nucleon の運動に関する information を得ること。

### 第II章 Quasifree transfer reaction process について

$a + X \rightarrow b + A + S$  反応中の q.t.r. process を考える。すなわち target  $X$  は cluster  $B$  と  $S$  からなり, incident particle  $a$  は cluster  $B$  とのみ相互作用し,  $B$  中の nucleon  $n$  を pick up して, off-mass shell での  $a + B \rightarrow b + A$  反応を生ずる pro-

cessである。Bはbとnからなり、Aはaとnから作られる。Sはspectatorである。

従来、q.e.s. でかなりの成功を収めている plane wave impulse 近似 (PWIA) で、q.t.r. を考えると cross section は次の式で書き表わされる。

$$\frac{d^3 \sigma}{d\Omega_b d\Omega_A dE_A} = (K.F.) \times |F(\bar{K}_S)|^2 \times \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{a+B \rightarrow A+b}$$

ここで  $K_S$  は、spectator S の transferred momentum で  $F(\bar{K}_S)$  は核X中のB-S間の wave function の Fourier transform で、その二乗は momentum distribution を表わし、 $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{a+B \rightarrow A+b}$  は、対応する  $a+B \rightarrow A+b$  反応の cross section (K.F.) は kinematical factor である。従って  $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{a+B \rightarrow b+A}$  が知られていると、 $K_S$  を変える測定により、 $|F(\bar{K}_S)|^2$  が求まり、又、 $K_S$  を一定にして  $a+B \rightarrow A+b$  反応の c.m. angle を変化させると、核内B中の移行核子に関する information が得られる。

更に、q.t.r. は次の特徴をもつ。それは free state が particle decay する cluster (例えば dineutron, diproton,  $^5\text{He}$ , etc.) であっても incident particle と outgoing particle を適当に選ぶことにより、観測可能となること、又、Q-value の高い反応を用いると、incident energy が低くなくても観測しやすいことである。

### 第三章 実験方法

実験は、東北大学 5 MV V.d.G. 加速器から得られる 4.0 MeV の  $^3\text{He}$  beam を用いて行なわれた。targetは、 $^6\text{Li}$  は enriched  $^6\text{Li}$  を carbon 薄膜上に蒸着し、 $^9\text{Be}$  は self support を用いた。厚さは各々約  $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,  $120 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  である。detector は  $^6\text{Li}$  ( $^3\text{He}, \alpha p$ )  $^4\text{He}$  反応では、proton 用に Li drift type (2.8 mm),  $\alpha$  用に  $100 \mu\text{m}$  の S.S.D. を、 $^9\text{Be}$  ( $^3\text{He}, \alpha \alpha$ )  $^4\text{He}$  反応では  $300 \mu\text{m}$  の S.S.D. を 2 個用いた。coincident events は Time to Amplitude Converter と Single Channel Analyzer を組み合わせて選別した。coincident time は 80 nsec  $\sim$  160 nsec 程度で行なわれた。2 個の detector からの energy pulse は 2 次元 ( $128 \times 32 \text{ ch.}$ ) で測定された。又、2 個の detector は beam 軸に対して互いに反対側の角度に set され、beam 軸と 2 個の detector が同一平面に乗る coplanar plane で行なわれた。

### 第四章 結果及び議論

#### (1) $^9\text{Be} (^3\text{He}, \alpha \alpha) ^4\text{He}$ 反応

一方の detector を固定して ( $\theta_1 = 75.2^\circ$ )、もう一方の detector を変化させて

( $\theta_2 \approx 60^\circ \sim 90^\circ$ ) 得られた energy spectra を、各々の角度 pair で計算される spectator  $\alpha$  の minimum energy ( $E_s^{\min}$ ) を parameter にして比較すると、次の特徴が示された。①各角度 pair で、 $E_s^{\min}$  の付近に broad な peak が存在する。② ${}^9\text{Be}$  ( ${}^3\text{He}, \alpha$ )  ${}^8\text{Be}$  で作られる  ${}^8\text{Be}$  ( $2^+, 4^+$ ) の state からの decay に対応する peak が存在する。③後者は  $\theta_2$  を変化させたどの spectrum にも現れているが、前者は  $E_s^{\min}$  が 0 から離れるに従って急速に減少する。

${}^9\text{Be}$  の基底状態は、 $J^\pi = 3/2^-$  であるから、 ${}^5\text{He} - \alpha$  間の angular momentum は  $L=0$  或いは  $L=2$  である。第Ⅱ章からわかるように、q.t.r. の寄与は  $L=0$  ならば、 $E_s = 0.0$  で最大となる。 $(p.p\alpha)$ 、 $(\alpha, \alpha\alpha)$  の結果は  $L=0$  が main であることを示しており、この反応においてもそのことは期待される。実験で得た energy spectrum のふるまいは、この期待を定性的によく示している。すなわち、 $E_s^{\min}$  付近の broad な peak が問題にしている quasifree  ${}^5\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + \alpha$  reaction process によるものである。

第Ⅱ章で述べた PWIA により、momentum distribution  $|F(K_s)|^2$  を、angular correlation からと、energy spectrum から求めた。 $(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{{}^5\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + \alpha}$  は後に測定した  $K_s = 0$  での angular distribution を用いた。予想したように  $|F(K_s)|^2$  は S-state が主で、 $K_s = 0$  付近に maximum を持っている。 $e^{-\frac{1}{2}(\frac{K_s}{K_0})^2}$  の関数で fit したときの  $K_0$  は  $0.16 \text{ fm}^{-1}$  と求まり、その巾 (FWHM) は  $0.38 \text{ fm}^{-1}$  である。energy spectrum から得た  $|F(K_s)|^2$  は angular correlation から得たのより多少、巾が広がっているが、これは上述の sequential decay process の影響によるものと思われる。

又、 $\theta_{\text{c.m.}} = 90^\circ$  の  $(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{{}^5\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + \alpha} = 2.0 \text{ mb/sr}$  と仮定して cluster probability を表わす effective number  $N_{\text{eff}} = \int 4\pi q^2 |F(q)|^2 dq$  を求めると 0.05 である。FWHM と  $N_{\text{eff}}$  を q.e.s. で得られているのと比較すると、 $(p.p\alpha)$  の結果はこの実験で得た値よりも FWHM で約 1.5 倍  $N_{\text{eff}}$  で 2~5 倍大きい値であり、 $(\alpha, 2\alpha)$  の結果は A. Guichard 達の結果が我々のとほぼ同じ値を示している。

$K_s = 0$  condition での quasifree  ${}^5\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + \alpha$  反応の角分布が  $\theta_{\text{c.m.}} \approx 20^\circ \sim 30^\circ$  で得られた。角分布の特徴は、 $\theta_{\text{c.m.}} \approx 40^\circ \sim 50^\circ$  に minimum を持ち、前方と後方に上がってゆく。 $\theta_{\text{c.m.}} = 50^\circ$  より前方は、q.t.r. の peak が  ${}^8\text{Be}$  (2.9 MeV) と重なったうために、upper limit と lower limit が示された。得られた角分布を Q-value 19.008 MeV, binding energy 15.7 MeV の  ${}^5\text{He}$  との反応とみため

て、Butler 近似で、 $\ell=1$ での fit を試みた。fit した結果は、 $50^\circ$  より後方の pattern を合わせようとすると、cutoff radius  $R=5.4$  fm がよく合うが、前方は全く合わなくなり、全体として傾向を再現するのは  $R=2.9$  fm である。

## (2) ${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, \alpha p){}^4\text{He}$ 反応

この反応は、(1)の場合とは違い、 $E_{{}^3\text{He}}=4.0$  MeV では、 $E_s$  が非常に小さくなる condition を  ${}^8\text{Be}(2.9$  MeV) の sequential decay peak から離れた位置にすることは kinematical に不可能であった。そのため、q.t.r. の寄与がほとんどないと思われる角度で、 ${}^9\text{Be}(2.9$  MeV) の shape を求め、q.t.r. の寄与を実験 data から推定した。 $\theta_p=60^\circ$  に固定し、 $\theta_\alpha$  を変化させていったときの spectra は次の特徴を示す。①  $E_s^{\min}$  付近に  ${}^9\text{Be}(2.9$  MeV) の peak とは異った peak がある。② この peak の maximum は  $E_s^{\min}$  の位置とは一致しない。③  $E_s$  が 1 MeV 以上になるとこの peak は消えて了う。又、 $\theta_p$  を後方にしても  $E_s=0$  付近にこの peak の現れることが確認された。

この peak の位置に、 ${}^5\text{Li}$ 、 ${}^8\text{Be}$  の sequential decay に相当する level は存在しない。従ってこの peak が考えている q.t.r. の寄与である。

(1)の場合と同様に得られた peak の maximum の値を、spectator の momentum の関数にやき直した。この結果は、予想されたものとは異った様相を示す。それは、 ${}^6\text{Li}$  中の  $\alpha$ - $\alpha$  間の angular momentum は  $L=0$  が main であると、q.e.s. からしられている。しかし、この実験で得られた angular correlation は  $K_s=0$  では maximum とはならず  $0.2$  fm $^{-1}$  程度ずれている。 $L=0$  以外の場合は  $K_s=0$  が対称軸とならなければならないが  $K_s=0$  は対称軸ではない。更に angular correlation と energy spectrum を PWIA に基づいて consistent に説明することは出来ない。

最近、q.e.s. process でも、PWIA では説明できない同様な現象が報告されている。このような現象は、完全には説明されていないが、final state interaction との interference の可能性が指摘されている。今回の  ${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, \alpha p){}^4\text{He}$  反応では、q.t.r. process と  ${}^8\text{Be}(2.9$  MeV) の巾広い state からの sequential decay process とが interference を生じている可能性がある。

## 第V章 結 論

1.  ${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, \alpha p){}^4\text{He}$ 、 ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \alpha\alpha){}^4\text{He}$  反応とも、incident energy が 4.0 MeV と非常に低いにもかかわらず、quasifree  $d+{}^3\text{He}\rightarrow\alpha+p$ 、 ${}^5\text{He}+{}^3\text{He}\rightarrow\alpha+\alpha$  反応 process の存在が確認された。

2.  ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \alpha\alpha){}^4\text{He}$  では, q.t.r. は PWIA でかなりよく説明される。この実験から求められた  ${}^5\text{He} - \alpha$  の  $|F(K_s)|^2$  の FWHM は  $0.38 \text{ fm}^{-1}$  であり,  $N_{\text{eff}}$  は

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\theta_{\text{c.m.}}=90^\circ}^{5\text{He}+{}^3\text{He}\rightarrow\alpha+\alpha} = 2.0 \text{ mb/sr} \text{ とすると } 0.05 \text{ である。}$$

quasifree  ${}^5\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + \alpha$  の角分布は, Butler 近似で,  $\ell=1$  neutron pick up,  $R=2.9 \text{ fm}$  とすると傾向は合わせられる。

3.  ${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, \alpha p){}^4\text{He}$  では, q.t.r. process と  ${}^8\text{Be} (2.9 \text{ MeV})$  state の sequential decay process との interference を生じている可能性がある。

## 論文審査結果の要旨

従来、準自由弾性散乱を用いて軽核のクラスター構造を調べる研究はいくつか行なわれてきた。本論文はこれと類似の核子移行反応が低いエネルギー領域でも可能であるかどうかを調べ、それによって軽核のクラスター構造を研究しようとするものである。

著者はこの観点から  ${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, \alpha p){}^4\text{He}$  と  ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \alpha\alpha){}^4\text{He}$  反応を取りあげた。すなわち  ${}^6\text{Li}$  と  ${}^9\text{Be}$  核が夫々、 $\alpha + d$  と  ${}^5\text{He} + \alpha$  なるクラスター構造をもつならば、入射  ${}^3\text{He}$  粒子が  $d$  と  ${}^5\text{He}$  中の中性子をピックアップして  $\alpha$  粒子となって放出され、標的核中の  $\alpha$  粒子はスペクテーターの役割を演ずるという 3 体反応である。平面波近似によれば、相対運動が S 状態の場合、スペクテーターの運動量移行が 0 の方向で断面積が最大になり、それ以外の状態では最小になることが予想される。またスペクテーターの運動量  $K_s$  を一定にして角分布を測定すれば、移行される中性子の運動状態が調べられる。

実験は 4 MeV の  ${}^3\text{He}$  ビームを  ${}^6\text{Li}$  または  ${}^9\text{Be}$  の標的にあてて、放出される  $\alpha$  粒子または陽子を 2 つの半導体検出器で同時計数し、2 次元表示によってエネルギー分析を行なった。先ず  $K_s = 0$  の方向でエネルギー分析を行ない、次に一方の検出器を動かして角相関を測る。最後に  $K_s = 0$  の条件を満足させつつ両方の検出器を動かして角分布を測定した。

測定結果は、 ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \alpha\alpha){}^4\text{He}$  反応では予想された方向でのスペクトルにピークがあらわれ、準自由核子移行反応が起っていることを証明すると同時に、 ${}^5\text{He}$  と  $\alpha$  粒子間の相対運動では  $L = 0$  が主であることが結論され、両者間の運動量分布が決定された。また角分布を直接反応理論と比べることによって、移行される中性子は  $\ell = 1$  で相互作用半径  $R = 2.9 \text{ fm}$  という結果がえられた。

${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, \alpha p){}^4\text{He}$  反応では、予想されるピークが  ${}^8\text{Be}(2.9 \text{ MeV})$  状態をとる sequential decay のピークと近接しているため確定的な結果がえられなかったが、スペクトルの形、ピークエネルギー値などから準自由反応の寄与があることが確認された。しかし角度相関の最大は  $K_s = 0$  方向からずれており、 ${}^8\text{Be}$  をとおる反応との干渉の可能性などが考えられ、今後の研究に対する問題を提供している。

以上、本論文は 4 MeV という低いエネルギー領域でも準自由核子移行反応が可能であることを初めて示し、これによって  ${}^6\text{Li}$  と  ${}^9\text{Be}$  核のクラスター構造に関して有用な知識をえたものである。よって笠木治郎太提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。