

氏名・(本籍)	織原彦之丞
学位の種類	理学博士
学位記番号	理博第178号
学位授与年月日	昭和44年3月25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 (博士課程)原子核理学専攻
学位論文題目	${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ における (${}^3\text{He}$, t) 反応
論文審査委員	(主査) 教授石松敏之 教授木村一治 助教授藤平力

論 文 目 次

第1章	序 論
第2章	実験方法
第3章	実験結果
第4章	角度分布の解析と議論
第5章	結 語

論 文 内 容 要 旨

第一章 序 論

原子核の中にクラスターが存在するという実験的検証と理論的考察が種々なされ、 α -クラスターモデルとして軽い核の諸性質が導き出されている。Phillips と Tombrello は特に二体クラスターモデルをもって軽い核の bound state を理解しようとした。例えば ${}^7\text{Li}$ 核の基底及び第一励起状態は、 α -粒子と triton が relative orbital momentum $L=1$ にある $P_{3/2}$, $P_{1/2}$ state である。 ${}^7\text{Li}$ 核のクラスター構造については前述の著者達によって論じられ、実験的には triton あるいは ${}^3\text{He}$ の ${}^4\text{He}$ による弾性散乱, direct capture reaction 等によって reduced width が求められている。又 ${}^9\text{Be}$ 核の基底状態については一般的には $\alpha + \alpha + n$ の三体クラスター状態と考えられているが、 ${}^6\text{Li} ({}^7\text{Li}, \alpha) {}^9\text{Be}$, ${}^9\text{Be} (p, \alpha) {}^6\text{Li}$ 等の反応を通して ${}^6\text{Li} + \text{triton}$ の configuration も一定の割合で存在する事が議論されている。

${}^7\text{Li} ({}^3\text{He}, t) {}^7\text{Be}$ 反応は2つ報告されているが、前方のみの角度分布であり、解析をやる実験はまだなされていない。 ${}^9\text{Be} ({}^3\text{He}, t) {}^9\text{B}$ 反応に関しては $E_0 \text{He} > 4.0 \text{MeV}$ において実験がなされ、DWBA理論によって解析されている。 $({}^3\text{He}, t)$ 反応は (p, n) の拡張として一般的には charge exchange reaction と考えられている。しかし (p, n) の場合現在二つの観点があって一つは入射粒子と標的核との charge exchange であり、もう一つは入射粒子と標的核の extra nucleon との間の charge exchange と核子交換を共に考えるという立場である。 $({}^3\text{He}, t)$ 反応はもっぱら前者の見地でなされているが、後者の見方をした場合 ${}^3\text{He}$ と triton の間の charge exchange と triton と ${}^3\text{He}$ が交換される cluster exchange reaction が起るものと考えられる。

Cluster exchange (transfer) reaction の重要性は Holmgren, Wolicki 達によって指摘されているが、これによって標的核の ground state configuration と残留核のクラスター構造が明らかにされる。例えば ${}^6\text{Li} (t, d) {}^7\text{Li}$ 反応において cluster が関与する反応がおきるとすれば ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ 核の ground state configuration として $\alpha + d$, $\alpha + t$ が考えられる事であり、更に核反応機構としても stripping ではなく knock-on 又は heavy-particle-stripping 反応がおきているという事である。 $({}^3\text{He}, t)$ 反応においても同様な議論が成り立つが、その起りやすさ、更には二つの反応の相対的な重要さ等が U_1 による kinematical な検討により導き出され、 $({}^3\text{He}, t)$ 反応は ${}^7\text{Li}$ を target にした場合起りやすく、特に低い入射エネルギーにおいて heavy-particle-stripping reaction の重要性が増す事がわかっている。

第二章 実験装置

東北大学 5 M V バンデグラーフ型加速器より得られた ${}^3\text{He}$ beam を用いて実験が行われ、target は carbon-backing に Li_2CO_3 を蒸着したものと、金属ベリリウムの self-support が使われた。このような軽い原子核に数 MeV の ${}^3\text{He}$ を入射した場合三体以上の崩壊による

background も含め生成粒子は非常に多く、低いエネルギーの triton を検出する事は困難である。一般的に triton は $dE/dx \sim E$ の counter system で検出されているが本論文の実験においては、まず magnetic field によって momentum 分析し、その後 S.S.D. によってエネルギー分析をするという方法がとられた。しかし、同一エネルギーをもつ ${}^3\text{He}^+$, ${}^4\text{He}^{++}$ 等は triton と同じ magnetic rigidity をもつので absorber によって弁別された。

第三章 実験結果

${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, t_0){}^9\text{Be}$ 反応の角度分布が $E_3\text{He} = 3.0, 3.5, 4.0\text{MeV}$ において測定され、knock-on 反応がおきている事を示す前方ピークが観測された。前方ピークの入射エネルギー依存性は少く、一方後方にあらわれた微分断面積の落ちあがりには特に t_1 において、入射エネルギーの増加につれて系統的に後方へづれてゆく。又 t_0 については $E_3\text{He} = 2.0 \sim 4.2\text{MeV}$ の入射エネルギー範囲で励起曲線の測定がなされたが $E_3\text{He} \cong 3.8\text{MeV}$ において巾の広いピークがある他は smooth な変化である。 ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, \alpha_2){}^6\text{Li}$ 反応の excitation curve も同時に測定され、 α_0 はほとんど変化せず α_2 に複合核 ${}^{10}\text{B}$ の $E_x \cong 20\text{MeV}$ における $T = 1$ state の影響が現れている。

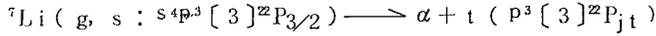
${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, t_0){}^9\text{B}$ 反応の角度分布は $E_3\text{He} = 3.0, 3.2, 3.5, 3.8\text{MeV}$ において測定され、そのふるまいは ${}^7\text{Li}$ を target にしたときと同じ傾向を示す。又この反応においても入射エネルギー $2.5 \sim 4.2\text{MeV}$ の範囲で励起曲線の測定がなされ、エネルギーの増加と共に単調に増加するという結果が得られた。

微分断面積の絶対値の測定が行われたが ${}^7\text{Li}$ の場合は ${}^9\text{Be}$ の約10倍大きい。又この絶対値測定の誤差は $\pm 13\%$ 以内であり、誤差の範囲内で他の人達の得た結果と矛盾していない。

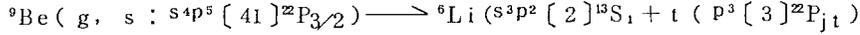
第四章 角度分布の解析と議論

角度分布にあらわれる前方ピークと後方ピークを同時に説明するものとして最近 Edwards 達によって PWB A E 理論が定式化され (p, α) , (n, α) 反応等に 응용されているがまだ distorted wave を使った理論はできていない。本論文においては Honda と Ui 達によって定式化された plane wave cut-off Born approximation の理論を使って解析がなされた。前方ピークは $d\sigma/d\Omega$ (knock-on) によって又後方における微分断面積の増加は $d\sigma/d\Omega$ (H.P.S stripping) によって説明された。前方ピークをつくりだすものとして一般的には他の反応機構も考えられるが $({}^3\text{He}, t)$ 反応においては一意的にきまる。又この理論によると実験との比較により target あるいは residual nucleus における outgoing あるいは incoming particle の reduced width が積の形で得られるが $({}^3\text{He}, t)$ 反応においては、核力の荷電独立性、具体的には ${}^7\text{Li}$ と ${}^7\text{Be}$ あるいは ${}^9\text{Be}$ と ${}^9\text{B}$ との核構造が同じであるとすれば質量数 7 又は 9 の原子核における質量数 3 のクスターの reduced width を求める事ができる。

cluster reduced width を出すにあたり ${}^7\text{Li}$ 核の ground state は



として L-S coupling shell model の波動関数をつかって S-factor が計算され、 ${}^7\text{Be}$ についても同様である。一方 ${}^9\text{Be}$ の ground state は



として S-factor が求められた。ここで ${}^7\text{Li}$ と ${}^9\text{Be}$ が α あるいは ${}^6\text{Li}$ core と triton cluster とに分けられたが α が ${}^{11}\text{S}$ 状態にある事により計算が簡素化され、更に前方の角度分布の勾配が ${}^7\text{Li}$ において ${}^9\text{Be}$ よりもゆるやかになる事が説明される。理論式を実験にあわせる為の parameter としては cut-off radius と $d\sigma/d\Omega$ (knock-on) に含まれる triton と ${}^3\text{He}$ の間の相互作用の強さをあらわす V_0 がとられた。

第五章 結 語

数 MeV の入射エネルギー領域において (${}^3\text{He}, t$) 反応によって生ずる triton の後方における角度分布の測定は kinematics から triton energy が 1 MeV 以下になるので困難であるが第二章で述べた測定技術の開発により最小エネルギー 500 KeV の triton までかなりの精度で検出された。

序論で述べたように $\alpha + \text{triton}$ の二体クラスターとしての記述がよい ${}^7\text{Li}$ を target にして cluster exchange reaction の実験がなされ、このような記述がそれ程よくない ${}^9\text{Be}$ の結果と比べ約 10 倍大きい absolute cross section が得られた。

角度分布においては前方ピークと後方における微分断面積の増加が観測され、exchange effect を考慮した PWB A 理論によって再現され、又入射エネルギーによる角度分布の変化が説明された。理論と実験との比較によって質量数 7 と 9 の原子核における質量数 3 の粒子の cluster reduced width が求められた。質量数 7 の原子核における reduced width の direct capture による結果と本論文の実験によって得られた値を比較してみると前者が 0.1 ~ 1.0 であるのに対し後者は ~0.3 である。 ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, t){}^7\text{Be}$ 反応の大きな absolute cross section (integrated cross section にして ~300 mb) は理論的に説明され reduced width も reasonable な値が得られた。一方 ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, t){}^9\text{B}$ 反応においては absolute cross section が普通の軽い核における ${}^3\text{He}$ induced reaction と同程度の大きさであり、かつ角度分布から cluster exchange reaction がおきていることが示されるにもかかわらず reduced width は前者にくらべ数倍大きくなる。これは ${}^9\text{Be}$ を ${}^6\text{Li} + \text{triton}$ に分けるときの S-factor を L-S coupling shell model で計算したのではその値が小さくなりすぎるところに帰因する。reduced width をきめるには弾性散乱によるのが最も良い方法であるが範囲は限られる。従って本論文のように核反応によって reduced width を決定する事はさらに多くの核構造を解明するてがかりになるものと考えられる。

参 考 文 献

- [1] E. Bogart, S. Devons and M. Tatcher, Padua (1963) p. 960
- [2] L. G. Earwaker, Nucl. phys. A90 (1967) 56
- [3] T. Honda and H. Ui Prog. Theor. Phys. 25 (1961) 613
- [4] K. L. Warsh and Steve Edwards, Nucl. Phys. 65 (1965) 382
- [5] G. C. Phillips and T. A. Tombrello, Nucl. Phys. 19 (1960) 555, Phys. Rev. 122 (1961) 224
- [6] H. D. Holmgren and E. A. Wolicki, Proc. Rutherford Jub. Intern. Conf. P 541
- [7] H. Ui Phys. Rev. 161 (1967) 1699, INSJ - 96 (1966)

論文審査結果の要旨

軽い核においてよく知られた核反応の機構を用いて原子核の中にクラスターが存在するという実験事実の理論的解析が種々なされているが、本論文は ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^9\text{Be}$ を二体のクラスターとして取扱ひ、これらの原子核の性質を明らかにした。

東北大5 MVバンデグラフ加速器より得られた ${}^3\text{He}$ ビームを用いて ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, t_0){}^7\text{Be}$ 、 ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, t_0){}^9\text{B}$ 反応の角分布を磁気分析器と半導体検出器の組合せにより測定を行った。 ${}^7\text{Li}$ については $E_{\text{He}}^{\text{inc}} = 3.0, 3.5, 4.0 \text{ MeV}$ での角分布と $E_{\text{He}}^{\text{inc}} = 2.0 \sim 4.2 \text{ MeV}$ の範囲で励起曲線の測定がなされ、 $E_{\text{He}}^{\text{inc}} \cong 3.8 \text{ MeV}$ において巾の広いピークがある以外は単調な変化が見られた。 ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, \alpha_0, \alpha_2){}^6\text{Li}$ 反応の励起曲線も測定し、 α_0 は変化がないが、 α_2 に複合核 ${}^{10}\text{B}$ の $E_x \cong 20 \text{ MeV}$ における $T = 1$ 状態の影響が見られる。 ${}^9\text{Be}$ については、 $E_{\text{He}}^{\text{inc}} = 3.0, 3.2, 3.5, 3.8 \text{ MeV}$ での角分布と $E_{\text{He}}^{\text{inc}} = 2.5 \sim 4.2 \text{ MeV}$ 領域での励起曲線の測定がなされ、エネルギー変化にともなう単調な増加が見られた。

この領域における $({}^3\text{He}, t)$ 反応で生ずるトリトンの後方の角度でエネルギーが 1 MeV 以下になり測定は非常に困難であるにもかかわらず、著者が開発した三点測定法により、 500 KV のトリトンも精度よく検出された。トリトンの後方の角分布の精密測定は、後述のクラスター交換反応を解明する重要な点で、実験技術のきめ手になっている。クラスター交換反応の重要性を指摘しているWolicki等がこの領域でデータを出せなかったのは正にこの点であった。この測定方法は他にも適用出来る有力な方法である。

角分布の解析は前方ピークはknock-on反応によって、後方ピークは宇井、本多によって定式化された $\text{H} \cdot \text{P} \cdot \text{S}$ 反応で行った。この解析は ${}^7\text{Li}$ と ${}^9\text{Be}$ が α 或いは ${}^6\text{Li}$ コアとトリトンクラスターに分けることによってクラスター交換反応として行ったものである。この結果は実験と理論のよい一致を見ており特に ${}^7\text{Li}$ の $\alpha + t$ の二体クラスターモデルのよいこと示している。又入射エネルギーの変化による角分布の変化も説明され、得られたクラスター換算幅は核構造の解明に重要な手がかりとなる。よって籾原彦之丞提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。