

氏名・(本籍)	たねいちひろし 種市宏
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 第 9 4 2 号
学位授与年月日	平 成 2 年 3 月 9 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
最 終 学 歴	昭和27年 3 月 東京大学理学部卒業
学位論文題目	軽い奇一奇核の電気四重極共鳴
論文審査委員	(主査) 教 授 庄 田 勝 房 教 授 菅 原 真 澄 助 教 授 斎 藤 悌二郎

論 文 目 次

第一章	序 論
第二章	実験方法及び解析
第三章	実験結果
第四章	実験結果についての議論
第五章	まとめ
	謝 辞
	参考文献
	付 録

論文内容要旨

[1] 序 論

光反応の断面積は1948年に初めて Baldwin と Klaiber によって測定され (γ, n) 反応による γ 線の吸収曲線に幅広い共鳴が発見された。この共鳴は電気双極子巨大共鳴 (GDR) と呼ばれ、光核反応の主要な研究課題であった。GDR の中心のエネルギー (E_m) , 共鳴幅 (Γ) が理論から導かれ、原子核構造の研究において、集団運動という重要な概念が導入された。1960年代に入ると、電子散乱の実験により電気双極子相互作用 ($E1$) 以外の多重極子相互作用が発見されて以来、ハドロンによる実験も含めて電気四重極巨大共鳴 (GQR) や、より高次の多重極 ($E3, E4, \dots, M1, \dots$) 巨大共鳴が発見された。

Texas A&M グループは115MeV のエネルギーの α を用いた (α, α') の実験で電気四重極巨大共鳴 (GQR) の研究を ^{27}Al から ^{208}Pb に到る27種の核について行なった。その結果 $A \geq 36$ の核では GQR のピークが見られたが、 $A < 36$ の核では確認できなかった。Jülich のグループでは155MeV の α を用いて、(α, α') の実験を行ない、 ^{14}N より重い核に GQR のあることを示した。 ^{14}N については、155MeV の ^6Li による ($^6\text{Li}, ^6\text{Li}'$) のスペクトルにも GQR のピークが現れている。 ^{14}N より軽い核については ^{12}C ($\alpha, \alpha'c$) で、 α と c 間のコインシデンス実験で GQR のピークが見出されているにすぎない。Hanna は、重い核ではコンパクトな GQR が存在しているが、軽い核では $E2$ 共鳴が $E1$ 共鳴に重なり、 $E2$ の強度が広い範囲に広がってしまうことを見出している。この結果によると、軽い核においても GQR は存在すると考えられる。従って、軽い核について、 $E2$ 共鳴の存在を調べることは重要なことである。

(α, α') 等の非弾性散乱で ^{14}N より軽い核でスペクトルに GQR を見出せないことが示すように、電子やハドロンによる非弾性散乱で GQR を分離することは困難と考えられる。また GDR のような大きな断面積と重なるような場合には断面積の小さな $E2$ 転移を分離できないので、選択的に $E1$ 反応が禁止され、 $E2$ 反応が主であるような反応により研究を行なう事が望ましい。この条件を満足するものとして自己共転核の (γ, α) , (γ, d) 反応がある。これ等の核は残留核と共にアイソスピン $T=0$ に属す。また、 α も d も $T=0$ であるので、この γ 線吸収におけるアイソスピン変化 ΔT は $\Delta T=0$ となり、アイソスピン選択則により、 $E1$ 転移が禁止される¹⁾。又、軽い核の (γ, α) 反応においては多体崩壊による α の放出が多くて、残留状態を定めて α を分離するのが困難である。従って、 $E2$ 共鳴の実験には (γ, d_0) 反応が適している。また、自己共転な核でも、偶-偶核では重陽子の分離エネルギーが、陽子の分離エネルギーより約10 MeV 大きい、奇-奇核では、重陽子の分離エネルギーが一般的に小さく、陽子の分離エネルギーは一般に大きい。 (γ, p) 反応による陽子は重陽子の検出に当って大きなバックグラウンドとなるが、この分離エネルギーの差のため、陽子の入射が全く無い環境で重陽子の測定を行なうことができる。

以上の理由で、自己共転な奇-奇核である $^6\text{Li}, ^{10}\text{B}, ^{14}\text{N}$ の (e, d) 反応の実験を行なって、 $E2$

共鳴を調べた。

[2] 実験及び解析

実験は核理研の300MeV 電子線型加速器から得られる電子線を標的核に照射し、放出された重陽子のエネルギー分布と角分布を測定した。重陽子のエネルギー分析、検出には焦点面に100個のSi(Li)半導体検出器(SSD)を備えたBrowne-Beuchner型の広帯域磁気分析器(BDM)を用いた。BDMによって、粒子は運動量分析されるので、1つのSSDで得る波高値は粒子の種類により分離したピークを作るので、重陽子を他の粒子から分離できる。また陽子の混入の無い状態で重陽子を純粹に測定できることは既に述べた。測定方法を確認するためGDRが禁止されない $^{11}\text{B}(e,d_0)$ の角分布を測定した。図1にこれを示す。図中の曲線はGibson et al.²⁾の式にfitさせたものであり、E1転移を示す。また $^{10}\text{B}(e,d_0)$ の角分布を測定した結果を図2に示す。これらの反応断面積の比 $\sigma(^{11}\text{B})/\sigma(^{10}\text{B}) \approx 100$ で予測されたGDRとGQRの比を示す。又、角分布の形も $^{11}\text{B}(e,d_0)$ のE1転移に対して、 ^{10}B は双山で、E2転移を示している。

GQRに関する (e,d_0) 反応は断面積が非常に小さいので、統計精度を上げるため、長時間の照射が必要であった。又、重陽子の収量を上げるためには標的を厚くせねばならず、10~25mg/cm²の標的を用いた。

測定した $^6\text{Li}(e,d_0)$ の角分布の例を図3に、 $^{14}\text{N}(e,d_0)$ の角分布の例を図4に示す。これらの角分布はいずれも双山で、特に ^6Li の場合は明瞭に双山に分れていて、E2転移であることを明確に示している。 ^6Li に比べて、 ^{14}N の角分布は90°付近の谷が浅く、等方成分(E0)が多いことを示している。又、角分布の非対称性はE1とE2の干渉を示している。

^6Li 及び ^{14}N については実光子による実験を行なった。標的手前25mmにTa板を置き、制動放射及び電子線による実験結果から、電子線のみによる結果を差し引いて、実光子による反応断面積を求めた。 ^{14}N における角分布の例を図5に示す。 (e,d_0) 、 (γ,d_0) の角分布の差によってE0の寄与を知ることができ、この寄与は大きいと思われる。 ^6Li の実験の結果(図6)によると、 (γ,d_0) 反応及び (e,d_0) 反応ともに同じ結果を与え、E0の寄与は小さいと考えられる。

[3] 理論計算との比較

$^6\text{Li}(\gamma,d_0)$ 反応において、クラスター模型による解析を行なった。 ^6Li が $\alpha + d$ のクラスター構造をとる確率は大きいことが確かめられている。 (d,γ) のdirect captureの断面積を計算し、詳細釣合の式によって (γ,d) 反応断面積を求め、電磁相互作用はmoszkowski³⁾の式に従い、 α と d の分離した状態の波動函数にクーロン函数を用い、結合した状態の波動函数には、Nobleの波動函数を用いた⁴⁾。また結合状態にはS-stateの他にD-stateを ϵ の割合で含むものとし、又、 $2M_d - M_\alpha \neq 0$ に基づくアイソスピン不純度に加えて、それ以外のアイソスピン不純度 δ_I を含めて計算した。核位相にはShanley等の d の α による弾性散乱の実験⁵⁾によって得られた値を用いた。実光子による $^6\text{Li}(\gamma,d_0)$ の角分布の比較を図6に示す。実線は上記の理論による計算

値を1.17倍したものである。また図中の破線は Gibson et al.²⁾の公式によるものである。結果は良い一致を示す。従って、 ${}^6\text{Li} (e, d_0)$ 反応においては Gibson et al.の公式を用いて解析した。 ${}^6\text{Li} (e, d_0)$ の実験結果に Gibson の式を fit して E1 と E2 を分離し、仮想光子数で割算して ${}^6\text{Li} (\gamma, d_0)$ の微分断面積を求め、更に全角度に積分して全断面積 σ を求めた。結果を図 7 (a)に示す。

${}^{14}\text{N} (e, d_0)$ 反応は、集団運動模型を取り入れたクラスター模型を用いて解析を行ない、E2 成分を分離した。このようにして求めた全断面積を図 7 (b)に示す。図 7 の実線はローレンツ曲線に best fit させたものである。これから得られた ${}^6\text{Li}$ 及び ${}^{14}\text{N}$ の電気四重極共鳴の中心エネルギー、共鳴幅 (FWHM) ,アイソスカラー・エネルギー加重和則を表 1 に示す。

[4] まとめ

序論に述べたように、軽い核の電気四重極巨大共鳴については、Heidelberg-Jülich グループが α の非弾性散乱実験で ${}^{14}\text{N}$ の GQR を見いだしている。中心エネルギー、幅等について、我々の結果と良い一致を示す。GQR 共鳴エネルギーは重核について導かれた $63A^{-1/3}$ (MeV) より小さくなること、及び共鳴幅が広がることが、我々の実験結果で確かめられ、この共鳴が電気四重極巨大共鳴であることは角分布により確認された。

${}^{10}\text{B}$ については、残留核も含めて、核構造が複雑であるため、クラスター模型による理論的な解析は困難である。しかし角分布は E2 転移のパターンを示している。 ${}^{10}\text{B} (e, d_0)$ 反応断面積は非常に小さいが、比較的大きな ${}^{10}\text{B} (e, d_1 + d_0)$ 反応から求めたエネルギー・スペクトルを仮想光子数で割算して求めた ${}^{10}\text{B} (\gamma, d_1 + d_0)$ の断面積から、中心エネルギーが $\sim 19\text{MeV}$ で、幅が $\sim 10\text{MeV}$ (FWHM) の共鳴が見出された。

以上、奇-奇軽核の (e, d_0) 反応の実験によって、幅の広い GQR が確認された。更に、アイソスピン不純度による E1 の寄与の他、 ${}^{14}\text{N}$ においては無視できない E0 成分の存在も発見された。

- 1) E.K.Warburton and J.Weneser ; Isospin in Nuclear Physics, ed. by Wilkinson, 1969 (North-Holland) P.175.
- 2) B.F.Gibson and H.T.Williams ; Nucl.Phys.A163 (1971) 193.
- 3) S.A.Moszkowski ; in Beta-and Gamma-Ray Spectroscopy, ed. by K.Siegbahn (North-Holland) 1955, P.373.
- 4) J.V.Noble ; Phys. Rev. C9 (1974) 1209.
- 5) P.E.Shanley ; Phys.Rev. 187 (1969) 1328.

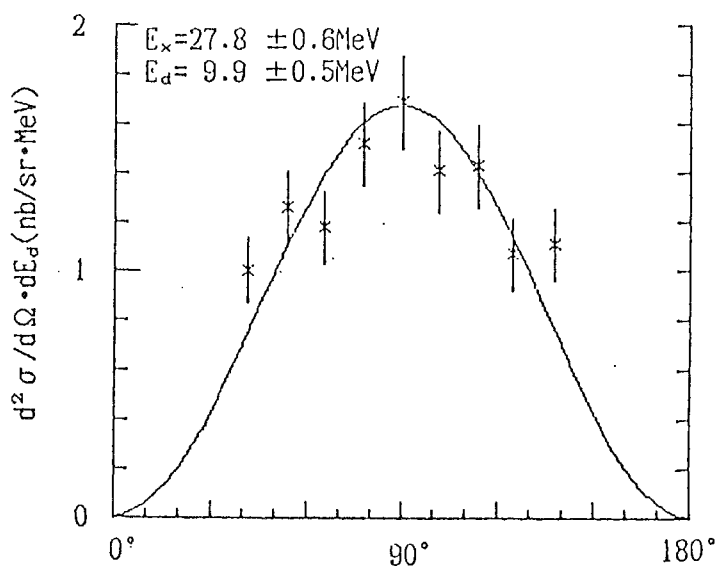


図1 $E_e = 29\text{ MeV}$ の $^{11}\text{B}(e, d_0)^9\text{Be}$ の角分布。実線は Gibson の式に測定値を fit させたもの。

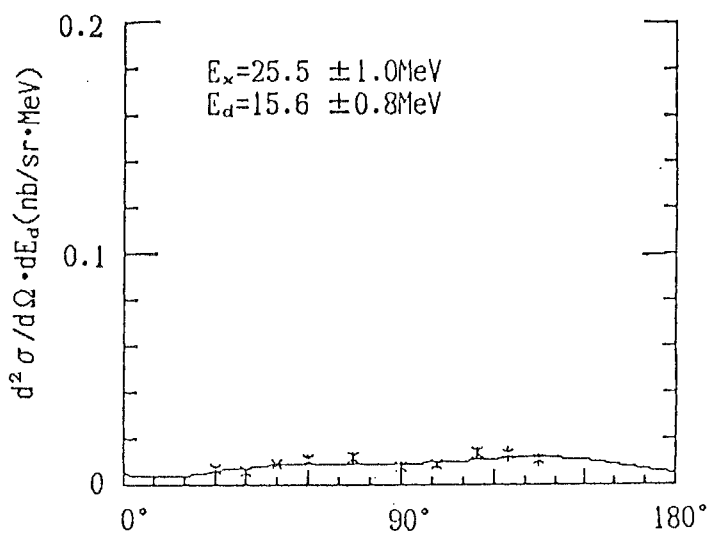


図2 $E_e = 27\text{ MeV}$ の $^{10}\text{B}(e, d_0)^8\text{Be}$ の角分布。
実線は図1 参照。

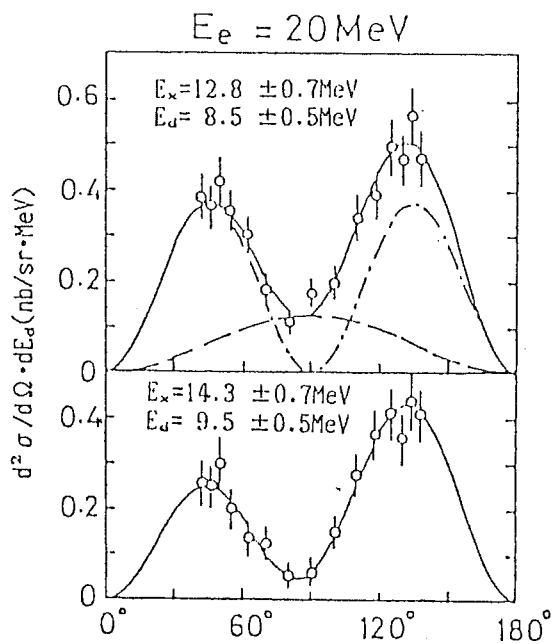


図3 ${}^6\text{Li}(e,d)$ 反応の角分布。実線は図1参照。

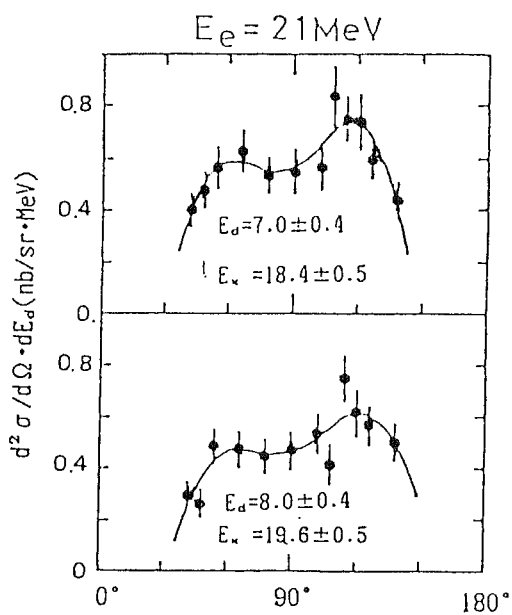


図4 ${}^{14}\text{N}(e,d)$ 反応の角分布。実線は図1参照。

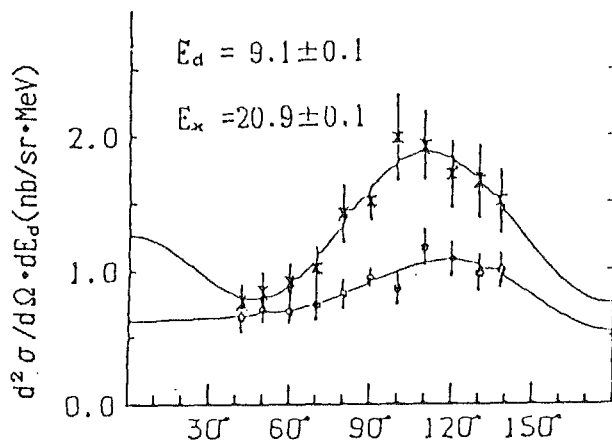


図5 $^{14}\text{N}(\gamma, d_0)$ (\times) と $^{14}\text{N}(e, d)$ (\bullet)。
実線は図1参照。

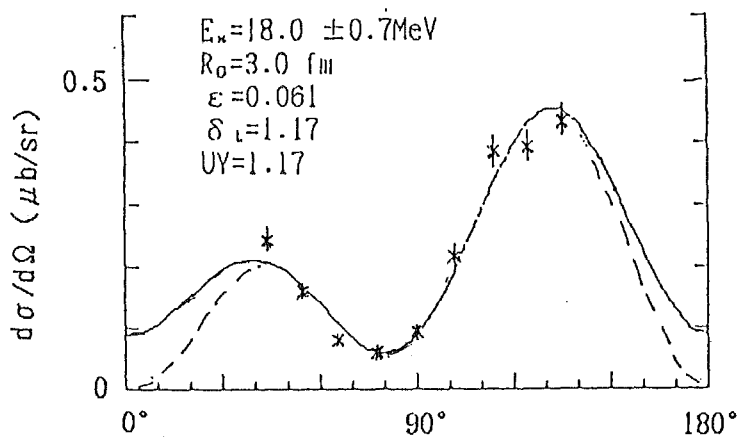


図6 $^6\text{Li}(e, d_0)$ の角分布。実線はクラスター模型
による計算。波線は Gibson の式による fit。

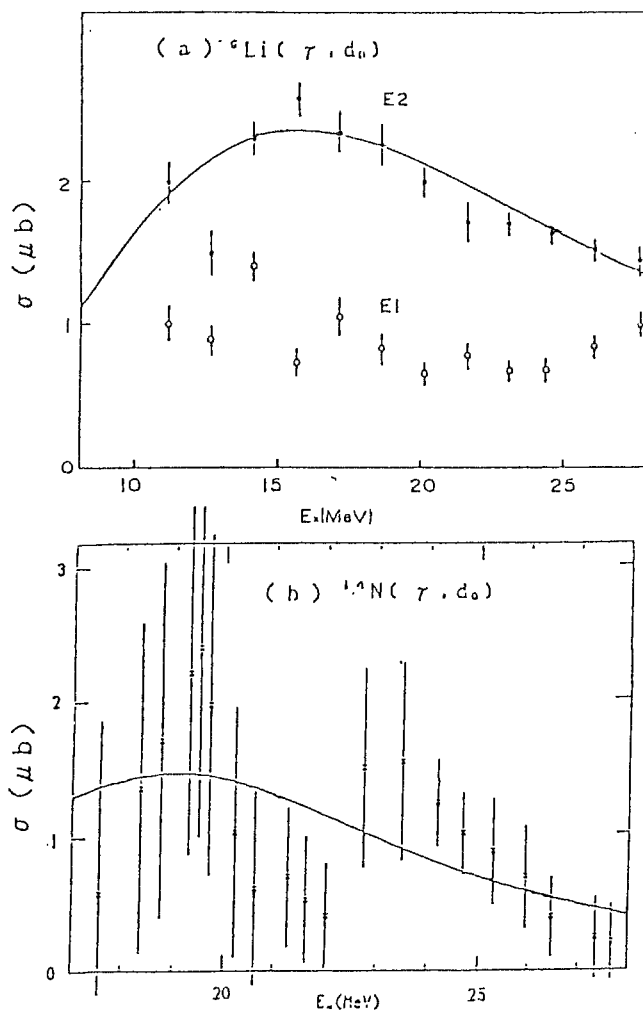


図 7 (a) ${}^6\text{Li}(e, d_0)$, (b) ${}^{14}\text{N}(e, d)$ の E2 巨大共鳴。
実線はローレンツ曲線による fit。

	共鳴 energy (MeV)	共鳴 幅 (MeV)	$\frac{\int \sigma(E2) \cdot \frac{dE}{E^2}}{0.25 Z^2 A^{-1} \langle R^2 \rangle}$
${}^6\text{Li}(\gamma, d_0)$	16	22	$\frac{0.19 \mu\text{b}/\text{MeV}}{2.5 \mu\text{b}/\text{MeV}} = 8\%$
${}^{14}\text{N}(\gamma, d_0)$	19	11.4	$\frac{0.33 \mu\text{b}/\text{MeV}}{4.47 \mu\text{b}/\text{MeV}} = 7\%$

表 1. ${}^6\text{Li}(\gamma, d_0)$, ${}^{14}\text{N}(\gamma, d_0)$ 反応の E2 巨大共鳴の特性。

論文審査の結果の要旨

本論文は軽い奇-奇核の (e, d_0) 反応及び (γ, d_0) 反応により残留核を基底状態として放出される重陽子 (d_0) のエネルギー分布, 角分布を測定し, これらの核の電気四重極巨大共鳴 (GQR) を研究したものである。原子核の GQR は以前から研究されていたが, 強い双極巨大共鳴 (GDR) や反応の連続成分から分離して測定する事は困難であった。これ迄の研究によると, GQR は ^{14}N より重い原子核領域で存在が明確であるに反して, これより軽い核ではその存在は明確でない。従って巨大共鳴は原子核の共通の性質であるとの観点から, これらの軽核における GQR の存在に関する研究は重要である。

奇-奇核においては一般に重陽子の結合エネルギーは陽子の結合エネルギーより小さいので, 放出重陽子の高エネルギー範囲では陽子による強い GDR のバックグラウンドを含まない。自然界に存在する奇-奇核は ^2H , ^6Li , ^{10}B , ^{14}N に限られるが, これらの核では GDR を經由して残留核を基底状態に残すような (e, d_0) 反応や (γ, d_0) 反応がアイソスピン選択則により禁止される。従って両反応を研究する事によって, 強い GDR を除外して, より弱い巨大共鳴を研究出来る。本論文においては ^6Li , ^{10}B , ^{14}N を標的核として (e, d_0) 及び (γ, d_0) 反応によって GQR, 単極巨大共鳴 (GMR) が研究された。著者は上記反応によって放出される d_0 のエネルギー分布と角分布を測定した。角分布は転移の多重極度により異なった形状を示す。また E0 転移は (e, d_0) 反応では可能であるが, 実光子による (γ, d_0) 反応では禁止される。著者は (e, d_0) 反応と (γ, d_0) 反応の結果を比較して E2, E0 転移を分離した。

実験結果によると, ^6Li では E2 転移が主であるが, ^{14}N では E0 転移の寄与も大きい事が結論された。著者はこれらの解析に基づき各転移の断面積を求めた結果, GQR を見出しその積分断面積と共鳴幅を求めた。 ^{10}B においては (γ, d_0) の断面積は小さく $(\gamma, d_0 + d_1)$ の実験結果から GQR の存在が推定されるが, 始と終の原子核状態の複雑さのため正確な結論を得る事は困難であった。

本研究によって ^{14}N より軽い原子核においても GQR が存在する事が初めて確認されたほか, GMR に関する情報が得られた事は巨大共鳴の研究に初めての新しい重要な知見を与えたものである。

以上この論文は著者が自立して研究活動を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することとを示している。よって種市宏提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。