

PROPOSAL FOR EXPERIMENT AT RCNP

TITLE

Laboratory exercise for undergraduate students at Kyoto University
Determination of the radii of the excited states in ^{12}C by measuring the inelastic proton scattering at $E_p = 53$ MeV

SPOKESPERSON

Full Name: Kawabata Takahiro
Institution: Department of Physics, Kyoto University
Title of Position: Associate Professor
Address: Kitashirakawa, Oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502 Japan
Phone number: +81-75-753-3832
FAX number: +81-75-753-3887
E-mail: kawabata@scphys.kyoto-u.ac.jp

EXPERIMENTAL GROUP

Full Name	Institution	Title or Position
K. Mizutani	Department of Physics, Kyoto University	D4
T. Takeda	Department of Physics, Kyoto University	M1
T. Furuno	Department of Physics, Kyoto University	D3
M. Tsumura	Department of Physics, Kyoto University	D3
K. Inaba	Department of Physics, Kyoto University	M1
Y. Takahashi	Department of Physics, Kyoto University	M1
Y. Fujikawa	Faculty of Science, Kyoto University	B4
T. Goto	Faculty of Science, Kyoto University	B4
S. Oakamoto	Faculty of Science, Kyoto University	B4
Y. Sakaguchi	Faculty of Science, Kyoto University	B4
I. Sakata	Faculty of Science, Kyoto University	B4
C. Takimoto	Faculty of Science, Kyoto University	B4
Y. Kanada-En'yo	Department of Physics, Kyoto University	AP

RUNNING TIME

Installation time without Beam:	3 days
Detector setup time:	8 hours
Measurement time:	12.5 hours
Reserved for possible troubles:	3.5 hours
<hr/>	
Total:	3+1 days

BEAM REQUIREMENTS

Beam line: W
Type of particle: p
Beam energy: 53 MeV
Beam intensity: 10 nA

1 Scientific motivation

^{12}C における 0_2^+ 状態 (ホイル状態) は、非常に空間的に発達した 3α クラスター構造を持つ状態として知られており、その構造については、理論と実験の両面から精力的な研究がなされてきた。近年、この状態は三つの α クラスターが最低エネルギーの s 軌道に凝縮した α 凝縮状態であることが理論的研究により指摘されている [1]。 α 凝縮状態では α クラスターの運動量分布がゼロ運動量を付近に鋭いピーク構造をもつため、運動量分布のフーリエ変換として与えられる α クラスターの分布は空間的に大きく拡がることになる。この結果、ホイル状態の半径は基底状態の半径の 2–3 倍に増大し、密度の極端な希薄化が生じている可能性がある [2]。この現象は、通常の原子核における核子密度が原子核の種類によらずほぼ一定であるという広く知られた常識的事実との対比において極めて興味深く、ホイル状態の半径を実験的に決定することが求められている。

しかし、極めて短寿命である原子核の励起状態の半径を実際に測定することは簡単ではない。直感的には、原子核の半径は散乱微断面積の角度分布における回折パターンに反映されると期待されるので、ホイル状態を励起する非弾性散乱の微断面積を測定すれば、ホイル状態の半径についての情報を得られる可能性がある。しかし、非弾性散乱の微断面積の回折パターンには、励起状態の密度分布だけでなく、基底状態の密度分布、核子間相互作用や結合チャンネル、反応機構など様々な要因が複雑に絡み合っており、微断面積の回折パターンと励起状態の半径の関係は必ずしも自明ではない [3, 4]。ホイル状態の半径を巡っては、いくつかの散乱微断面積の測定 [5, 6] がなされてきたが、これまでのところ、ホイル状態の半径を決定するには至っていない。

このような状況のなか、伊藤誠らはホイル状態の半径を測定するのではなく、ホイル状態の回転励起状態であり、ホイル状態と同様に半径が増大していると考えられている ^{12}C の 2_2^+ 状態の半径を測定することを提案している [7, 8]。

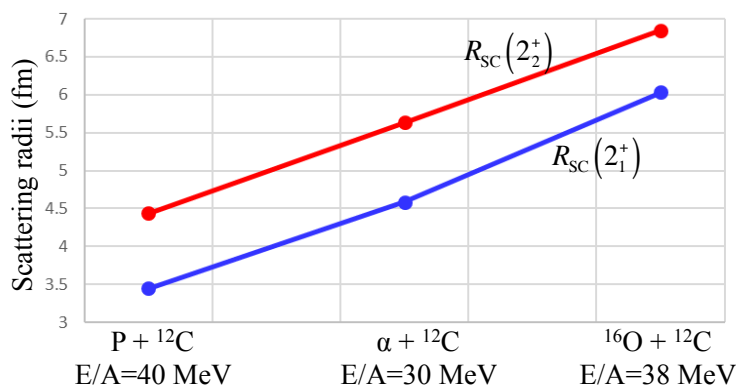


図 1: 核子あたり 40 MeV 付近における陽子、 α 、 ^{16}O の非弾性散乱における 2_1^+ 状態と 2_2^+ 状態の散乱半径 [8]。

伊藤誠らの計算によると、 $\Delta L = 0$ の遷移であるホイル状態への非弾性散乱に比べ、 $\Delta L = 2$ の遷移である 2_2^+ 状態への非弾性散乱は、励起状態の半径が散乱微断面積の回折パターンに影響を与えやすい。特に、核子あたり 50 MeV 程度の比較的低い反応エネルギーにおいて回折パターンが大きく変化すると期待される。伊藤誠らは、通常の半径を持つと考えられている 2_1^+ 状態と 2_2^+ 状態の散乱微断面積の系統的計算を行い、その回折パターンから直接導出可能な散乱半径 R_{sc} の比較を行った。図 1 に、核子あたり 40 MeV 付近における陽子、 α 、 ^{16}O の非弾性散乱における 2_1^+ 状

態と 2_2^+ 状態の散乱半径の比較を示す。いずれの反応チャンネルにおいても 2_2^+ 状態に対して 1 fm 程度の散乱半径の増大が生じており、 2_1^+ 状態と 2_2^+ 状態間の実半径の違いが、散乱半径に反映されていることが見て取れる。散乱半径は、 2_1^+ 状態、 2_2^+ 状態ともにプロブの質量数が減少するにつれて系統的に減少しており、半径増大に伴う散乱半径の変化量と絶対値の比を比較すると、散乱半径の変化を調べるには陽子非弾性散乱がもっとも適していると考えられる。

図 2 に、陽子非弾性散乱における 2_1^+ 状態と 2_2^+ 状態の間での散乱半径の変化量 ΔR_{sc} をビームエネルギーの関数として示す。 ΔR_{sc} は、 $E_p = 40\text{--}65$ MeV の間でほぼ一定の値となる一方で、 $E_p < 40$ MeV では緩やかに減少している。そこで、本研究では大阪大学核物理研究センター (RCNP) において豊富な加速実績があり、高品質のビームが供給される $E_p = 53$ MeV 陽子ビームを用いて ^{12}C を標的とした非弾性散乱の微分断面積を測定し、 2_1^+ 状態と 2_2^+ 状態の散乱半径を比較することで、半径が増大していると考えられている 2_2^+ 状態の半径についての知見を得ることを目指す。

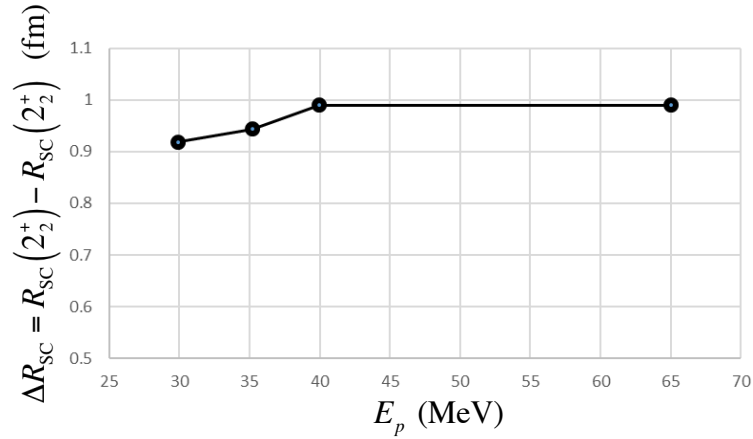


図 2: 陽子非弾性散乱における 2_1^+ 状態と 2_2^+ 状態の間での散乱半径の変化量 [8]。

2 Experimental Procedure

2.1 Experimental Setup

測定は RCNP の W 実験室において、高分解能磁気スペクトロメータ RAIDEN[9] を使用して行う。図 3 に RAIDEN スペクトロメータの概略図を示す。AVF サイクロトロンから供給される $E_p = 53$ MeV の陽子ビームは RAIDEN スペクトロメータの散乱槽に輸送され、 ^{12}C 標的に照射されるのちに、散乱槽ファラデーカップによって停止される。散乱された陽子は磁気分析されたのちに、RAIDEN スペクトロメータの焦点面で検出される。焦点面には、トリガー信号を生成する 2 枚のプラスチックシンチレータと電荷分割法によって粒子位置を測定する Single-wire drift chamber (SWDC) を設置する。

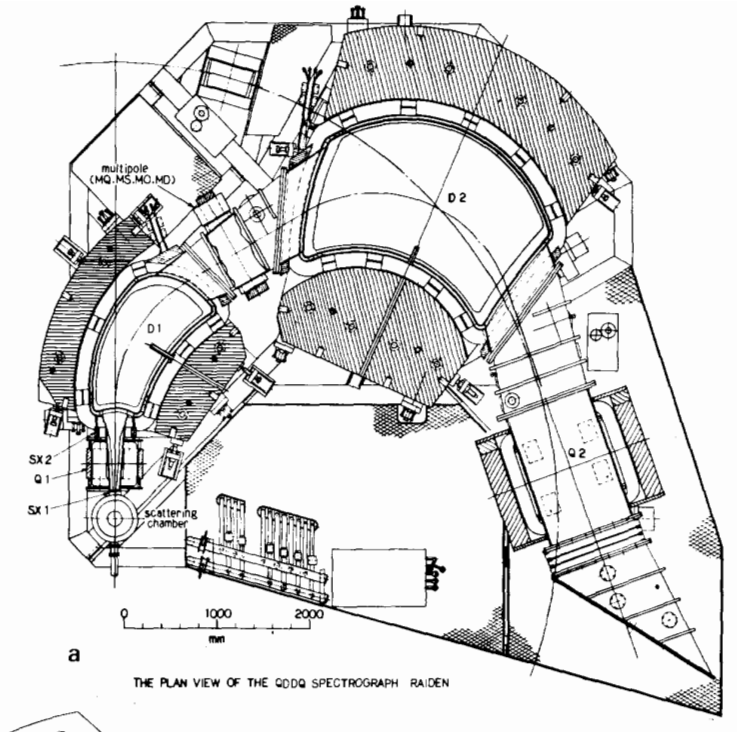


図 3: RAIDEN スペクトロメータの概略図 [9]。

3 Beam Time Estimation

本研究では、 2_1^+ 状態 ($E_x = 4.44$ MeV) と 2_2^+ 状態 ($E_x = 9.84$ MeV) を励起する陽子非弾性散乱の微分断面積のほかに、ホイル状態に対する微分断面積と、歪曲波ボルン近似計算に用いる歪曲ポテンシャルと有効相互作用を決定するための陽子弾性散乱の微分断面積を測定する。

ここでは、必要なビームタイムを評価するために、それぞれの反応に対して期待される微分反応断面積を Linear Expansion Approximation (LEA) [10] によって計算した。このとき、 ^{12}C の波動関数は上村による $3\alpha\text{RGM}$ 計算 [11] の結果を利用し、核子間の有効相互作用には Franey と Love による相互作用 [12] を用いた。計算結果を図 4 に示す。

図 4(c)(d) に示した 2_1^+ 状態と 2_2^+ 状態を励起する陽子非弾性散乱の微分断面積の角度分布をみると、たしかに、二つの状態の間で散乱微分断面積の回折パターンに変化が現れていることがわかる。本研究では、この回折パターンの変化を明らかにするために $\theta = 20\text{--}70^\circ$ において RAIDEN スペクトロメータの設置角度を 6° ずつ変化させながら測定を行う。

厚さ 2.0 mg/cm^2 の炭素標的を使用し、RAIDEN スペクトロメータの角度アクセプタンスを 10 msr 、ビームの最大強度を 10 nA と仮定すると、必要な統計を取得するのに要する時間は表 1 のとおりとなる。ただし、 2_2^+ 状態は自然幅が大きく、 $E_x = 8\text{--}12\text{ MeV}$ の領域に連続的に分布すると考えられるため、 250 keV ごとに 16 分割して解析することにして、必要な統計を他の状態の 16 倍として見積もった。

RAIDEN スペクトロメータの運動量アクセプタンスは約 6% であるので、 53 MeV の陽子ビームを用いた陽子非弾性散乱における励起エネルギーアクセプタンスは約 6 MeV である。ゆえに、基底状態から 2_2^+ 状態までのすべての状態を同時に測定することはできない。本研究では、基底状態、

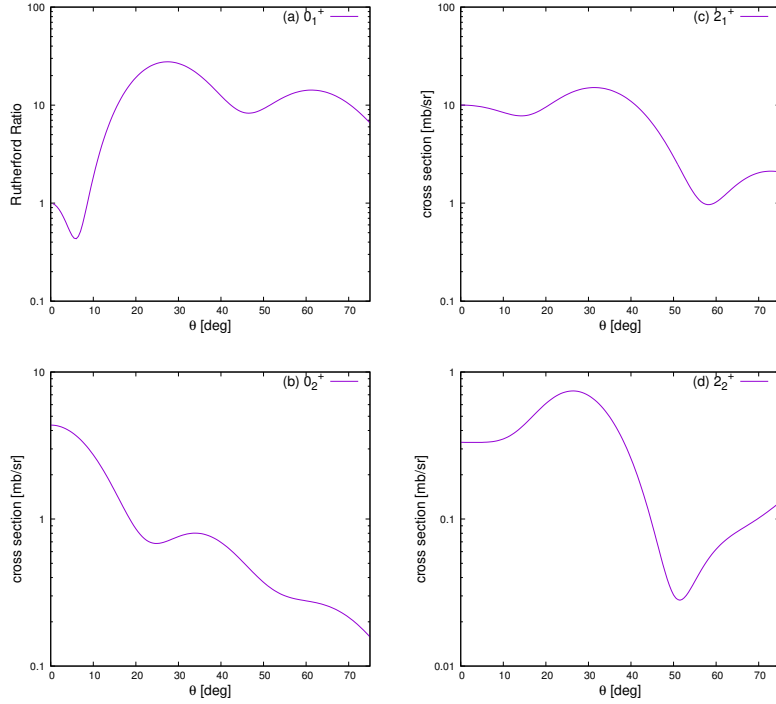


図 4: Linear expansion approximation [10] による陽子非弾性散乱の微分断面積の計算結果

$2_1^+ + 0_2^+$ 状態、 2_2^+ 状態の 3 つのグループに分けて、RAIDEN スペクトロメータの磁場を変更しつつ、それぞれの角度で 3 回ずつの測定を行うとすると、測定には合計で約 450 分間を必要とする。

RAIDEN スペクトロメータの磁場設定や設置角度を変更するのに 10 分間を要すると仮定すると、10 角度 \times 3 回の条件変更を行うために 300 分間が必要となる。これらの時間を考慮すると、物理測定には 12.5 時間が必要である。

また、実験開始時の検出器立ち上げには、8 時間程度を要すると予想されるので、本研究では、合計して 24 時間のビームタイムを要求する。

参考文献

- [1] A. Tohsaki, H. Horiuchi, P. Schuck, and G. Röpke, Phys. Rev. Lett. **87**, 192501 (2001).
- [2] T. Yamada and P. Schuck, Eur. Phys. J. A **26**, 185 (2005).
- [3] M. Takashina and Y. Sakuragi, Phys. Rev C **74**, 054606 (2006).
- [4] M. Takashina, Phys. Rev. C **78**, 014602 (2008).
- [5] S. Ohkubo and Y. Hirabayashi, Phys. Rev C **70**, 041602 (2004).
- [6] A. N. Danilov, T. L. Belyaeva, A. S. Demyanova, S. A. Goncharov, and A. A. Ogloblin, Phys. Rev. C **80**, 054603 (2009).
- [7] M. Ito, M. Iwasaki, R. Otani, and M. Tomita, EPJ Web of Conf. **122**, 06004 (2016).

- [8] M. Ito (private communication).
- [9] H. Ikegami, S. Morinobu, I. Katayama, M. Fujiwara, and S. Yamabe, Nucl. Instrum. Methods **175** 335–356 (1980).
- [10] J. J. Kelly, program LEA (private communication).
- [11] M. Kamimura, Nucl. Phys. **A351**, 456–480 (1981).
- [12] M.A. Franey and W.G. Love, Phys. Rev. C **31**, 488 (1985).
- [13] Alain Coc *et al.*, Phys.Rev. D **87**, 123530 (2013).
- [14] E. Komatsu *et al.*, Astrophys. J. Supple. **192**, 18 (2011).
- [15] M. Yosoi, Doctor Thesis, Kyoto University (2003).
- [16] C. H. King, Sam M. Austin, H. H. Rossner, and W. S. Chien, Phys. Rev. C **16**, 1712 (1977).

状態	角度 [deg]	断面積 [mb/sr]	ビーム強度 [nA]	取得個数	測定時間 [s]
0_1^+	15	6.83E+02	1	15000	4
	21	4.50E+02	1	15000	5
	27	2.25E+02	1	15000	11
	33	8.86E+01	1	15000	27
	39	2.84E+01	1	10000	56
	45	9.91E+00	1	5000	81
	51	6.57E+00	1	5000	122
	57	5.84E+00	1	5000	137
	63	4.38E+00	1	5000	183
0_2^+	69	2.55E+00	1	5000	313
	15	1.64E+00	5	10000	195
	21	8.34E-01	5	10000	384
	27	7.06E-01	5	10000	453
	33	7.90E-01	5	10000	405
	39	7.25E-01	5	10000	441
	45	5.27E-01	10	10000	304
	51	3.61E-01	10	10000	444
	57	2.92E-01	10	10000	549
2_1^+	63	2.67E-01	10	10000	599
	69	2.26E-01	10	10000	708
	15	7.93E+00	1	10000	202
	21	1.01E+01	1	10000	159
	27	1.37E+01	1	10000	116
	33	1.48E+01	1	10000	108
	39	1.19E+01	1	10000	135
	45	6.78E+00	2	10000	118
	51	2.70E+00	2	10000	296
2_2^+	57	1.09E+00	2	10000	733
	63	1.30E+00	2	10000	615
	69	1.93E+00	2	10000	415
	15	4.39E-01	10	30000	1092
	21	6.32E-01	10	30000	760
	27	7.32E-01	10	30000	656
	33	5.90E-01	10	30000	813
	39	3.17E-01	10	30000	1515
	45	1.04E-01	10	10000	1538
51	3.22E-02	10	10000	4971	
57	4.64E-02	10	10000	3447	
63	7.36E-02	10	10000	2173	
69	9.65E-02	10	10000	1657	

表 1: 理論計算に基づく測定時間の評価