

α 弾性散乱の微分断面積

京都大学理学部 P4

上村拓也

大畑成史

高三和晃

西宮大輔

橋本雄馬

松野秀昭

森田皓之

平成 26 年 3 月 31 日

目次

第1章 序論	2
第2章 実験	5
2.1 全体のセットアップ	5
2.2 α ビーム	6
2.3 ターゲット	6
2.4 ファラデーカップ	7
2.5 検出器	7
2.6 回路のセットアップ	8
第3章 解析	9
3.1 微分断面積の計算	9
3.1.1 粒子の特定	10
3.1.2 弾性散乱	12
3.1.3 微分断面積の結果	12
3.1.4 光学ポテンシャルの計算	15
第4章 考察・まとめ	24

第1章 序論

遷移強度は原子核において二つの状態間の遷移確率の大きさを表す物理量である。 α 非弾性散乱の微分断面積は原子核の遷移強度と良い比例関係にあると考えられており、遷移強度を測定するために α 非弾性散乱は広く用いられてきた実験手法である。例えば、D.T.KhoaらはDWBA計算及びcoupled channel計算を行い、 α 非弾性散乱の微分断面積から ^{12}C の遷移強度を決定することを試みた。その結果、 2_1^+ 状態(44.4 MeV)の遷移強度は電磁遷移によって決定された遷移強度と一致する一方、Hoyle stateと呼ばれる 0_2^+ 状態(7.65 MeV)の遷移強度は電子散乱によって決定された値よりも数倍小さい値となった。Khoaらは遷移ポテンシャルの虚部を2.5-3.4倍大きくすれば、 α 非弾性散乱から求めた遷移強度と電磁遷移がほぼ一致することを見出し、これはHoyle状態が空間的に発達した 3α クラスター状態であり、 3α 崩壊チャンネルとの結合が大きいことから説明できると指摘した。([2])すなわち、Khoaらは α 非弾性散乱における遷移強度の過小評価の問題はHoyle状態の特異的な構造にあると主張している。

昨年、T.Kadoyaらは、大阪大学核物理研究センター(RCNP)においてE369実験を実施した。この実験では、 $E_\alpha = 130$ MeVに加速した α ビームを用いて、 ^{12}C , ^{16}O , ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{58}Ni を標的とした α 非弾性散乱における微分断面積を系統的に測定し、これらの原子核の離散状態に対するアイソスカラー自然パリティ遷移強度の抽出を試みた。その暫定的な解析結果によると、 $\Delta J^\pi = 2^+$ 遷移の遷移強度は、電磁遷移によって決定された遷移強度とほぼ一致する一方で、 $\Delta J^\pi = 0^+$ 遷移の遷移強度は、

電磁遷移によって決定された遷移強度に比べ系統的に過小評価されることが示唆されている。すなわち、Khoa らが観測した Hoyle 状態の遷移強度に対する α 非弾性散乱と電磁遷移の間の矛盾は、Hoyle 状態の構造の特異性に起因するものではなく、あらゆる $\Delta J = 0^+$ 遷移において普遍的に観測される現象である可能性がある。Kadoya らの研究では、DWVA 計算を用いて α 非弾性散乱の微分断面積から遷移強度を決定した。DWBA 計算における歪曲ポテンシャルは、弾性散乱の光学ポテンシャルを用いることとし、弾性散乱の光学ポテンシャル $U(r)$ と非弾性散乱の遷移ポテンシャル $\delta U_\lambda(r)$ はそれぞれ、Single folding model に基づいて、基底状態の密度分布と一粒子遷移密度を αN 相互作用で畳み込むことによって得られた。このとき有効相互作用には、密度依存性のあるガウス型有効相互作用を用いた。有効相互作用の密度依存性は、Single folding model の処方によって弾性散乱を解析する際に、後方角度での微分断面積を再現するために必要だと指摘されており、 α 非弾性散乱の解析には慣習的に $\beta = -1.9$ が用いられている。そこで、Kadoya らは $\beta = -1.9$ に固定して解析を行い、その他の相互作用のパラメータ V, W, α_V, α_W については、過去の電子散乱の実験で得られた基底状態の密度分布を αN 有効相互作用で畳み込んだ光学ポテンシャルが、弾性散乱の微分断面積を再現するように決定した。また、これと比較するために、密度依存性を無視し、 $\beta = 0$ に固定した場合の解析も行った。二つの相互作用の計算は、実験データが存在する前方角度ではほぼ同じ結果を与え、どちらも実験データを良く再現しているが、実験データの存在しない後方角度では、大きく食い違った結果を与えている。この問題は、重イオン弾性散乱における”deep or shallow problem”として知られており、前方角度における微分断面積から光学ポテンシャルを決定しようとする、浅いポテンシャルと深いポテンシャルの二つの解が得られてしまうという不定性が存在する。これは Kadoya らの解析において深刻な問題であった。後方角度に

ついでの実験データを補うことができれば、不定性を取り除くことができる。本研究では、Kadoya らの E369 実験においてビームタイムの制約から測定できなかった後方角度における弾性散乱の微分断面積を測定し、Kadoya らの解析において深刻な問題となっている有効相互作用について不定性を取り除くことを目的とする。

第2章 実験

実験は準備も含め7月5-9日に大阪大学核物理研究センター(RCNP)の東実験室 ENN コースにおいて130 MeVの α ビームを用いて行った。

2.1 全体のセットアップ

散乱槽の全体像を図2.1に示す。AVFサイクロトロンで加速された α 粒子が散乱槽の中心に設置されたターゲットによって散乱される。散乱された粒子は検出器によって捕獲された検出器で落としたエネルギーと時間が測定される。ターゲットに散乱されずに通過した粒子はファラデーカップによって捕獲し、入射粒子数として数える。それぞれの詳細は以下の各節にて説明する。

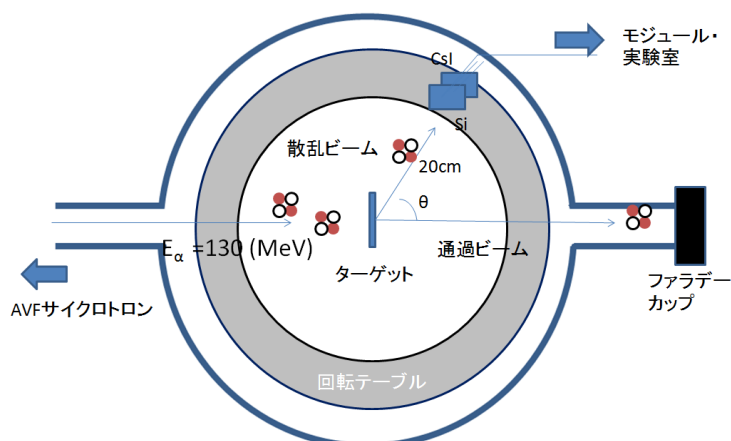


図 2.1: ENN コースの散乱槽

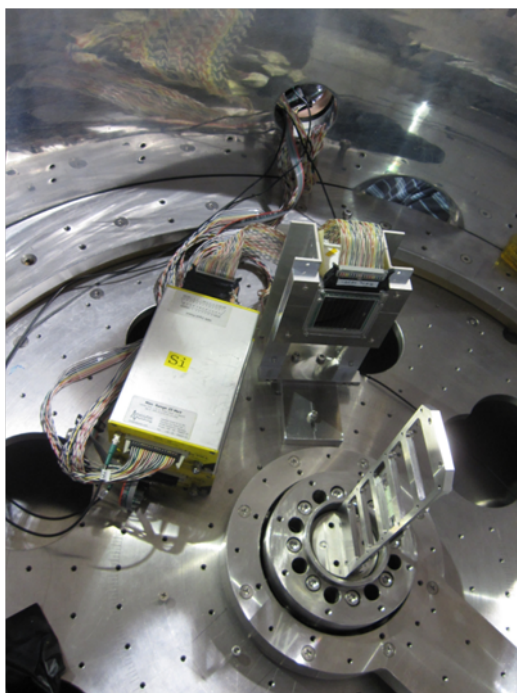


図 2.2: 散乱槽内部の様子

2.2 α ビーム

本実験では AVF サイクロトロンで加速された $E_\alpha = 130 \text{ MeV}$ の α ビームを使用した。ビームは 1–10nA の間で調整しながら照射した。

2.3 ターゲット

実験で使用した標的を表 2.1 に示す。散乱槽の中心部にターゲットとビームの標準器を設置した。 ^{16}O の微分断面積は SiO_2 と Si のヒストグラムの引き算によって決定した。

表 2.1: 実験に用いたターゲット

ターゲット	面密度 (mg/cm ²)
¹² C	2.2
SiO ₂	2.2
²⁴ Mg	1.2
<i>nat</i> Si	1.72
⁴⁰ Ca	1.63
⁵⁸ Ni	1.5

2.4 ファラデーカップ

ファラデーカップは散乱槽の下流側に設置され、入射ビームの電流を測定し、入射粒子の個数をカウントする。ファラデーカップで捕獲された電荷は散乱槽のある東実験室から地下共同溝に導かれ、カレントインテグレーターに測定される。カレントインテグレーターは設定した電荷量が捕獲されるごとに 1000 カウントのパルスが出力されるようにレンジを設定している。したがって、今回の入射粒子は α 粒子であるから、素電荷を e 、カレントインテグレーターのカウント数を C 、レンジを R とすると、入射粒子数 N_b は

$$N_b = \frac{RC \times 10^3}{e} \quad (2.1)$$

となる。

2.5 検出器

散乱された粒子を検出するためにシリコンストリップ検出器と CsI 検出器 4 台を重ねた検出器を使用する。検出器はターゲットから 20 cm 離れた場所に設置し、検出器の設置角度は遠隔操作によって自由に変えることができる。シリコンストリップ検出器は 50 mm×50 mm の有感領域

をもち、0.5 mm の厚さである。シリコンストリップ検出器は水平方向に10分割されており、1ストリップあたり $25 \text{ mr} \times 250 \text{ mr} = 6.25 \text{ mSr}$ の立体角をカバーしており、一回の測定で検出器がカバーできる水平角度は 14.3° である。CsI 検出器は $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ である。

2.6 回路のセットアップ

回路は図 2.3 のように組んだ。Si 検出器と CsI 検出器が同時にヒットしたイベントだけを取得するようにゲートを作っている。

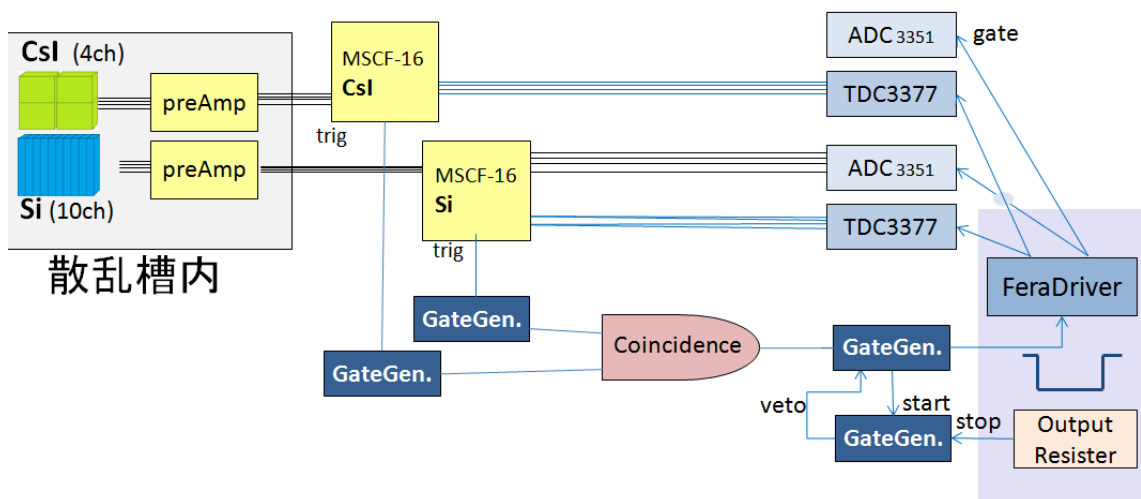


図 2.3: 回路のセットアップ

第3章 解析

今回の解析の目標は α 弾性散乱の後方散乱のデータを取得し、光学ポテンシャルの不定性をなくすことである。微分断面積を求めるための解析では、シリコンストリップ検出器で測定されたエネルギーを縦軸、シリコンストリップ検出器とCsI検出器で測定されたエネルギーの和を横軸にとったヒストグラムを作成する。ヒストグラムからベータブロッホの式によって α 粒子のイベントだけを抽出する。さらに、 α 弾性散乱のピークのみを数える。これによって、散乱粒子数が求まる。ファラデーカップで数えた入射粒子数、立体角、ターゲット密度とあわせて、実験室系での微分断面積を求める。さらに、実験室系から重心系への変換を行う。後方角度での微分断面積を再現するようにECIS95コードを用いて光学ポテンシャルを決定する。

3.1 微分断面積の計算

実験室系の微分断面積は以下の式によって決定した。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{N_e}{d\Omega N_b N_t} \quad (3.1)$$

θ はシリコンストリップ検出器の各ストリップの中心の水平角度、 $d\Omega$ は各ストリップの立体角、 N_b は弾性散乱の散乱粒子数、 N_b は入射粒子の個数、 N_t は標的の単位体積あたりの粒子数である。実験室系から重心系

への変換は、変換式

$$\left[\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_{cm}) \right]_{cm} = g(\theta_{lab}) \left[\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_{lab}) \right]_{lab} \quad (3.2)$$

によって、変換する。 $g(\theta_{lab})$ は重心系へ変換するための係数である。

3.1.1 粒子の特定

シリコンストリップ検出器で落としたエネルギーとシリコンストリップ検出器と CsI 検出器で落としたエネルギーの二次元ヒストグラムは図 3.1 となる。この時、なめらかな曲線が 2 本観測されたが、下側に位置するものが ${}^3\text{He}$ 、上側に位置するものが ${}^4\text{He}$ (α 粒子) である。ベーテブロッホの式において、単位長さで落とすエネルギーは $\frac{Z^2}{\beta^2}$ に比例する。今、 α 粒子の全エネルギーは $\Delta E = \frac{1}{2}m\beta^2c^2$ としているので、2 本の曲線として粒子が分離される。ベーテブロッホの式から得られる曲線によって α 粒子の曲線をフィッティングして近似曲線を決定する。二次元ヒストグラムから近似曲線を引き、y 軸に射影すると、図 3.2 にのような図が得られる。0 付近に α 粒子の高いピークがみられ、このピークをガウスシアンでフィッティングする。フィッティングによって得られたガウスシアン の σ を使い、近似曲線から 2σ の範囲のみを取り出す。

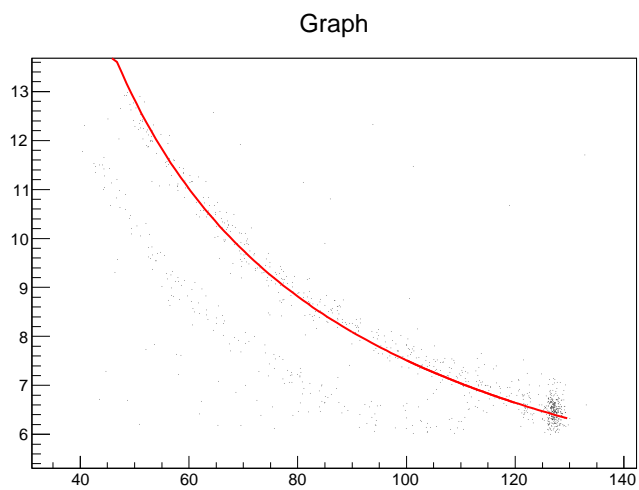


図 3.1: 落とした全エネルギーとシリコンストリップ検出器で落としたエネルギー

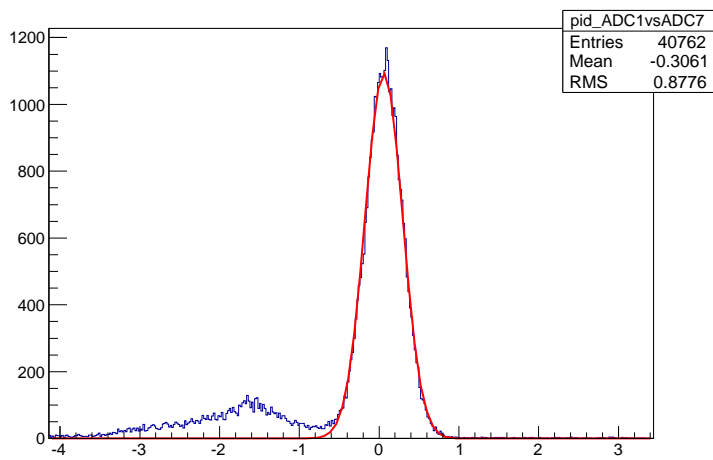


図 3.2: 近似曲線を引き、y 軸に射影したもの。0 付近をガウシアンでフィッティングしている。

3.1.2 弾性散乱

2σ の範囲のみを抽出し、x 軸に射影すると、図 3.3 のように、 α 粒子の弾性散乱のピーク及び非弾性散乱のピークが見られる。たいていの場合、分解能の関係で、弾性散乱と非弾性散乱のピークは重なっているが、2つのガウシアンを重ねあわせとしてフィッティングすることによって、非弾性散乱のピークを減算し、弾性散乱の自称数を求める。O の場合のみ、 SiO_2 のヒストグラムから Si のヒストグラムを規格化してから減算をすることで、O のみのヒストグラムを作成している。

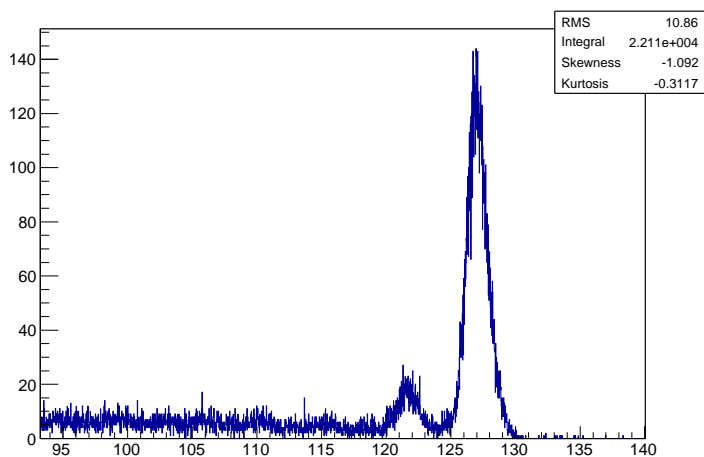


図 3.3: 2σ の範囲のみ x 軸に射影したもの

3.1.3 微分断面積の結果

式 3.1 及び式 3.2 を用いて、求められた各標的核の弾性散乱の微分断面積の角度分布を図 3.4–3.7 に示す。我々のデータは Kadoya のデータよりも系統的に 1.3–1.8 倍程度小さかったため、定数倍を乗じることによって、連続的な角度分布になるようにした。また、弾性散乱の微分断面積の実

驗値は付録に掲載する。 ^{58}Ni については弾性散乱と非弾性散乱を精度よく分離することができなかつたため、データは得られていない。

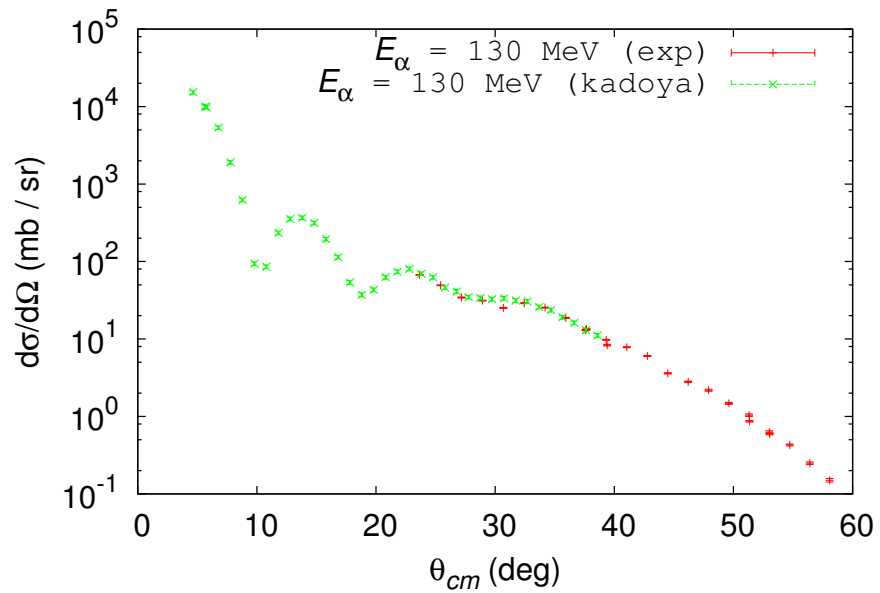


図 3.4: O の微分断面積

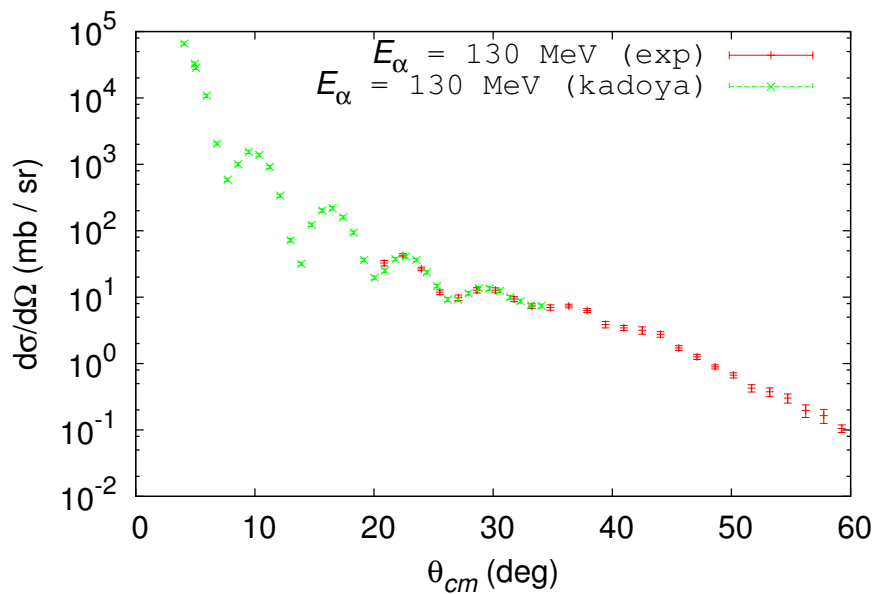


図 3.5: Ca の微分断面積

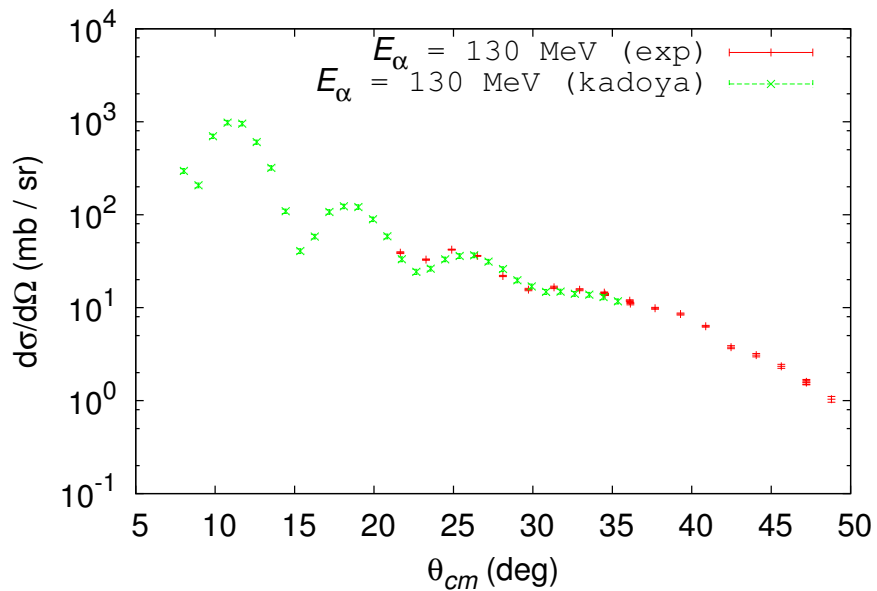


図 3.6: Si の微分断面積

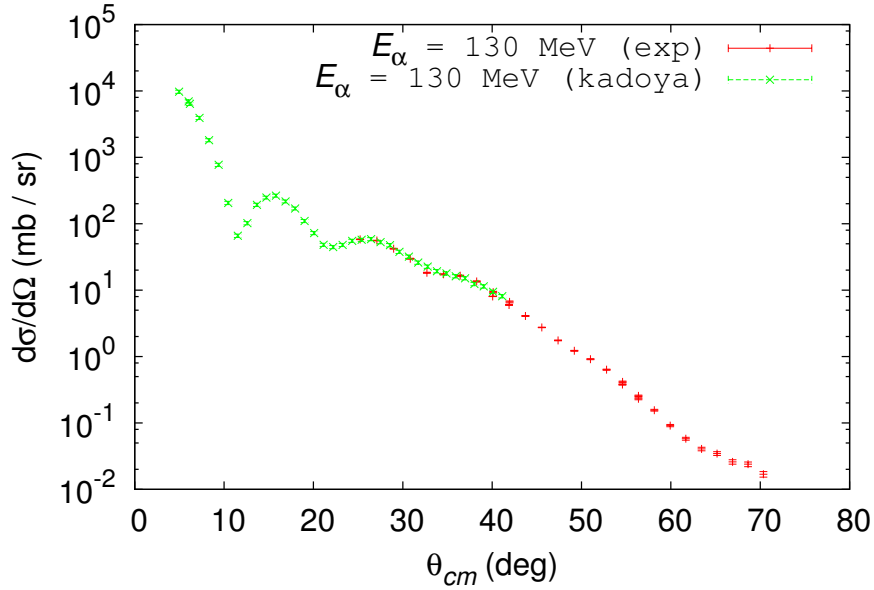


図 3.7: C の微分断面積

3.1.4 光学ポテンシャルの計算

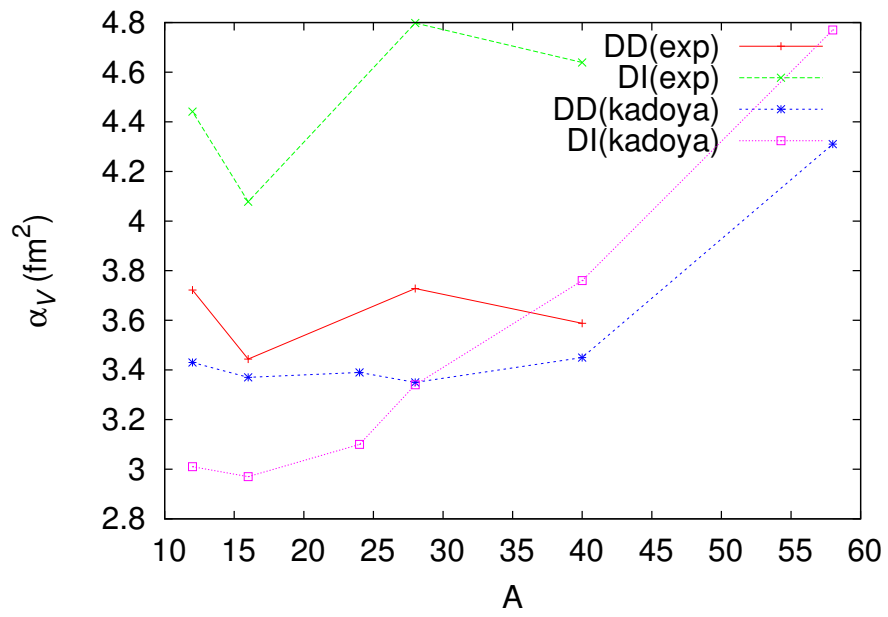
実験で与えられた弾性散乱の微分断面積を再現する光学ポテンシャルを与えるように α -N 相互作用を決定する。Kadoya 修士論文に従い、 α -N 相互作用 $V(|r - r'|, \rho_0(r'))$ を、

$$V(|r - r'|, \rho_0(r')) = -V(1 + \beta\rho_0^{2/3})e^{-|r-r'|^2/\alpha_V} - iW(1 + \beta\rho_0^{2/3})e^{-|r-r'|^2/\alpha_W} \quad (3.3)$$

とする。 α_V, α_W はそれぞれ実部、虚部のポテンシャルの半径の二乗を表す。 V, W はそれぞれ実部、虚部のポテンシャルの深さを表す。 β は密度依存性の程度を表す。今回の実験で得られた弾性散乱のデータを再現するように、核標的核について相互作用に密度依存性がある場合 ($\beta = -1.9$)、密度依存性がない場合 ($\beta = 0$) の二つの場合のパラメータを求めた。 β の値は Kadoya 修士論文と同じ値である。便宜上、密度依存性のある場合の

パラメータ群を DD (density-dependence), 密度依存性のない場合のパラメータ群を DI (density-independence) と名付ける。決定された DD,DI のパラメータを表 3.1.4 に光学ポテンシャルを図 3.12–3.15 に、再度計算された微分断面積を図 3.16–3.19 に Kadoya のデータとともに載せる。

標的核	α_V (fm ²)	α_W (fm ²)	β (fm ²)	V (MeV)	W (MeV)
¹² C	3.72	7.90	-1.9	47.4	5.81
¹⁶ O	3.44	9.45	-1.9	52.0	4.30
²⁸ Si	3.73	6.91	-1.9	48.9	7.34
⁴⁰ Ca	3.59	6.54	-1.9	50.7	8.01
¹² C	4.44	9.02	0.0	21.7	2.83
¹⁶ O	4.08	9.76	0.0	25.5	2.54
²⁸ Si	4.80	8.93	0.0	19.1	2.74
⁴⁰ Ca	4.64	8.75	0.0	19.7	2.77



☒ 3.8: α_V

[H]

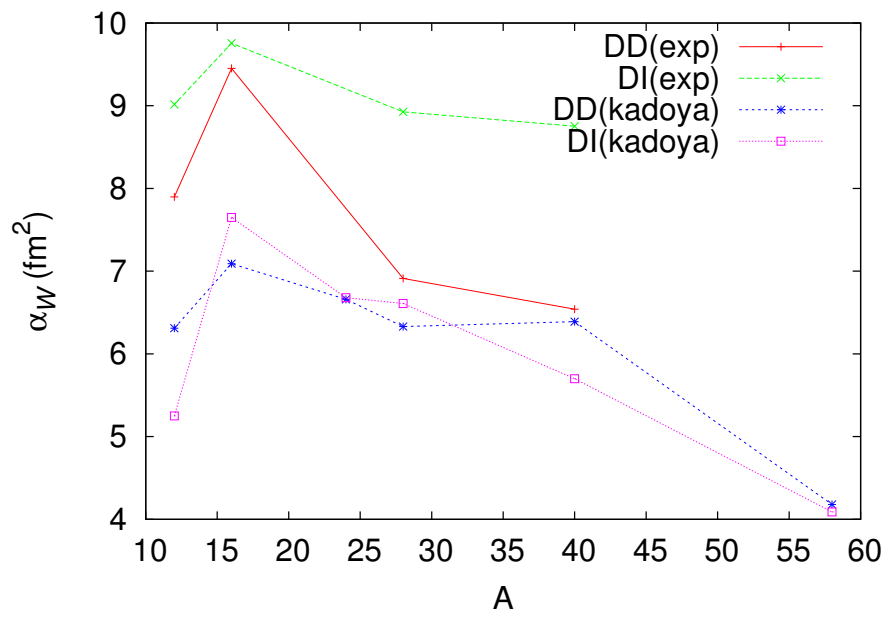


图 3.9: α_W

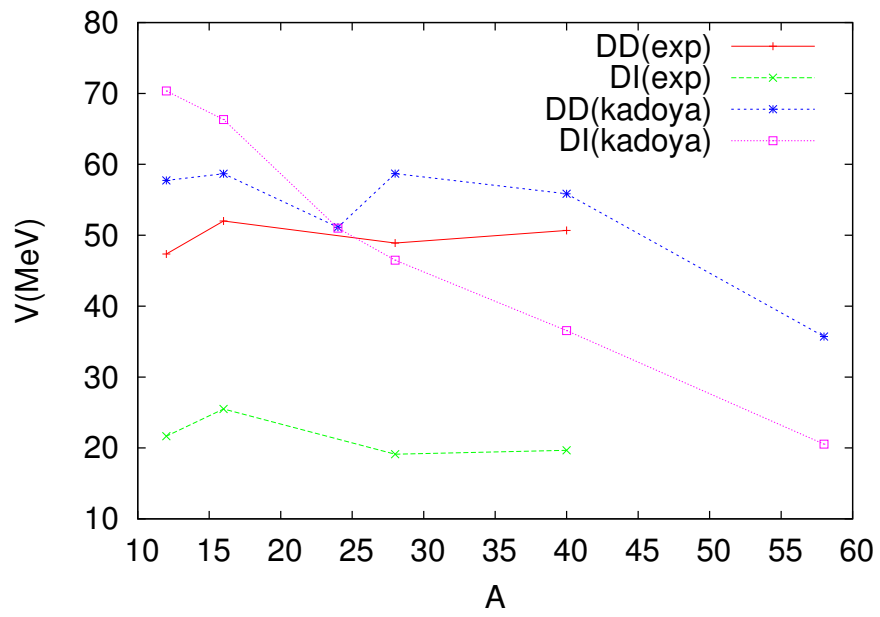


図 3.10: V

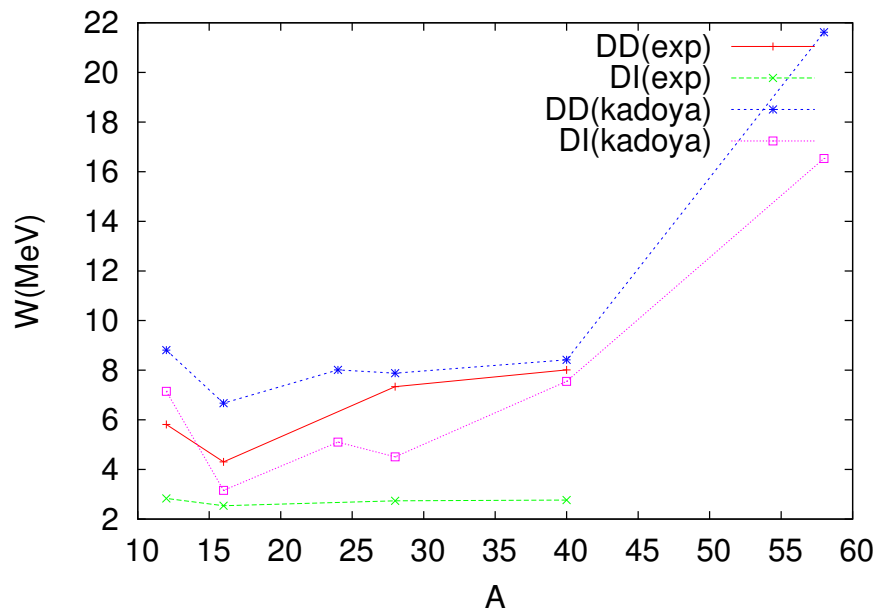


図 3.11: W

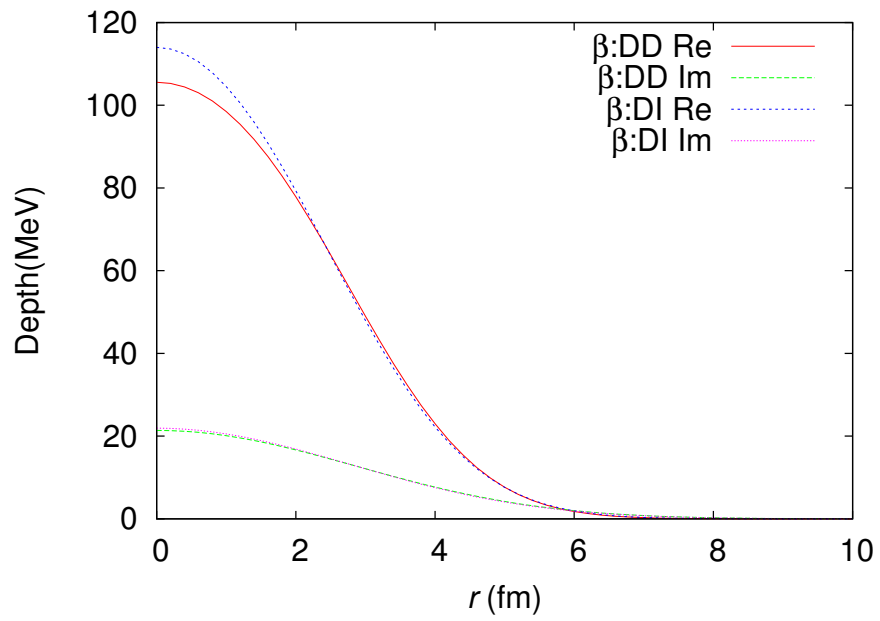


図 3.12: O の光学ポテンシャル

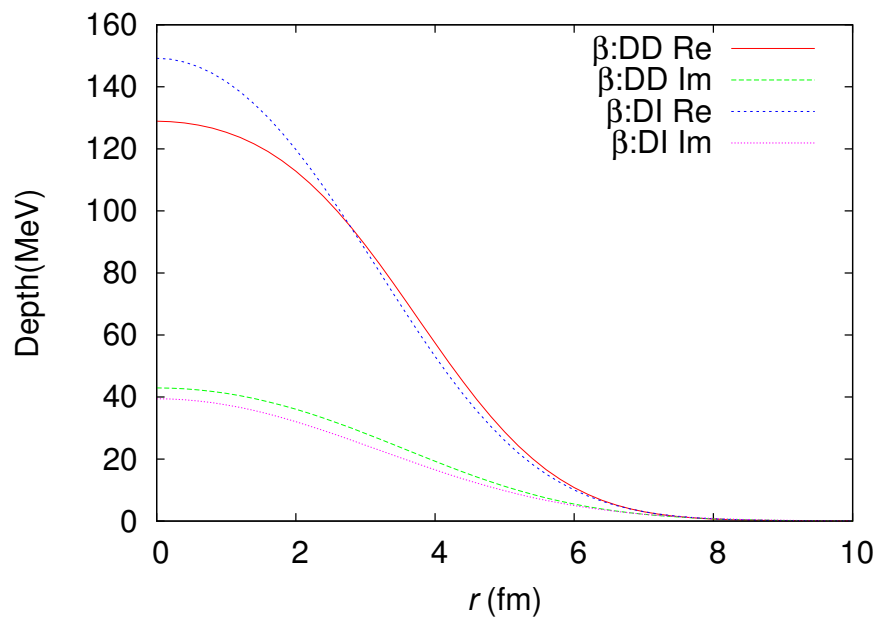


図 3.13: Ca の光学ポテンシャル

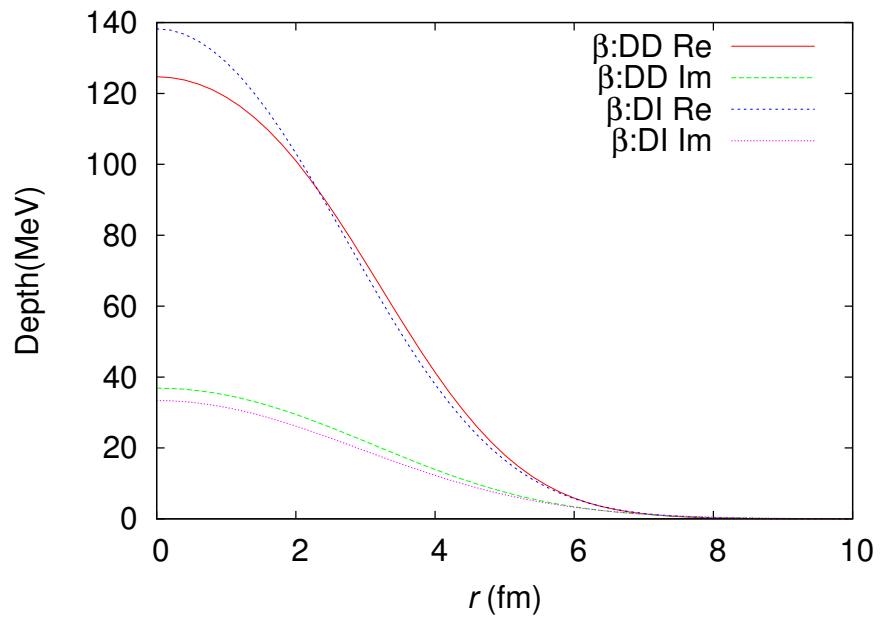


図 3.14: Si の光学ポテンシャル

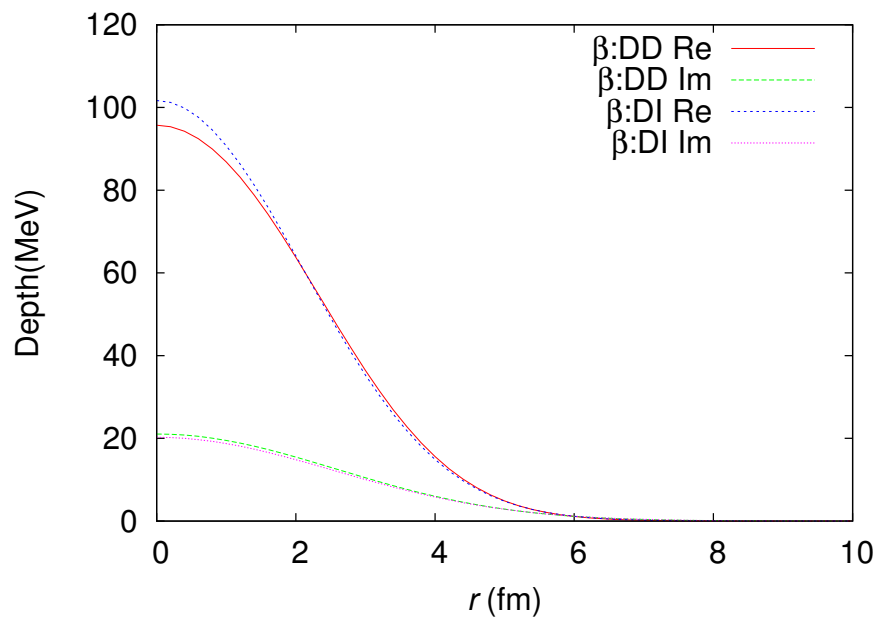


図 3.15: C の光学ポテンシャル

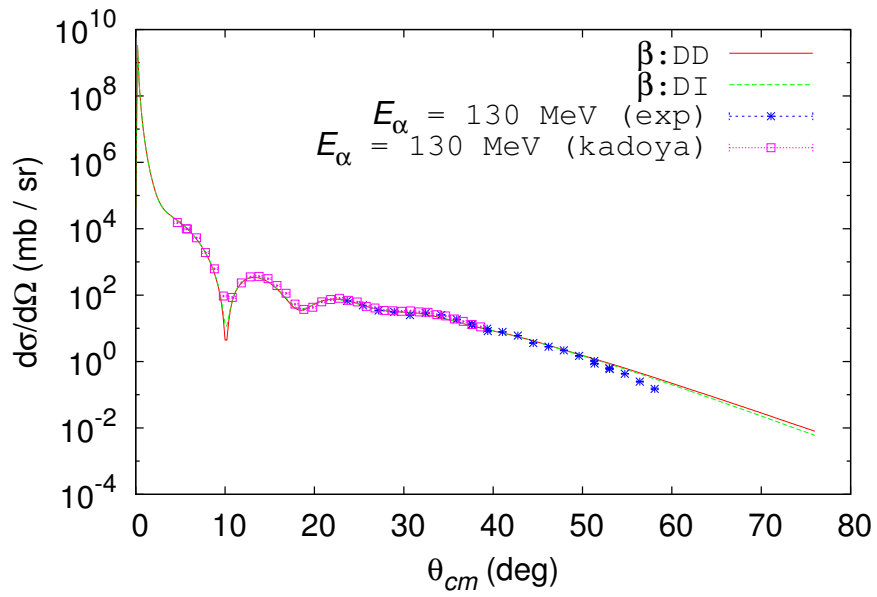


図 3.16: 再計算された O の微分断面積

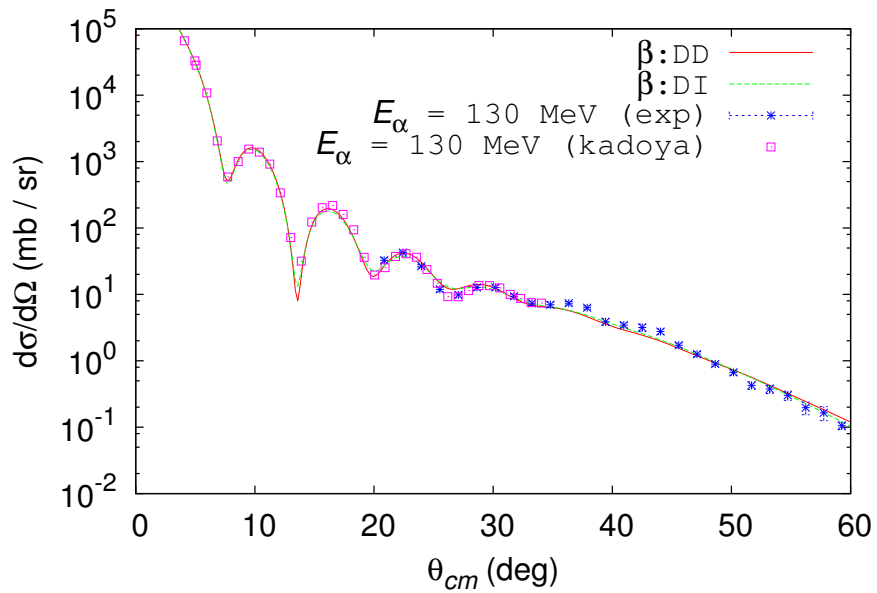


図 3.17: 再計算された Ca の微分断面積

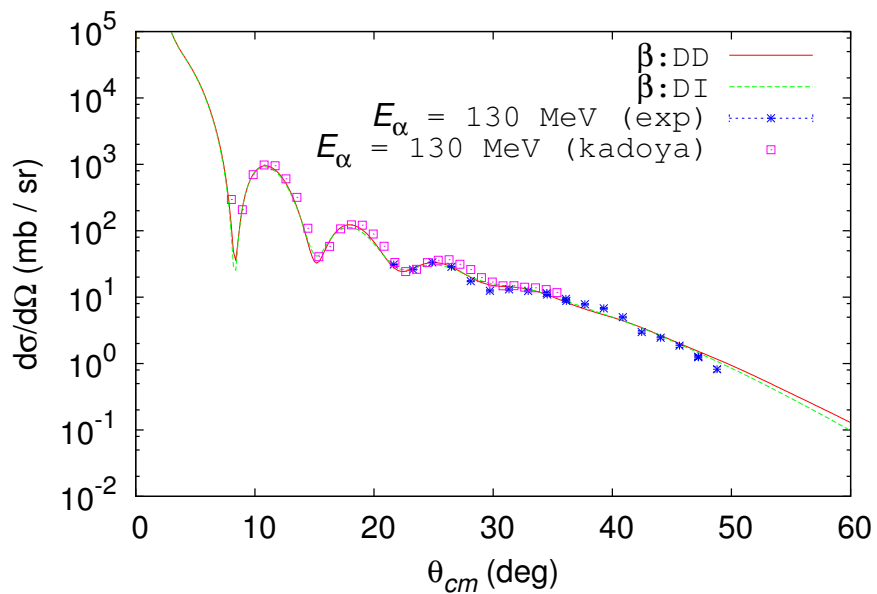


図 3.18: 再計算された Si の微分断面積

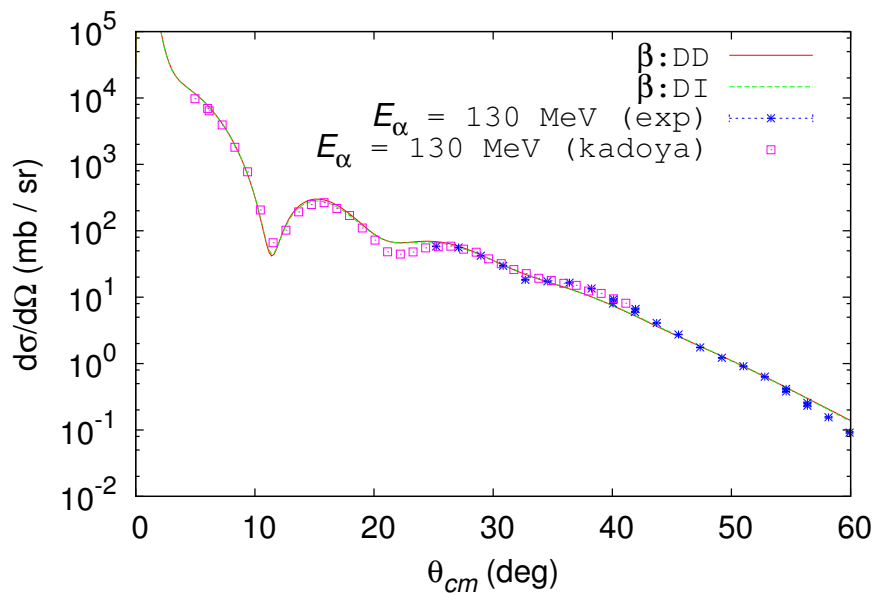


図 3.19: 再計算された C の微分断面積

第4章 考察・まとめ

解析の結果から、光学ポテンシャルを決定する α -N 相互作用のパラメータを決定することができた。パラメータ α_V, α_W で大きな値が得られた一方で、 V, W は Kadoya の値よりも小さな値が得られたている。質量数によるパラメータの変化の仕方には虚部については Kadoya の結果と共通する部分があるが、実部については異なった傾向がでている。しかし、Kadoya の解析において前方角度でしか解析できなかったため、正しいパラメータを得られているとは限らない。我々のデータを補填して、解析を行うと、密度依存性がある場合もない場合も同程度の深さのポテンシャルが得られたことから、”deep or shallow problem ”は回避できたように思われる。したがって、今回のデータを用いることで、より精度よく非弾性散乱の微分断面積のデータを得ることができるだろう。

関連図書

- [1] T. Kadoya, Master Thesis, Kyoto University (2013).
- [2] Dao T. Khoa and Do Cong Cuong, Phys. Lett. B 660, 331 (2008).
- [3] G. R. Satchler and Dao T. Khoa, Phys. Rev. C 55, 285 (1997).

謝辞

実験のイロハも知らない我々に丁寧かつ適度な厳しさをもって、指導してくださった川畑先生、実験中のあらゆる場面でサポートしてくださったTAの足立さん、村田さんには大変お世話になりました。理論面では延与先生にご指導いただき原子核についての理論背景を深めることができました。また、原ハドの津村さんにも実験のサポートしていただきました。大阪大学核物理研究センターの皆様にも我々の実験のために施設の使用等色々なことでお世話になりました。ご協力頂いた方々に感謝いたします。

付録・ α 弾性散乱の微分断面積の 実験値

表 4.1: $^{12}\text{C}(\alpha,\alpha)$ 反応

θ_{cm} (deg)	$d\sigma/d\Omega$ (mb/sr)	error (mb/sr)
25.2	58.3	0.629
27.1	55.8	0.617
29.0	42.1	0.537
30.8	29.7	0.453
32.7	18.3	0.356
34.6	17.3	0.348
36.4	16.5	0.340
38.3	13.5	0.309
40.1	9.32	0.258
41.9	6.66	0.218
40.1	8.05	0.0459
41.9	5.98	0.0397
43.7	4.08	0.0329
45.6	2.74	0.0271
47.4	1.75	0.0217
49.2	1.22	0.0182
51.0	0.911	0.0158
52.8	0.634	0.0133
54.6	0.415	0.0108
56.4	0.232	0.00810
54.6	0.379	0.00731
56.4	0.256	0.00604
58.1	0.155	0.00473
59.9	0.0912	0.00364
61.7	0.0579	0.00292
63.4	0.0406	0.00246
65.2	0.0346	0.00228
66.9	0.0259	0.00199
68.6	0.0239	0.00192
70.3	0.0169	0.00162

表 4.2: $^{16}\text{O}(\alpha,\alpha)$ 反応

θ_{cm} (deg)	$d\sigma/d\Omega$ (mb/sr)	error (mb/sr)
23.7	67.2	0.654
25.4	49.3	0.516
27.2	34.4	0.513
28.9	31.4	0.415
30.7	25.2	0.336
32.4	29.0	0.410
34.2	25.4	0.328
35.9	18.7	0.301
37.7	13.4	0.317
39.4	8.32	0.189
37.6	13.0	0.154
39.3	9.77	0.125
41.0	7.83	0.097
42.8	6.04	0.079
44.5	3.60	0.069
46.2	2.80	0.062
47.9	2.18	0.064
49.6	1.48	0.042
51.3	1.04	0.038
53.0	0.627	0.026
51.3	0.867	0.02
53.0	0.596	0.016
54.7	0.429	0.012
56.4	0.249	0.01
58.1	0.150	0.008

表 4.3: $^{28}\text{Si}(\alpha,\alpha)$ 反応

θ_{cm} (deg)	$d\sigma/d\Omega$ (mb/sr)	error (mb/sr)
21.7	31.0	0.829
23.3	26.1	0.503
24.9	33.4	0.482
26.5	28.6	0.383
28.1	17.4	0.345
29.7	12.4	0.463
31.3	13.1	0.481
32.9	12.4	0.382
34.5	11.0	0.328
36.1	8.78	0.337
34.5	11.5	0.249
36.1	9.42	0.282
37.7	7.82	0.228
39.3	6.78	0.215
40.9	5.00	0.135
42.5	2.98	0.141
44.1	2.45	0.131
45.6	1.86	0.118
47.2	1.27	0.0949
48.8	0.822	0.0750
47.2	1.24	0.0884
48.8	0.929	0.0821
50.4	0.325	0.0500
51.9	0.333	0.0401
53.5	0.117	0.0219
55.1	0.178	0.0238
56.6	0.350	0.0181
58.2	0.276	0.0147
59.7	0.0582	0.0146
61.3	0.0312	0.00975

表 4.4: $^{40}\text{Ca}(\alpha,\alpha)$ 反応

θ_{cm} (deg)	$d\sigma/d\Omega$ (mb/sr)	error (mb/sr)
20.9	32.6	3.10
22.4	42.7	2.33
24.0	26.7	1.59
25.5	11.9	0.97
27.1	9.82	0.94
28.6	12.7	1.15
30.2	12.7	1.07
31.7	9.36	0.814
33.3	7.36	0.566
34.8	7.00	0.655
36.3	7.37	0.470
37.9	6.29	0.419
39.4	3.87	0.428
41.0	3.45	0.315
42.5	3.17	0.404
44.0	2.76	0.265
45.6	1.72	0.142
47.1	1.26	0.113
48.6	0.894	0.0648
50.2	0.669	0.0598
51.7	0.427	0.0535
53.2	0.376	0.0544
54.7	0.302	0.0480
56.2	0.197	0.0426
57.8	0.165	0.0392
59.3	0.105	0.0136