3MeV陽子ビームによる、金及びアルミニウムとの散乱実験

神戸大学M1　　杉本太郎
石飛由介
桑野将大
岡田健
吉田登志輝

Introduction

- タンデム加速器を用いて3MeV陽子ビームを金、アルミニウムに照射してその散乱を観測した
- 観測結果からターゲットごとの微分散乱断面積の角度分布を導いた
- 導いた微分散乱断面積の角度分布と理論曲線との比較と、アルミニウムの準安定状態(metastable)についての考察を行った

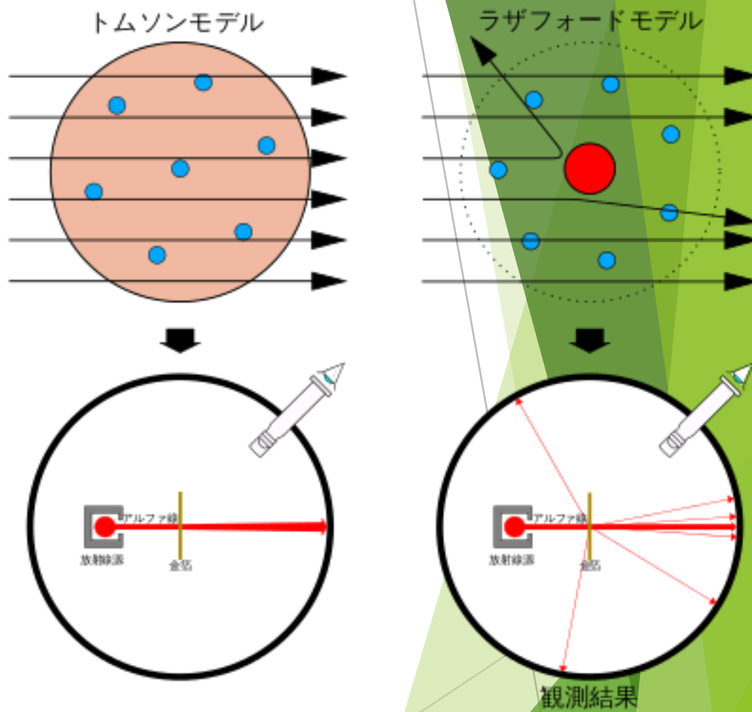
ラザフォード散乱とは

- プロトンが散乱する原因として考えられるもの。

  ⇒ラザフォード散乱、核力による散乱

- ラザフォード散乱とは

  荷電粒子同士が衝突するとき、主にクーロン力により粒子が散乱すること。



ラザフォードの散乱公式

- クーロン力による散乱断面積を得た方法

⇒ラザフォードの散乱公式

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Ze^2}{16\pi\varepsilon_0 \mathrm{E}}\right)^2 \frac{1}{\sin^4\frac{\theta}{2}}$$

$\frac{d\sigma}{d\Omega}$: 微分散乱断面積

Z: 粒子の原子番号

E: 入射粒子のエネルギー

θ:散乱角

- 今回は金($_{79}$Au)、アルミニウム($_{13}$Al)の2種類のターゲットにより散乱を見る
- それぞれの薄膜(金…0.1μm、アルミニウム…0.8μm)を用意した

ターゲット

- ターゲットの厚さを検証するために、Bethe-Blochの式

$$-\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx} = 0.3071\times\frac{Z}{A}\frac{1}{\beta^2}\left(\ln\left[\frac{1.022\times\beta^2}{I(1-\beta^2)}\right]-\beta^2\right) \quad (\mathrm{MeV\ cm^2/g})$$

ρ:ターゲットの密度 $(\mathrm{g/cm^3})$

Z: ターゲットの原子番号　A:質量数

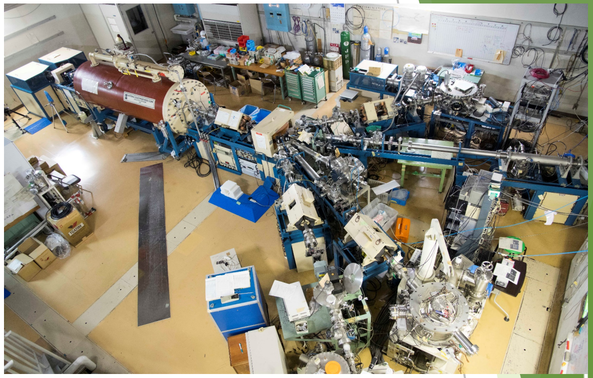
I(平均イオン化ポテンシャル) $\approx 16\times Z^{0.9}$ eV

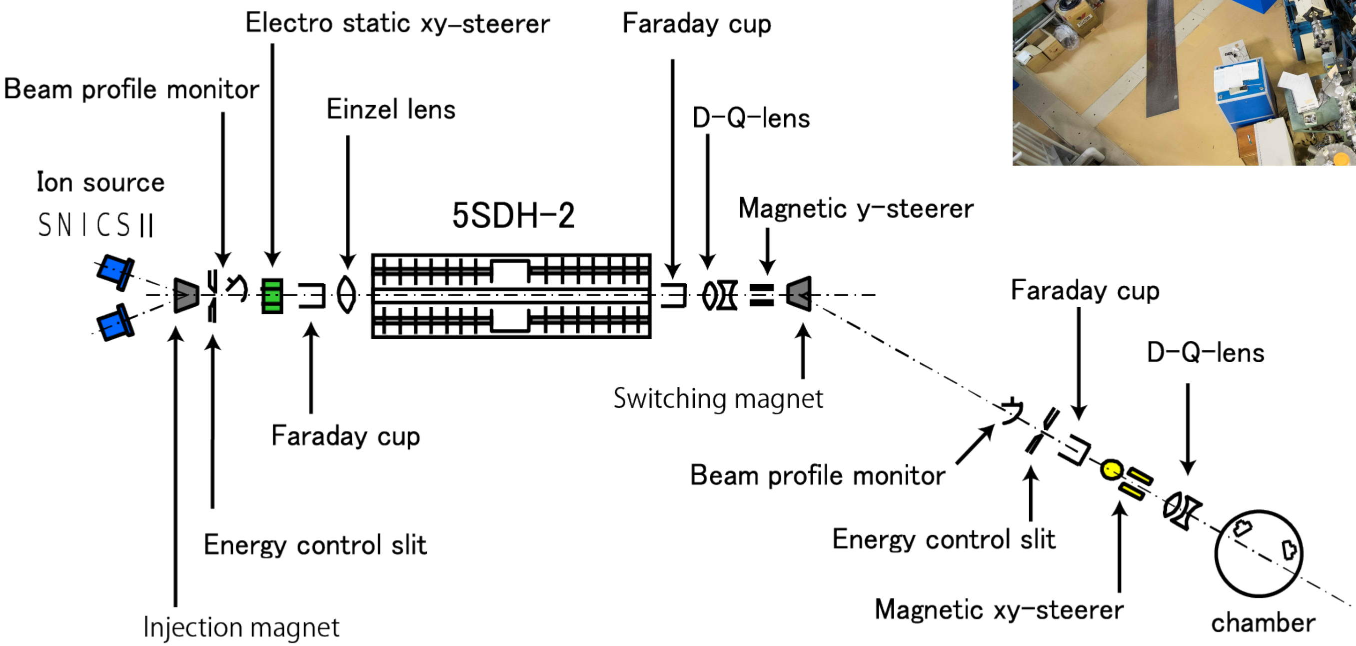
を利用する。

- 3MeVのプロトンは$\beta = 0.08$であり、${}_{79}\mathrm{Au}$, ${}_{13}\mathrm{Al}$の厚さはそれぞれ0.1μm, 0.8μmであったので、0.23%,1.87%のエネルギー損失だった。

  →十分にビームが透過する。

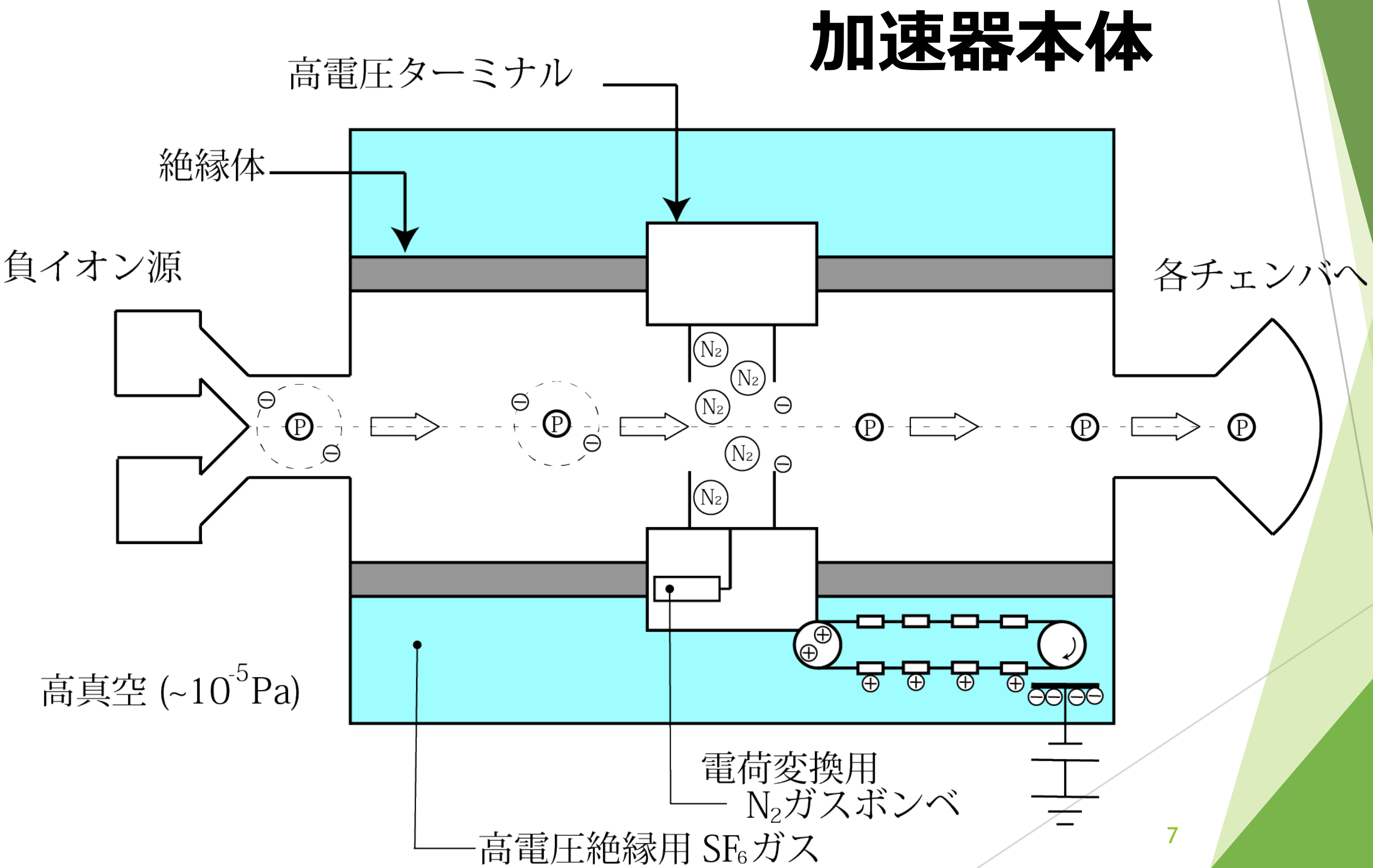
加速器の概要





Electro static xy−steerer
Faraday cup
Beam profile monitor
Einzel lens
D−Q−lens
Ion source
SNICSII
5SDH−2
Magnetic y−steerer
Faraday cup
D−Q−lens
Switching magnet
Faraday cup
Beam profile monitor
Energy control slit
Energy control slit
Magnetic xy−steerer
chamber
Injection magnet

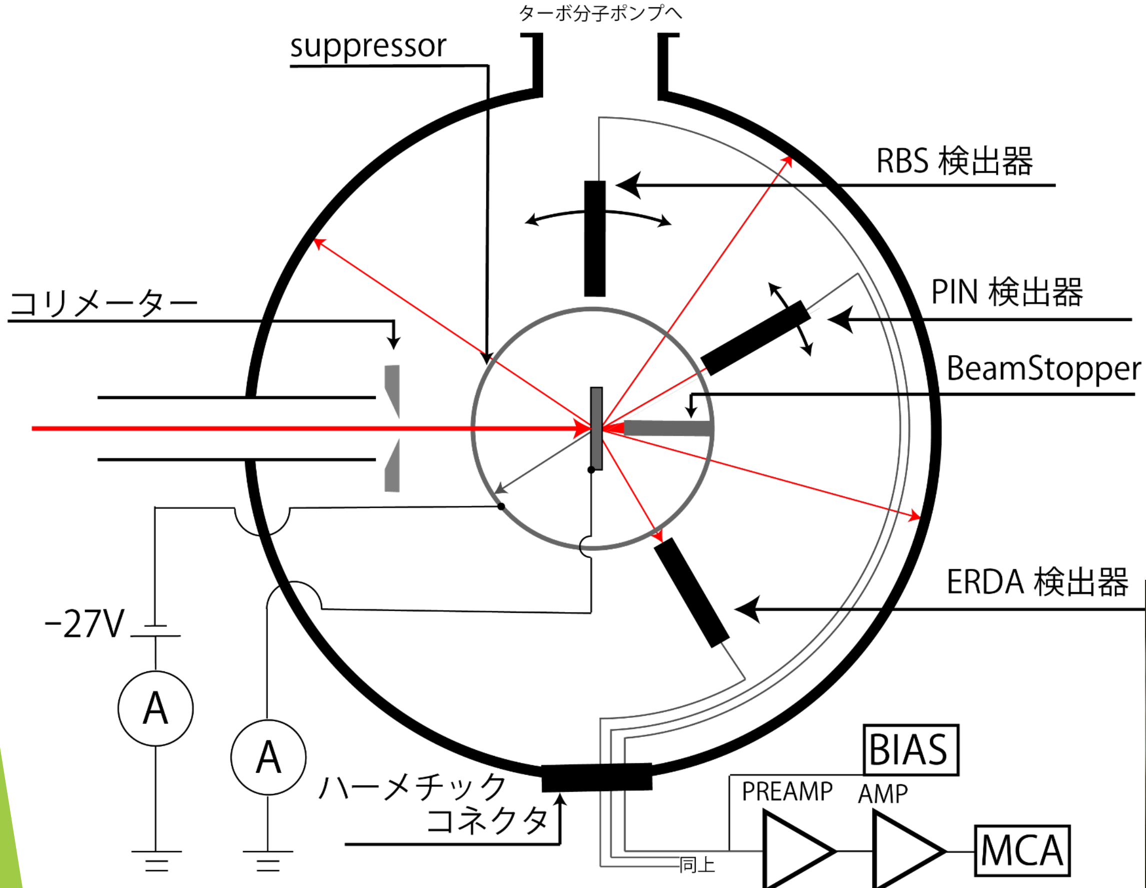
加速器の概要


加速器本体
高電圧ターミナル
絶縁体
負イオン源
各チェンバへ
高真空 (~10-5Pa)
電荷変換用
N2ガスボンベ
高電圧絶縁用 SF6ガス

Set Up

内径600mmの真空容器

真空排気はターボ分子ポンプ
(排気速度500l/s，到達圧力10^{-6}Pa)



・チェンバに届いたビームはコリメータを通りターゲットにぶつかる

・ターゲット周囲にある10°毎にM4螺子穴の開いたサプレサーを通して散乱粒子を検出する

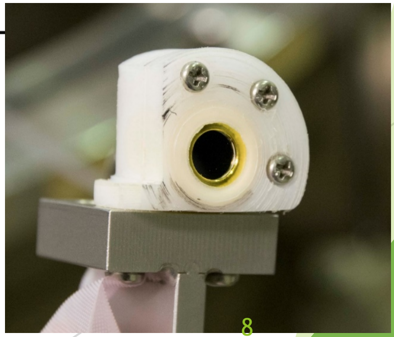
・ターゲットとサプレサーはそれぞれ電流計(電源)に接続されている

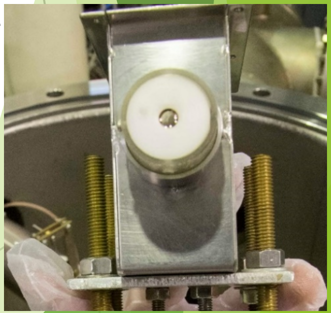
使用する検出器は三つ

それぞれ光電面はサプレッサーの穴より十分大きい為有感面積は固定

通称をRBS,ERDA,PINとした

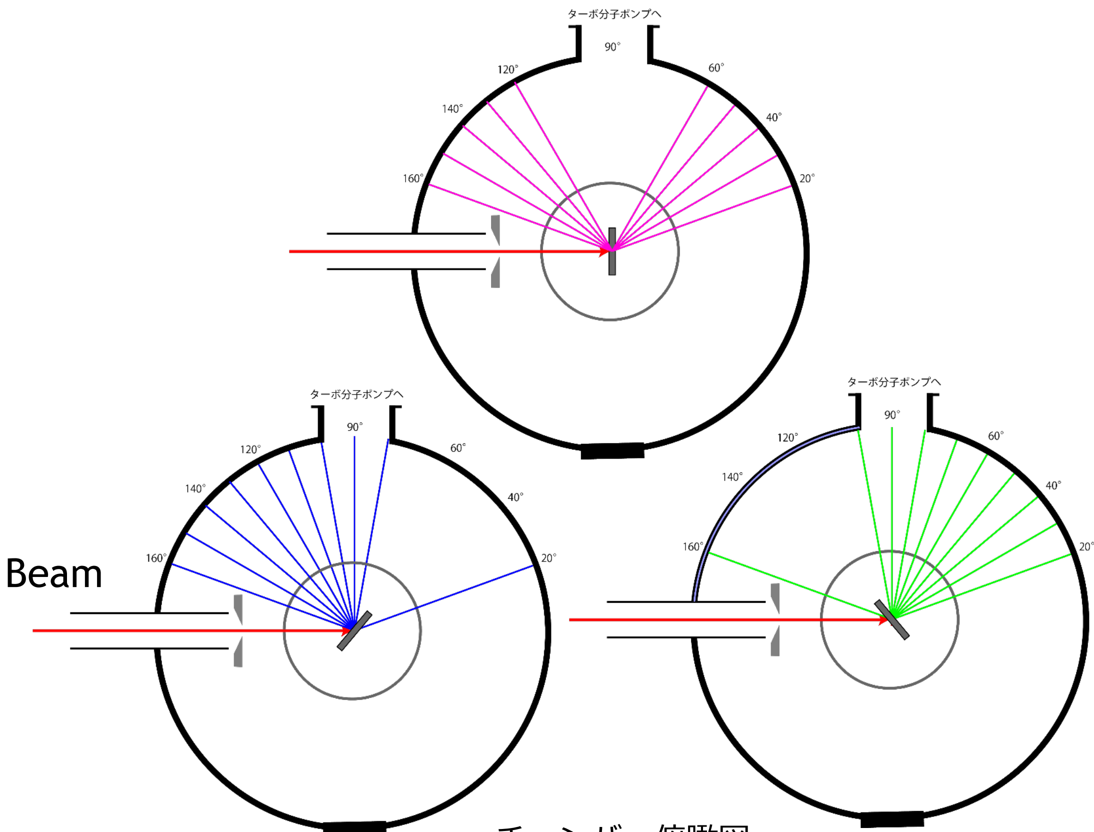
RBS光電面φ10





ERDA
光電面φ5

Set Up



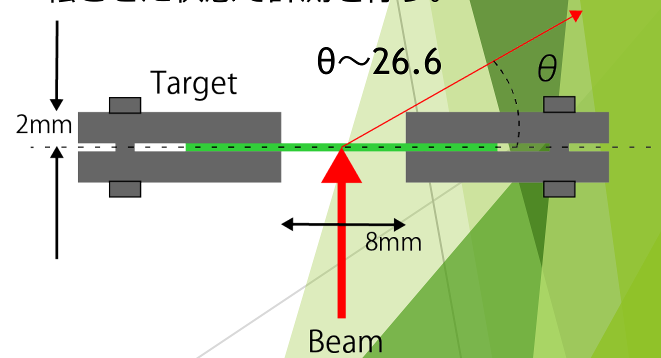
チェンバー俯瞰図

ターゲット角と検出可能角度

・20°〜160°の範囲を10°間隔で計測

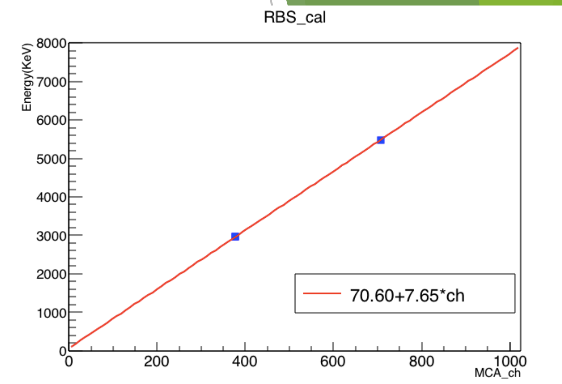
・最小検出器間隔20°で調整

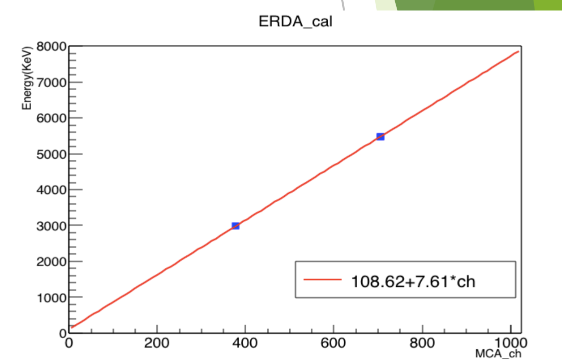
・ターゲットの角度を基準より±40°に回転させた状態で計測を行う。

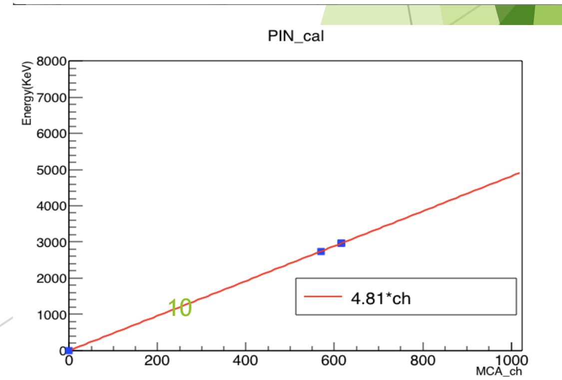


検出器のキャリブレーション

- 今回使用した３つのPINフォトダイオードのキャリブレーションを行った
- 右図は上からRBS、ERDA、PINのキャリブレーション
- RBS,ERDAはAm(241)から出るα線(約5.4MeV)と金の散乱ピークで較正直線を引いた
- PINは金、アルミの散乱ピークとpedestalとで行った
- 青点はRBS,ERDAは右下から金の散乱ピーク、Am(241)
  PINは右下から金、アルミの散乱ピーク
- RBS…E(KeV)= $70.60 + 7.65\times$ch
- ERDA…E(KeV)= $108.62 + 7.61\times$ch
- PIN…E(KeV)= $4.81\times$ch







散乱断面積の求め方

- $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{count \times e \times A}{d\Omega \times I \times T \times \mathrm{d} \times t \times \mathrm{N}_A} [cm^2/sr]$

- $count$…散乱してきた陽子の数
- e … $1.60 \times 10^{-19} C$
- A …原子量$[g/mol]$
- $d\Omega$ …微小立体角$[sr]$
- I …電流値$[A]$
- T …計測時間$[s]$

- d …ターゲットの密度$[g/cm^3]$
- t … ターゲットの厚み$[cm]$
- N_A …アボガドロ数$[/mol]$

- 赤字の値が計算で必要になる

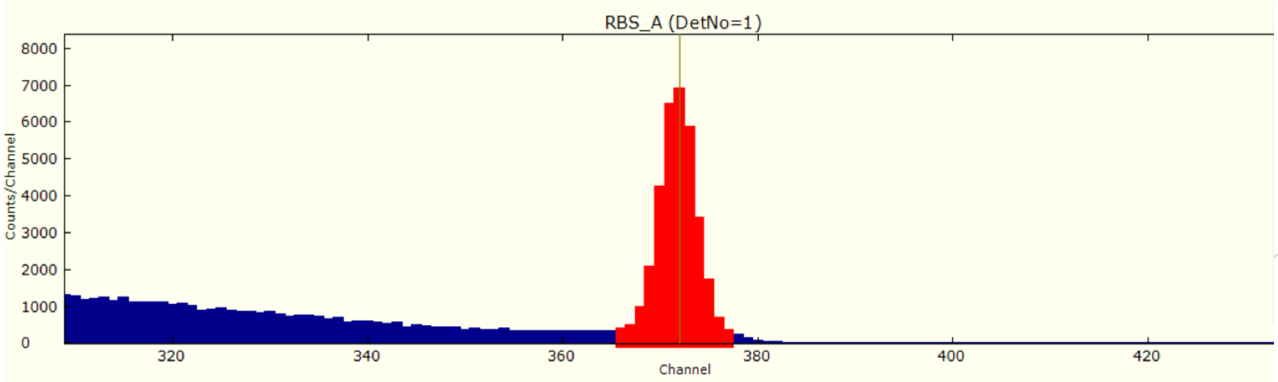
- 微小立体角、ターゲットの密度と厚みについては状況に応じた値を考慮した

count数の計測

- 計測して得られたスペクトルからピーク部分を積分することでcount数を計測した

- 一例として下図の場合、赤くなった山の部分をガウスfitすることで積分してcount数を出した

- この際山になだれ込んでくる青い部分を指数関数$\exp(p_o + p_1 x)$でfitしてピークと被った部分を引いた



アルミニウムと50°で散乱する時のエネルギースペクトル

結果と考察

実験で得られた結果を以下の観点から考察する。

1. 微分散乱断面積
   - ラザフォードの公式と得られた結果との比較
2. エネルギー
   - Alの準安定状態

金の微分散乱断面積

- ラザフォードの公式による理論計算と一致している
- 大角度で誤差が大きいのは、高い電流値で実験を行ったため電流値モニターのぶれが大きくなったから
- 40度と50度の穴の間にあるボルト飛び出ていたので40度と50度のレートが下がっている

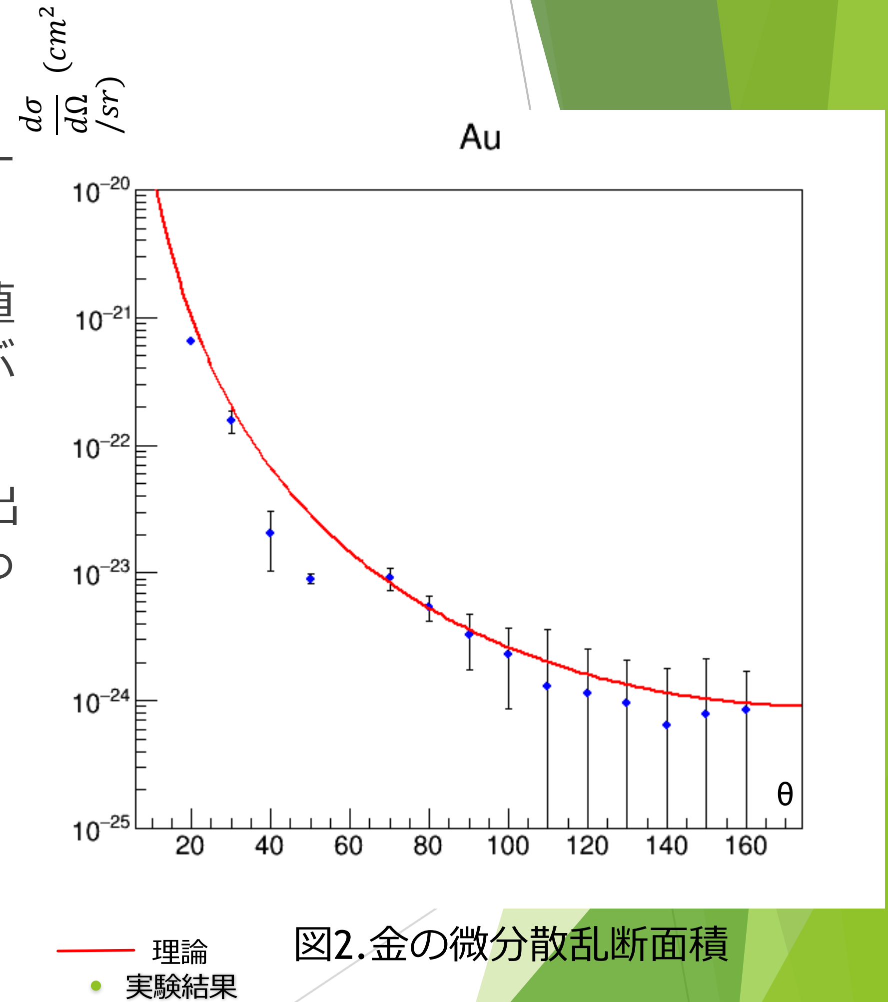


図2.金の微分散乱断面積

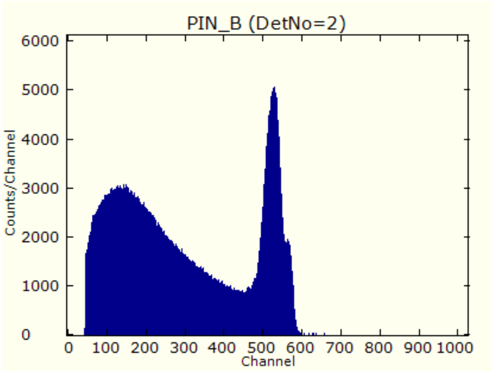


図3.40度の金のスペクトル

Alの微分散乱断面積

　相対的にはラザフォードの公式と一致しているように見えるが、全体的に理論曲線の半分ほど。

→電流値のモニターがうまくいっていなかった可能性が高い。

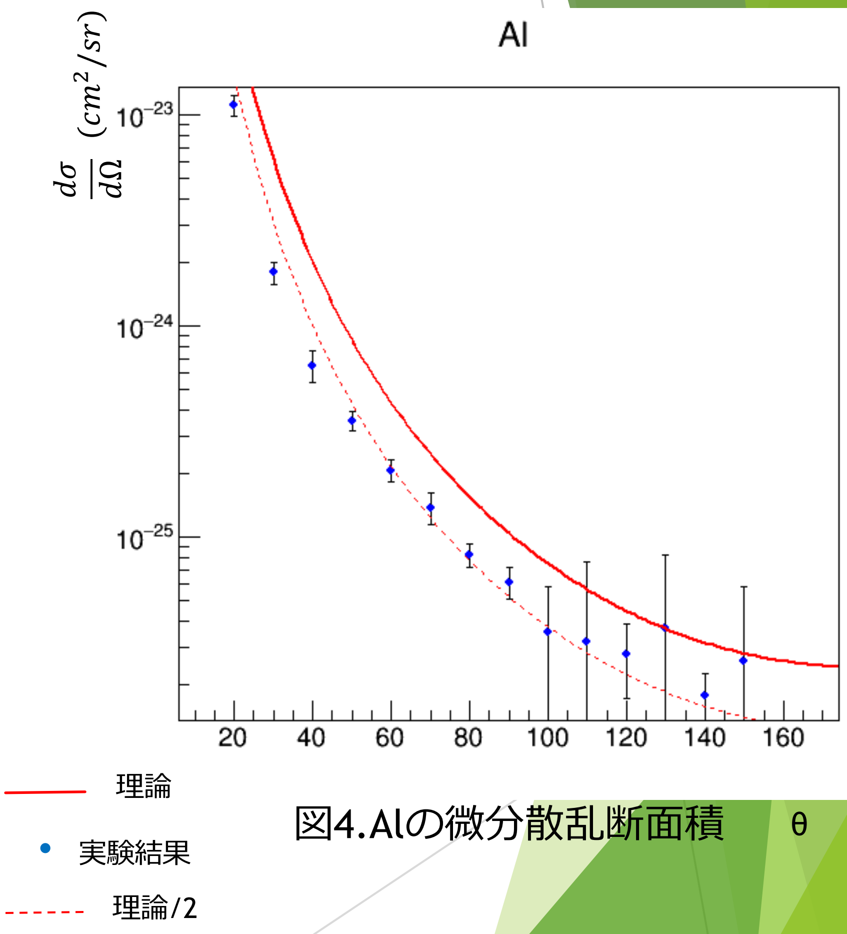


図4.Alの微分散乱断面積

エネルギーの観点からの考察

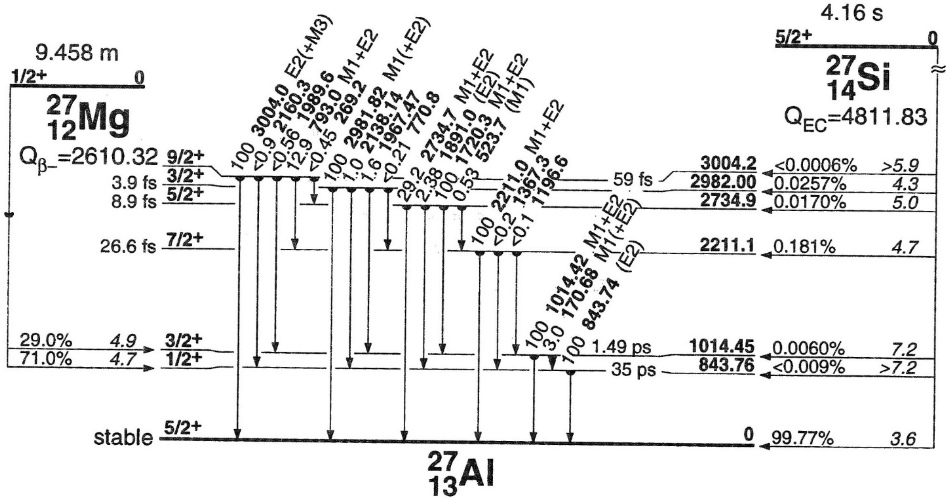


図1.Alの準安定状態

準安定状態

- 多くの原子には準安定状態(metastable)が存在する。
- 原子の種類により励起エネルギーは異なる。
- 今回の条件ではアルミニウムの1014keVと844keVの準安定状態は観測できる可能性がある。

Alのエネルギースペクトル

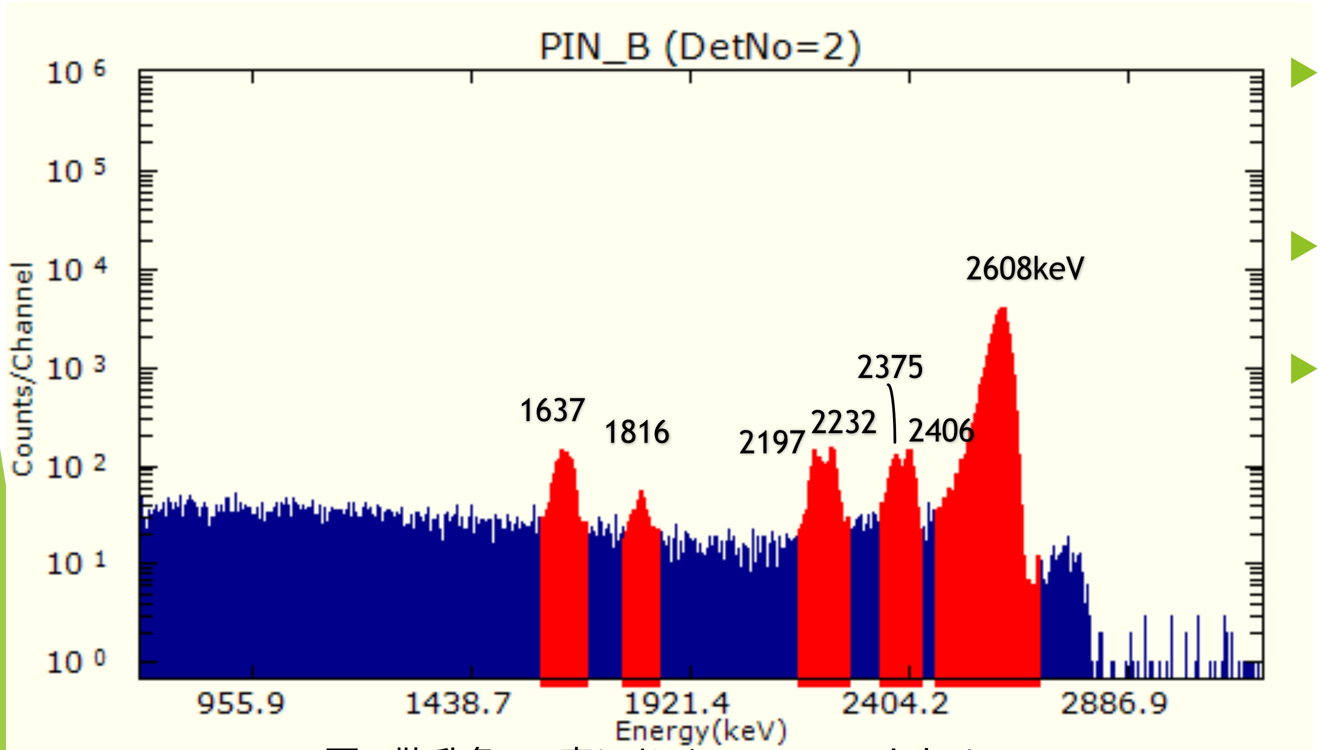


図5.散乱角130度におけるAlのスペクトル

- Alのエネルギースペクトルの中に、複数のピークを持つものがあった。
- 2608keVのピークがAl原子核とのクーロン弾性散乱によるもの
- 左の二つはAlの準安定状態による非弾性散乱
- 二股に分かれた二つのピークは、右が酸素で左が炭素と散乱したときのエネルギー。

Alの裏側と表側で散乱するものがあるため二股になる。→Al膜の中でのエネルギー損失を計算するとほぼ一致する。

Alのエネルギー

Alのエネルギーを横軸を角度にしてプロットする

曲線はそれぞれ、Alの弾性散乱、酸素の散乱、炭素の散乱、Alの準安定状態の理論計算の結果

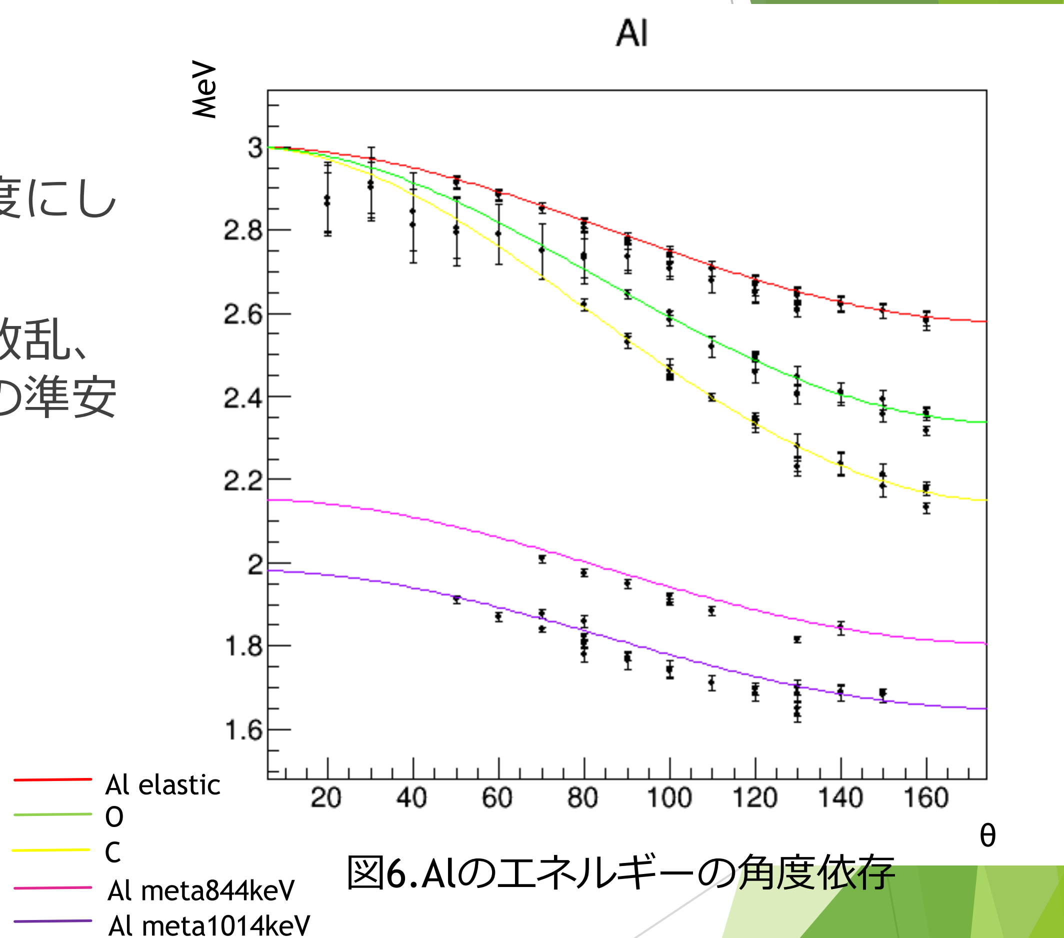


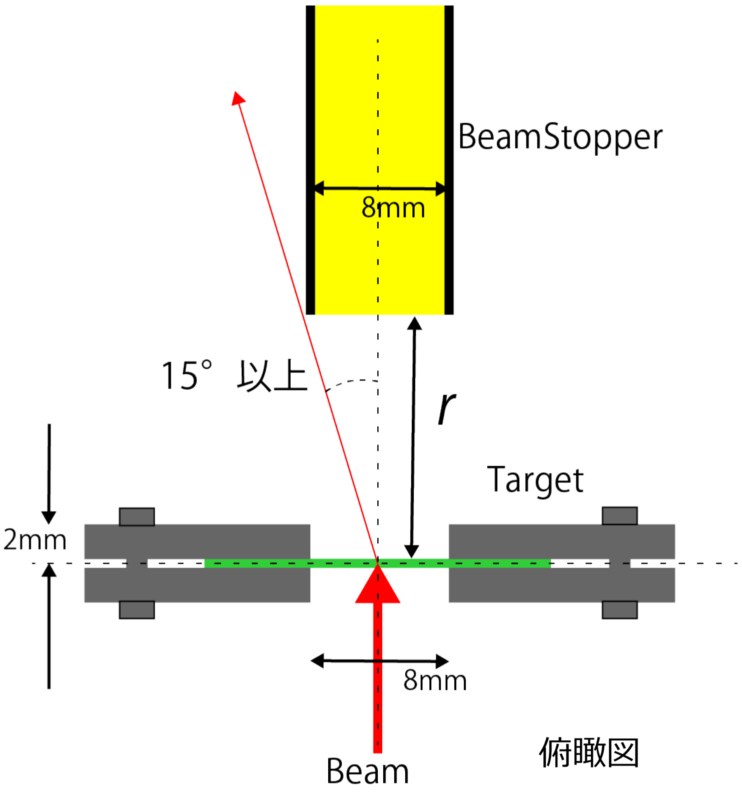
図6.Alのエネルギーの角度依存

まとめ

- 金については散乱断面積が理論値と一致していることを確認できた
- 本実験で得られたアルミニウムの散乱断面積が理論値とほぼ半分の値を示した
- アルミニウムの準安定状態(metastable)を確認できたが、同時にアルミニウム表面に酸素と炭素が付着していることを発見した

BACK UP

加速器運転



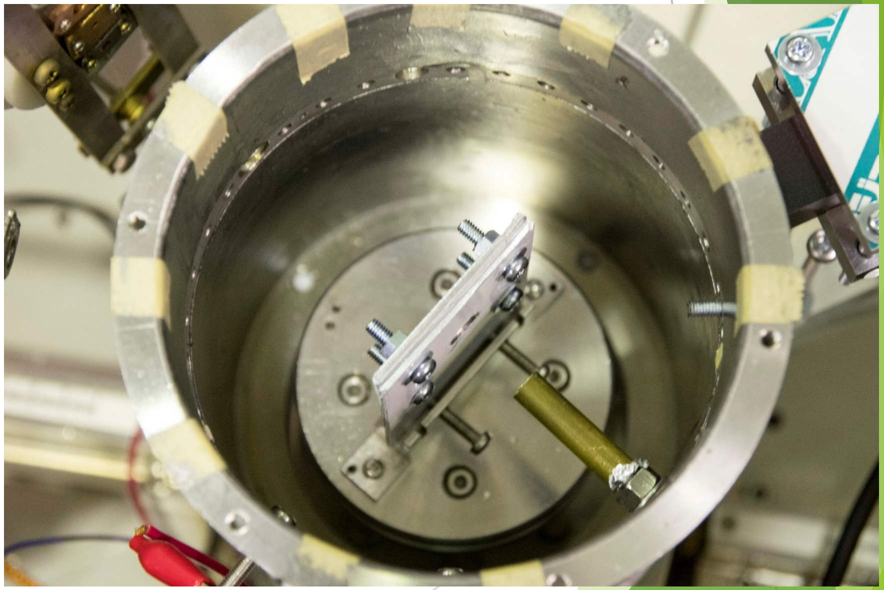
ビームストッパー

本実験では入射粒子のほとんどは直進又はごく小さい角度で散乱される

→さらなる反射を止めるものが必要

今回は金属の筒を用いた

左図では r > *13mm*

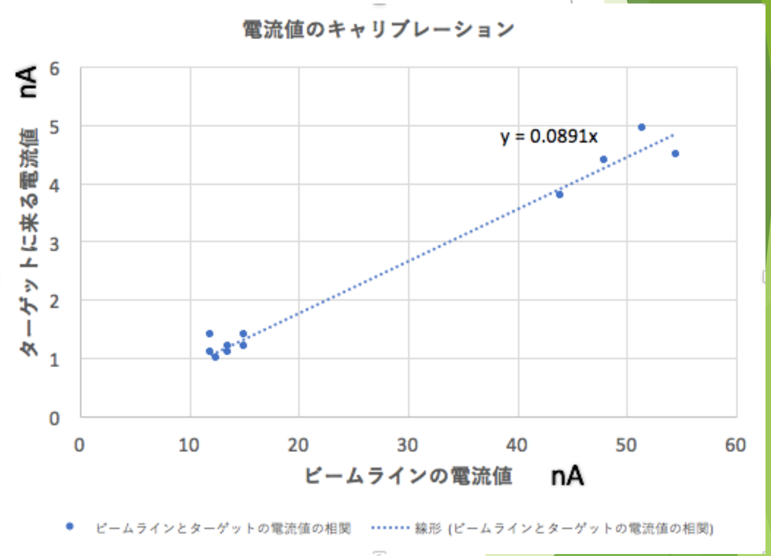


電流値のキャリブレーション

- ターゲットにつけた電流計の値をうまく計測できなかった

- ビームライン上の電流値から
  ターゲットにあたったビーム
  の電流値を見積もる式を求めた

- T_g電流値 $= 0.0891 \times \mathrm{B_l}$電流値



計測時間について

- 統計誤差を減らすためにcount数が10000を十分超える計測時間をもうけた
- 大角度(90°~ 160°)への散乱は頻度が少なく時間がかかるため、ビームの強度を上げて計測した
- 小角度(20°~ 90°)への散乱は逆に頻度が多すぎるために、パイルアップを起こしてエネルギーをうまく計測できないため強度を落として計測した

ポリエチレンのエネルギー

- ポリエチレンのエネルギー角度分布を調べた。
- 二つのピークがそれぞれ炭素と水素のエネルギーに対応していることがわかる。

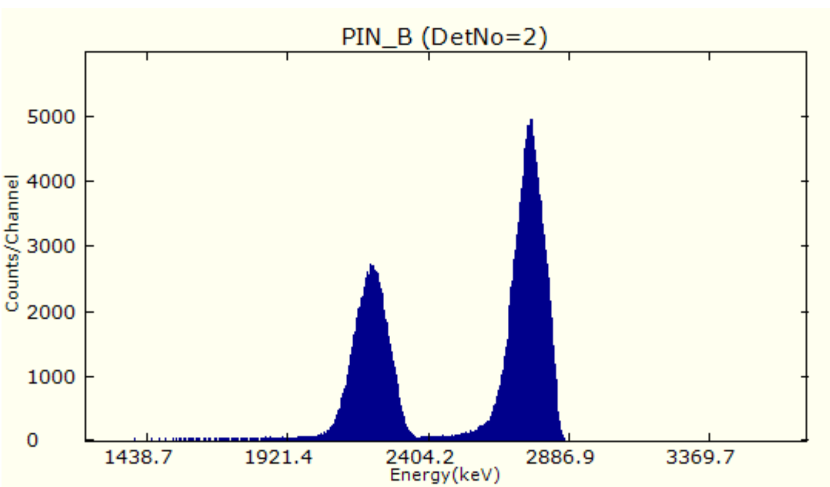


図7.60度でのポリエチレンのスペクトル

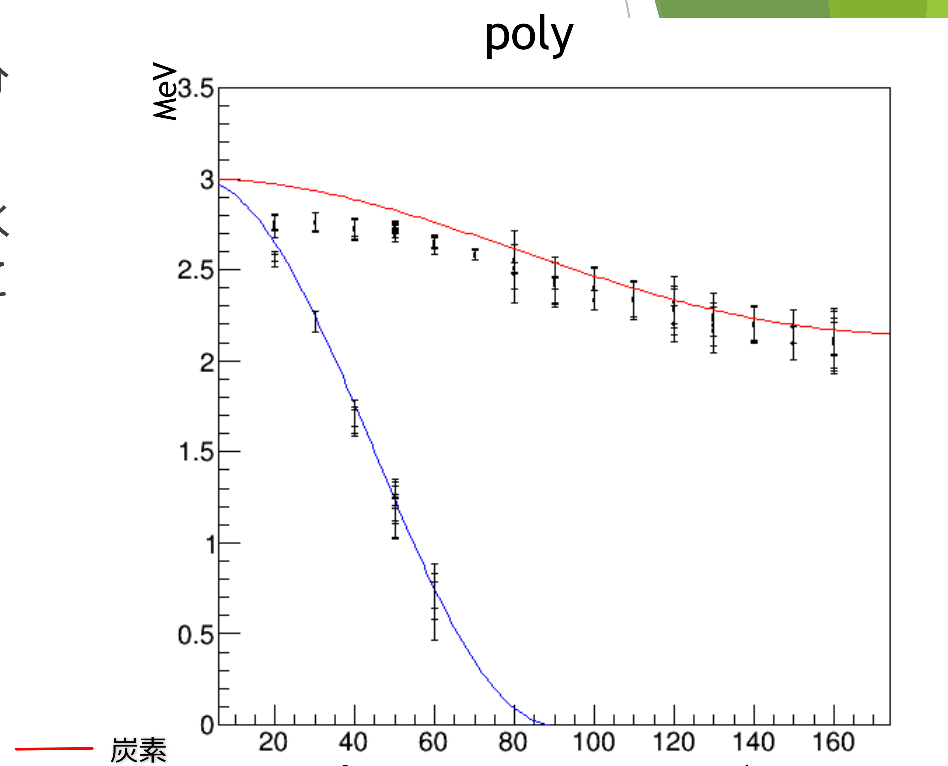


図8.ポリエチレンのエネルギー

炭素の微分散乱断面積

- 炭素の微分散乱断面積を考える。
- 90度以上の角度ではラザフォードの公式による理論曲線からかなりずれている
- 点線は核力を考慮した理論曲線
- 強い相互作用による散乱が見えていると考える

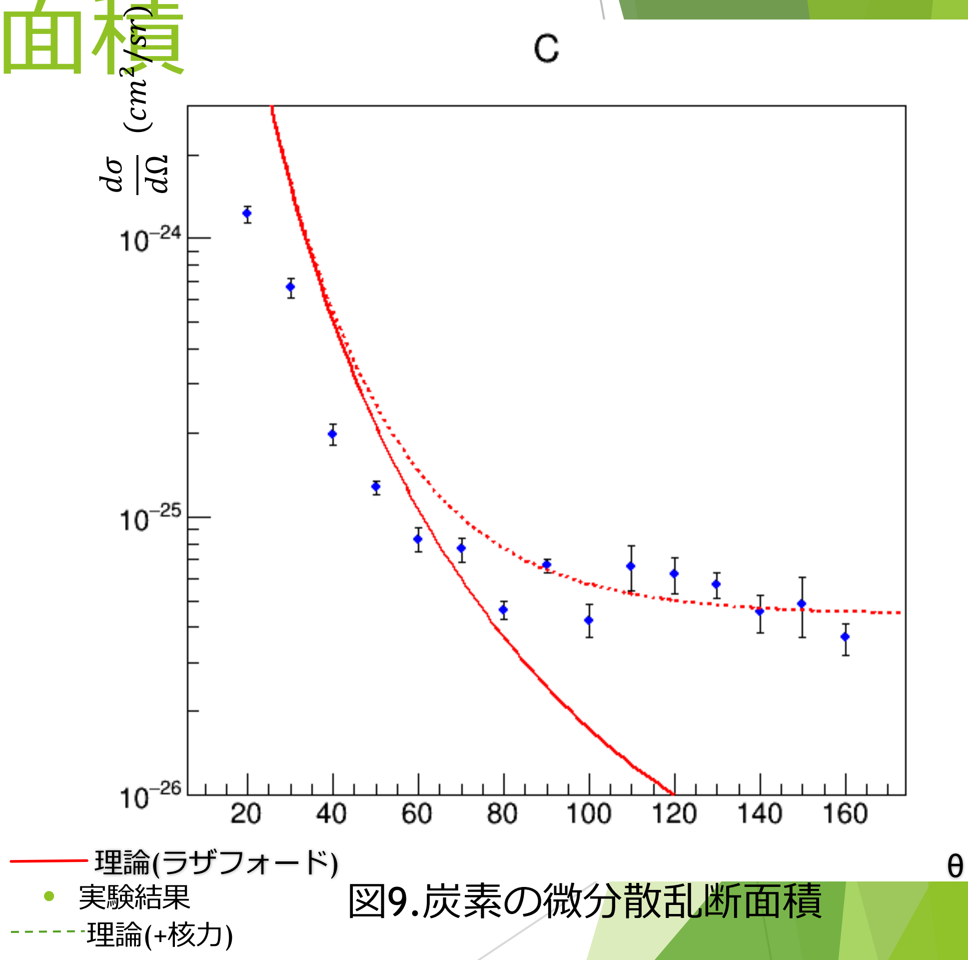


図9.炭素の微分散乱断面積

炭素の原子核半径

- 炭素原子核の半径を推定する。
- 算出方法
  - 実験結果とラザフォードの公式による差を強い核力による微分散乱断面積とする。
  - $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{R_0^2}{4}$ の近似式から相互作用の半径R_0を求める。
  - 陽子の半径$R_p = 1.25 fm$を引く。
- 今回の実験では炭素原子核の半径は

$R_C = 2.8 \pm 0.5\ fm$ であると推定できた。

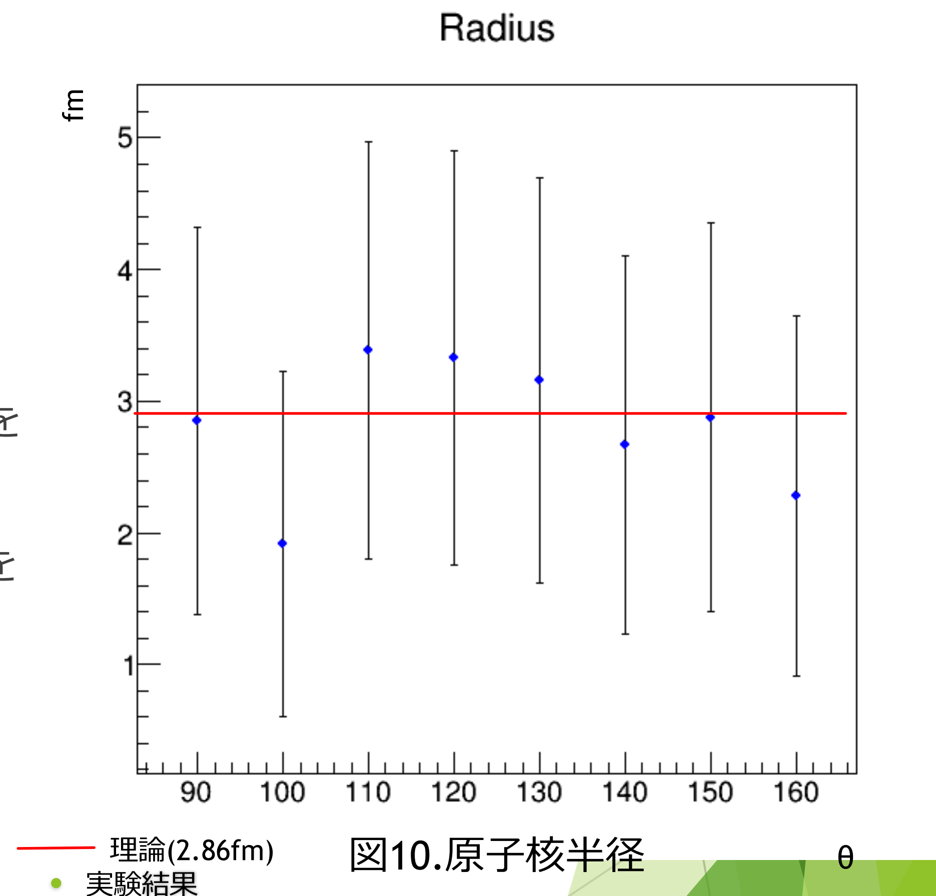
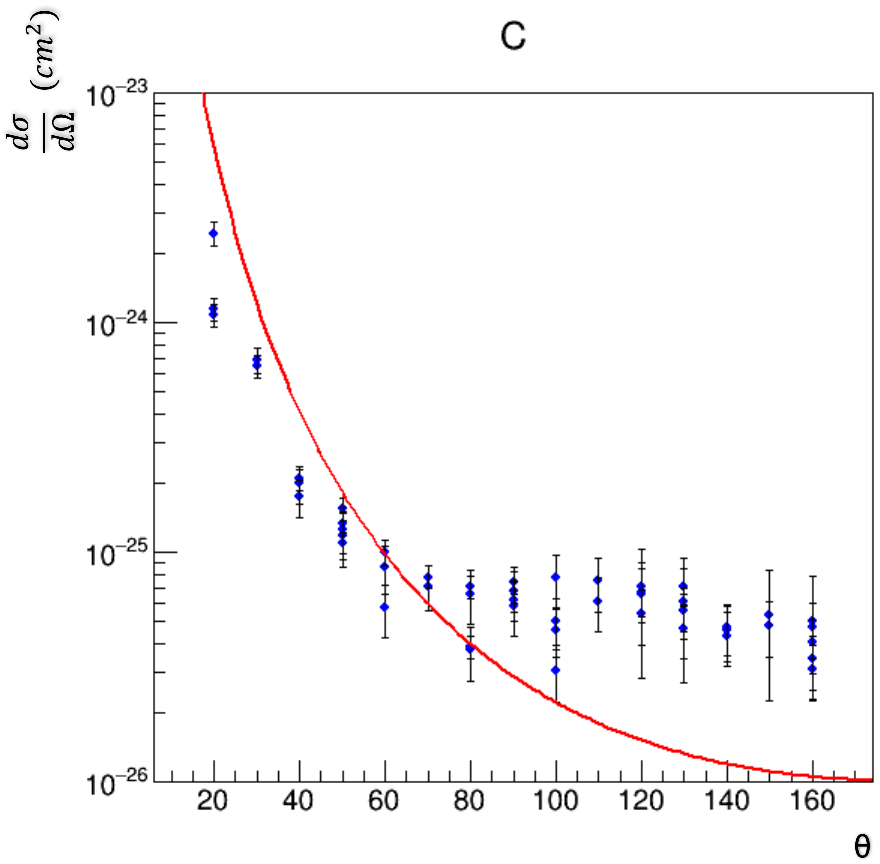
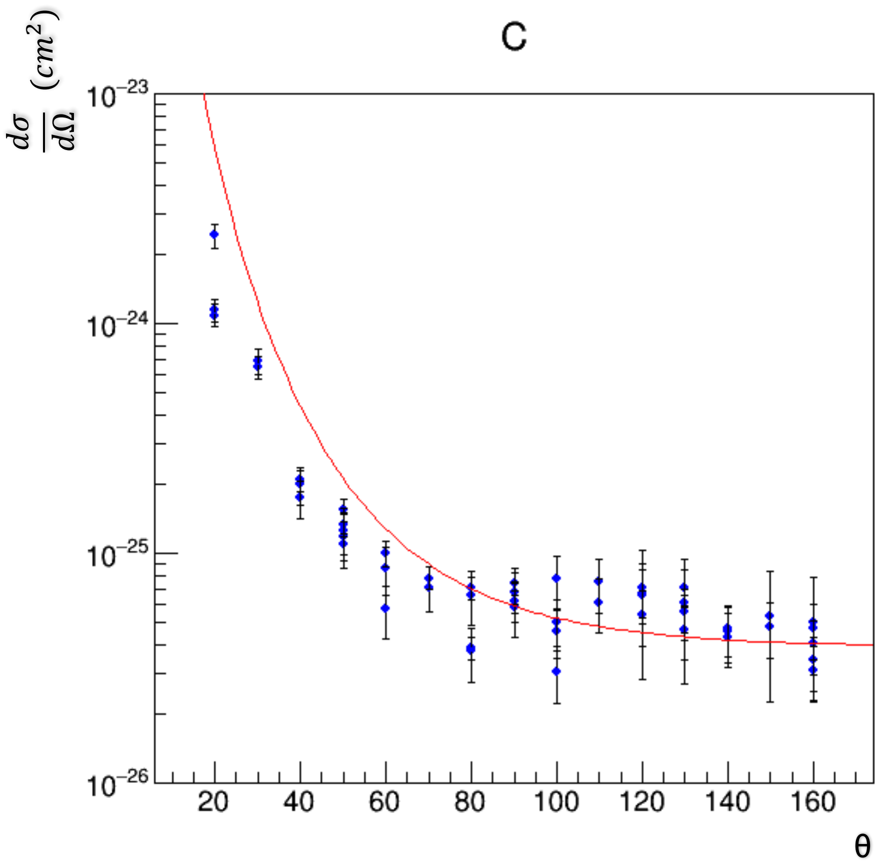


図10.原子核半径



C
$\frac{d\sigma}{d\Omega}\ (cm^2)$
10^{-23}
10^{-24}
10^{-25}
10^{-26}
20 40 60 80 100 120 140 160
θ


C
$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ (cm^2)
10^{-23}
10^{-24}
10^{-25}
10^{-26}
20
40
60
80
100
120
140
160
θ