

学士論文
 ^{86}Kr ビームによる
入射核破碎反応における
不安定核の収量測定

東京工業大学理学部応用物理学科

97-2684-0 三浦 元隆

指導教官 中村 隆司 助教授

2001年03月05日

Abstract

入射核破砕片分離装置を用いた不安定核ビーム生成技術の発展により、ドリップライン付近に至る不安定核の研究(天体核、ハロー核等)が進展しつつある。こうした不安定核の生成には核子あたり数十 MeV 以上の重イオンビームによる入射核破砕反応を用いている。この生成法は様々な核種が化学的性質によらず効率よく二次ビームとして得られるという特長がある。

ところで、不安定核ビームを用いる実験では、目的とする核種の収量をあらかじめ予想しておくことが必要である。ここ数年、入射核破砕反応の反応率についての基礎データ収集や、予測計算コードの開発が進みつつある。ただし、これまでの計算コードは ^{40}Ar , ^{48}Ca といった軽い原子核を重イオンビームとして用いたデータに基づいており、より重い中性子過剰な領域における収量の予測は必ずしも満足のいくものではなかった。したがって、より重い不安定核に関するデータをとる必要があった。

本研究では ^{86}Kr ビーム (66MeV/n) を用い入射核破砕反応による破砕片の生成断面積を測定し、生成率予想コードの改善を試みる。実験は理化学研究所のリングサイクロトロン加速器施設において行われ、不安定核ビームライン RIPS を用いて、生成物の分離とその生成率を測定した。実験より得られたデータの中から、Zn, Ga, Ge, As について解析をした。今回得られた収量と既存の予想コード INTENSITY2 を比較し、その妥当性及び予想コードの可能性等を議論する。

目次

第1章 序	2
第2章 実験原理	3
2.1 入射核破碎反応	3
2.2 破碎片の分離	4
2.2.1 RIPS について	4
2.2.2 粒子の識別法	6
第3章 実験	7
3.1 一次標的	7
3.2 一次ビームの測定	7
3.3 検出器	7
3.4 飛行時間の計測について	8
第4章 実験解析とその結果	9
4.1 一次ビーム強度	9
4.2 ターゲット厚の測定	9
4.3 TOF と ΔE の Calibration	10
4.3.1 TOF Calibration	10
4.3.2 TOF Slew Correction	11
4.3.3 Energy Loss Calibration	12
4.4 粒子識別	13
4.4.1 各核種にて分ける	13
4.4.2 Charged Particle の選別	14
4.5 微分断面積導出	15
第5章 まとめ	16
第6章 Appendix	19
6.1 Glodhaber の理論	19
6.2 荷電粒子のエネルギー損失	21
6.3 TDC Calibration	23
6.4 Differential Cross Section	24

第1章 序

近年の重イオン加速器の発展に伴い、非常に中性子の多い中性子過剰核等の不安定原子核の研究(天体核、ハロー核等)が進められている。不安定原子核を生成するために、中間エネルギー(数10MeV~100MeV)における入射核破砕反応が用いられる。この方法により、我々は様々な核種を効率的に生成し、二次ビームとして得ることができる。

実際にこの考えに基づいた不安定核生成装置として、入射破砕片分離装置が用いられている。この装置は運動量分析により破砕片を分離する装置であるが、この装置による実験を行う際には、目的とする不安定原子核の収量をあらかじめ予測しておく必要がある。これまで一次ビームとして、 ^{40}Ar , ^{48}Ca を用いてこの反応率に関する実験が行われ、有用な結果が得られている。しかし、それは軽い原子核かつ安定核周辺にのみ限られており、 β 安定線から離れた中性子過剰核等の不安定核の予測は、必ずしも実験値と一致するわけではない。その理由としては、コードを作る際に用いられた基礎データが、我々が扱おうとしている実験領域とは違うことがあげられる。特にデータが不足している、 ^{48}Ca 以上の中性子過剰な領域のデータをそろえることが必要であった。

本実験ではより重い入射核である ^{86}Kr を用いて、入射核破砕反応を起こしその反応率を調べた。そして得られた収量と標準的な収量予想コード INTENSITY2 とを比較し、その妥当性及び、新しい予想コードの可能性等を議論する。

第2章 実験原理

今回我々は理化学研究所にあるリングサイクロトロン (RARF : RIKEN Accelerator Research Facility) によって加速される ^{86}Kr ビームを用い、入射核破砕分離装置:RIPS:(RIKEN Projectile-Fragment Separator) [3] を用いて、生成原子核の反応率を測定した。

ここでは不安定原子核の生成方法である入射核破砕反応について説明をし、さらに生成した破砕片を分離するために用いた RIPS について説明する。

2.1 入射核破砕反応

核子当たりのエネルギーが数十 MeV 以上の重イオンビームと標的核の反応では、入射核破砕反応 (Fragmentation) が優勢になる。入射核破砕反応の概念図は、図:2.1 で示すようなモデル (Spectator Participant Model) で説明できる。(図 2.1) のように、入射核 (Projectile) が標的 (Target) と幾何学的に重なり合った部分 (Participant) が剥ぎ取られる。さらに重ならなかった他の部分 (Projectile Fragment) は、反応にまったく関与せず入射速度をほぼ保ったまま運動を続ける。

特に入射エネルギー 100MeV/n の領域では、Goldhaber[2] によってこのモデルの妥当性が示されている。(Appendix 参照のこと)Goldhaber は、その運動量分布が入射核子の Fermi 運動にもとづく対称的な Gaussian 分布することを示し、その幅の定量的な理解を可能にした。しかし、入射エネルギーが 100MeV/n に満たない領域では、非対称的な運動量分布が見られ、これは Goldhaber の理論では説明できない [1]。つまり、反応が Spectator Participant Model だけでは説明できないことを示している。

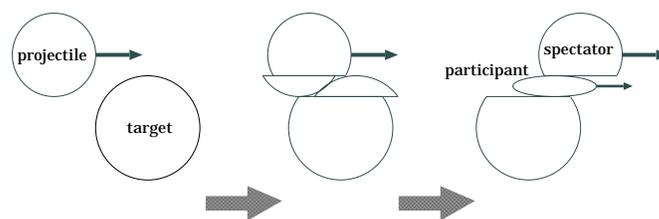


図 2.1: 入射核破砕反応の概念図

2.2 破碎片の分離

破砕反応により生成した原子核は、下記に述べるような不安定核ビームライン RIPS によって分離される。RIPS は本来入射核破砕反応により、不安定核を生成するための装置であるが、今回は破碎片を分離し、運動量を測定するための装置として使用した。

2.2.1 RIPS について

理化学研究所におけるサイクロトロン施設を図 (2.1) に不安定核ビームライン RIPS を図 (2.2) に示す。前述したように RIPS は入射核破砕反応を利用して、不安定核ビームを生成する装置である。サイクロトロンにより、光速の数%まで加速された一次ビーム (Primary Beam) が RIPS の生成ターゲット (通常 Be が用いられる) に入射する。この時 Primary Beam は入射核破砕反応を起こし、入射核破砕片が生成される。次に生成された原子核を分離する。RIPS は運動量分析を行う中間焦点面を備えた 0° 方向の磁気スペクトロメータとすることができる。粒子の分離は磁気硬度 (Magnetic Rigidity)¹ を利用した運動量分析とエネルギー損失の違いを組み合わせることによって行われる。

具体的には、まず、ターゲット (F0) から第一焦点面 (F1) までで、第一の磁気分析が行われる。これは、

$$B\rho = \frac{P}{Q} \propto \frac{A \cdot v}{Z}$$

である。ただし、エネルギーが十分高く、full strip²の場合、 $Q = Ze$ としてよく、上の関係は

$$B\rho \propto \frac{A}{Z}v$$

になる。

次に中間焦点面にエネルギー Degradar を置き、エネルギー損失を起こさせる。このエネルギー損失により、中間焦点面 (F1) から第二焦点面 (F2)(アクロマティックな焦点面³) までの磁気分析では、 $A^{2.5}/Z^{1.5}$ に基づいた分離が行われている。なお今回の実験では、分析後の粒子を広く獲得するために、Degradar を入れていない。

¹我々はこれを $B\rho$ として扱っている。 ρ とは、RIPS の曲率半径である。

²電子が全てはがされた原子核を指す。

³運動量分析のない焦点面

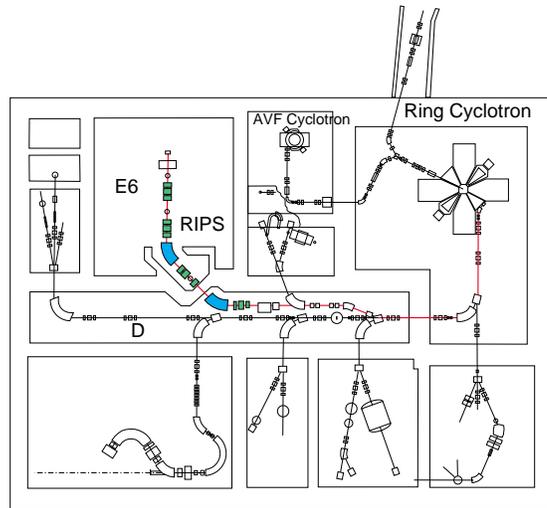


図:(2.1):理研加速器施設：RARF の全体図。RIPS は E6 室にある。

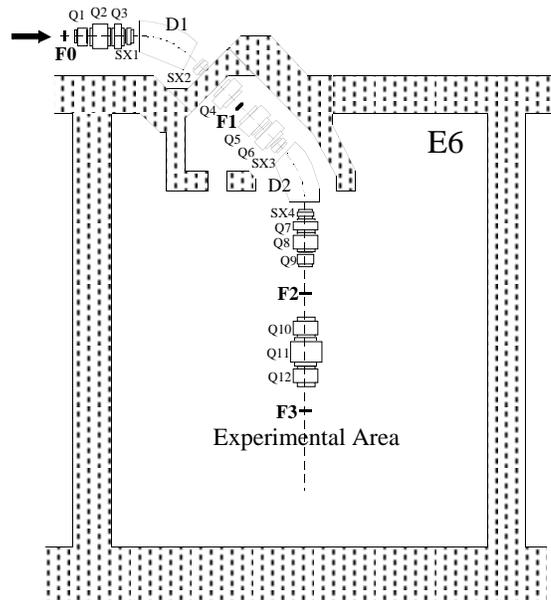


図:(2.2):不安定核ビ - ムライン：RIPS

2.2.2 粒子の識別法

粒子識別は、以下の4点の組合せにより行われる。

- $B\rho$:磁気硬度の選別
- Production Target からの飛行時間 (TOF:Time Of Flight)
- エネルギー損失 (ΔE)
- 全エネルギーの測定

また、これらは $A, Q(Z), v$ の関数である。

- $B\rho \propto \frac{A}{Q}v$
- $TOF \propto \frac{1}{v}$
- $\Delta E \propto \frac{Z^2}{v^2}$
- $E \propto Av^2$

測定中 $B\rho$ は一定なので、TOF は A/Q に比例する。よって、 ΔE 、TOF との相関関係より、 Z を特定することができる。さらに、 E と TOF との関係から、 $E \propto Q/TOF$ が導かれ Q が特定できる。そして、 Q が特定されることにより、TOF との関係から A が特定できる。以下にその相関関係を載せる。

$$\bullet \quad TOF \propto \frac{A}{Q} \quad (2.1)$$

$$\bullet \quad \Delta E \propto Z^2 TOF^2 \implies Z^2 \propto \frac{\Delta E}{TOF^2} \quad (2.2)$$

$$\bullet \quad E \propto \frac{A}{TOF^2} \implies E \propto \frac{Q}{TOF} \quad (2.3)$$

第3章 実験

今回の実験は、理化学研究所のリングサイクロトロン内にある RIPS において行った。入射ビーム (Primary Beam) として $^{86}\text{Kr}65.89\text{Mev/n}$ を、標的核 (Production Target) は ^9Be を用いた。RIPS によって選別された破砕片は、F3 部分に設置された 4 枚の SSD によるエネルギー損失、及び Production Target よりの飛行時間の組み合わせによって識別を行った。

3.1 一次標的

一次標的として、 ^9Be を用いた。また、厚さの測定は一次ビームと二次ビームのエネルギー損失より求めた。

3.2 一次ビームの測定

生成断面積を求めるためには、入射ビームの強度を測定する必要がある。本実験では、標的核後方 135 度にある 3 枚の Plastic シンチレーター (以後 OKUNO) を用いた。ただし、これは破砕反応によって、散乱された粒子を相対的に測定している。そのためそのビーム量を校正する必要がある。そこで、ビームライン上に Faraday Cup¹(以後 FC) を置き、その電流値を調べた。FC は通常標的直後にある FC が用いられるが、今回は精密測定を考慮し、バックグラウンドとなりうる散乱電子の影響を受けにくい下流の (F2)FC を用いた。

3.3 検出器

本実験では、以下の検出器を使用した。

- SSD: Solid State Detector シリコン半導体検出器である。サイズは、 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 500\mu\text{m}$ であり、F3 チェンバー内に 4 枚設置した。 ΔE 及び E の測定に使用した。
- PPAC: Parallel Plate Avalanche Counter 位置を特定できるガスカウンターである。今回は F1 では粒子の位置を特定するために、F3 では TOF の測定のために使用した。

¹電氣的に絶縁されており、そこに発生する電荷量からビームの照射量を知ることができるしくみになっている。

3.4 飛行時間の計測について

一次標的から検出器のある F3 への飛行時間 (TOF) の測定は、リングサイクロトロン
のビームを加速する周期:RF(Radio Frequency) と PPAC の信号を利用した。以下の図を交え
ながら説明する。加速周期はビームが一次ターゲットに到着する時間に同期している。し
たがって、飛行時間は RF 信号と F3 検出器 PPAC の時間信号の差となる。ただし、RF は
 $t = 43.5[\text{ns}]$ という高速周期なので、データ収集の処理能力が追い付かなくなる。したがっ
て、start を PPAC、stop を RF とする方法をとった。その関係を下図に T_1 示す。PPAC
に粒子が来て電気信号を起こしたところから、次の RF の信号までの時間を計測した。

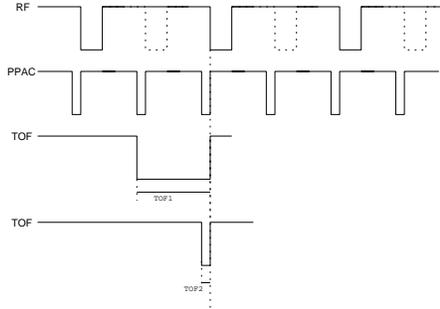


図 3.4:RF 信号と PPAC トリガーのフローチャート

TOF のレンジを稼ぐため RF の信号は一つおきに削除している。このために実際の計
測では、同じ相関図が 2 つ得られる。下図 3.4 は、横軸に TOF をとり、縦軸にエネル
ギー損失をとりにチャンネルでとったものである。

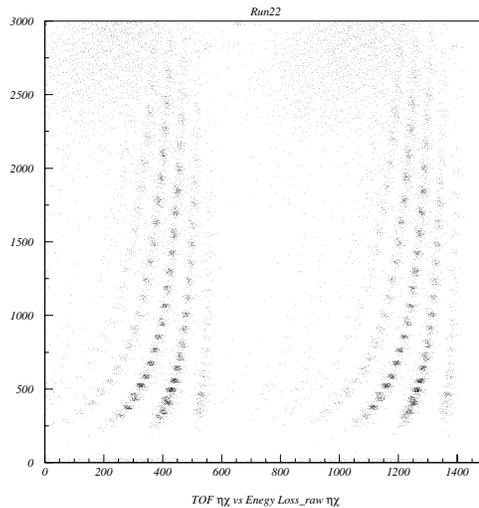


図 3.4:2 つの相関図が確認できる

第4章 実験解析とその結果

この章では実験より得られたデータの解析方法及び結果を示す。さらに粒子を特定することにより、目的とする原子核の収量を求めていく。そのためには、まず測定データを物理量に校正 (Calibration) する必要がある。以下ではまず飛行時間：TOF を特定した。

4.1 一次ビーム強度

これは、実験中はOKUNOによって計測する。ただしOKUNOは相対的強度しか計測できないので、あらかじめ校正しておく必要がある。校正はOKUNOとF2のFaraday Cupとの比較により行った。(3.1(p.7)) まず、標的を置いて入射粒子を通し、そのときOKUNOに飛んで来る軽粒子の数とFCの電流値の関係を求める。実験中の測定から、OKUNOの計測数と二次ビーム強度の関係は以下のように求まった。

$$\text{beam}[\text{個}] = (1.90387 \times [\text{OKUNO}] + 3.44557) \times 10^8 \quad (4.1)$$

4.2 ターゲット厚の測定

一次ビームのTarget中でのエネルギー損失測定により厚さを求めた。Target挿入後のビームのrigidity: $B\rho=2.5587[\text{Tm}]$ より、Target通過後のビームエネルギーは $53.93[\text{MeV/n}]$ 、Target通過後のエネルギーは同様のrigidity測定により、 $65.89[\text{MeV/n}]$ であった。それぞれのビームの飛程は $356[\text{mg/cm}^2]$ 、 $259[\text{mg/cm}^2]$ となり、その差によってターゲット厚が $97[\text{mg/cm}^2]$ と求まる。

4.3 TOF と ΔE の Calibration

ここでは TOF、 ΔE を計算値と比較し、実際の飛行時間・エネルギーに校正する。

Projectile Fragment の速度は、 A/Z に比例することは先程述べた。この飛行時間は $enewr^1$ により特定できる。

次にエネルギー - についても行った。TOF が具体的に求まったので、粒子のエネルギー - 損失を $enewr$ により比較した。

4.3.1 TOF Calibration

TOF は $1/v$ に比例する。よって、 $^{12}C, ^{20}Ne$ のように A/Z が等しい ($A/Z=2$) TOF を持つことになる。下図 4.3.3 は TOF と ΔE (SSD1 枚目) の相関を表したものである。具体的には TDC² の Calibration (Appendix 6.3 を参照のこと) をし、 A/Z の部分を X 軸に Projection し、どのチャンネルにピークがあるのかを Gaussian Fitting することにより求めた。そして、 $enewr$ と比較することで校正した。

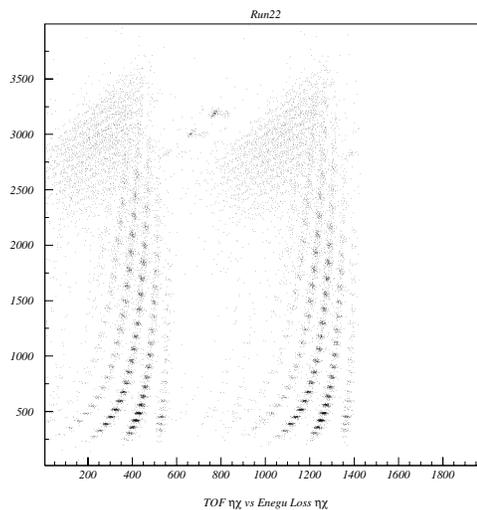


図 4.3.3: 横軸: TOF、縦軸: エネルギー損失 をともにチャンネルで表してある。

上図より、1395[ch] に $A/Z=2$ のラインが見える。これを $enewr$ の計算値: 330.053[ns] を比較して TOF を校正した。

またエネルギー - の低い所は曲がっている。これは “Slew” と呼ばれており、次項にて説明する。

¹この計算コードは TOF と ΔE の両方が $B\rho$ の測定によって求められる。

²Time Digital Converter のこと

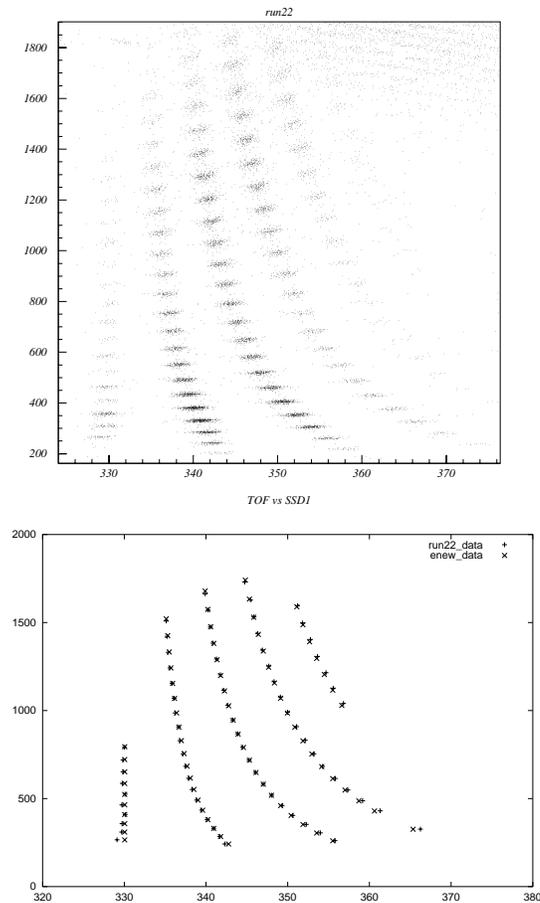
4.3.2 TOF Slew Correction

測定しているエネルギー - の値は全ての値を見ているわけではない。ある一定の基準 (threshold) を決めておき、基準値以上のエネルギー - が来たときのみ、測定値として記録している。エネルギー - の電器信号はパルスの高さ : (Pulse Height) を見ているわけであるが、この Pulse Height の立上り時間の差が、Pulse Height が低い場合は、無視できなくなる。

Pulse は様々な波形が観測されるが、この立上り部分のみ二次式として近似し、次に示す式を当てはめることで補正を行った。

$$t_0 = t_1 - \frac{C}{\sqrt{E}}$$

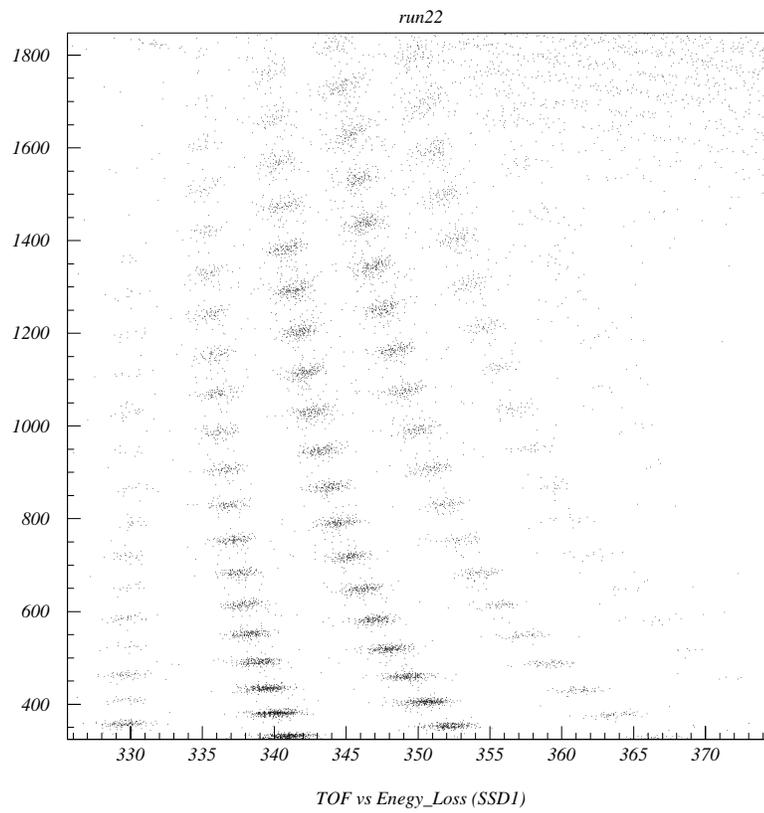
ΔT を補正すれば、先程の図 (4.3.3) の $A/Z=2$ のラインは直線になる。下図 (4.3.2) に Slew Correction 後の相関図を載せる。



横軸: TOF、縦軸: ΔE をとった。これは先の相関図と計算コードとを比較したものである。400[MeV] 以下では、1[ns] ほど誤差が生じた。

4.3.3 Energy Loss Calibration

TOFの数値を調節した後に、エネルギー損失についても Calibration を行った。例として以下の図をあげる。これは二次ビームを $\frac{A}{Z} = 2$ にあわせたものである。



(図 4.3.3) 横軸：TOF[ns]、縦軸 [MeV/n]

4.4 粒子識別

4.4.1 各核種にて分ける

前項までに時間及びエネルギーは校正した。では、実際に断面積測定をしたデ - タなどの破砕片が飛んで来ているかを見なければならぬ。実験では、デ - タの Run41~Run54 を断面積測定に使用した。今回は Run43 における TOF 及び、 ΔE を enewr 計算コードと比較することで粒子を識別した。以下にその様子を載せる。

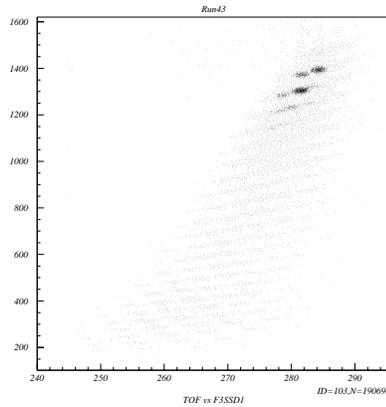
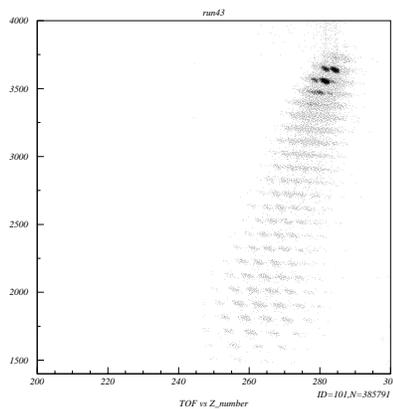


図 4.4.1:横軸に TOF[ns] 縦軸は SSD#1 による Δ [MeV] をとったもの

次に破砕片を Z ごと (各粒子ごと) に分けるために、 $Z = \frac{\Delta E}{\sqrt{TOF}}$ の関係を用いた。その様子を載せる。



Z = 一定の粒子がそれぞれ分離しているのが分かる。また、原子番号の大きい破砕片は full strip ではなく、一つまたは二つ程の電子が付いており、そのため分離が困難になる。その TOF や ΔE が近いために見にくくなってしまふここで Y 軸に Projection し、それぞれの粒子に Gate をかけ、この領域を通過した粒子のみを検出できるようにした。

4.4.2 Charged Particle の選別

今回測定した粒子は全て三枚目の SSD において止まることが、 $enewr$ の計算より分かっている。よって、三枚目までの Energy Loss を全て足し合わせることで、破砕片の全運動エネルギー - を知ることができる。これを E とすると、式 (2.3) のように、

$$E \propto Q \times TOF \quad (4.2)$$

となる。つまり破砕片は、TOF に反比例し破砕片の持つ電荷荷重状態を、分けることができる。前節の方法によって特定の Z を選んでおく。(Gate をかける)そして、Gate をかけた後に三枚目のまでエネルギー損失した量を足し合わせたものと TOF をグラフにすると、原子核に電子が付いたものとそうでないものに分けることができる。(その様子を下図 (4.4.2) に載せる。)

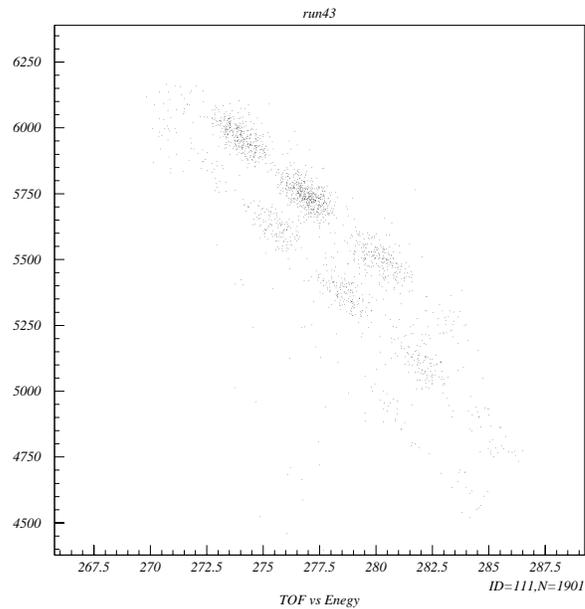


図 (4.4.2): Z の等しい粒子が $1/TOF$ に比例して並んでいる。

また TOF は A/Z に比例しているので、TOF の値が大きいほど質量数 : A が大きい原子核であることが分かる。

4.5 微分断面積導出

一次ビ - Δ ^{86}Kr の入射強度は、OKUNO の観測値に前述した (4.1) から電荷素量 $e=1.602 \times 10^{19}[\text{c}]$ で割ったものである。そのビ - Δ 量を N_0 として、測定した粒子数を N_{fr} として、次のような形で求めた。 $\sigma = \frac{d^2\sigma}{dP d\Omega}(\theta = 0)$

そして一般に

$$\frac{N_{fr}}{N_0} = n \cdot \Delta_t \cdot \sigma \Delta\Omega \Delta P = \left(\frac{N_A}{A_t} \right) \sigma \Delta_t \Omega \Delta P \tag{4.3}$$

である。

- N_0 : 二次ビ - Δ 量
- N_{fr} : 破碎片の収量
- N_A : アボガドロ数。 $6.02 \times 10^{23}[\text{個/mol}]$ とした。
- A_t : 標的核の原子量。 ^9Be より計算では $9[\text{g/mol}]$ とした。
- Δ_t : 標的核の厚さ。測定により $97[\text{mg/cm}^2]$
- $\Delta\Omega$: 角度アクセプタンス。今回は $5.0[\text{mstrad}]$
- ΔP : 運動量アクセプタンス。今回は $5.0 \times 10^{-3}[\%] \times P[\text{MeV/c}]$

これより、以下の式で求めた。

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dP} \left[\frac{\text{mbarn}}{\text{sr} \cdot (\text{MeV/c})} \right] = \left(\frac{N_{fr}}{N_0} \right) \cdot d \cdot \frac{1}{\Delta\Omega \Delta P} \tag{4.4}$$

このように求めた断面積の運動量分布は、以下の示すように非対称性が見られる。

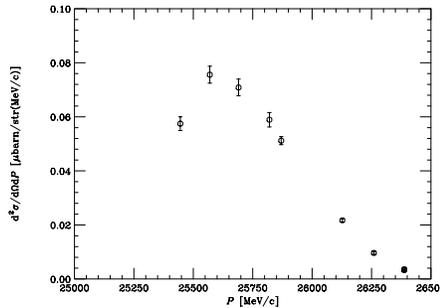


図 4.5: $^{80}\text{Ga}^{31+}$ の運動量分布の様子

第5章 まとめ

本実験では、65.891[MeV/n]の ^{86}Kr を入射核、 ^9Be を標的核として、入射核破砕反応における破砕片の反応率を測定した。得られた各粒子の運動量分布を計算コード INTENSITY2 と比較した。

今回は $^{79}\text{Ga}^{31+}$ から $^{81}\text{Ga}^{31+}$ について調べた。以下にその図を載せる。(図の数字は INTENSITY が今回の収量とどのくらいずれているのかを表している。)これによると、 A/Z が大きくなるにつれて、INTENSITY2 の予測が少なく見積もられていることが分かった。この理由の一つとして、INTENSITY2 が安定線に近い原子核の収量のデータに基づいていることがあげられる。

今後は、収量の荷電分布やより中性子過剰なデータを解析し、INTENSITY2 の改良を試みる必要がある。

Ga^{31+} を横軸 : A、縦軸 : 生成断面積 をとった

参考文献

- [1] 土記 康博 修士論文 (1994)
- [2] A.S.Goldhaber,Phys.Lett.53B,306(1974)
- [3] T.Kubo,et al.,Nucl.Inst.and.Meth.B70,309(1992)
- [4] 八木 浩輔著 基礎物理学シリーズ 4 原子核物理学

謝辞

この研究を行うにあたって、御協力、助言をして頂いた次の方々に感謝します。

私の指導教官である、東京工業大学の中村隆司助教授には、研究材料を与えて頂き、物理の基本、論文作成にいたるまで教えて頂きました。東京大学櫻井研究室の博士課程3年生である福田直樹氏には、お忙しい中、解析の手順や計算のチェックなどをして頂きました。氏の協力なくては本論文の完成は無かったものと思われます。同研究室の助手である青井考氏には、論文作成のための実験に参加させて頂きました。さらに、解析したデータを参考に頂いたことは、データのチェックに非常に役に立ちました。

最後に、中村研、旭研の方々にもいろいろな面で助けて頂きました。深く感謝致します。

第6章 Appendix

6.1 Glodhaber の理論

入射核破砕反応における破砕片の運動量分布が、入射核の核子の Fermi motion に基づく幅を持つ Gaussian になるというモデルである。

質量数:A の入射核が質量数:K を生成すると考える。また、入射核を構成する核子と核子の重心に対する運動量として、入射核内部における核子の運動量の和の2乗の平均を0として、

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^A \mathbf{p}_i\right)^2 &= 0 \\ A\langle p^2 \rangle + \sum_{i \neq j} \langle p_i \cdot p_j \rangle &= 0 \end{aligned}$$

ここで、 $\langle p_i \cdot p_j \rangle$ を全ての $i \neq j$ についての平均として考えることにする。よって、

$$\begin{aligned} A\langle p^2 \rangle + \langle p_i \cdot p_j \rangle \cdot A C_2 \cdot 2 &= 0 \\ \langle p_i \cdot p_j \rangle &= -\frac{p^2}{A-1} \end{aligned}$$

また、同様にして破砕片についても考える。

反応後破砕片が重心に対して持つ運動量 $\langle p_K^2 \rangle$ は前述の式を使って、以下のように求める。

$$\begin{aligned} \langle p_K^2 \rangle &= \left\langle \left(\sum_{i=1}^K \mathbf{p}_i \right)^2 \right\rangle \\ &= K\langle p^2 \rangle + \langle p_i \cdot p_j \rangle \cdot K C_2 \cdot 2 \\ &= K\langle p^2 \rangle - K(K-1) \cdot \frac{\langle p^2 \rangle}{A-1} \\ &= \frac{K(A-K)}{A-1} \langle p^2 \rangle \end{aligned}$$

ここで、特定の方向の運動量分布の幅： $\sigma \langle p_K^2 \rangle$ が特定の方向によらず、破砕片の3方向の運動量の平均であるとする。このとき

$$\sigma = \frac{\sigma \langle p_K^2 \rangle}{3} \quad (6.1)$$

$$= \frac{K(A-K)}{A-1} \frac{\sigma \langle p_K^2 \rangle}{3} \quad (6.2)$$

$$(6.3)$$

よって、 $\frac{\langle p^2 \rangle}{3} \equiv \sigma_0^2$ と置くと、

$$\sigma = \frac{K(A-K)}{A-1} \sigma_0^2 \quad (6.4)$$

6.2 荷電粒子のエネルギー損失

一般に荷電粒子がある物質を通過するとき、その物質の構成原子の電子と電磁的に相互作用を起こすことが知られている。このとき構成原子は励起されるか、電離されて電子とイオンに分かれる。一方入射粒子は、相互作用の分だけエネルギーを奪われる。このエネルギー損失を古典的に考えてみる。

電荷： Ze 、質量： M 、速度： V の入射粒子と物質中の一つの核外電子（電荷： $-e$ 質量： m とする）との相互作用を考える。ここで電子は原子によって束縛されているが、ここでは自由電子でかつ初速が0であるものとする。これは入射粒子から受ける力が束縛力よりも十分に大きく、束縛されている原子における電子の速度と比べて、 V が大きいという仮定をもとにしている。また、この仮定により入射粒子は電子によってその速度の方向を変えずに直進することができる。この関係を下図 6.1 に示す。また、 b は衝突パラメーターである。

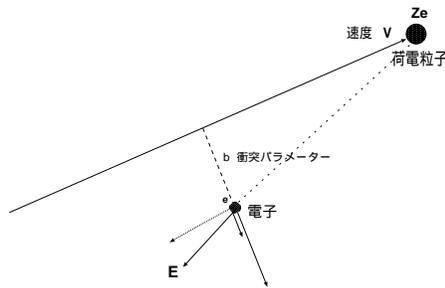


図 6.1: 物質中をほとんど直進して止まる。また、軽い電子との相互作用するのが大部分のために方向は変わらない。

上図のように、電子は入射粒子の通過に伴う電場により力を受ける。この時入射粒子の速度と平行な成分は、左右の対称性により積分すると0になる。よって、

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e \mathbf{E}_{\parallel} dt = 0$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} m \frac{dv}{dt} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} e \mathbf{E}_{\perp} dt$$

$$p = \int_{-\infty}^{+\infty} e \mathbf{E}_{\perp} dt$$

(p は電子の得た運動量である。)

ここで、衝突パラメーター： b を半径とする無限に長い円筒を考えると、ガウスの法則により、

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_{\perp} 2\pi b dx = 4\pi z e$$

であるから、

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_{\perp} dx = 2 \frac{\pi z e}{b}$$

となる。よって、先ほどの式から以下の式が求まる。

$$p = e \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_{\perp} dx = e \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_{\perp} \frac{dt}{V} = \frac{2ze^2}{Vb} \quad (6.5)$$

$$(6.6)$$

$E = \frac{p^2}{2m}$ であるから、電子の得るエネルギー（入射粒子の失うエネルギー）は

$$\Delta E = \frac{p^2}{2m} = \frac{2z^2 e^4}{mb^2 V^2} \propto \frac{z^2}{V^2} \quad (6.7)$$

のように求まる。

このエネルギー損失の特徴は、入射粒子に関する物理量が V^2 と z^2 のみということにある。したがって、電荷が等しい粒子に関しては、入射速度： V が等しく測れば、損失は各粒子とも同じになる。また、エネルギーを等しく測れば、エネルギーは質量に比例するから、 $E = \frac{1}{2}mV^2$ この損失の曲線は平行に移動する。

さらに、進路 l [cm] あたりで、 $b \sim b+db$ 間で起こる衝突回数は、物質の原子密度を n [$1/\text{cm}^3$] として、 $2\pi n Z b db$ となる。よって??式を用いて b について積分することにより、入射粒子の l [cm] 当たりのエネルギー損失は、以下のように求まる。

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mV^2} nZ \ln \frac{b_{max}}{b_{min}} \quad (6.8)$$

以上は古典的な立場から計算したが、量子力学的な計算を相対論的效果も考慮して行くと、以下に示す Bethe-Bloch の式が与えられる。

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mV^2} nZ \left\{ \ln \frac{2mV^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right\} \quad (6.9)$$

ここで I は物質原子の平均の電離電圧であり、 $\beta = V/c$ である。この式の数部分でのきき方は非常に鈍いので、近似式 (6.8) により本質的なことはいえる。

6.3 TDC Calibration

チャンネルと時間が一次式で表せるものとして、以下のように校正をした。

まず Time Cibrator¹を用いて 20[ns] おきに信号を送り、そのチャンネルを読むことで、チャンネルと時間との関係を一次近似により導き出した。以下にその表を載せる。

Run1001		Run1002	
channel	Δ time	channel	Δ time
71.37	200.33	71.37	200.33
271.70	200.34	271.70	200.34
472.04	200.33	472.04	200.50
672.37	204.51	672.54	204.34
876.88	200.33	876.88	200.33
1077.21	200.34	1077.21	200.34
1277.55	200.33	1277.55	200.33
1477.88	200.33	1477.88	200.33
1678.21	200.51	1678.21	200.34
1882.72		1878.55	
Average	200.80	Average	201.26

これより、RF のチャンネルと時間の関係は、 $\frac{20.00}{200.80} = 0.09960159$

ここで、図 (3.4) より、RF 信号の基準は実際に Trigger である PPAC を通過した後に来る信号をとっていることから、負の比例関係となる。

$$TOF[\text{ns}] = -0.09969159 \times [\text{チャンネル}] + b$$

¹20[ns] 置きに信号を送る装置

6.4 Differential Cross Section

今回の解析によって、得られた微分断面積を掲載する。

$^{79}\text{Zn}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Section	Error of Cross Section
2.53E+04	3.24E-03	2.12E-04
2.54E+04	2.01E-03	2.39E-04
2.55E+04	1.91E-03	1.60E-04
2.55E+04	1.48E-03	2.68E-04
$^{78}\text{Zn}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Section	Error of Cross Section
2.49E+04	1.37E-02	1.38E-03
2.50E+04	1.89E-02	1.53E-03
2.47E+04	1.93E-02	1.61E-03
2.46E+04	7.65E-03	9.38E-04
2.53E+04	1.20E-02	4.08E-04
2.50E+04	1.99E-02	9.45E-04
2.54E+04	7.87E-03	4.73E-04
2.55E+04	4.14E-03	2.36E-04
2.55E+04	8.08E-03	6.26E-04
$^{77}\text{Zn}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Section	Error of Cross Section
2.49E+04	1.03E-01	3.77E-03
2.50E+04	7.96E-02	3.15E-03
2.47E+04	1.12E-01	3.87E-03
2.46E+04	1.15E-01	3.63E-03
2.53E+04	2.79E-02	6.21E-04
2.50E+04	7.43E-02	1.82E-03
$^{76}\text{Zn}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Section	Error of Cross Section
2.49E+04	1.96E-01	5.19E-03
2.50E+04	1.04E-01	3.60E-03
2.47E+04	2.63E-01	5.94E-03
2.46E+04	3.49E-01	6.33E-03
2.50E+04	8.65E-02	1.97E-03

$^{75}\text{Zn}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	1.01E-01	3.74E-03
2.47E+04	2.30E-01	5.55E-03
2.46E+04	4.31E-01	7.04E-03

$^{77}\text{Zn}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Section	Error of Cross Section
2.44E+04	3.29E-03	2.17E-04
2.42E+04	1.95E-03	3.01E-04
2.46E+04	3.39E-03	3.15E-04
2.47E+04	2.17E-03	1.74E-04
2.47E+04	4.69E-03	4.85E-04
$^{76}\text{Zn}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Section	Error of Cross Section
2.40E+04	1.03E-02	1.21E-03
2.42E+04	1.52E-02	1.40E-03
2.39E+04	1.63E-02	1.50E-03
2.44E+04	1.29E-02	4.29E-04
2.42E+04	1.48E-02	8.27E-04
2.46E+04	1.08E-02	5.62E-04
2.47E+04	8.68E-03	3.47E-04
2.47E+04	6.22E-03	5.59E-04
$^{75}\text{Zn}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Section	Error of Cross Section
2.40E+04	7.18E-02	3.20E-03
2.42E+04	4.76E-02	2.48E-03
2.39E+04	5.59E-02	2.78E-03
2.38E+04	7.66E-02	3.02E-03
2.44E+04	2.81E-02	6.34E-04
2.42E+04	5.75E-02	1.63E-03
2.46E+04	1.34E-02	6.26E-04
2.47E+04	8.06E-03	3.34E-04
2.47E+04	1.40E-02	8.37E-04
$^{74}\text{Zn}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Section	Error of Cross Section
2.40E+04	7.53E-02	3.28E-03
2.42E+04	5.39E-02	2.64E-03
2.39E+04	9.18E-02	3.56E-03
2.38E+04	1.27E-01	3.88E-03
2.44E+04	2.14E-02	5.53E-04
2.42E+04	5.28E-02	1.56E-03

$^{73}\text{Zn}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.40E+04	5.76E-02	2.87E-03
2.42E+04	4.00E-02	2.27E-03
2.39E+04	8.81E-02	3.49E-03
2.38E+04	1.64E-01	4.42E-03
2.42E+04	3.15E-02	1.21E-03

$^{75}\text{Zn}^{28+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.36E+04	6.29E-04	9.65E-05
2.37E+04	8.00E-04	1.56E-04
2.38E+04	9.34E-04	1.16E-04
2.38E+04	6.33E-04	1.82E-04
$^{74}\text{Zn}^{28+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.33E+04	2.06E-03	5.24E-04
2.36E+04	1.49E-03	1.48E-04
2.34E+04	2.02E-03	3.11E-04
2.37E+04	1.35E-03	2.03E-04
2.38E+04	7.00E-04	1.00E-04
2.38E+04	1.27E-03	2.57E-04
$^{73}\text{Zn}^{28+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.32E+04	7.35E-03	1.04E-03
2.33E+04	7.88E-03	1.03E-03
2.31E+04	8.45E-03	1.10E-03
2.30E+04	7.33E-03	9.51E-04
2.36E+04	3.44E-03	2.26E-04
2.34E+04	4.72E-03	4.76E-04
2.37E+04	2.71E-03	2.87E-04
2.38E+04	1.60E-03	1.52E-04
2.38E+04	2.11E-03	3.31E-04
$^{72}\text{Zn}^{28+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.32E+04	7.76E-03	1.07E-03
2.33E+04	6.85E-03	9.56E-04
2.31E+04	1.65E-02	1.54E-03
2.30E+04	1.38E-02	1.30E-03
2.36E+04	1.95E-03	1.70E-04
2.34E+04	5.17E-03	4.98E-04
2.37E+04	1.54E-03	2.16E-04
2.38E+04	3.76E-03	2.33E-04
2.38E+04	2.43E-03	3.55E-04

$^{71}\text{Zn}^{28+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.32E+04	4.49E-03	8.15E-04
2.33E+04	4.11E-03	7.41E-04
2.31E+04	5.92E-03	9.21E-04
2.30E+04	1.73E-02	1.46E-03
2.34E+04	2.02E-03	3.11E-04
2.37E+04	2.71E-03	2.87E-04

$^{82}\text{Ga}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	7.09E-02	3.07E-03
2.58E+04	5.89E-02	2.67E-03
2.56E+04	7.56E-02	3.13E-03
2.54E+04	5.75E-02	2.53E-03
2.61E+04	2.17E-02	5.39E-04
2.59E+04	5.12E-02	1.49E-03
2.63E+04	9.64E-03	5.15E-04
2.64E+04	3.24E-03	2.05E-04
2.64E+04	3.62E-03	4.13E-04
$^{81}\text{Ga}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.56E+04	5.92E-03	8.75E-04
2.61E+04	7.28E-03	3.12E-04
2.63E+04	5.31E-03	3.82E-04
2.64E+04	3.16E-03	2.03E-04
2.64E+04	2.34E-03	3.31E-04
$^{80}\text{Ga}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	7.09E-02	3.07E-03
2.58E+04	5.89E-02	2.67E-03
2.56E+04	7.56E-02	3.13E-03
2.54E+04	5.75E-02	2.53E-03
2.61E+04	2.17E-02	5.39E-04
2.59E+04	5.12E-02	1.49E-03
2.63E+04	9.64E-03	5.15E-04
2.64E+04	3.24E-03	2.05E-04
2.64E+04	3.62E-03	4.13E-04
$^{79}\text{Ga}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	1.57E-01	4.57E-03
2.58E+04	1.03E-01	3.53E-03
2.56E+04	2.34E-01	5.51E-03
2.54E+04	3.22E-01	5.98E-03
2.61E+04	1.06E-02	3.77E-04
2.59E+04	8.18E-02	1.88E-03
2.63E+04	1.56E-03	2.07E-04

$^{78}\text{Ga}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	1.05E-01	3.74E-03
2.58E+04	3.06E-02	1.92E-03
2.56E+04	2.69E-01	5.90E-03
2.54E+04	4.92E-01	7.40E-03
2.61E+04	3.73E-04	7.07E-05
2.59E+04	2.44E-02	1.03E-03

$^{77}\text{Ga}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	9.41E-03	1.12E-03
2.56E+04	4.16E-02	2.32E-03
2.54E+04	1.54E-01	4.14E-03

$^{80}\text{Ga}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.53E+04	1.81E-03	1.58E-04
2.54E+04	2.27E-03	2.54E-04
2.55E+04	2.57E-03	1.86E-04
2.55E+04	2.51E-03	3.49E-04
$^{79}\text{Ga}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	8.77E-03	1.10E-03
2.50E+04	7.67E-03	9.78E-04
2.47E+04	8.48E-03	1.06E-03
2.53E+04	1.23E-02	4.12E-04
2.50E+04	1.13E-02	7.12E-04
2.54E+04	1.16E-02	5.74E-04
2.55E+04	8.32E-03	3.34E-04
2.55E+04	8.82E-03	6.54E-04
$^{78}\text{Ga}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	6.56E-02	3.01E-03
2.50E+04	5.83E-02	2.70E-03
2.47E+04	5.21E-02	2.64E-03
2.46E+04	4.59E-02	2.30E-03
2.53E+04	3.18E-02	6.62E-04
2.50E+04	6.22E-02	1.67E-03
2.54E+04	2.12E-02	7.77E-04
2.55E+04	1.14E-02	3.92E-04
2.55E+04	1.22E-02	7.69E-04
$^{77}\text{Ga}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	1.01E-01	3.74E-03
2.50E+04	8.50E-02	3.26E-03
2.47E+04	1.37E-01	4.29E-03
2.46E+04	1.72E-01	4.44E-03
2.53E+04	1.76E-02	4.94E-04
2.50E+04	7.68E-02	1.85E-03
2.54E+04	6.55E-03	4.31E-04
2.55E+04	2.51E-03	1.83E-04
2.55E+04	3.01E-03	3.82E-04

$^{76}\text{Ga}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	7.55E-02	3.23E-03
2.50E+04	3.36E-02	2.05E-03
2.47E+04	1.31E-01	4.18E-03
2.46E+04	2.14E-01	4.96E-03
2.53E+04	1.91E-03	1.63E-04
2.50E+04	2.39E-02	1.03E-03

$^{75}\text{Ga}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	8.96E-03	1.11E-03
2.47E+04	2.47E-02	1.82E-03
2.46E+04	7.89E-02	3.01E-03

$^{78}\text{Ga}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.47E+04	4.45E-04	1.50E-04

$^{77}\text{Ga}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.40E+04	7.89E-04	3.35E-04
2.42E+04	2.15E-03	5.26E-04
2.44E+04	2.28E-03	1.81E-04
2.42E+04	1.95E-03	3.01E-04
2.46E+04	2.55E-03	2.74E-04
2.47E+04	2.06E-03	1.69E-04
2.47E+04	2.09E-03	3.24E-04

$^{76}\text{Ga}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.40E+04	9.07E-03	1.14E-03
2.42E+04	6.78E-03	9.35E-04
2.39E+04	6.94E-03	9.80E-04
2.38E+04	7.08E-03	9.18E-04
2.44E+04	4.44E-03	2.52E-04
2.42E+04	7.92E-03	6.06E-04
2.46E+04	3.36E-03	3.14E-04
2.47E+04	2.10E-03	1.71E-04
2.47E+04	1.78E-03	2.99E-04

$^{75}\text{Ga}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.40E+04	1.05E-02	1.22E-03
2.42E+04	9.42E-03	1.10E-03
2.39E+04	1.22E-02	1.30E-03
2.38E+04	1.71E-02	1.43E-03
2.44E+04	2.38E-03	1.84E-04
2.42E+04	7.38E-03	5.85E-04
2.46E+04	1.34E-03	1.98E-04
2.47E+04	5.35E-04	8.62E-05

$^{74}\text{Ga}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.40E+04	7.30E-03	1.02E-03
2.42E+04	4.46E-03	7.59E-04
2.39E+04	8.77E-03	1.10E-03
2.38E+04	1.98E-02	1.53E-03
2.44E+04	4.79E-04	8.28E-05
2.42E+04	5.32E-03	4.96E-04

$^{73}\text{Ga}^{29+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.40E+04	1.58E-03	4.74E-04
2.39E+04	1.63E-03	4.75E-04
2.38E+04	5.00E-03	7.71E-04

$^{83}\text{Ge}^{32+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.65E+04	1.05E-01	3.69E-03
2.67E+04	8.42E-02	3.14E-03
2.64E+04	7.47E-02	3.06E-03
2.70E+04	2.90E-02	6.13E-04
2.67E+04	8.52E-02	1.89E-03
2.71E+04	1.01E-02	5.18E-04
2.72E+04	7.40E-04	9.65E-05
2.72E+04	1.85E-03	2.90E-04

$^{82}\text{Ge}^{32+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.65E+04	4.24E-01	7.40E-03
2.67E+04	2.34E-01	5.23E-03
2.64E+04	5.64E-01	8.41E-03
2.63E+04	8.13E-01	9.36E-03
2.70E+04	1.68E-02	4.66E-04
2.67E+04	1.75E-01	2.71E-03
2.71E+04	5.38E-04	1.20E-04
2.72E+04	1.91E-03	1.55E-04

$^{81}\text{Ge}^{32+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.65E+04	3.81E-01	7.02E-03
2.67E+04	9.17E-02	3.27E-03
2.64E+04	9.30E-01	1.08E-02
2.63E+04	1.90E+00	1.43E-02
2.67E+04	5.61E-02	1.53E-03

$^{80}\text{Ge}^{32+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.65E+04	3.22E-02	2.04E-03
2.64E+04	1.75E-01	4.68E-03
2.63E+04	6.83E-01	8.58E-03

$^{83}\text{Ge}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.64E+04	4.06E-03	2.30E-04
2.64E+04	3.05E-03	3.79E-04
$^{82}\text{Ge}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.61E+04	3.06E-02	6.40E-04
2.59E+04	2.34E-02	1.01E-03
2.63E+04	3.03E-02	9.13E-04
2.64E+04	2.67E-02	5.89E-04
2.64E+04	2.50E-02	1.08E-03
$^{81}\text{Ge}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	1.74E-01	4.82E-03
2.58E+04	1.75E-01	4.59E-03
2.56E+04	1.37E-01	4.22E-03
2.54E+04	1.05E-01	3.42E-03
2.61E+04	1.46E-01	1.40E-03
2.59E+04	2.20E-01	3.08E-03
2.63E+04	8.71E-02	1.55E-03
2.64E+04	4.43E-02	7.59E-04
2.64E+04	4.55E-02	1.46E-03
$^{80}\text{Ge}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	6.08E-01	9.01E-03
2.58E+04	4.60E-01	7.45E-03
2.56E+04	6.41E-01	9.11E-03
2.54E+04	6.83E-01	8.72E-03
2.61E+04	9.82E-02	1.15E-03
2.59E+04	3.92E-01	4.12E-03
2.63E+04	3.27E-02	9.47E-04
2.64E+04	8.25E-03	3.27E-04
2.64E+04	6.39E-03	5.48E-04

$^{79}\text{Ge}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	4.89E-01	8.07E-03
2.58E+04	2.26E-01	5.22E-03
2.56E+04	8.96E-01	1.08E-02
2.54E+04	1.44E+00	1.27E-02
2.61E+04	9.56E-03	3.58E-04

$^{78}\text{Ge}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	6.38E-02	2.92E-03
2.56E+04	2.11E-01	5.22E-03
2.54E+04	5.45E-01	7.79E-03

$^{81}\text{Ge}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.55E+04	1.88E-03	1.59E-04
2.55E+04	1.28E-03	2.49E-04
$^{80}\text{Ge}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.53E+04	9.39E-03	3.60E-04
2.54E+04	1.02E-02	5.39E-04
2.55E+04	1.06E-02	3.78E-04
2.55E+04	8.77E-03	6.52E-04
$^{79}\text{Ge}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	3.47E-02	2.19E-03
2.50E+04	2.97E-02	1.92E-03
2.47E+04	1.70E-02	1.51E-03
2.46E+04	2.13E-02	1.57E-03
2.53E+04	2.88E-02	6.31E-04
2.50E+04	3.59E-02	1.27E-03
2.54E+04	2.42E-02	8.28E-04
2.55E+04	1.44E-02	4.39E-04
2.55E+04	1.20E-02	7.64E-04
$^{78}\text{Ge}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	5.68E-02	2.80E-03
2.50E+04	6.14E-02	2.77E-03
2.47E+04	7.18E-02	3.10E-03
2.46E+04	7.04E-02	2.85E-03
2.53E+04	1.94E-02	5.17E-04
2.50E+04	6.32E-02	1.68E-03
2.54E+04	9.13E-03	5.09E-04
2.55E+04	3.21E-03	2.08E-04
2.55E+04	2.96E-03	3.79E-04

$^{77}\text{Ge}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	5.95E-02	2.86E-03
2.50E+04	3.20E-02	2.00E-03
2.47E+04	9.11E-02	3.49E-03
2.46E+04	1.23E-01	3.76E-03
2.53E+04	2.99E-03	2.03E-04
2.50E+04	2.79E-02	1.12E-03

$^{76}\text{Ge}^{30+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.47E+04	2.21E-02	1.72E-03
2.46E+04	5.72E-02	2.56E-03

$^{85}\text{As}^{33+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.65E+04	8.40E-02	3.30E-03
2.67E+04	2.88E-02	1.83E-03
2.64E+04	1.59E-01	4.47E-03
2.63E+04	2.97E-01	5.66E-03
$^{84}\text{As}^{33+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.652E+04	4.322E-01	7.475E-03
2.665E+04	3.716E-02	2.084E-03
2.639E+04	1.689E+00	1.455E-02
2.627E+04	3.533E+00	1.952E-02
2.724E+04	7.601E-02	9.779E-04
$^{83}\text{As}^{33+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.64E+04	1.67E-01	4.58E-03
2.63E+04	1.36E+00	1.21E-02
2.72E+04	6.41E-03	2.84E-04

$^{85}\text{As}^{32+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.71E+04	1.08E-02	5.35E-04
2.72E+04	5.92E-03	2.73E-04
2.72E+04	8.41E-03	6.19E-04
$^{84}\text{As}^{32+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	1.83E-01	4.95E-03
2.58E+04	2.99E-01	6.01E-03
2.61E+04	3.06E-01	2.02E-03
2.59E+04	3.90E-01	4.11E-03
2.63E+04	1.84E-01	2.25E-03
2.64E+04	7.85E-02	1.01E-03
2.64E+04	7.94E-02	1.93E-03
$^{83}\text{As}^{32+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	1.58E+00	1.45E-02
2.58E+04	1.36E+00	1.28E-02
2.56E+04	1.54E+00	1.41E-02
2.54E+04	1.10E+00	1.10E-02
2.61E+04	2.69E-01	1.90E-03
2.59E+04	1.22E+00	7.26E-03
2.63E+04	6.00E-02	1.28E-03
2.64E+04	6.62E-03	2.93E-04
2.64E+04	5.72E-03	5.18E-04
$^{82}\text{As}^{32+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	2.25E+00	1.73E-02
2.58E+04	8.57E-01	1.02E-02
2.56E+04	4.04E+00	2.29E-02
2.54E+04	6.20E+00	2.63E-02
2.59E+04	5.78E-01	5.00E-03
$^{81}\text{As}^{32+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.57E+04	1.98E-01	5.14E-03
2.56E+04	9.07E-01	1.08E-02
2.54E+04	2.57E+00	1.69E-02

$^{83}\text{As}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.61E+04	1.06E-01	1.19E-03
2.63E+04	1.44E-02	6.29E-04
2.64E+04	2.64E-02	5.85E-04
2.64E+04	2.71E-02	1.13E-03
$^{82}\text{As}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	5.11E-02	2.65E-03
2.50E+04	6.14E-02	2.77E-03
2.53E+04	9.44E-02	1.14E-03
2.50E+04	1.15E-01	2.27E-03
2.54E+04	1.04E-01	1.72E-03
2.55E+04	7.41E-02	9.97E-04
2.55E+04	6.65E-02	1.80E-03
$^{81}\text{As}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	2.04E-01	5.30E-03
2.50E+04	2.16E-01	5.19E-03
2.46E+04	1.96E-01	4.75E-03
2.53E+04	1.17E-02	4.02E-04
2.50E+04	2.52E-01	3.36E-03
2.54E+04	4.62E-02	1.14E-03
2.55E+04	1.65E-02	4.70E-04
2.55E+04	1.19E-02	7.61E-04
$^{80}\text{As}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.49E+04	2.46E-01	5.83E-03
2.50E+04	1.51E-01	4.34E-03
2.47E+04	3.69E-01	7.02E-03
2.46E+04	5.28E-01	7.79E-03
2.50E+04	1.44E-01	2.53E-03
$^{79}\text{As}^{31+}$		
Momentum[MeV/c]	Differential Cross Seciton	Error of Cross Section
2.47E+04	6.67E-02	2.99E-03
2.46E+04	1.53E-01	4.20E-03