

2011 年度

学士論文

中性子ノックアウト反応による中性子
過剰 Mg 同位体のインビーム γ 線核分光

イギスン

学籍番号 07B01270

指導教官 中村隆司

東京工業大学 理学部 物理学科

平成 24 年 2 月 24 日

概要

近年重イオン加速器の発達に伴い、大強度の不安定核ビームの生成が可能になり、束縛限界(ドリップライン)に至る中性子過剰核の研究が急速に進展しつつある。こうした中性子過剰核の中には β 安定線付近の原子核にはない中性子ハローや中性子スキンと呼ばれる特異構造が発見されていて、さらに、興味深いクラスター構造の可能性も指摘されている。本研究で対象とする中性子過剰な ^{37}Mg 同位体は Island of Inversion に位置するハロー核の候補として注目されている。

本研究では ^{37}Mg のハロー構造や殻構造を調べるため、不安定核のインビーム γ 線分光を用いた実験を行った。実験は理化学研究所にある加速器研究施設(RIBF)においてRIビーム生成分離装置(BigRIPS)を用いて行われた。BigRIPSによって得られた ^{37}Mg の不安定核ビームを鉛や炭素標的に入射させ、1中性子ノックアウト反応を用いて励起した ^{36}Mg を生成した。この ^{36}Mg が脱励起する際に放出される γ 線のエネルギーを、186本のNaI(Tl)シンチレーター(DALI2)により測定した。その結果、 ^{37}Mg の 2_1^+ 準位に対応する γ 線を同定した。この γ 線の収量から ^{37}Mg のコア励起の断面積が導出されるが、これは ^{37}Mg のハロー構造の研究にも重要である。

目次

第1章 序	1
第2章 実験概要	4
2.1 中性子過剰核の γ 線分光法	4
2.1.1 インビーム γ 線分光法	4
2.2 不安定核ビームの生成	5
2.2.1 SRC	5
2.2.2 BigRIPS	6
2.3 実験セットアップ	7
2.3.1 実験セットアップ	7
2.3.2 ビームと標的	8
2.3.3 入射粒子測定系	8
2.3.4 γ 線検出系	9
2.3.5 ZDS	10
2.4 データ収集システム	11
2.4.1 トリガー回路	11
第3章 解析	12
3.1 粒子識別	12
3.1.1 BigRIPSにおける二次ビームの粒子識別	12
3.1.2 ZDSにおけるフラグメントの粒子識別	13
3.2 γ 線検出器系	14
3.2.1 NaI 検出器のエネルギー較正	14
3.2.2 NaI 検出器のGainのゆらぎ	16
3.2.3 ドップラー補正	17
3.2.4 NaI シンチレーターの時間情報	17
第4章 結果と議論	19
4.1 ^{37}Mg の1中性子ノックアウト反応	19
4.1.1 γ 線のエネルギースペクトル	19
4.1.2 1中性子ノックアウト反応の断面積	20

4.2 ^{37}Mg の配位	21
第5章 まとめと今後の展望	22
第6章 付録	23
A DALI2 の設置座標	23
B Bethe-Bloch の式	26

目次

図 1.1	$Z \leq 12$ における核図表	1
図 1.2	中性子ハロー核の例	2
図 1.3	Mg 同位体の 2_1^+ 準位のエネルギーと中性子過剰 Ne、Mg、Si 同位体の S_n	3
図 2.1	^{37}Mg と炭素標的の 1 中性子ノックアウト反応の模式図	4
図 2.2	RIBF の概観図	5
図 2.3	RIBF の加速能力	6
図 2.4	RIBF のサイクロトロンの一部と BigRIPS の概観図	6
図 2.5	BigRIPS からビーム下流までのセットアップ	7
図 2.6	DALI2 の配置図	10
図 2.7	トリガー回路	11
図 3.1	PI 図@BigRIPS (AoZ vs Z)	12
図 3.2	図 3.1 の一定の領域でカットして横軸に射影させた図	13
図 3.3	ZDS での PI 図から一定の領域をカットして射影させた図	14
図 3.4	識別番号 1 番の NaI 検出器に対する較正線	15
図 3.5	検出器の ID と出力の相関図	15
図 3.6	識別番号 1 番の検出器の時間変化による Gain のゆらぎ	16
図 3.7	識別番号 1 番の検出器の時間変化による Gain のゆらぎ	16
図 3.8	ドップラー補正前後比較グラフ	17
図 3.9	反応の際の NaI シンチレーターの NaI トリガーにおける時間スペクトル	18
図 3.10	時間情報の適用前後比較グラフ	18
図 4.1	$^{37}\text{Mg} + \text{C} \rightarrow ^{36}\text{Mg}$ 反応からの γ 線ピークのグラフ	20

表目次

表 2.1	二次標的の種類と厚さ	8
表 2.2	BigRIPS のプラスチックシンチレーターの情報	8
表 2.3	BigRIPS と ZDS での PPAC の情報	9
表 2.4	ZDS に置かれた検出器の情報	10
表 3.1	γ 線源と光電ピークのエネルギー	14
表 4.1	断面積計算のパラメータ	21
表 A	DALI2 の設置座標	23

第1章 序

近年、重イオン加速器技術の進展により、核破碎反応を用いた広範囲の不安定核ビームの生成が可能となった。これに伴い、これまで研究困難であった不安定核領域において原子核構造の研究が進展しつつある。現在 RIKEN (RIBF)、MSU (NSCL、米)、GSI (独)、GANIL (仏) においてこうした研究が活発に進んでいる。

図 1.1 に $Z \leq 12$ における核図表を示す。右下の境界および左上の境界は、それぞれ中性子ドリップライン、陽子ドリップラインと呼ばれ、中性子束縛限界および陽子束縛限界を表す。中性子ドリップライン近傍には、中性子ハローや中性子スキンなど、安定線付近の原子核には見られない特異な構造が観測され、注目されている。中性子ハロー核とは、フェルミ面近傍の価中性子が量子トンネル効果によって一粒子ポテンシャルの外に染み出した状態として理解されている。その半径は通常の原子核の2倍に達する場合もある。図 1.2 に中性子ハロー核の例として ^{31}Ne の模式図を示す。これは東工大グループがクーロン分解反応を用いて発見したハロー核で、 ^{30}Ne コアの周りに1中性子がハローを作る構造を持つ [1]。 ^{31}Ne は現在発見されている最も重いハロー核である。

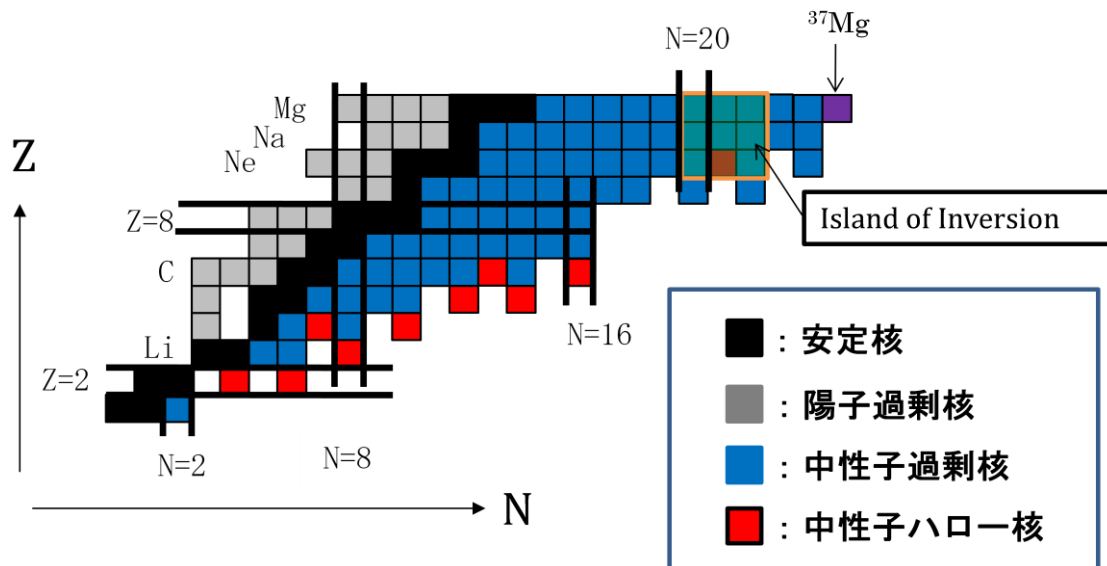


図 1.1 : $Z \leq 12$ における核図表。縦軸が陽子数 Z 、横軸が中性子数 N で黒が安定核灰色が陽子過剰核、青は中性子過剰核、赤は認められた中性子ハロー核を意味する。黒線で表示したのは魔法数で、 $N=20$ 近傍の枠は魔法数が消失される Island of Inversion という領域。

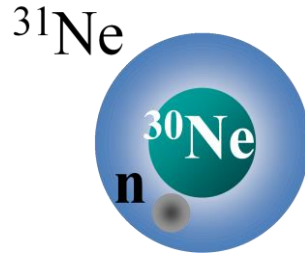


図 1.2 : 中性子ハロー核の例。 ^{31}Ne のコアとして ^{30}Ne が存在し、1 中性子がハローを作るような構造である。

中性子ハロー構造は、(1) 中性子分離エネルギーが小さくかつ (2) 価中性子の軌道角運動量(1)が小さい(s 軌道や p 軌道)場合に現れる。後者については遠心力ポテンシャル $V(r)$

$$V(r) = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu r^2} \quad (1.1)$$

が関与しており、 $l=0, 1$ のように小さい場合のみトンネル効果が起こりやすくなるためである。 ^{31}Ne の場合は、 S_n が数百 keV 程度で、価中性子が $p_{3/2}$ 軌道を占めていると考えられる。 ^{31}Ne は $N=21$ なので通常は $f_{7/2}$ 軌道の価中性子であるが、クーロン分解の結果 $p_{3/2}$ 軌道を占有していることが分かる。これは $N=20, 28$ の魔法数が破れていることを示している。この結果はこの領域が Island of Inversion と呼ばれる領域であることと合致する。このような興味深い現象を理解するためには、原子核の離散準位のエネルギーやスピン・パリティ、さらには一粒子軌道の配位に関する情報を得ることが重要となる。

本研究で対象とする ^{37}Mg は、Island of Inversion に位置する 1 中性子ハロー核の候補として注目されている。 ^{37}Mg のスピン・パリティが $3/2^-$ であると仮定すると、価中性子が pf の軌道を占め、次の配位を取ると考えられている。

$$|^{37}\text{Mg}(3/2^-) \rangle = \alpha^2 |^{36}\text{Mg}(g.s: 0^+) \otimes v p_{3/2} \rangle + \beta^2 |^{36}\text{Mg}(2^+) \otimes v f_{7/2} \rangle + \dots \quad (1.2)$$

しかし、これらを取り得る配位の構成比(分光的因子) α^2 、 β^2 は、これまで独立に求められていない。分光的因子は微視的な核構造理論と計測を結びつける重要な量であり、殻構造の変形がハロー構造とどのような関係にあるかを議論する上で重要な意味を持つ。

本論文では、1 中性子ノックアウト反応を用いた中性子過剰核 ^{37}Mg の研究を行う。 ^{36}Mg の終状態を特定することで(1.2)式の α^2 、 β^2 を特定することができる。特に β^2 の項は $^{36}\text{Mg}(2^+)$ からの γ 線測定を行うので測定が可能である。これまでの研究により、 ^{37}Mg の 1 中性子分離エネルギーは $S_n=0.25(1.03)\text{MeV}$ と求められていて[2]、 ^{37}Mg のコアを規定する ^{36}Mg に関しては、A. Gade らが NSCL (National Superconducting Cyclotron Laboratory) で行った実験により、660(6) keV の光電ピークが観測されている[3]。図1.3にA. Gade らが測定した Mg 同位体の 2^+ 準

位のエネルギーと中性子過剰Ne、Mg、Si同位体の S_n を示す。

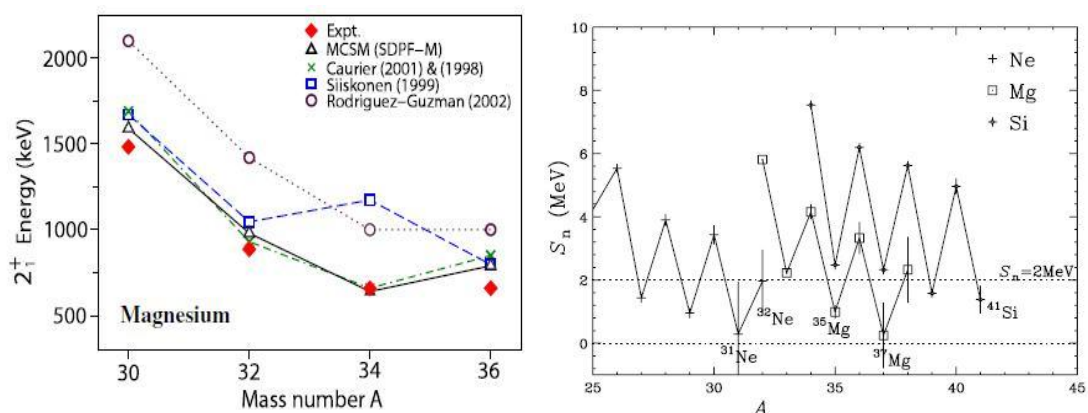


図1.3：左図は既存の実験から測定された $A=30, 32, 34, 36$ のMg同位体の 2_1^+ 準位のエネルギー。横軸は質量数 A で、縦軸は 2_1^+ 準位のエネルギー(keV)である[3]。右図は中性子過剰Ne、Mg、Si同位体の1中性子分離エネルギー(S_n)を示した図である。横軸は質量数 A で、縦軸は1中性子分離エネルギー S_n である[2]。

本研究の実験は理化学研究所の加速器研究施設RIBF(RI Beam Factory)の入射核破砕片分離装置BigRIPS(RIKEN Projectile fragment Separator)を用いて行われた。BigRIPSによって不安定核ビーム ^{37}Mg を生成、分離し、この ^{37}Mg と鉛、炭素標的と1中性子ノックアウトの反応によって生成される励起した ^{36}Mg の脱励起 γ 線を測定した。

本論文では、第二章で実験の概要、第三章で得られたデータの解析、第四章でその結果と議論を述べ、第五章でまとめと今後の展望について述べる。

第2章 実験概要

本章では、インビーム γ 線分光、不安定核ビームの生成、実験で使用した各種検出器系及び、トリガー回路についてそれぞれ述べる。

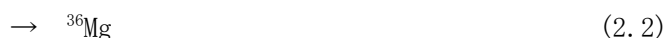
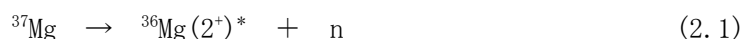
2.1 中性子過剰核の γ 線分光法

2.1.1 インビーム γ 線分光法

励起した原子核が基底状態に遷移する際、励起準位のエネルギーに対応したエネルギーを持つ γ 線を放出する。この放出 γ 線のエネルギーや角度分布、角相関などを測定することによって、遷移の情報や原子核構造の情報を得ることができる。

インビーム γ 線分光とは、入射核と標的核との核反応の際に放出される γ 線を測定する分光法のことである。オフラインで行う β - γ 分光に比べて、バックグラウンドが大きいので、通常同時計測する必要がある。反応標的として原子番号の大きな核を用いた場合、クーロン相互作用によって誘導されるクーロン励起が支配的な反応となる。逆に原子番号が小さい核を標的として用いると、核力相互作用が支配的になる。後者の場合、非弾性散乱やノックアウト反応が起こる。このように反応標的を選択することで、測定に用いる核反応を選択することができる。

本実験では BigRIPS によって分離された不安定核ビーム ^{37}Mg を鉛、炭素標的に入射させることによって、それぞれクーロン分解反応、1 中性子ノックアウト反応を起こす。すなわち



を利用し、 ^{36}Mg からの脱励起 γ 線を測定する。その反応の模式図を図 2.1 に示す。

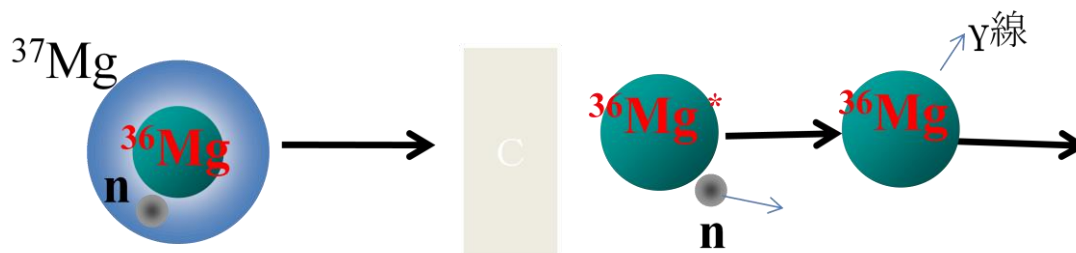


図 2.1 : ^{37}Mg と炭素標的の 1 中性子ノックアウト反応の模式図。インビーム γ 線分光法は反応後の ^{36}Mg と ^{36}Mg からの γ 線を同時測定する方法である。

不安定核ビームを用いるインビーム γ 線分光の特長は、前方散乱に放出される粒子と γ 線の同時測定により S/N 比がよいこと、脱励起 γ 線と反応標的から放出される出射粒子を同時測定することによって γ 線の起源を同定できること、 γ 線のエネルギー E_γ から励起エネルギー E_x が特定できるため、エネルギー分解能がよいこと、放出される γ 線が前方に集中されるため収量が多いこと、 γ 線を測定するため厚い標的が使えることがある。

ただし、インビーム γ 線分光法では測定対象の原子核が光速の 30-40%で飛行しているため、放出される γ 線がドップラー効果を受け、実験室系での測定エネルギーがシフトする。このためデータ解析においてこのエネルギーシフトをイベント毎に補正する必要がある(3.2.3 参照)。

2.2 不安定核ビームの生成

中性子過剰核の研究をするためには、まず目的とする不安定核を生成する必要がある。本実験では理化学研究所の加速器研究施設(RIBF)における入射核破砕片分離装置(BigRIPS)を用いて目的とする不安定核 ^{37}Mg を生成した。

2.2.1 RIBF

RIBF(RI Beam Factory)は核子当たり345MeVまで加速できる重イオン加速器であり、ウランに至る重イオンを生成する世界最大強度の不安定核ビーム加速器研究施設である。図2.2にRIBFの概観図を示す。

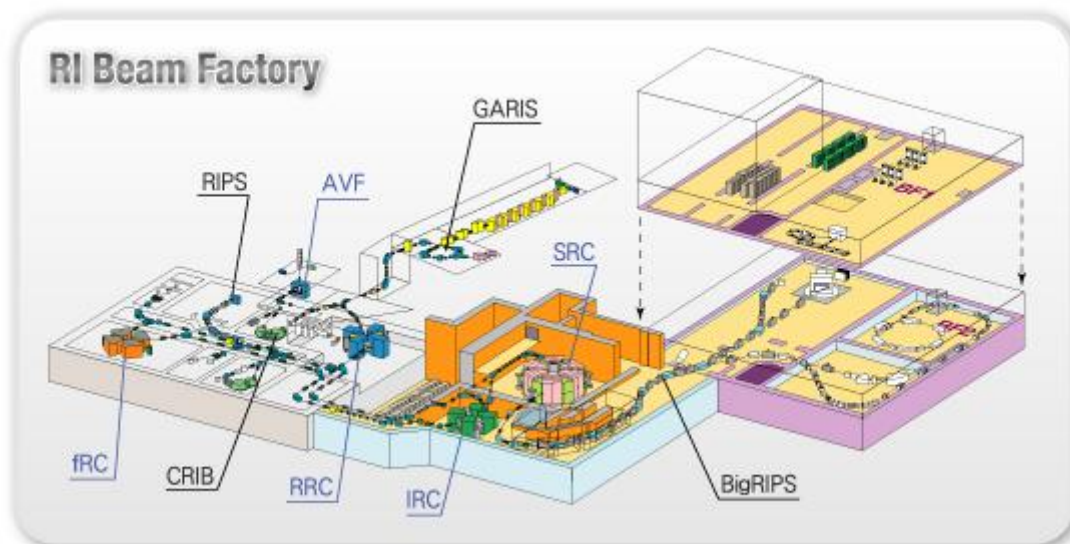


図2.2 : RIBFの概観図。RIBFは従来のRARFを増設させて構造になっていて、主要部はIRC-IRC-SRCと繋がる加速器ラインとBigRIPS、そのほかの基幹実験設備がある。

本施設では、SRC(Superconducting Ring Cyclotron)を主加速器としており、陽子は最大エネルギー440MeV、ウランの場合は最大エネルギー345MeV/uまで加速させることができる。その性能について表したグラフを図2.3に示す。

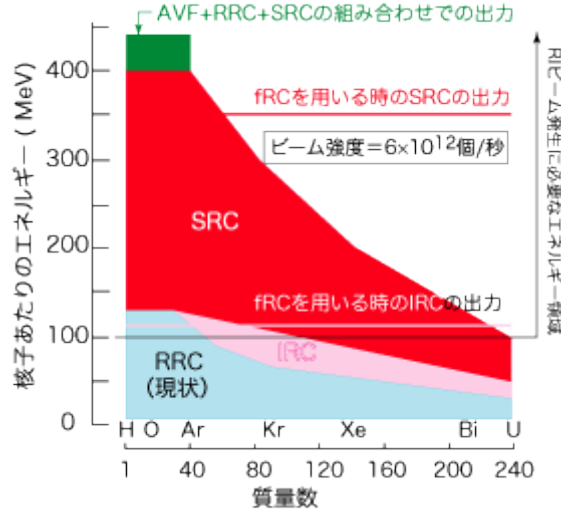


図2.3：RIBFの加速能力。横軸は質量数、縦軸は核子当たりのエネルギーを表す。色分けされている領域は、青の領域がRRCによって加速できるエネルギー、桃色の領域はIRCによる加速エネルギー、赤の領域はRRCとIRC、SRCを用いて加速できるエネルギーを表し、軽い原子核の場合はAVF+RRC+SRCの組み合わせで緑の領域まで加速できる。

2.2.2 BigRIPS

BigRIPS(RIKEN Projectile fragment Separator)はRIBFのサイクロトロンで加速された重イオンビームを用い、核破砕反応やクーロン分裂反応を用いて不安定核ビームを生成し、分離、識別を行う装置である。図2.4にBigRIPSの概観を示す。

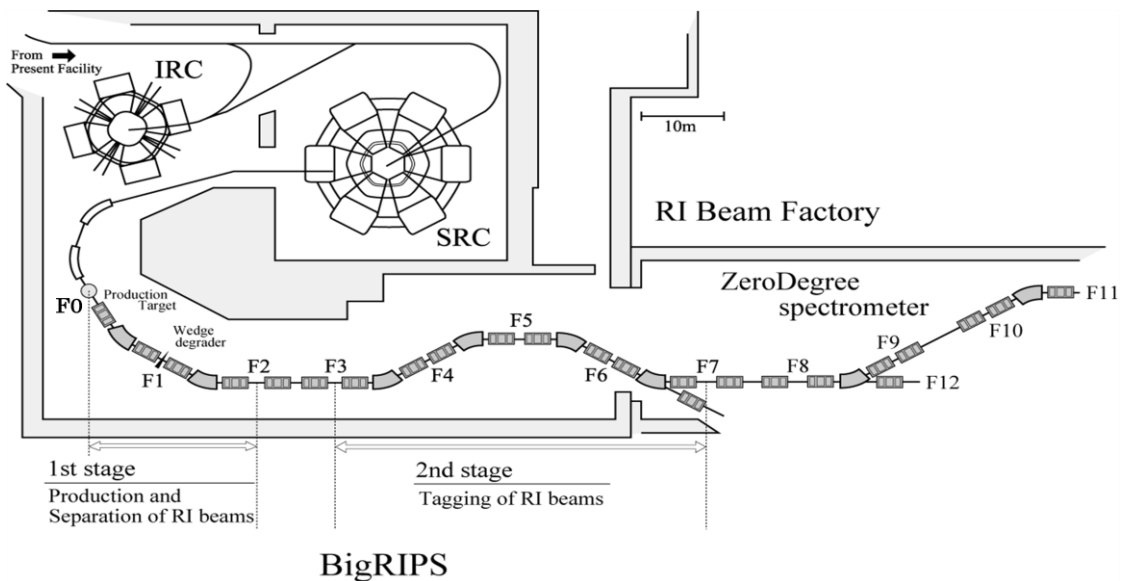


図2.4：RIBFのサイクロトロンの一部とBigRIPSの概観図

図中の F は焦点面 (Focal Plane) を意味し、生成標的を F0 にセットし、F8 に反応標的をセットする。サイクロトロンで加速された重イオンビームは F0 におかれた生成標的と衝突し、フラグメントを生成する。そのフラグメントは F0 から F2 の 1st stage で磁気分析と減衰版でのエネルギー損失の違いを組み合わせ、分離される。その二次ビームは 2nd stage (F3 から F7 までの区間) でイベント毎に粒子識別され、F8 の反応標的に入射する。

2.3 実験セットアップ

2.3.1 実験セットアップ

図2.5に実験セットアップ、すなわちBigRIPSおよびZDS (Zero Degree spectrometer) の配置図を示す。

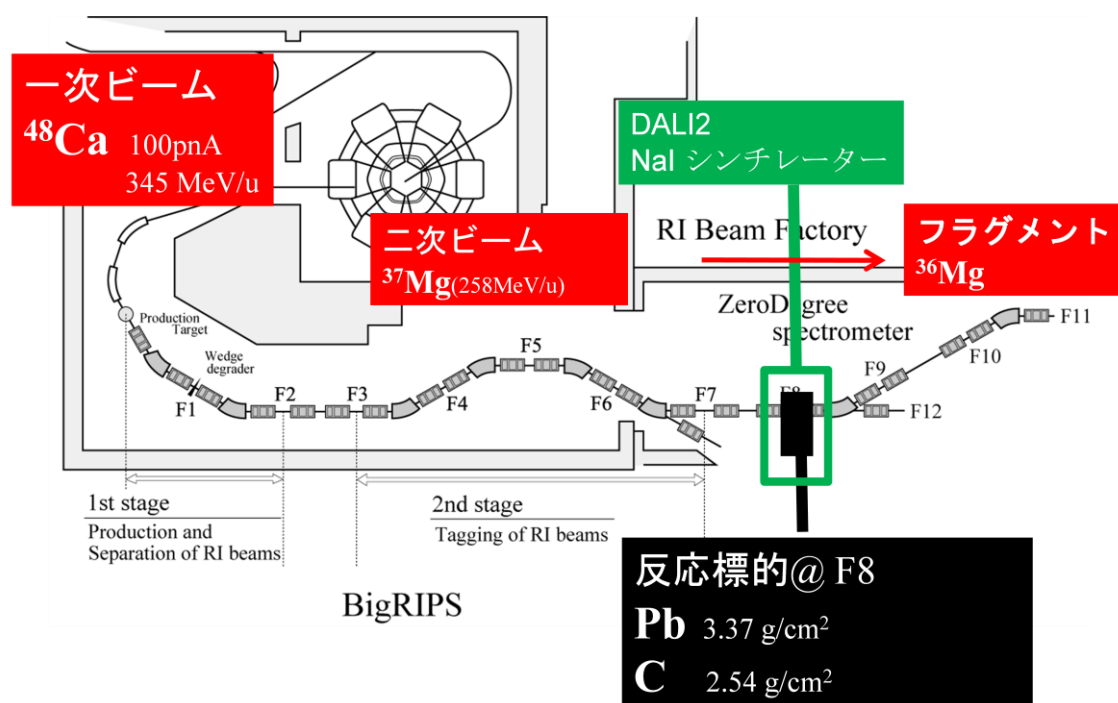


図2.5 : BigRIPSからビーム下流までのセットアップ。

BigRIPSで生成、分離された二次ビームは、まず入射粒子測定系 (BigRIPSの2ndステージ) で測定、識別されて後、F8に位置する反応標的 (鉛、炭素) に入射され、核反応を起こす。その反応により生成された粒子が脱励起することによって放出される γ 線は反応標的の周囲に配置されたDALI2 (NaI (Tl) シンチレーター) により検出される (2.3.4 参照)。さらに、反応標的で生成された荷電粒子は二次ビームとほぼ同速度で進みながらZDSで識別される。このように、実験では、入射核、放出核、 γ 線を同時測定した。

2.3.2 ビームと標的

SRCサイクロトロンにより345MeV/uまで加速された一次ビーム ^{48}Ca を一次標的(Be:厚さ2.78g/cm²)に入射し、入射核破砕反応によって不安定核ビームを生成した。こうして得られた不安定核をBigRIPSによって分離し、二次ビームとして258MeV/uのエネルギーを持つ ^{37}Mg を得た。これを反応標的に入射させた。二次標的の情報を表2.1に示す。

標的の種類	厚さ
Pb	3.37g/cm ²
C	2.54g/cm ²

表2.1 : 二次標的の種類と厚さ

2.3.3 入射粒子測定系

BigRIPSによって生成、分離された二次ビームは、目的とする核以外の核種を含む場合がある。このため、反応標的に入射される前に粒子識別(Particle Identification)を行う必要がある。本実験では、プラスチックシンチレーターから得られる粒子のエネルギー損失に対応した波高情報および飛行時間情報から目的核を識別した。また、PPAC(Parallel Plate Avalanche Counter)を用いて粒子の飛跡(位置情報)を求め、反応標的に入射されるイベントを選別した。

以下には、目的核の粒子識別および位置情報の取得に用いた、プラスチックシンチレーターおよびPPACについて述べる。

プラスチックシンチレーター

プラスチックシンチレーターはBigRIPSのF3、F5、F7に設置され、粒子の飛行時間(Time Of Flight)、および粒子のエネルギー損失 ΔE を測定する検出器である。表2.2に本実験で用いたプラスチックシンチレーターの情報を示す。

焦点面	厚さ	大きさ(縦x横)
F3	1mm	90mm x 100mm
F5	1mm	100mm x 240mm
F7	3mm	100mm x 240mm

表2.2 : BigRIPSのプラスチックシンチレーターの情報。

PPAC(Parallel Plate Avalanche Counter)

PPACは、時間信号の差から荷電粒子が通った位置を測定するガスカウンターである。三枚の電極から構成されており、陽極が二つの陰極間に4mmの間隔を開けて、delay-lineでつながっている。一つの陰極は、幅2.40mmのストリップ40本で構成され、ストリップ同士は

0.15mm の間隔を開けてある。この陰極の上下・左右の時間信号の差から $100 \times 100 \text{mm}^2$ の範囲について、荷電粒子の通った位置を測定することができる。本実験では二つのPPACをまとめた状態で表2.3のように配置し、両方の位置の外挿から反応標的に入射する位置を求めた。

焦点面	位置	有感面積(縦 x 横)
F3	上流	150mm x 150mm
	下流	150mm x 240mm
F5	上流	150mm x 240mm
	下流	150mm x 240mm
F7	上流	150mm x 240mm
	下流	150mm x 150mm
F9	上流	150mm x 240mm
	下流	150mm x 240mm
F10	上流	150mm x 240mm
	下流	150mm x 240mm
F11	上流	150mm x 240mm
	下流	150mm x 240mm

表 2.3 : BigRIPS と ZDS での PPAC の情報。

2.3.4 γ 線検出系

本研究では、目的核 ^{37}Mg の1中性子ノックアウト反応によって生成される ^{36}Mg の脱励起 γ 線の測定をする。 γ 線の測定にはDALI2を用いた。以下にDALI2に関して述べる。

DALI2 (NaI (Tl) シンチレーター

DALI2 (Detector Array for Low Intensity radiation) は 186 個の NaI (Tl) シンチレーターで構成される γ 線検出器として、反応標的とビームラインをシンチレーターが囲むような配置になっている。186 個のシンチレーターのうち $6 \times 6 \times 12 \text{cm}^3$ の結晶を下流側に 32 個、 $4 \times 8 \times 16 \text{cm}^3$ の結晶が 154 個あり、12 層で配置されている。一つの検出器は NaI (Tl) 結晶に直径 38mm の光電子増倍管を結合したものである。この検出器により、反応後に放出される γ 線を測定した。測定された γ 線は解析のときにドップラー補正と検出器ごとのエネルギー較正を行った。NaI (Tl) 検出器本来の分解能は 662keV (標準線源 ^{137}Cs) の γ 線に対し 8-9% である。図 2.6 に DALI2 の配置図を示す。

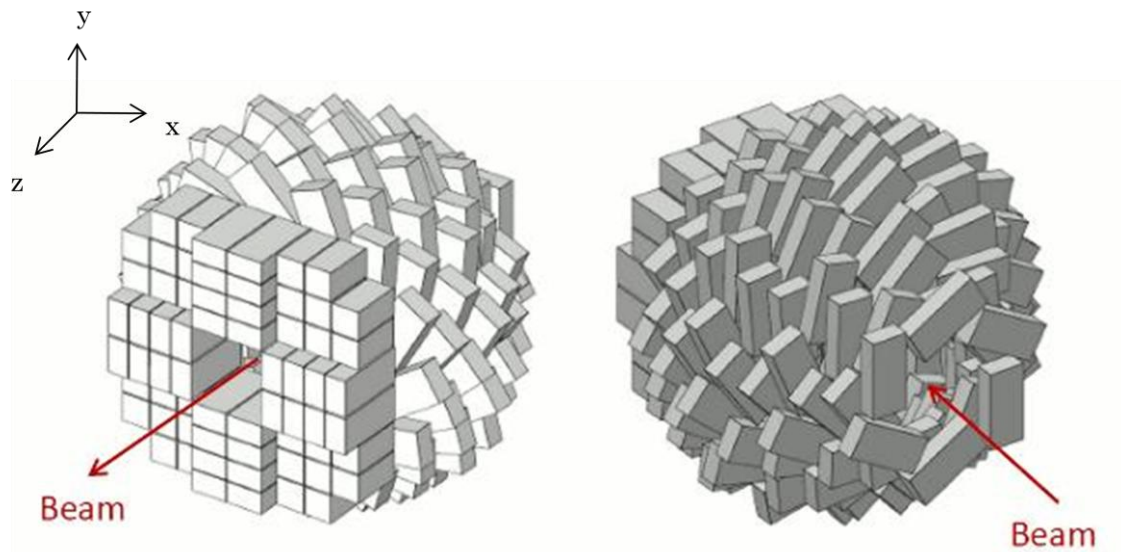


図 2.6 : DALI2 の配置図。左側の正面に位置する正四角形の断面を持つのが $6 \times 6 \times 12 \text{cm}^3$ のシンチレーターで、残りが $4 \times 8 \times 16 \text{cm}^3$ のシンチレーター。赤い線はビームの向きである。

それぞれのNaIシンチレーターの位置は反応標的を原点として付録Aの座標通り設置された(付録Aの表参照)。ここで座標系は図2.6に示されるように、原点を二次標的の中心に、ビームの進行方向をz軸、鉛直上向きを縦軸、水平右向きを横軸と設定した(左手系)。各層は6本から64本までビームラインを囲むように配置されている。ただし、実験の際には133番シンチレーターが故障により使えなかった。

2.3.5 ZDS

ZDSでは反応標的での分解反応によって放出されるフラグメントの粒子識別を行う。双極子磁石の磁場は、測定対象となるフラグメントの磁気硬度に合わせて設定した。粒子識別はBigRIPSと同様の検出器及び、手法を用いる。用いた検出器を表2.4にまとめる。BigRIPSで用いた検出器以外の検出器の詳細について述べる。

検出器の種類	設置場所
PPAC	F9、F10、F11
IC	F7、F11

表2.4 : ZDSに置かれた検出器。これらの検出器は粒子識別を行うためのものである。

IC(Ionization Chamber)

ICは、荷電粒子のエネルギー損失 ΔE を測定するガス検出器である。

2.4 データ収集システム

2.4.1 トリガー回路

本研究の実験データは、イベント毎に収集しコンピュータに取り込んだ。各検出器からの信号をコンピュータで収集するさい、トリガー回路を介して条件を課した。図 2.7 に、今回用いたトリガー回路を示す。ここで、F3PlaR に信号が入った瞬間を基準として時間情報を記録する。

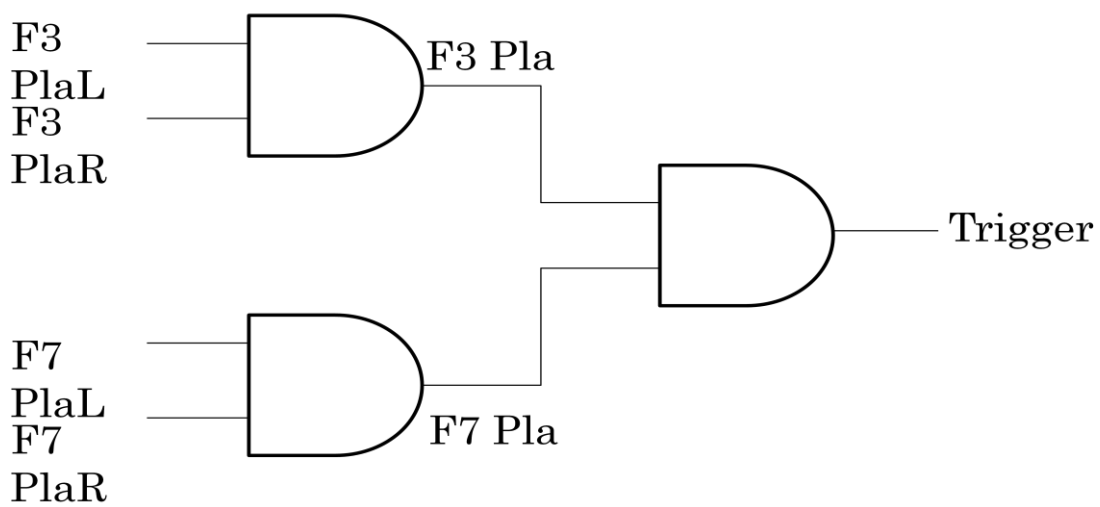


図2.7：トリガー回路。ただし、F3Pla、F7Plaは、各プラスチックシンチレーターの左右のPMTの信号を足しあわせたものがディスクリレベルを越えたとき出力される信号である。

第3章 解析

3.1 粒子識別

3.1.1 BigRIPS における二次ビームの粒子識別

BigRIPSによって生成・分離された二次ビームの粒子識別を、プラスチックシンチレーターにおけるエネルギー損失 ΔE および F5-F7間の飛行時間 (TOF) によって行った。本実験のエネルギー領域において、プラスチックシンチレーターでのエネルギー損失 ΔE と飛行時間は、Bethe-Blochの式から近似的に以下の関係を満たす。(付録B参照)

$$\Delta E \propto \frac{Z^2}{v^2} \propto Z^2 \text{TOF}^2 \quad (3.1)$$

ただし、 Z 、 v 、 TOF はそれぞれ荷電粒子の原子番号、速度およびTOFを表す。また、BigRIPSで選択される磁気硬度 $B\rho$ 値は、近似的に以下の関係を満たす。

$$B\rho \propto \frac{A}{Z} v \propto \frac{A}{Z} \frac{1}{\text{TOF}} \quad (3.2)$$

ただし、 A は、粒子の質量数を表す。この二つの関係式から、Ionization Chamberでの ΔE と F5-F7の間でのTOFの相関を取ることにより、陽子数 Z および質量数 A を識別することができる。図3.1にBigRIPSでのPI図を示す。

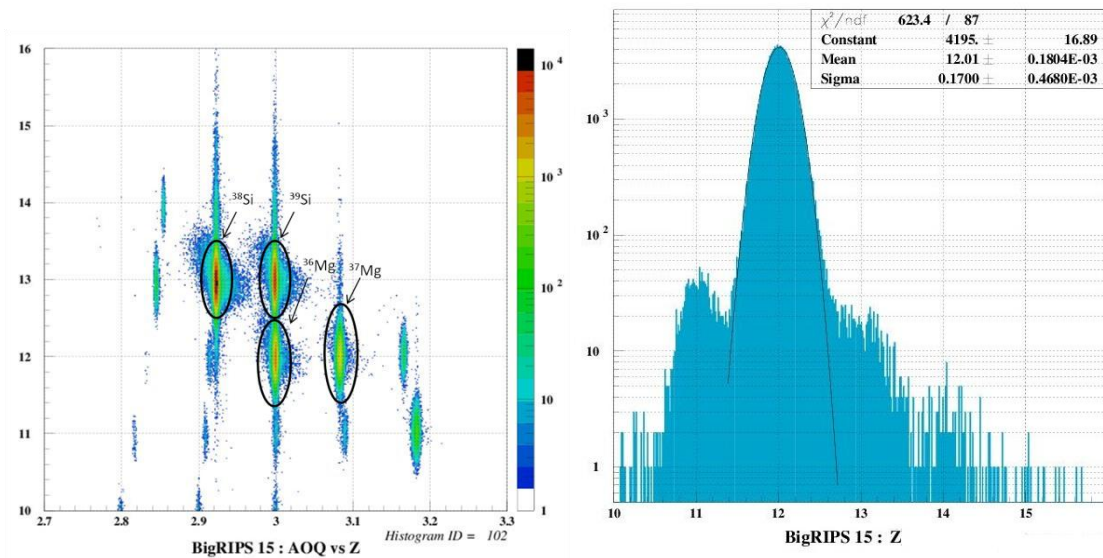


図 3.1: 左図は BigRIPS での PI 図で、右図は左図を $3.06 \leq A/Z \leq 3.12$ までカットして縦軸 (Z) に射影させたものである。左図の横軸は A/Z 、縦軸は Z 、右図の横軸は Z 、縦軸はイベントの個数である。

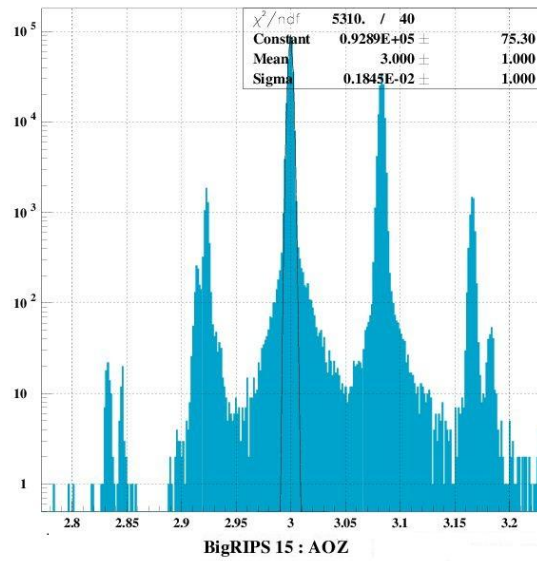


図 3.2 : 図 3.1 の PI 図をさらに $3.06 \leq A/Z \leq 3.12$ 、 $11.5 \leq Z \leq 12.5$ の領域でカットして横軸 (A/Z) に射影させたものである。横軸は A/Z、縦軸はイベントの個数である。

図 3.1 の右図と図 3.2 はそれぞれ $Z=12$ と $A/Z=3$ のピークに対して縦軸、横軸に射影したものである。これについて Gaussian Fit を行い、その結果 BigRIPS における粒子識別の場合は、 σ がそれぞれ $\sigma_z=0.1700$ 、 $\sigma_{AOZ}=0.1845 \times 10^{-2}$ となった。それぞれの分解能を FWHM で表すと $FWHM(Z)=0.403$ 、 $FWHM(A/Z)=0.443 \times 10^{-2}$ で、これらの値は粒子識別の際に Z と A/Z に対して設定した最低限の幅である 1 と 0.06 の半分より小さく、誤差が解析の結果に影響を与えないレベルであることを示す。

3.1.2 ZDS におけるフラグメントの粒子識別

ZDS の場合、F11 に置かれた IC での ΔE と F8—F9 の間での TOF を用いて粒子識別を行う。

図 3.3 に ZDS での PI 図の中から必要な領域だけカットして射影させた図を示す。

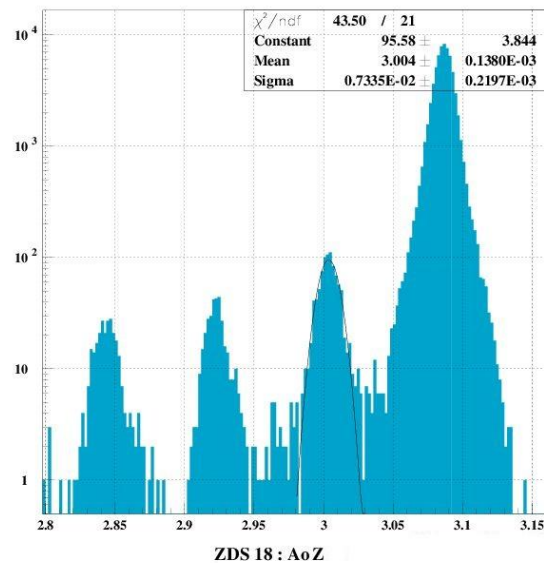


図 3. 3 : ZDS での PI 図を $2.97 \leq A/Z \leq 3.03$ までカットして縦軸に射影させた図。横軸は A/Z 、縦軸はイベントの個数である。

(3. 1. 1) と同様の計算を行うことで分解能を評価する。 $\sigma_{\text{AOZ}} = 0.7335 \times 10^{-2}$ から FWHM を計算すると $\text{FWHM}(A/Z) = 1.738 \times 10^{-2}$ となり、(3. 1. 1) の場合と同じく誤差が解析の結果に影響を与えないレベルである。

3. 2 γ 線検出器系

3. 2. 1 NaI 検出器のエネルギー較正

二つの γ 線源を用いて測定された光電ピークを用いて 186 本の NaI (T1) について ADC (Analog to Digital Converter) のエネルギー較正を行った。表 3. 1 にエネルギー較正に用いた γ 線源と γ 線のエネルギーを示す。

^{60}Co	^{88}Y
1132keV	897keV
1332keV	1832keV

表 3. 1 : γ 線源と光電ピークのエネルギー

線源ごとに二つの点とペダスタルの 3 点でエネルギー較正を行った。図 3. 4 に、例として識別番号 1 番の NaI (T1) シンチレーターの較正線を示す。

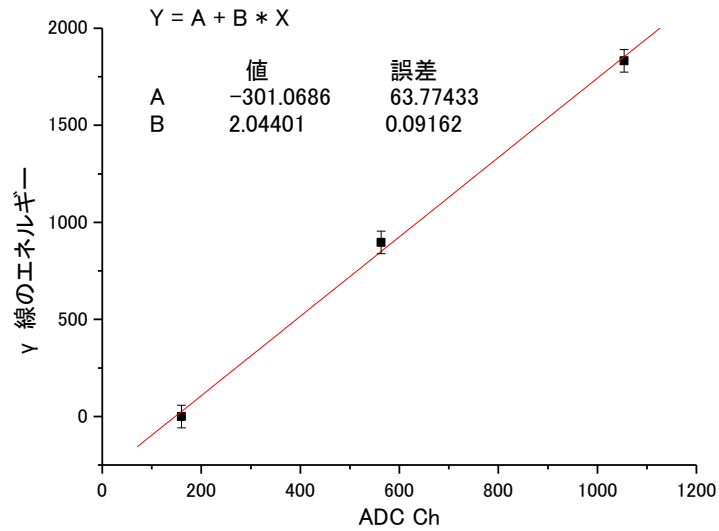


図3.4： 識別番号1番のNaI検出器に対する較正線。横軸はADC Ch、縦軸は γ 線のエネルギー (keV)。エラーバーの幅は $\sigma = 58.021$ である。

186本全てのNaIシンチレーターに対して、同様に較正線を求めNaIシンチレーターのエネルギー校正を行った。図3.5に、標準 γ 線源 ^{88}Y から γ 線を測定した際のNaI検出器のIDと出力波高との相関図を示す。これより、検出器のIDに依らず出力が校正されている様子が確認できる。

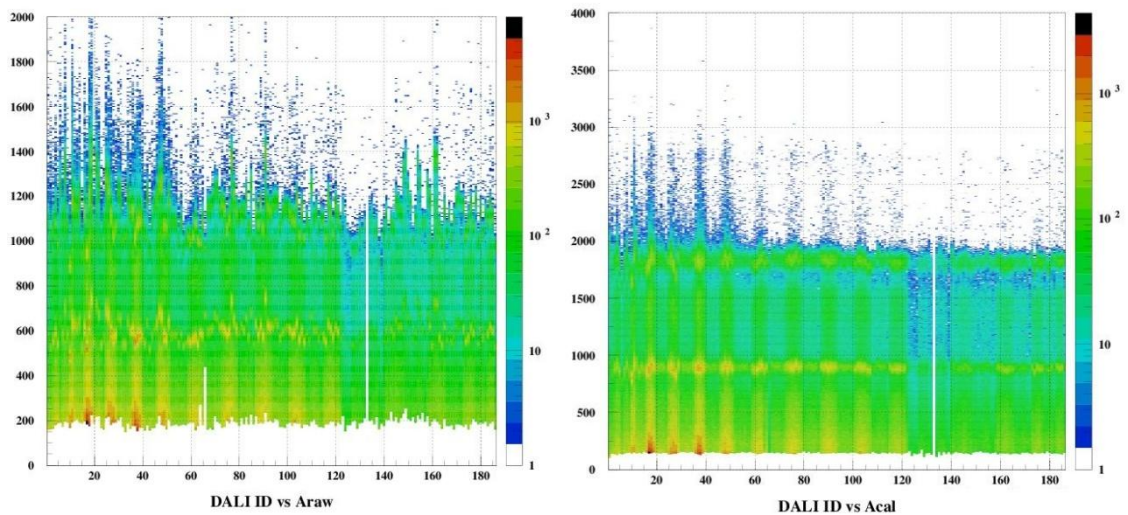


図3.5： 検出器のIDと出力の相関図。左図はエネルギー校正前、右図はエネルギー校正後。横軸は両方とも検出器のID、縦軸は左図で較正前のエネルギー、右図で較正後のエネルギーである。右図の場合ADCの出力が検出器に依らず、較正されている。

3.2.2 NaI 検出器の Gain のゆらぎ

エネルギー較正を行うときに ch とエネルギーの間の変換のため較正係数という値を使うが、この変換係数は Gain のゆらぎにより変化することがある。その原因としては、周辺磁場の変化などが考えられる。実験の時には数回にわたって標準 γ 線源を用い、較正係数の変化を測定した。解析の際には Gain のゆらぎを考慮しながら γ 線のエネルギーを計算した。図 3.6、3.7 に例として Gain のゆらぎが大きかった識別番号 1 番の検出器の較正係数の変化と、ゆらぎが小さかった識別番号 3 番の検出器の較正係数の変化を示す。

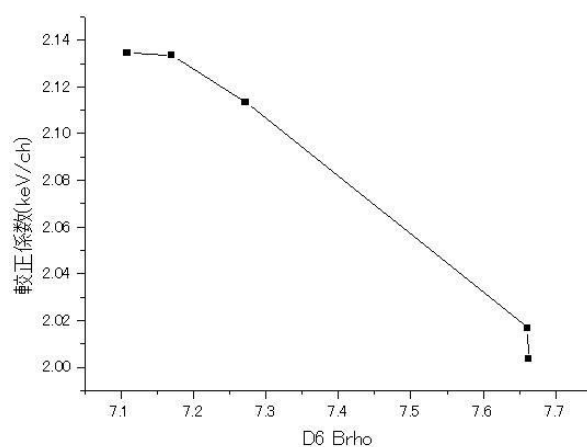


図 3.6 : 識別番号 1 番の検出器の Gain のゆらぎ。横軸は F6—F7 の $B\rho$ 、縦軸は較正係数 (keV/ch) である。

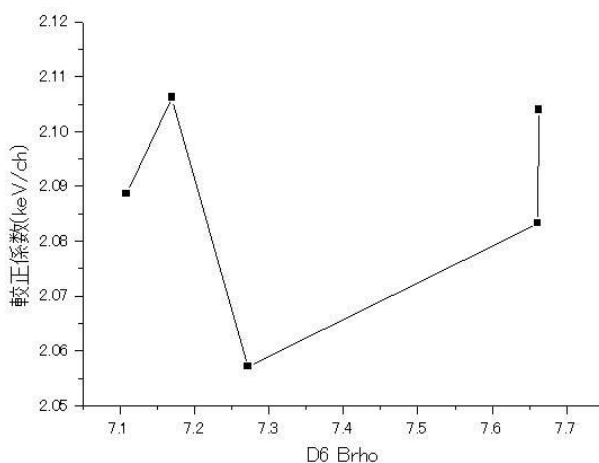


図 3.7 : 識別番号 3 番の検出器の Gain のゆらぎ。横軸は F6—F7 の $B\rho$ 、縦軸は較正係数 (keV/ch) である。

1番検出器は較正係数の変化が大きい方で、約0.15まで変化を見せるが、3番検出器の場合は約0.5以下の変化を見える。解析の際にこのGainのゆらぎによって γ 線のエネルギーが正確に較正できないことを防ぐために、測定時間によって較正係数の値を変えながら適用する。

3.2.3 ドップラー補正

γ 線を放出する反応粒子は、光速の30-40%程度で飛行しているため、ドップラー効果によって粒子の静止系での γ 線のエネルギーと実験系での γ 線のエネルギーにずれが生じる。これを補正する為に、式(3.3)を用いた。

$$E = \frac{(1 - \beta \cos \theta)}{\sqrt{1 - \beta^2}} E_{\text{Lab}} \quad (\beta = \frac{v}{c}) \quad (3.3)$$

ただし、 E 、 E_{Lab} 、 θ 、 v 、 c は、粒子の静止系での γ 線のエネルギー、実験室系での γ 線のエネルギー、粒子の速度方向と γ 線方向のなす角、粒子の速度、光速である。図3.8の左図には $^{37}\text{Mg} + \text{C} \rightarrow ^{36}\text{Mg}$ で生成される ^{36}Mg 励起状態からの γ 線スペクトルを示し、右図はドップラー補正をかけたスペクトルを示す。このようにドップラー補正によってピーク E_x が現れることがわかる。

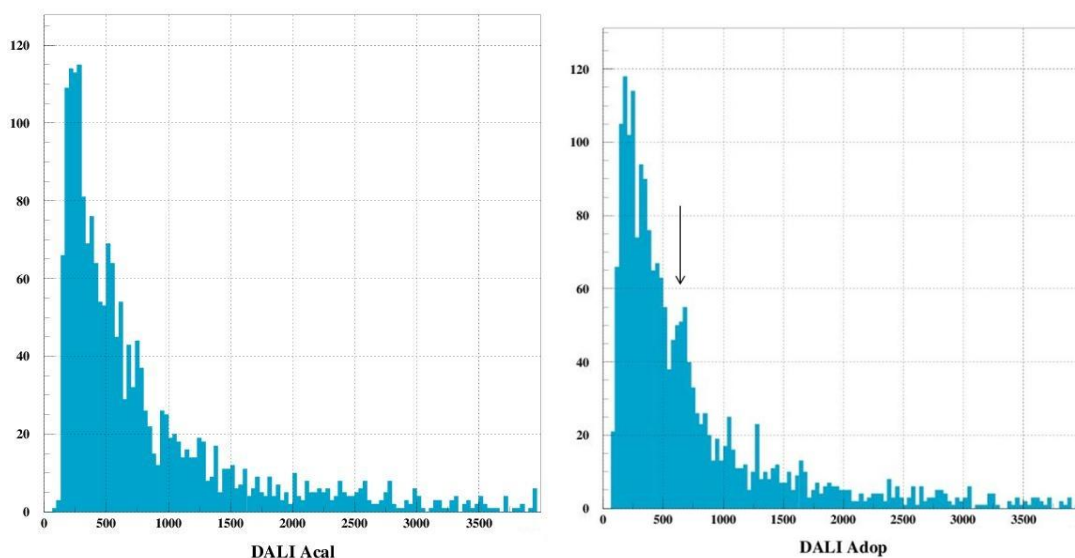


図3.8：右図は左図のグラフにドップラー補正をかけた後の γ 線スペクトルを表す。補正によって γ 線のピークが矢印のところにはっきり見えるようになることが分かる。両方とも横軸はエネルギー(keV)、縦軸はイベントの個数。

3.2.4 NaI シンチレーターの時間情報

図3.9にNaIシンチレーターのビームシンチレーター(F3P1aR)に対する γ 線の時間スペクトルを示す。図中のピーク部分が二次ビームと同期したイベントであり、その他一定部分

は環境放射線などのバックグラウンドイベントと考えられる。よって以降の解析では、図中両横軸の 0 ± 10 (ns)の範囲内に位置するイベントのみ解析を行い、それ以外を排除する。その前後の比較を図3.9に示す。

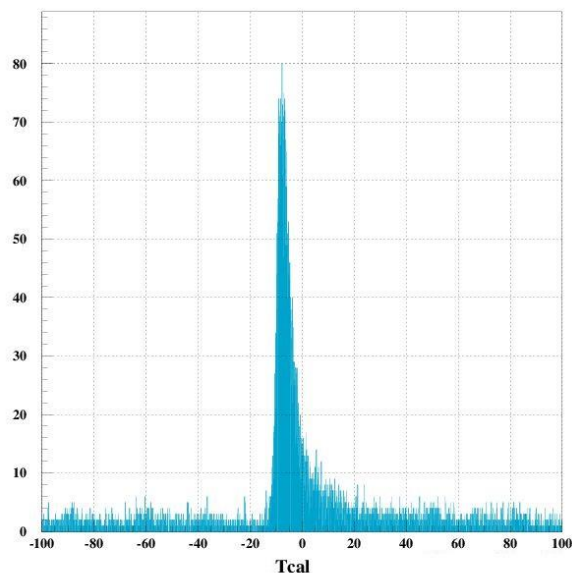


図 3.9 : $^{37}\text{Mg} + \text{C} \rightarrow ^{36}\text{Mg}$ 反応の際の NaI シンチレーターの NaI トリガーにおける時間スペクトル。横軸はイベント毎に二次ビームが反応標的を通る瞬間を 0 とおいて γ 線が出た時間を表示したもので(ns)、縦軸はイベントの個数である。

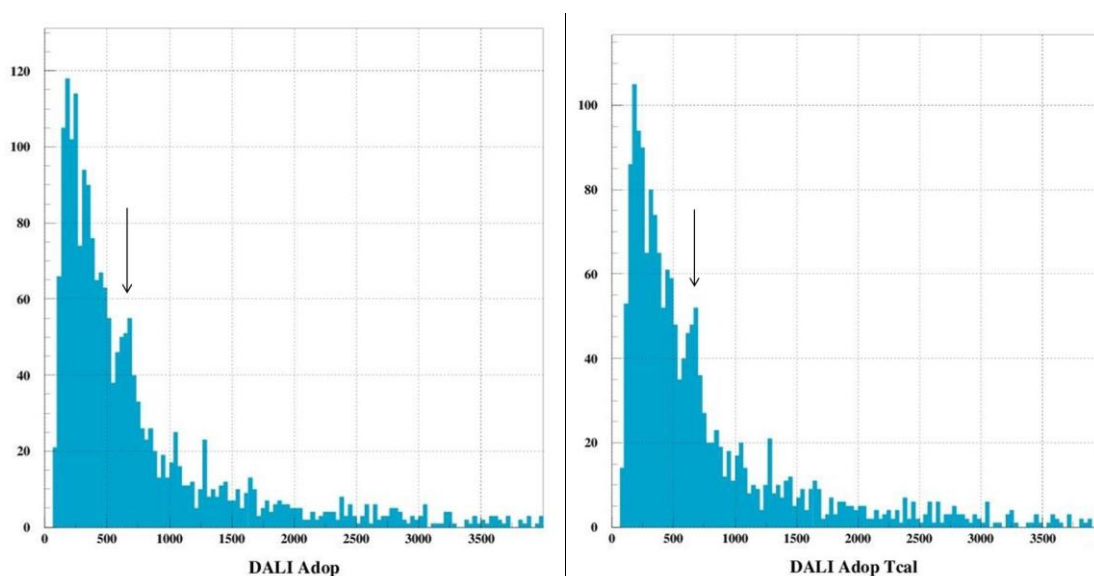


図 3.10 : 時間情報の適用前後比較。左図が時間情報を適用する前で、右図が時間情報を適用した後もの。それぞれ横軸は γ 線のエネルギー (keV)、縦軸はイベントの個数である。左図の矢印のピークがより右図の矢印のピークがはっきりするのが分かる。

第4章 結果と議論

この章では、解析から得られる情報を基に

- 反応標的に入射する核種は ^{37}Mg
- F5の中心から水平方向で $\pm 64\text{mm}$ の範囲を通っている。
- PPACで求められた反応標的に入射する位置が、反応標的の大きさ ($3 \times 3 \times \pi \text{mm}^2$)におさまっている。
- ^{36}Mg が反応標的から放出された。
- DALI2の時間情報によるバックグラウンドカット。

という条件のイベントについての γ 線エネルギースペクトルを示し、その γ 線エネルギースペクトルから得られる情報に基づいて ^{37}Mg に関して考察する。

4.1 ^{37}Mg の 1 中性子ノックアウト反応

4.1.1 γ 線のエネルギースペクトル

図4.1に、 ^{37}Mg の1中性子ノックアウト反応によって生成された ^{36}Mg の脱励起 γ 線エネルギースペクトルを本章の初めに示した条件のもとで示す。なおこの結果は、 γ 線の多重度についての条件をかけていない。

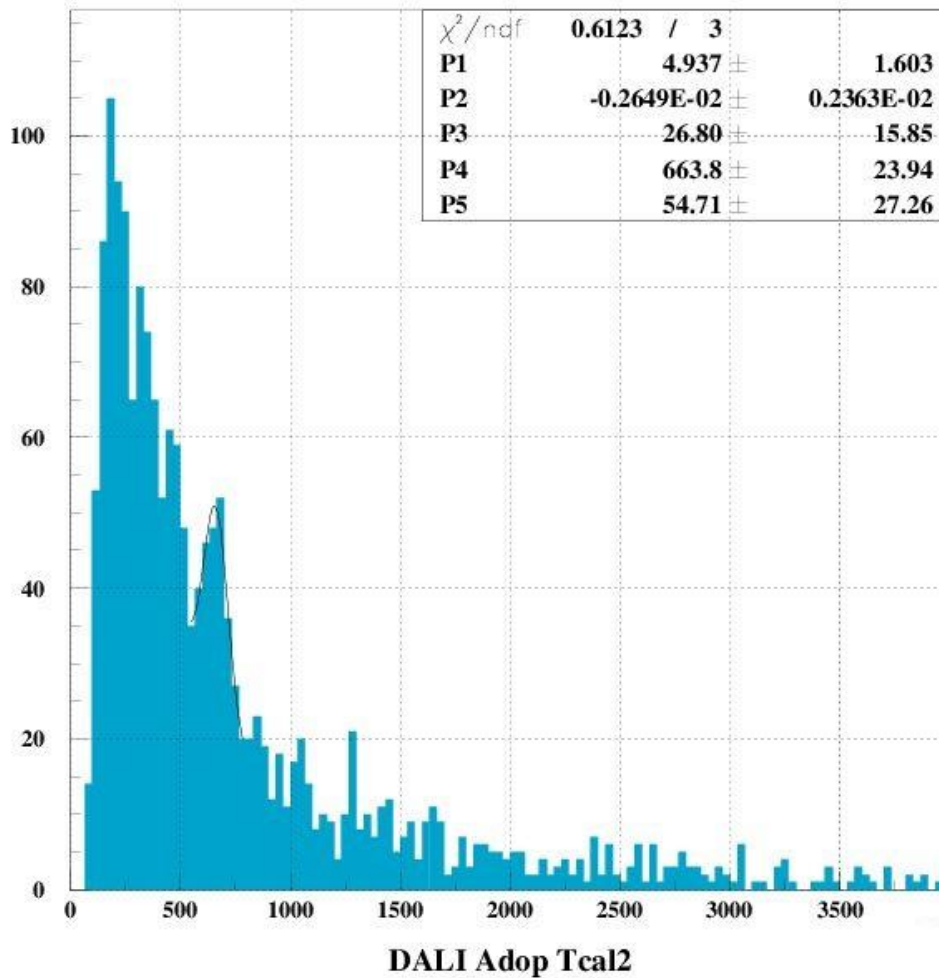


図 4.1 : 解析から得た情報を組み合わせて出した $^{37}\text{Mg}+\text{C}\rightarrow^{36}\text{Mg}$ 反応からの γ 線ピークのグラフ。横軸は γ 線のエネルギー (keV)、縦軸はイベントの個数である。右上のパラメータはピークをフィットした際に表示されるデータ。P4 がピークの位置を示す。

現在知られている ^{36}Mg の γ 線は 660 (6) keV があり [3]、誤差の範囲内で見られている。バックグラウンドを指数関数として、 $^{37}\text{Mg}+\text{C}\rightarrow^{36}\text{Mg}$ からの純粋な γ 線の個数は 95 ± 11 個と計算される。

4.1.2 1 中性子ノックアウト反応の断面積

まず 4.1.1 で測定した γ 線の個数を用いて $^{37}\text{Mg}+\text{C}\rightarrow^{36}\text{Mg}$ 反応による γ 線の断面積を求めらる。断面積を計算するための式は次のようになる。

$$N = N_b \frac{\sigma}{A_t} t N_A \cdot \epsilon \quad (4.1)$$

$$\sigma = \frac{N \cdot A_t}{N_A \cdot N_b \cdot t \cdot \epsilon} \quad (4.2)$$

ただし、 N は γ 線の個数、 N_b は反応標的に入射した二次ビームの個数、 σ は反応断面積[barn = 10^{-24}cm^2]、 A_t は反応標的の質量数[g/mol]、 t は反応標的の面密度[g/cm²]、 N_A はアボガドロ数[mol⁻¹]、 ε は efficiency である。

断面積を計算する為のパラメータを表 4.1 にまとめる。

	N	N_b	A_t	t [g/cm ²]	N_A	ε
γ 線放出	95	74418	12	2.54	6.02×10^{23}	0.15 (仮定)
すべての反応	700	74418	12	2.54	6.02×10^{23}	1

表 4.1：断面積計算のパラメータ。 γ 線放出の efficiency は過去の実験のデータを使っていて、本来はシミュレーションを行う必要がある。

このパラメータを式(4.2)に代入し、計算すると

$$\sigma_\gamma \cong 66(8)\text{mb} \quad (4.3)$$

$$\sigma_{\text{tot}} \cong 74(2)\text{mb} \quad (4.4)$$

となる。この二つの断面積の割合を計算すると

$$\frac{\sigma_\gamma}{\sigma_{\text{tot}}} \cong 90(2)\% \quad (4.5)$$

である。この割合から $^{37}\text{Mg} + \text{C} \rightarrow ^{36}\text{Mg}$ の反応では γ 線を出す ^{36}Mg が主に生成されると考えられる。

4.2 ^{37}Mg の配位

^{37}Mg のスピン・パリティが $3/2^-$ である場合と $7/2^-$ である場合で、それぞれの配位は式(4.6)、(4.7)のようになる。

$$\begin{aligned} |^{37}\text{Mg}(\frac{3}{2}^-) \rangle &= \alpha_1^2 |^{36}\text{Mg}(g, s: 0^+) \otimes \nu p_{3/2} \rangle + \beta_1^2 |^{36}\text{Mg}(2^+) \otimes \nu f_{7/2} \rangle \\ &+ \gamma_1^2 |^{36}\text{Mg}(2^+) \otimes p_{3/2} \rangle \dots \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} |^{37}\text{Mg}(\frac{7}{2}^-) \rangle &= \alpha_2^2 |^{36}\text{Mg}(g, s: 0^+) \otimes \nu f_{3/2} \rangle + \beta_2^2 |^{36}\text{Mg}(2^+) \otimes \nu p_{3/2} \rangle \\ &+ \gamma_2^2 |^{36}\text{Mg}(2^+) \otimes f_{7/2} \rangle \dots \end{aligned} \quad (4.7)$$

(4.5) から $^{36}\text{Mg}(0^+)$ より $^{36}\text{Mg}(2^+)$ がドミナントになることが分かるが、この時点で $\beta_{1,2}$ 、 $\gamma_{1,2}$ の割合とスピン・パリティを決めることはできない。その割合とスピン・パリティを決めるためには、クーロン分解との比較を行うこととノックアウトされる中性子を検出する必要がある。

第5章 まとめと今後の展望

本研究では中性子過剰な領域に現れるハロー核の研究において、NeからSiまでの原子が $N=20-28$ の領域で殻構造が破れるIsland of Inversionの領域に注目し、その領域に位置する中性子過剰核の一つである $N=25$ の ^{37}Mg に対してインビーム γ 線核分光を行った。

実験は理化学研究所の入射核破砕片分離装置BigRIPSにおいて行われた。不安定核ビーム ^{37}Mg を用いて、1中性子ノックアウト反応により ^{36}Mg の励起状態を生成し、その脱励起 γ 線を186本のNaIシンチレーターで測定した。その結果、 ^{36}Mg からの γ 線ピーク $E_\gamma=660\text{keV}$ を観測し、さらにピークの断面積と1中性子ノックアウト反応の反応断面積を求めた。なお、その断面積により $^{37}\text{Mg}+\text{C}\rightarrow^{36}\text{Mg}$ の反応からの ^{36}Mg は 2^+ の状態がドミナントになることが分かった。

今後、SAMURAI 実験でクーロン分解反応の測定をすることによってE1励起分布を求め、分光学因子の割合とスピン・パリティを決めることによって究極的には ^{37}Mg がハロー構造を持つか判定することを目指す。

第6章 付録

A DALI2 の設置座標

層	ID	x[mm]	y[mm]	z[mm]	層	ID	x[mm]	y[mm]	z[mm]
1	1	-14.72	-7.8	-25	5	31	-11.31	-23.98	-5
	2	-14.12	8.85	-25		32	-23.24	-12.76	-5
	3	0.61	16.65	-25		33	-26.3	3.34	-5
	4	14.72	7.8	-25		34	-19.32	18.16	-5
	5	14.12	-8.85	-25		35	-4.95	26.05	-5
	6	-0.61	-16.65	-25		36	11.31	23.98	-5
2	7	-10.28	-13.11	-20	37	23.24	12.76	-5	
	8	-16.5	2.34	-20	38	26.3	-3.34	-5	
	9	-6.22	15.46	-20	39	19.32	-18.16	-5	
	10	10.28	13.11	-20	40	4.95	-26.05	-5	
	11	16.5	-2.34	-20	6	41	-16.3	-27.08	0
	12	6.22	-15.46	-20		42	-27.65	-15.3	0
3	13	-16.41	-12.57	-15		43	-31.6	0.57	0
	14	20.49	2.72	-15		44	-27.08	16.3	0
	15	-12.57	16.41	-15		45	-15.3	27.65	0
	16	2.72	20.49	-15		46	0.57	31.6	0
	17	16.41	12.57	-15	47	16.3	27.08	0	
	18	-20.49	-2.72	-15	48	27.65	15.3	0	
	19	12.57	-16.41	-15	49	31.6	-0.57	0	
	20	-2.72	-20.49	-15	50	27.08	-16.3	0	
4	21	-18.16	-19.32	-10	51	15.3	-27.65	0	
	22	-26.05	-4.95	-10	52	-0.57	-31.6	0	
	23	-23.95	11.31	-10	7	53	-15.72	-31.36	5
	24	-12.76	23.24	-10		54	-27.77	-21.43	5
	25	3.34	26.3	-10		55	-34.32	-7.26	5
	26	18.16	19.32	-10		56	-34.07	8.35	5
	27	26.05	4.95	-10		57	-27.08	22.31	5
	28	23.95	-11.31	-10		58	-14.72	31.85	5
	29	12.76	-23.24	-10	59	0.56	35.08	5	
	30	-3.34	-26.3	-10	60	15.72	31.36	5	

層	ID	x [mm]	y [mm]	z [mm]	層	ID	x [mm]	y [mm]	z [mm]	
	61	27.77	21.43	5	10	95	-16.98	-26.95	21.25	
	62	34.32	7.26	5		96	-26.99	-16.91	21.25	
	63	34.07	-8.35	5		97	-31.65	-3.53	21.25	
	64	27.08	-22.31	5		98	-30.05	10.55	21.25	
	65	14.72	-31.85	5		99	-22.49	22.55	21.25	
	66	-0.56	-35.08	5		100	-10.48	30.07	21.25	
8	67	-19.47	-29.73	10.25		101	3.6	31.64	21.25	
	68	-30.43	-18.34	10.25		102	16.98	26.95	21.25	
	69	-35.38	-3.31	10.25		103	26.99	16.91	21.25	
	70	-33.31	12.36	10.25		104	31.65	3.53	21.25	
	71	-24.65	25.59	10.25		105	30.05	-10.55	21.25	
	72	-11.1	33.75	10.25		106	22.49	-22.55	21.25	
	73	4.64	35.23	10.25		107	10.48	-30.07	21.25	
	74	19.47	29.73	10.25		108	-3.6	-31.64	21.25	
	75	30.43	18.34	10.25		11	109	-10.13	-28.9	26.75
	76	35.38	3.31	10.25			110	-21.66	-21.64	26.75
	77	33.31	-12.36	10.25			111	-28.91	-10.1	26.75
	78	24.65	-25.59	10.25			112	-30.42	3.44	26.75
	79	11.1	-33.75	10.25	113		-25.92	16.3	26.75	
	80	-4.64	-35.23	10.25	114		-16.28	25.93	26.75	
9	81	-11.77	-31.72	15.75	115		-3.41	30.43	26.75	
	82	-24.37	-23.47	15.75	116		10.13	28.9	26.75	
	83	-32.14	-10.57	15.75	117		21.66	21.64	26.75	
	84	-33.54	4.42	15.75	118		28.91	10.1	26.75	
	85	-28.3	18.53	15.75	119		30.42	-3.44	26.75	
	86	-17.46	28.98	15.75	120		25.92	-16.3	26.75	
	87	-3.16	33.68	15.75	121		16.28	-25.93	26.75	
	88	11.77	31.72	15.75	122		3.41	-30.43	26.75	
	89	24.37	23.47	15.75	12	123	-19.45	-26.45	36.74	
	90	32.14	10.57	15.75		124	-26.45	-19.45	36.74	
	91	33.54	-4.42	15.75		125	-26.45	19.45	36.74	
	92	28.3	-18.53	15.75		126	-19.45	26.45	36.74	
	93	17.46	-28.98	15.75		127	19.45	26.45	36.74	
	94	3.16	-33.68	15.75		128	26.45	19.45	36.74	

層	ID	x[mm]	y[mm]	z[mm]	層	ID	x[mm]	y[mm]	z[mm]
	129	26.45	-19.45	36.74		158	-4.5	22.11	38.74
	130	19.45	-26.45	36.74		159	4.5	22.11	38.74
	131	-4.5	-27.41	38.74		160	12.45	19.45	36.74
	132	-12.45	-26.45	36.74		161	19.45	12.45	36.74
	133	-19.45	-19.45	36.74		162	22.11	4.5	38.74
	134	-26.45	-12.45	36.74		163	22.11	-4.5	38.74
	135	-27.41	-4.5	38.74		164	19.45	-12.45	36.74
	136	-27.41	4.5	38.74		165	12.45	-19.45	36.74
	137	-26.45	12.45	36.74		166	4.5	-22.11	38.74
	138	-19.45	19.45	36.74		167	-4.5	-16.81	38.74
	139	-12.45	26.45	36.74		168	-12.45	-12.45	36.74
	140	-4.5	27.41	38.74		169	-16.81	-4.5	38.74
	141	4.5	27.41	38.74		170	-16.81	4.5	38.74
12	142	12.45	26.45	36.74	12	171	-12.45	12.45	36.74
	143	19.45	19.45	36.74		172	-4.5	16.81	38.74
	144	26.45	12.45	36.74		173	4.5	16.81	38.74
	145	27.41	4.5	38.74		174	12.45	12.45	36.74
	146	27.41	-4.5	38.74		175	16.81	4.5	38.74
	147	26.45	-12.45	36.74		176	16.81	-4.5	38.74
	148	19.45	-19.45	36.74		177	12.45	-12.45	36.74
	149	12.45	-26.45	36.74		178	4.5	-16.81	38.74
	150	4.5	-27.41	38.74		179	-4.5	-11.51	38.74
	151	-4.5	-22.11	38.74		180	-11.51	-4.5	38.74
	152	-12.45	-19.45	36.74		181	-11.51	4.5	38.74
	153	-19.45	-12.45	36.74		182	-4.5	11.51	38.74
	154	-22.11	-4.5	38.74		183	4.5	11.51	38.74
	155	-22.11	4.5	38.74		184	11.51	4.5	38.74
	156	-19.45	12.45	36.74		185	11.51	-4.5	38.74
	157	-12.45	19.45	36.74		186	4.5	-11.51	38.74

表 B.1 : DALI2の座標情報。

B Bethe-Blochの式

荷電粒子は、物質中を通過する際に、周囲の物質に含まれた電子との間のクーロン相互作用により連続的に減速しエネルギーを失う。この荷電粒子のエネルギー損失は、以下に示したBethe-Blochの式に従う。

$$\frac{dE}{dX} = -K \frac{Z}{A} \frac{\rho}{\beta^2} \left\{ \ln \frac{2mc^2 \beta^2 E_M}{I^2 (1 - \beta^2)} - 2\beta^2 \right\}, \quad K = \frac{4\pi N z^2 e^4}{mc^2}$$

ここで、 Z 、 A は物質の原子番号と原子量、 z は入射荷電粒子の原子番号、 ρ は媒質の物質密度、 β は光速を単位にした入射粒子速度、 m 、 e は電子の質量と電荷、 N はアボガドロ数、 I は実効電離ポテンシャルを表している。入射粒子が単位電荷を持っているときの K の値は、 $mc^2=0.511\text{MeV}$ を用いて計算すると $K=0.154 \text{ MeVcm}^2/\text{g}$ となる。単位電荷と粒子エネルギーの単位は MeV である。また E_M は、二体の相対論的運動学によって与えられる、相互作用によって粒子が受け渡す事が出来るエネルギーの最大値であり、

$$E_M = \frac{2mc^2 \beta^2}{1 - \beta^2}$$

と表される量である。

参考文献

- [1] T. Nakamura et al. *Phy. Rev. Lett.*, 103, 262501 (2009)
- [2] B. Jurado et al. *Phys. Lett. B* 649, 43 (2007).
- [3] A. Gade et al. *Phy. Rev. Lett.*, 99, 072502 (2007).
- [4] G. Audi, A. H. Wapstra, and C. Thibault, *Nucl. Phys. A* 729, 3327 (2003)
- [5] 理化学研究所 プレスリリース (2007)
<http://www.riken.go.jp/r-world/info/release/press/2007/070324/detail.html>
- [6] T. Nakamura, Inclusive Breakup of Neutron Drip-Line Nuclei near $N=20$ and $N=28$
Proposal
- [7] 小林信之, 修士論文, 東京工業大学 (2009)
- [8] 近藤洋介, 卒業論文, 東京工業大学 (2001)
- [9] 中林彩, 修士論文, 東京工業大学 (2006).
- [10] 奥村俊文, 修士論文, 東京工業大学 (2005)
- [11] 田中直樹, 修士論文, 東京工業大学 (2010)

謝辞

この研究を進めるにあたり、沢山の方々に御協力、助言を頂きました。指導教官である中村隆司氏には本研究の方向性から解析を進める方法まで指導して頂きました。また、日本語の文章で論文を書くためにたくさんの助言を頂きました。助教の近藤洋介氏には解析が行き詰まったときの確かな助言を頂きました。理化学研究所の松下昌史氏にはγ線検出器のDALI2の仕組みや解析方法、実験に対する姿勢を教わりました。また、同研究室の博士課程2年の小林信之氏には解析環境の整備や行き詰ったときの解決法など些細なことまで丁寧に教えてもらい大変お世話になりました。本実験の共同実験者の方々には実験時に大変お世話になりました。

本論文は多くの方々のご指導、助言のお陰で完成することができました。大変感謝致します。

RIKEN-RIBF-55 Collaborators (敬称略)¹

小林信之、中村隆司、近藤洋介、出口茂樹、田中直樹、河田鷹介、佐古貴行、高橋好太郎、田中隆己、佐藤義輝²、H. S. Lee、S. Kim、青井考³、馬場秀忠、福田直樹、稲辺尚人、石原正泰、久保敏幸、松下昌史、本林透、大西哲哉、大津秀暁、櫻井博儀、武智麻耶、竹田浩之、武内聡、榎野泰宏、米田健一郎、R. Kanungo⁴、M. Famiano⁵、R. Barthelemy、N. A. Orr⁶、炭竈聡之⁷

¹ 東京工業大学

² Seoul National University, Korea

³ 理化学研究所

⁴ Saint Mary's University, Canada

⁵ Western Michigan University, USA

⁶ LPC-ENSICAEN, IN2P3-CNRS et Universite de Caen, France

⁷ 東京理科大学