

## 超重粒子検出器としてのイメージングプレートの基礎特性

郡 司 修 一<sup>1</sup>・櫻 井 敬 久<sup>1</sup>・佐 藤 修 彦<sup>1</sup>・安 田 伸 宏<sup>2</sup>・小 林 正<sup>3</sup>

### Basic Characteristics of an Imaging Plate as Heavy Particle Detector

By

Syuichi GUNJI<sup>1</sup>, Hirohisa SAKURAI<sup>1</sup>, Nobuhiko SATO<sup>1</sup>, Nakahiro YASUDA<sup>2</sup>, and Tadashi KOBAYASHI<sup>3</sup>

**Abstract:** We are investigating basic characteristics of an Imaging Plate to develop new type of ultra heavy particle detector. In this paper, we describe the fading characteristics of the Imaging Plate (IP) and the method of determination of  $dE/dx$  for heavy particles in use of the IP, based on the experiments of the irradiation with heavy particles by the accelerator (HIMAC) in NIRS and with  $\alpha$ -rays in Yamagata University.

#### 概 要

現在我々は、イメージングプレート (IP) を超重粒子検出器として応用すべく、IP の基礎実験を行っている。本文では、放射線医学総合研究所での重粒子照射実験と山形大学でのアルファ線照射実験を基に、IP のフェーディング効果と IP による重粒子の  $dE/dx$  決定方法を述べる。

**重要語:** イメージングプレート (IP), 超重粒子宇宙線, 超重粒子宇宙線検出器

#### 1. はじめに

宇宙線物理学の分野において、一次宇宙線の重粒子比率の精密測定は、超新星爆発の際に生じる元素合成のプロセスや宇宙空間における物質量を研究する上で非常に有効な手段となっている [1]–[5]。そのため、現在まで HEAO3 や Trek 検出器等で、その元素比の精密な測定が行われてきた [4] [5]。しかしながら原子番号が 80 を越える核種に関しては、そのフラックスが非常に少ないため、まだ精密な測定が行われていないのが現状である。実際に原子番号が 80 を越える超重粒子を精度良く検出するには、大面積で長期間の観測が必要であり、宇宙ステーションでの数年に渡る観測が必要となってくる。大面積のアクティブな検出器を製作するには、非常にコストがかかるので、パッシブな検出器が現実的である。また長時間の観測でも安定に動作する必要があるので、比較的構造が単純な検出器が適している。この様な要請から、重粒子検出器として原子核乾板等が現在まで使用されてきたが、この様な装置の欠点は、宇宙ステーションで宇宙線にさらした原子核乾板を 1 年程度おきに地上に持ち帰る必要があるということである。さらに原子核乾板のデータ解析技術は近年向上しているが、その解析

---

<sup>1</sup>山形大学理学部, <sup>2</sup>放射線医学総合研究所, <sup>3</sup>青山学院大学理学部

には多くの時間が必要である。

我々は、その様な従来の検出器の欠点を克服するために、イメージングプレート (IP) を使用して、新しいタイプの重粒子検出器を開発する事を計画している [6]。IPは富士写真フィルムで開発されたデバイスで、位置分解能が  $25\ \mu\text{m}$ 、ダイナミックレンジが100000、感度がX線フィルムの1000倍という大変優れた性能を持つ検出器である。IPに重粒子が入射すると、そのエネルギーデポジットの情報はIPに蓄えられる。この情報はIPにレーザーを照射して、その際に生じる輝尽発光 [8] を光電子増倍管で捕らえることで読み出せる。この輝尽発光の量 (PSL値と呼ばれる) から入射粒子のエネルギーデポジットの量を調べることができる。以上のレーザー照射から光電子増倍管での輝尽発光の取得はIPの読みとり装置で行われる [7]。現在市販されているIPには  $20\ \text{cm} \times 25\ \text{cm}$  程度のものであり、これを並べることで大面積化が可能である。さらに  $20\ \text{cm} \times 25\ \text{cm}$  程度の面積に蓄積されたデータを10分程度でデジタル信号として読み出すことができる。そのため非常に精度の高い解析をコンピューターで短時間で行うことができる。またIPは消去機を使うことで、何度も使用可能であるため、図1の様なシステムを宇宙ステーションに構築すれば、地上にIPを持ち帰ることなく、数年に渡り観測を行うことができる。さらに上空で取得されたデータの内、重粒子に関するデータだけを上空でイベントセレクションして、地上にテレメーターを使って送信する事ができるため、観測を行いながら随時解析が可能である。

図1に示されている様なセットアップでは、数層に重ねられたIPにおいて、超重粒子がエネルギーデポジットを行っていく。そのエネルギーデポジットの変化の様子から (トランジションカーブを取ることから)、入射粒子の弁別を行うことが可能である。以上の様な事が実現できれば、IPは非常に有効な超重粒子検出器として使用可能なので、我々は以下に述べる2つのIPの基礎特性を実験的に調べた。

1. まず最初に我々はIPのフェーディング特性を実験的に調べた。フェーディングとは、粒子がIPで起こしたエネルギーデポジットの情報が時間的に失われていく現象である [9] [10]。IPを超重粒子検出器として使用するには、最低でも1週間程度はそのフェーディングが安定している必要がある。
2. 重粒子がIPを通過する際に失われるエネルギーをPSL値を使って検出できるか、重粒子の照射実験から調べる必要がある。さらに大角度から入射した重粒子に対しても、IPで失われたエネルギーをPSL値を使って読み出すことができれば、広いオープニングアングルを持った検出器を構成することができる。そのた

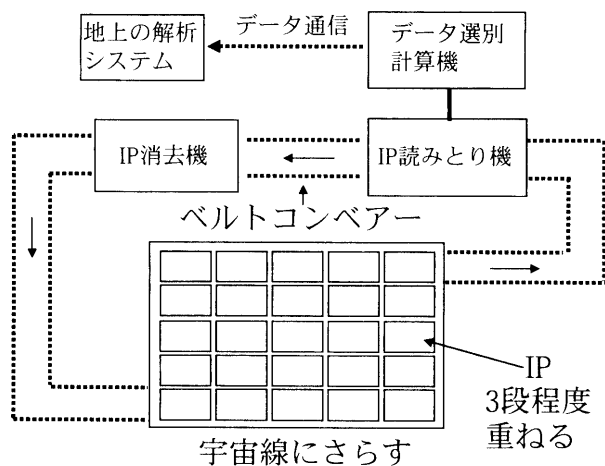


図1 IPを使用した重粒子検出器システムの例  
3層程度に重ねられたIPは1週間程度宇宙線にさらされ、その後ベルトコンベアーを通して、IPからのデータを読みとる装置に送られる。ここでデータを取得し、イベントセレクションが行われ、超重粒子に関するデータのみが地上にテレメーターを使って送信される。データが読み出された後のIPは消去機にかけられて、その後再び宇宙線にさらされる。

め、入射方向によらず、PSL値からIPにデポジットしたエネルギーを決定できる必要がある。以上の2点に関する実験結果を以下で順次説明していく。

## 2. フェーディング特性

フェーディングの特性を調べるために、我々はBAS2025SRと最近発売されたBAS2025MSの2種類のIPを実験に使用した。両者のIPは共に大きさが同じであり、違いはBAS2025MSの方が耐水性に優れた製品であるという事である。まず<sup>241</sup>Amから出てくるアルファ線(5.4 MeV)とガンマ線(60 keV)を5分程度照射して、データを読み出す時間を変化させながら、そのフェーディング特性を調べた。なおこの実験は室温を20度にコントロールして行われている。図2の横軸は照射後からIPを読み出すまでの時間を示しており、縦軸にはその読み出されたPSL値が示されている。黒丸がBAS2025SRのデータであり、白丸がBAS2025MSのデータを示している。この図を見て分かるようにBAS2025SRでは照射後24時間から197時間までの間に、PSL値が70%から37%にも減衰してしまうが、BAS2025MSの場合には、80%から70%程度の減衰で収まっており、比較的フェーディングが緩やかであることが分かる。図の中にはさらに×印のデータも示されているが、これは放射線医学総合研究所でXe(290 MeV/n)をBAS2025SRに照射した場合のフェーディングの様子を示したデータである(1発1発の重粒子のPSLを測定して、そのフェーディングを調べる方法は次のセクションを参照)。このデータを見ると、アルファ線やガンマ線に対するフェーディングも重粒子に対するフェーディングもほとんど同じ振る舞いを示すことが分かる。以上のデータから、BAS2025MSでは照射後1日から8日程度は重粒子に対しても、フェーディングによるPSL値の低下は10%程度である事が期待される。さらに低温ではフェーディング特性は改善されることを考慮すると、温度0度ではBAS2025MSは5%程度のフェーディングしか起こさないと考えられる。

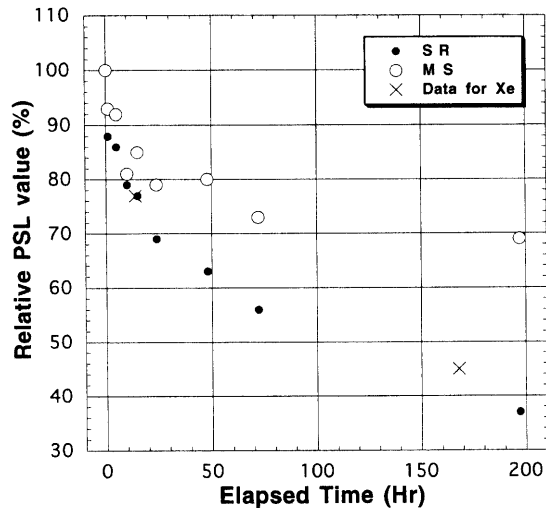


図2 横軸は照射後の経過時間、縦軸はPSL値を示している。黒丸及び白丸のデータは、それぞれBAS2025SRとBAS2025MSに<sup>241</sup>Amからのアルファ線やガンマ線を照射した場合のフェーディングの様子を示している。また図の中の×印は、BAS2025SRにXe(290 MeV/n)を照射した場合のフェーディングの様子を示している。

### 3. 粒子弁別特性

次にIPの粒子弁別性能を調べるために、放射線医学総合研究所で、290 MeV/nのC, Ne, Si, ArをBAS2025SRに垂直に入射させて、IPからのPSL値を取得することで1発1発の重粒子のイメージを調べた [11] [12]。図3は、そのセットアップを示している。ビーム前面にはビームのエネルギーを調整するためのアクリルでできたフィルターと金属のコリメーターが設置されている。また1発1発の重粒子のイメージが重ならないように、ビームのフラックスは1平方cm当たり50発程度に調節された。またコリメーターにより粒子が照射されなかった領域はバックグラウンドの測定に利用された。またフェーディングの効果を揃えるために、各々の粒子のデータは照射から14時間後に読み出された。

図4は以上の様なセットアップにおいて、1発のSiがIP上で作るイメージを示している。図の縦軸は1つのピ

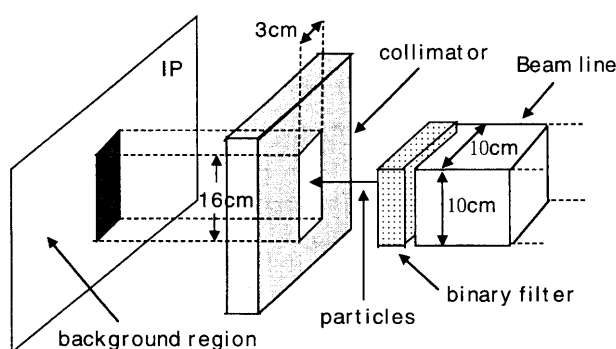


図3 重粒子照射のセットアップ

ビームの元々のエネルギー的な分散とバイナリーフィルターによるエネルギーの分散の効果により、ビームのエネルギー分解能は数%程度であると推定される。またビームのフラックスは1発1発の粒子の像が重ならないように、50発/1cm<sup>2</sup>程度に調整された。

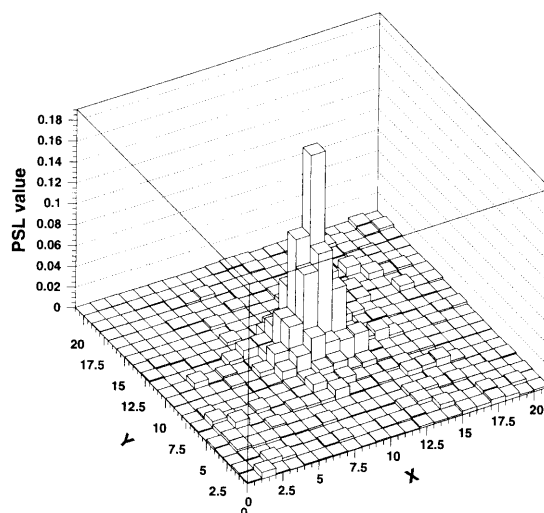


図4 Siの典型的なIP上でのイメージ

X軸とY軸はそれぞれIPのXYに相当する。またXY上の1つのピクセルの大きさは25×25μmに相当する。Z軸はそれぞれのピクセルのPSL値を示している。この形はローレンツ分布でよくフィットできる。

クセル( $25 \times 25 \mu\text{m}$ )上でのPSL値を示している。図を見ると分かるが、1発のイメージは数ピクセルに広がっている。そこで、このイメージをローレンツ分布でフィットして、そのローレンツ分布の90%の体積を含む領域に存在するピクセルのPSL値を足し算することで、1発の粒子の全PSL値を測定した[6]。図5は290 MeV/nのSiの1発1発のPSL値の分布を示している。この図を見て分かる通り、X軸の0.8付近にピークが存在している。これが290 MeV/nのSiのPSL値に相当する。さらに他の3種類の粒子に対しても同様の解析を行い、それぞれの粒子に対するPSL値を測定した。その結果が図6に示されている。横軸は、それぞれの粒子の $Z^2$ を示しており、縦軸は実験で取得したPSLを示している。また縦軸のエラーバーは、図5で示されたピークの $1\sigma$ の幅である。この図を見ると大まかにPSL値が $Z^2$ に比例していることが分かる。入射粒子のエネルギーが同じ場合には、粒子のエネルギーデポジットは $Z^2$ に比例するため、以上の様な解析で決めた1発のPSL値が、粒子のエネルギーデポジットに大まかに比例していることが分かる。またこのグラフが原点を通らないのは、バックグラウンドの見積もりが若干不正確であったと考えられる。以上の実験結果から、IPに粒子が垂直に入射した場合には、IPからのPSL値を使って、入射粒子の電荷を弁別することが可能であることが分かる。しかしながらまだその分解能は悪いので、より解析の手法や温度設定等により、その分解能を上げる努力が必要である。

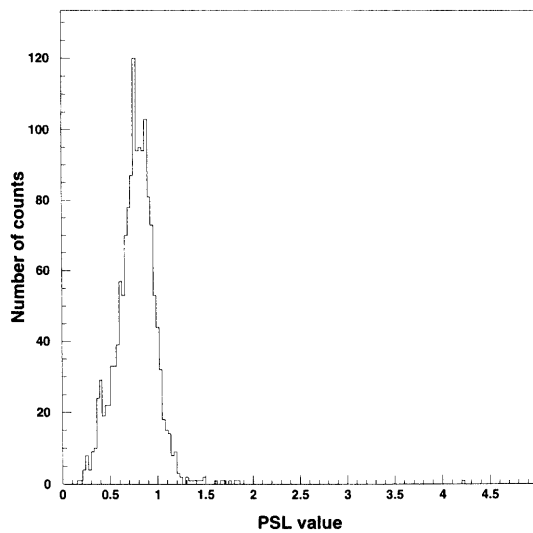


図5 1発1発のSiのPSL分布  
横軸が1発の全PSL値を示しており、縦軸はカウント数を示している。X軸の0.8付近にピークが観測されるが、これが290 MeV/nのSiのピークである。

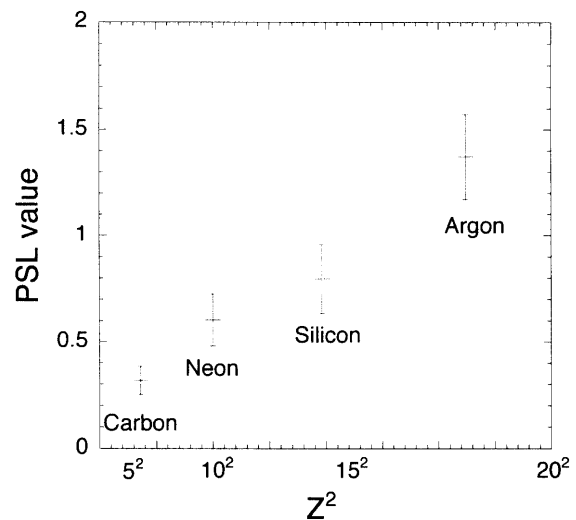


図6 横軸に入射粒子の $Z^2$ 乗を取り、縦軸に解析から得られた粒子のPSL値をプロットした図  
縦軸のエラーバーは、それぞれの粒子のPSL分布の $1\sigma$ の幅に相当する。入射粒子のエネルギーデポジットの量は、入射粒子のエネルギーが同じである場合には、 $Z^2$ に比例する。その事を考えると、解析で得られたPSL値が、粒子のエネルギーデポジットに比例していることが分かる。

## 4. 斜め入射に対するIPのレスポンス

次にIPをビームに対して傾けた際のIPのレスポンスを測定した。測定に使用した粒子は500 MeV/nのFeであり、実験に際しては図3で示したバイナリーフィルターやコリメーターは使用しなかった。またこの実験ではBAS2025SRが使用されている。図7は、角度を0度(垂直入射)、45度、60度、70度、80度と変化させていった場合のIP上での平均的なイメージを等高線で表した図である。また右下の図は80度で入射した場合の1イベントの等高線の図である。一番外側の等高線は、ピークの10分の1のPSL値を持ったピクセルを等高線で結んだものである。この図を見て分かる通り、入射角度が大きくなるに従ってその平均的なイメージは、入射方向に対して大きく伸びていくのが観測される。

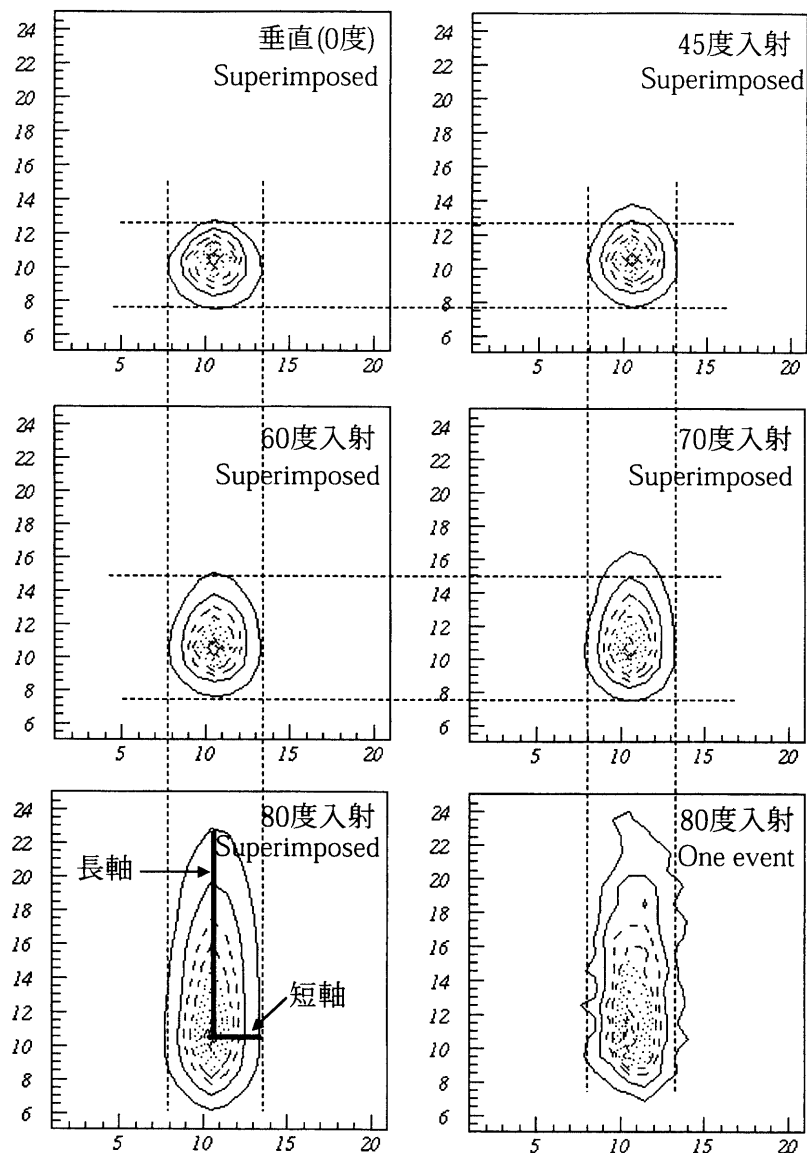


図7 500 MeV/nのFeを様々な角度からIPに入射させた場合のIP上での平均的なイメージ  
 図は全て等高線でプロットされている。また右下の図は80度で入射した場合の1発のFeのイメージである。また80度入射の図には、後に使われる短軸と長軸の定義が示されている。

図7の80度入射の図に示された短軸と長軸の比を、500 MeV/nのFeと290 MeV/nのArに対して1イベントごとに調べた。この結果が図8に示されている。図の横軸は入射角度を示しており、縦軸はその短軸に対する長軸の長さの比である。またこの図ではゼロ度での短軸に対する長軸の長さを1にノーマライズしてある。Y方向のエラーバーは、イベントごとのばらつきを示しており、そのばらつきの $1\sigma$ に相当する。Feのデータは黒丸でArのデータは×で示されている。この図を見て分かる通り、入射核種も入射エネルギーも違う2種類の粒子に対して、その角度ごとの比は非常に良く一致しているのが分かる。これは1イベントのデータの短軸と長軸の比を求めると、大ざっぱな入射粒子の角度を知ることができることを意味している。実際、宇宙環境では入射粒子の角度は、数枚に重ねられたIP上のスポットをリコンストラクトする事により、正確に決定されるが、この様な1発1発のイメージを調べることで、このリコンストラクトが非常に容易に行える。

さらに80度に入射された場合のイメージを使って、IP中で生じる輝尽発光が表面に到達する際にどの程度減衰するかを調べてみた。図9の左図は80度に入射されたFe粒子のイメージである。この図で四角に囲まれた領域(9ピクセル分)のPSLをそれぞれ調べてプロットしたのが、右図である。左図の等高線のピークの部分のPSL値は、IP表面で起こった輝尽発光により得られたPSL値であり、そこから $l$ 離れた部分のPSL値は、 $d = l \tan 80$ の深さから発光した輝尽発光に相当している。また500 MeV/nのFeの場合、IPを通過していく際に失われるエネルギーは $6.8 \mu\text{m}$ 当たり2.35 MeV/nから3.45 MeV/nと変化する。この変化はさほど大きくないため、各部分でのエネルギーデポジットをほぼ一定みなして、解析を行った。図9の右図は、指数関数でよくフィットすることができ、この指数の肩がIP中での輝尽発光の減衰長に相当する。フィットの結果、その減衰長は $21 \mu\text{m}$ であった。この様な短い減衰長は本来好ましくなく、IPでの全エネルギーデポジットのうち、表面に近い部分からのエネルギーデポジットしか読み出せていない事が分かった。

表面付近からの輝尽発光だけが読み出せることを考えると、その付近にエネルギーデポジットの情報が集中していることが分かる。そこで、角度をもってIPに入射した粒子のエネルギー情報を引き出すために、図10で示された領域のPSL値を読み出して、読み出されたPSL値の値が入射角度により、どの様に変化するかを

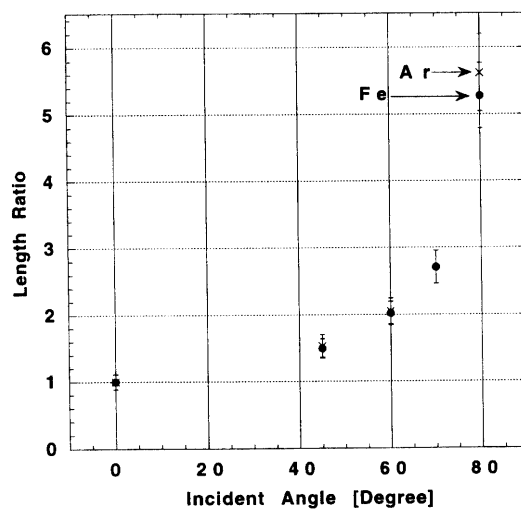


図8 角度によるイメージの違いを示した図  
横軸は入射角度、縦軸は短軸に対する長軸の比を示しており、0度でのデータを1にノーマライズしてある。図の黒丸は500 MeV/nのデータであり、×は290 MeV/nのアルゴンのデータである。ただし70度でのArのデータは実験の失敗により、図にはプロットされていない。

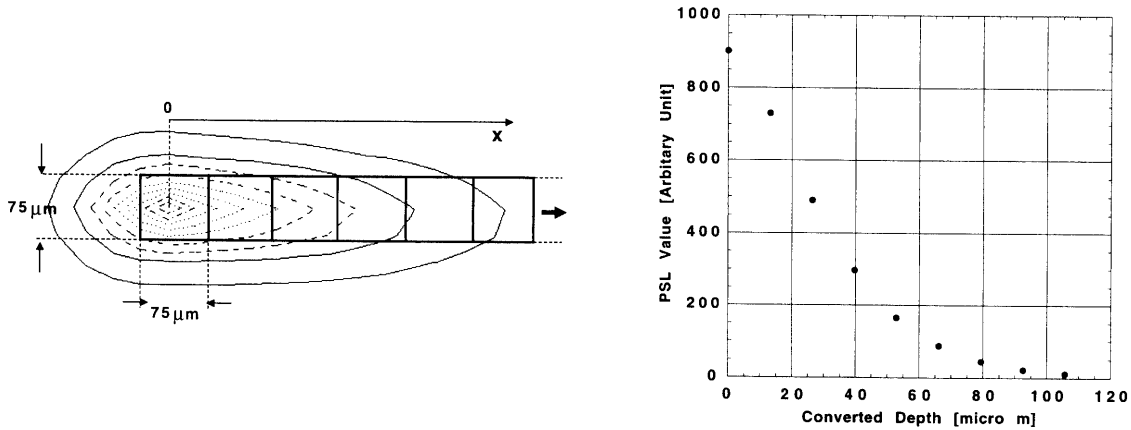


図9 上図は80度で入射されたFeのイメージを示している。そして図に示された領域は75×75μmの領域に相当する。このそれぞれの四角の領域から得られた輝尽発光は、IP中を通り抜けてきた深さがそれぞれ異なっており、等高線の中心から四角の領域の中心までの距離を*l*とすると、 $d = l \times \tan 80$ という深さ*d*を通り抜けてきたことになる。右図は、輝尽発光が起きたと考えられる深さを横軸にして、縦軸にその時に取得したPSL値をプロットしたものである。図を見て分かるとおり、図は指数関数でよくフィットできる。

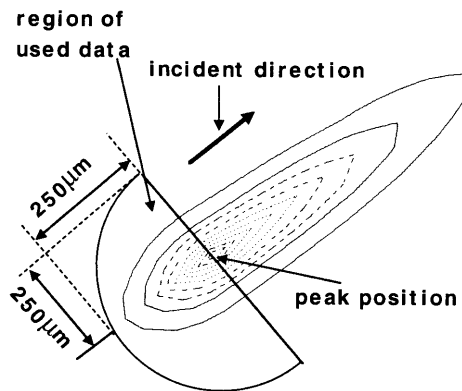


図10 角度がついて入射した重粒子のPSLの決定の方法  
 まず等高線のピークから、イメージが伸びている方向と逆の半径250μmの半円部の領域のデータを使って、それをローレンツ分布でフィットする。そしてそのローレンツ分布の体積の90%を含む領域内に存在するピクセルのPSL値が全部足された。

500 MeV/nのFeと290 MeV/nのArのデータを使って調べてみた。その結果は、図11に示されている。この図を見ると、エネルギーも核種も違う2つの粒子に対して、その振る舞いが非常に似ていることが分かる。従ってこのデータを使えばあらゆる種類の粒子に対して、角度を持って入射した粒子に対するPSL値を、ゼロ度で入射した場合のPSL値に変換することが可能である事が分かる。

最後に以上の様な半円部分の領域を取り出して決定されたPSL値が、IPで生じたエネルギーデポジットに比例するのかを、0度で入射された500 MeV/nのFe、290 MeV/nのAr、290 MeV/nのNeのデータを基にして調べた。以下の表1はその結果を示している。まず計算値として示された値は、290 MeV/nのNeと290 MeV/nのArと500 MeV/nのFeがIPを通過した際に起こすエネルギーデポジットを計算して、Arのデータを1にノーマライズしたものである。一方得られたPSL値とは、上のような半円部からPSL値を決定した場合に得られたPSL値で



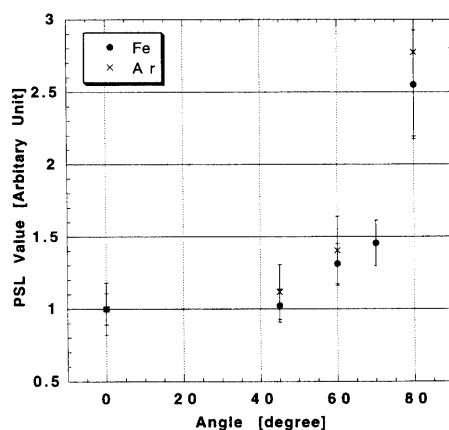


図 11 角度に対する読み出された PSL 値の変化を示した図  
横軸に入射角度、縦軸に読み出された PSL 値が示されている。黒丸が Fe のデータで×が Ar のデータである。エラーバーはイベントごとのばらつきを示したもので  $1\sigma$  に相当する。両者の変化の様子は非常に良く似ていることが分かる。

表 1 実験的に決定された PSL 値と計算から得られたエネルギーそれぞれの値は Ar の値を 1 にノーマライズして書かれている。

	Ne	Ar	Fe
計算値	1.6	1.0	0.31
得られた PSL 値	1.5	1.0	0.29

あり、Ar の値を 1 にノーマライズしてある。この計算値と実験値を見比べると、計算値と得られた PSL 値がよく比例していることが分かる。従って、以上の様な解析方法で得られた PSL 値は、実際のエネルギーデポジットに良く比例していることが分かる。

以上の実験結果をまとめると、IP を使用した場合の超重粒子弁別は以下のようなプロシージャーで原理的に進めることが分かる。

1. 図 1 の様に数枚重ねられた IP 上で、各層の IP での重粒子のイメージを取得し、その飛跡をリコンストラクトすることにより重粒子の入射角度を正確に測定する。その際には、各層の重粒子のイメージの形を調べる事が、リコンストラクトを容易にする (図 8 参照)。
2. 図 10 で説明した方法により、各層の IP の PSL 値を決定する。
3. 得られた PSL 値と図 11 のデータを基に、この粒子が仮に垂直に入射したとしたら、どの程度の PSL 値になるかを計算する。
4. 換算された PSL 値は表 1 で示されているように、エネルギーデポジットに比例するため、各層でのエネルギーデポジットが分かる。そのエネルギーデポジットと入射角度から、各層での重粒子の  $dE/dx$  が計算される。
5. 各層の  $dE/dx$  の値から、トランジションカーブを作ることで、入射粒子の種類が決定される。

## 5. おわりに

以上のように、IPを重粒子検出器として利用することは原理的に可能である。しかしながら、現在のIPの性能ではまだ精度の良い重粒子の弁別は難しいと考えられる。しかしながら、今後以下の2点が改良されれば実際にIPを使用して精度の良い重粒子弁別検出器を製作できるのではないかと思われる。一つはフェーディングである。現在BAS2025MSを低温で温度コントロールすれば、1週間程度は5%程度のフェーディングしか生じないと考えられる。しかし30平方メートル程度の検出面積を持った検出器をIPで製作する場合、IPを全て読み出すのに2週間程度かかると考えられる。従って2週間程度で2%程度にフェーディングが収まる必要がある。もう一つは、IP中での輝尽発光の減衰の問題である。現在はIP中での輝尽発光の減衰があることから、IPで生じたエネルギーデポジットのほんの一部しか検出されていないことになる。もしIPで生じた輝尽発光を減衰無しに捕まえることができれば、PSLの分布はよりシャープになると考えられる。それにより格段に電荷の分解能が上がるのが期待される。

## 6. 謝 辞

本研究は、文部省科学研究費の奨励研究と宇宙科学研究所の気球搭載用機器開発費のもとで行われた。また山形工科大学の西村先生から実験に対して多くの示唆を受けた。放射線医学総合研究所の村上先生には、加速器のマシントイム等の調整でお世話になった。ここで感謝の意を表したい。

## 参 考 文 献

- [1] K. Takahashi *et al.* *Phys. Rev. C* 36 1987 pp. 1522–1528
- [2] A. J. Westphal and Y. D. He. “Measurement of Cross Sections for Electron Capture and Stripping by Highly Relativistic Ions”, *Phys. Rev. Letters Vol. 71 No.8*, 1993 pp. 1160–1163
- [3] A. J. Westphal *et al.* “ECCO: The Extremely Heavy Cosmic Ray Composition Observer”, *Space Technology and Applications International Forum* 1999 pp. 120–126
- [4] W. R. Binns *et al.*, “Abundances of ultraheavy elements in the cosmic radiation: results from HEAO3”, *Ap.J. Vol.346*, 1989 pp. 997–1009
- [5] A. J. Westphal *et al.*, “Evidence against stellar chromospheric origin of Galactic cosmic rays”, *Nature Vol.396*, 1998 pp. 50–52
- [6] G. Kanase *et al.*, “Development of an Imaging Plate as a Heavy-Nuclide Detector”, 1998 *IEEE Nucl. Sci. Sympo.* N12--6
- [7] S. Okano and J. Miyahara, “FUJIX Bio-Imaging Analyzer System”, *FUJIFILM RESEARCH & DEVELOPMENT No.36*, 1991
- [8] Y. Iwabuchi *et al.*, “Mechanism of Photosimulated luminescence process in BaFBr:Eu<sup>2+</sup> phosphor”, *J.J. Appl. Phys. Vol. 33*, 1994 pp. 178
- [9] A. Taniyama *et al.*, “Sensitivity and Fading Characteristics of the 25  $\mu\text{m}$  Pixel Size Imaging Plate for Transmission Electron Microscopes”, *Electron Microsc. Vol.45*, 1996 pp. 232–235
- [10] C. Mori and A. Matsumura, “Radioactivity and geometrical distribution measurements of  $\alpha$ -emitter specimens with the imaging plate”, *NIM Vol.A312*, 1992 pp. 39–42
- [11] 櫻井敬久他, “イメージングプレートを用いた高エネルギー一次宇宙線中の重粒子線の基礎研究”, 1998年放射線医学総合研究所報告書 (9P056)
- [12] 櫻井敬久他, “イメージングプレートを用いた高エネルギー一次宇宙線中の重粒子線の基礎研究”, 1999年放射線医学総合研究所報告書 (10P056)