卒　業　論　文

題　　目　　宇宙線ミュオンを用いた 3 次元非破壊イメージングに関する研究

氏　　名　　本岡親英

所属教育分野　　プラズマ理工学

指 導 教 員　　渡辺幸信助教授

九州大学工学部エネルギー科学科

提出年月　　平成 19 年 2 月

1. 序論 1
1.1 研究背景 1
1.2 研究目的 1
2. 宇宙線ミュオン 2
2.1 宇宙線 2
2.2 ミュオン 3
2.2.1 ミュオンの生成 3
2.2.2 発見に至る経緯[6] 4
2.2.3 物理的性質 5
2.2.4 地上でのミュオンの収量と角度分布 6
3. 3次元非破壊イメージングの原理 7
3.1 散乱過程 7
3.1.1 ラザフォードの式 8
3.2 多重クーロン散乱 8
3.3 測定装置の提案 11
3.4. 再構築アルゴリズム 12
4. 模擬数値実験 14
4.1 PHITS コード 15
4.1.1 PHITS とモンテカルロ法 15
4.1.2 PHITS コードの誕生と現状 15
4.2 PHITS コード適応性の検証 15
5. 結果 17
5.1 実験条件 17
5.1.1 使用体系 17
5.1.2 照射数の決定 17
5.2 模擬数値実験による再構築結果 18
5.2.A 垂直入射、運動量固定ミュオン使用時 18
5.2.A(Ⅰ) 中央にウランを置いた体系の結果 18
5.2.A(Ⅱ) 中央に球形ウランを置いた体系の結果 18
5.2.A(Ⅲ) 4種の物質を置いた体系の結果 19
5.2.A(Ⅳ) 穴を空けた鉄の中に棒状のウランを入れた体系 19
5.2.B 擬似宇宙線ミュオン使用時 20
5.2.C 擬似宇宙線による、p=3[GeV/c]固定時の結果 21
6. 考察とまとめ 35
6.1 考察 35
6.1.1 Z 方向のエラー 35
6.1.2. 分解能 36
6.2 まとめ 39
参考文献 40
謝辞 41

1. 序論

1.1 研究背景

地上には宇宙線が降り注いでいる。つまり我々は宇宙線を浴びながら日々の生活を送っている。宇宙線とは宇宙に存在する高エネルギーの放射線のことで、地上に到達する宇宙線のうち 7 割以上がミュオンという素粒子である。

ミュオンと他の物質との反応は電気的相互作用のみである。具体的に言うと、ミュオンと物質の間には電離しか起こらない。つまりミュオンは物質と電子のやり取りを行うのみである。継続的に浴び続けても我々が影響を受けないのはこのためである。これはミュオンの非破壊検査への適性が高いことも示している。例えば、応用例の一つとして貴重な文化財の状態調査を考えた場合、文化財自体に影響を及ぼさないというのは不可欠な要素であるが、ミュオンはこの条件を満たしている。他の物質と電離しか起こさないので、ミュオンが検査対象の破壊に繋がることはない。

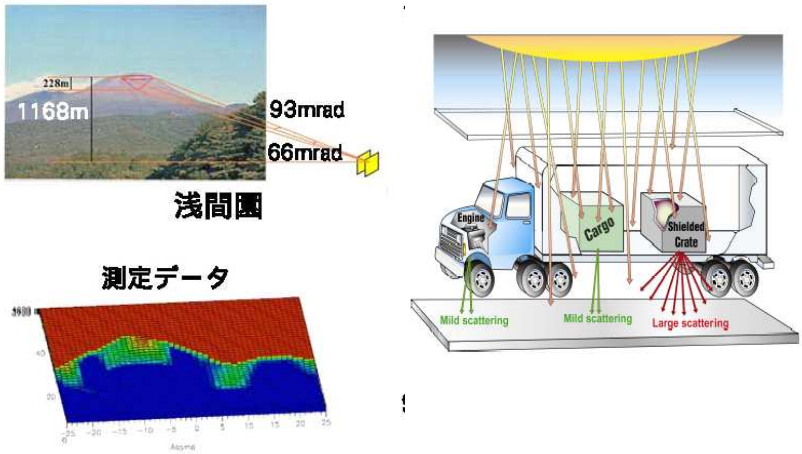
近年、宇宙線ミュオンを用いたラジオグラフィー（放射線撮影）の魅力的な応用が提案され、実証研究が行われてきた。高エネルギー加速器研究機構(KEK)が行った火山のマグマ状態観測はその一例である[(1)]。永嶺謙忠氏らのチームが宇宙線ミュオンの透過力の高さを利用して筑波山と浅間山で内部のマグマ状態の再現を成功させている。他にもピラミッドの内部調査に使用された例がある。宇宙線ミュオンという自然放射線を利用することから、これらのラジオグラフィーには放射線源が不要という大きな特長がある。また、これらのラジオグラフィーはミュオンの減衰を利用している。医療分野で使われる X 線写真もラジオグラフィーの一種であるが、これも X 線の減衰を利用したものである。

1.2 研究目的

従来のラジオグラフィーは減衰を利用したものであったが最近、多重クーロン散乱を利用した新しいラジオグラフィー方法が提案され、核テロ対策に向けた核物質密輸監査装置への応用についての検討がなされた[(2)]。この方法は物質通過時の散乱角の差によって元の物質を判断するという方法である。散乱角には物質の原子番号の増加に伴って大きくなるという傾向があるため、この傾向を利用することで物質の種類を判別する。この方法を使用済み核燃料の管理に利用しようとする試みもある[(3)]。図 1-1 はラジオグラ

フィーの応用例を使用する原理で分類したものである。

本研究は多重クーロン散乱を用いた 3 次元非破壊イメージングの可能性を、高エネルギー粒子、イオン輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)[4] を用いたモンテカルロシミュレーションによって検討するとともに、実際の装置設計の指針を得るために、3 次元破壊イメージング装置の小型プロトタイプ実験装置の設計指針を得ることを目的としている。ここでいう 3 次元非破壊イメージングとは、ある対象を非破壊検査し、その対象の 3 次元立体画像を再構築することである。



減衰
火山内部のマグマ状態観測
ピラミッドの内部調査

多重クーロン散乱
核物質密輸監視
使用済み核燃料の監視

図 1 -1. ラジオグラフィーの応用例[1][5]

2. 宇宙線ミュオン

2.1 宇宙線

宇宙線とは宇宙空間に存在する高エネルギーの放射線のことである。1912 年以降、ビクター・フランツ・ヘス(Victor Franz Hess)が気球を用いた放射線の計測実験を繰り返し行い、地球外から飛来する放射線、つまり宇宙線を発見した。ヘスは「宇宙線の発見」の功績で 1936 年度のノーベル物理学賞を受賞している。

宇宙線は、その生成過程から一次宇宙線と二次宇宙線とに分けられる。一次宇宙線とは地球に入射する宇宙線そのものであり、二次宇宙線とは一次宇宙線が地球の大気と反

応することにより生じる宇宙線である。一次宇宙線が上層の大気にぶつかり、空気中の窒素や酸素の原子核と衝突､反応することで二次宇宙線となる。一次宇宙線の発生源は、銀河系内の超新星の爆発とそれによって発生した星雲､バルサーなどであると考えられている。一次宇宙線は殆ど陽子から成り、他に電子やヘリウム原子核、鉄原子核、ごく僅かではあるがウラン原子核やγ線も含んでいる。二次宇宙線の組成は約 3/4 がミュオン、約 1/4 が電子になっており、他に低エネルギーの窒素粒子も含む。二次宇宙線のうち、透過力の高いもの、具体的には約 10cm の鉛を透過できるものを硬成分、透過できずに吸収されるものを軟成分という。硬成分は主にミュオンで､少量の窒素粒子も含む。軟成分は主に電子、及び陽電子、光子で少量の低エネルギー中間子も含まれる。

2.2 ミュオン

2.2.1 ミュオンの生成

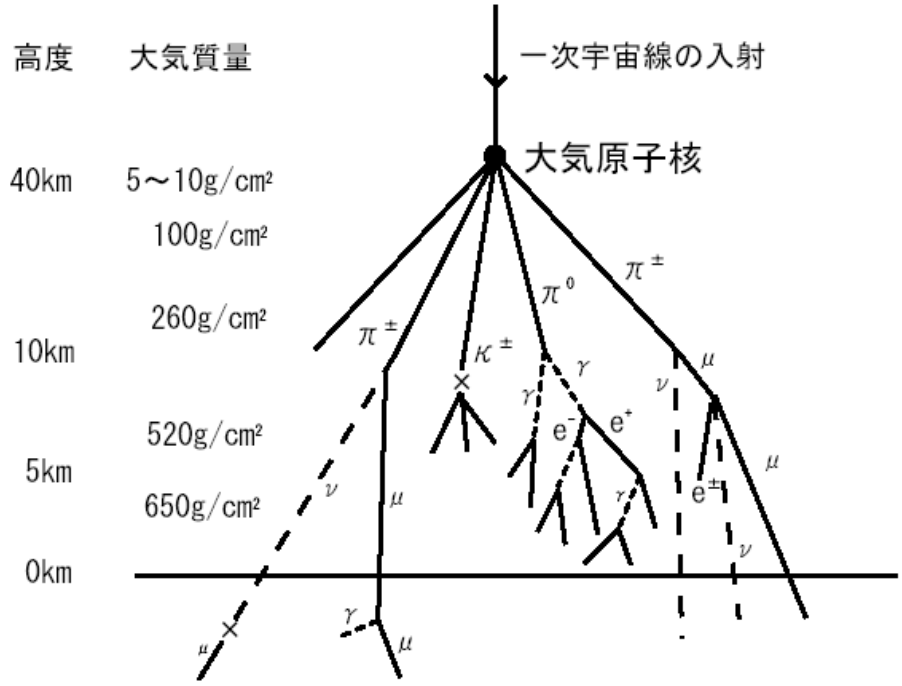


図 2－1. 地上付近での宇宙線

図 2－1 に地上付近での宇宙線の様子を示す。およそ 20km 上空の大気中で一次宇宙

線により、パイオン(π)が作られる。パイオンはπ中間子ともよばれる。

一次宇宙線から生じた平均寿命 2.6×10^{-8}[s]の荷電パイオンは、およそ 10km 上空で次のようにミュオンへと崩壊する。

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu} \tag{2-2-1}$$

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \bar{\nu}_{\mu} \tag{2-2-2}$$

ここで $\pi^{\pm}$は正及び負パイオン、$\mu^{\pm}$は正及び負ミュオン、ν_{μ} はミューニュートリノ、$\bar{\nu}_{\mu}$ は反ミューニュートリノである。

その後、ミュオンは平均寿命 2.2×10^{-6}[s]で次のように崩壊する。

$$\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \nu_{e} + \bar{\nu}_{\mu} \tag{2-2-3}$$

$$\mu^{-} \rightarrow e^{-} + \bar{\nu}_{e} + \nu_{\mu} \tag{2-2-4}$$

ここで ν_{e} は電子ニュートリノ、$\bar{\nu}_{e}$ は反電子ニュートリノである。2.2×10^{-6}[s]は非常に短く、ある物体が仮に光速 c=2.998×10^{8}[m/s]で進んだとしても 660m 程度しか進むことができない。しかし物体の速度 v が光速に近い場合は、相対論効果により進む時間が $1/\sqrt{1-\beta^{2}}$ 倍($\beta=v/c$)になるため、ミュオンは地上に到達しうる。

2.2.2 発見に至る経緯[6]

1932 年に中性子が発見され、原子核が陽子と中性子からなることがわかった。原子核を構成する陽子と中性子は総称して核子と呼ばれる。陽子は＋の電荷を持ち、中性子は電荷を持たないことから核子間には電気的でない引力が必要である。この引力を核力という。1934 年、湯川秀樹博士は電磁場の量子論を元に、核力を媒介し原子核を安定に保つ粒子（以下 U 粒子）の存在を予言した。湯川博士は核子間の距離が 10^{-15}[m]を超えると核力が極端に弱くなる、という実験結果から U 粒子の質量が電子の質量の約 200 倍であると理論的に予想していた。それらの予想を「素粒子の相互作用について」と題した論文に記し、1935 年に発表した。その後 1937 年にカール・アンダーソン（Carl Anderson）、セス・ネッダーマイヤー（ Seth Neddermeyer）によって宇宙線の霧箱写真の中から電子の約 200 倍の質量を持つ粒子（以下 M 粒子）が発見された。この質量は U 粒子の質量と近かったため、当時の物理学者はこの粒子を U 粒子と考えた。陽子と電子の間の質量を持つことから、U 粒子は中間子と名づけられた。その後 1947 年にセシル・パウエル(Cecil Frank Powell らがアンデス山脈の標高 5000m の山上に置いた原子核乾板で U 粒子が崩壊して M 粒子になり、さらに M 粒子が崩壊して電子になる事例を

発見した。この事実により、U 粒子と M 粒子は区別されるようになった。U 粒子は π 中間子、M 粒子はミュオンと名づけられた。その歴史的経緯からミュオンは μ 中間子と呼ばれることもあったが、現在ではそう呼ばれることは殆どない。π 中間子の存在を予言した湯川博士は 1949 年度に「核力の理論的研究による中間子の存在の予想」の功績で、π 中間子を発見したパウエルは 1950 年度に「写真による原子核崩壊過程の研究方法の開発および諸中間子の発見」の功績でそれぞれノーベル物理学賞を受賞している。

π 中間子、ミュオンは共に素粒子の一種であるが、π 中間子は強い相互作用(核力)を受けるクォークに、ミュオンは強い相互作用を受けないレプトンに属する。つまり、今日では両者は全く別の種類の粒子として扱われている。

2.2.3 物理的性質

ミュオンは素粒子の一種であり、105.66 [MeV]の質量、1/2 のスピン、正および負の電荷、3～4 [GeV]の平均エネルギー、2.2×10^{-6}[s]の平均寿命を持つ。図 2－2 はミュオンの運動量分布である(7)。

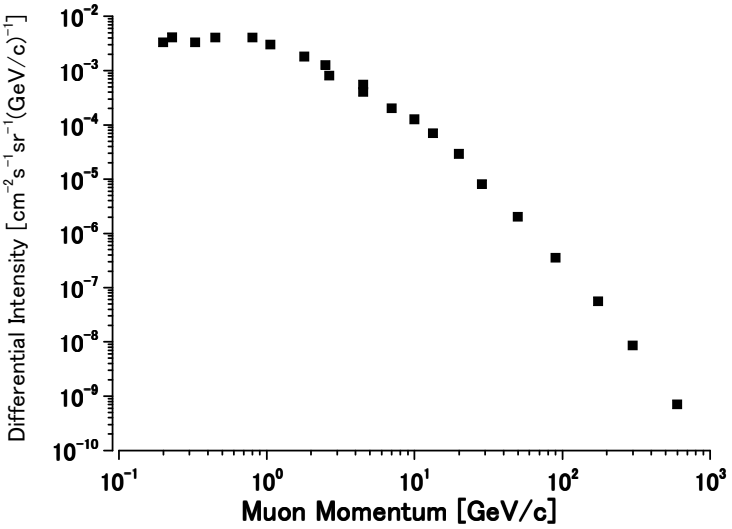


図 2－2　宇宙線ミュオンの運動量分布

また、その高い平均エネルギーによりミュオンは高い透過力を持つ。平均寿命は 2.2 [μs]だが、エネルギーの高いものは前述したように相対論効果により地上に到達しうる。相対論において運動量 p と運動エネルギーT には以下の関係がある。

$$p = \frac{\sqrt{T^2 + 2Tm_0c^2}}{c} \tag{2-2-5}$$

ここで c=2.998×10^8[m/s]は光速、m_0=105.66[MeV]はミュオンの質量である。m_0 を[GeV]単位で書くと m_0=0.10566[GeV]となる。従って平方根内はおよそ T^2+0.21T となり、T が大きい場合は第 2 項の影響は小さくなるため、p=T と近似される。図 2－3 は p=1～10[GeV/c]までの p-T 関係である。

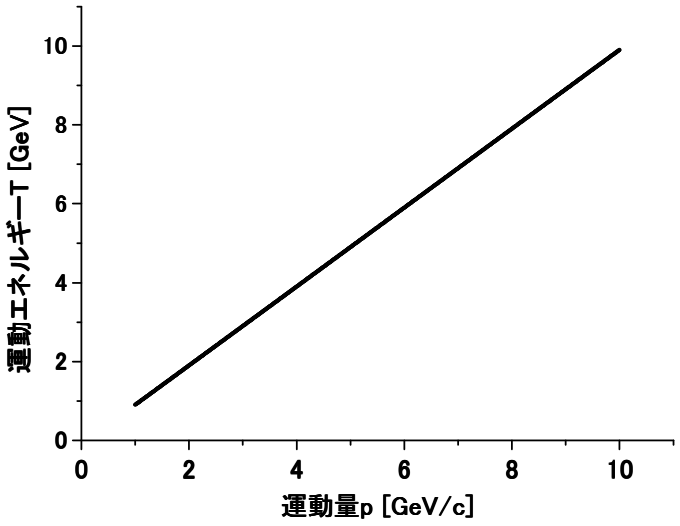


図 2－3. 1～10[GeV/c]までの運動量 p と運動エネルギーT の関係

質量 105.66[MeV]は電子の質量 0.511[MeV]の 207 倍、陽子の質量 938[MeV]の 1/9 倍に相当する。＋の電荷を持つ μ^+は軽い陽子、－の電荷を持つ μ^-は重い電子のように振舞う。μ^-は電子と約 200 倍の質量の差があるが、両者の違いは現在見出されている全ての物理過程において質量差に起因するものしか存在しない。この類似性は μ-e 普遍性(μ-e universality)と呼ばれている[(8)]。

ミュオンは物質とは電磁相互作用をするのみである。相対論的なミュオンの物質中での電磁相互作用には電離と制動放射がある。電離とは高速荷電粒子が物質を通過する際、その物質を構成する原子または分子を電離、励起することによってエネルギーを失う現象のことである。制動放射とは電子が原子核に接近した時に原子核の電場で曲げられ、その際大きな加速度を受けるために電磁波としてエネルギーを失う過程のことである。エネルギーが 1000 [GeV] を超える領域では制動放射の影響も強く効いてくるが、地上に到達するミュオンの殆どはそれほどのエネルギーを持たないため、ミュオンと物質との相互作用は主に電離と考えてよい[(9)]。

2.2.4 地上でのミュオンの収量と角度分布

ある方向から来る粒子の単位立体角、単位面積、単位時間あたりの粒子数を強度という。地上でのミュオンの天頂角 θ における強度 j_θ は次式(2-2-6)で近似できる。

$$j_\theta \approx I_v \cos^2\theta = j_{\theta=0}\cos^2\theta \qquad (2\text{-}2\text{-}6)$$

ここで I_v は $I_v = j_{\theta=0}$ であり、鉛直強度と呼ばれる。あらゆる方向からの単位面積、単位時間あたりの粒子数 J は全方向強度と呼ばれ次式で表される。

$$J = \int j_\theta d\Omega = \int_0^{\pi/2} j_\theta \sin\theta d\theta \qquad (2\text{-}2\text{-}7)$$

式(2-2-7)に式(2-2-6)を代入すると J と I_v との関係式が得られる。

$$J = \frac{2\pi I_v}{3} \approx 2.1\times I_v \qquad (2\text{-}2\text{-}8)$$

ミュオンの鉛直強度 I_v は 8.0×10^{-2}[$cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}$]、全方向強度 J は 1.7×10^{-2}[$cm^{-2}s^{-1}$]程度であると計算できる。つまりミュオンは地上に 1 秒に $1m^2$ あたり 170 個程、1 分間に $1m^2$ あたり 10000 個程降り注いできている。

本研究ではこの宇宙線ミュオンを用いた非破壊イメージングを検討する。

3. 3 次元非破壊イメージングの原理

ミュオンを用いたラジオグラフィーには減衰を用いるものと多重クーロン散乱を用いるものがある。対象が小さい場合、減衰は殆ど観測できないので、多重クーロン散乱を利用する方法を採用する。

3.1 散乱過程[10]

散乱とは衝突等による偏向である。クーロン散乱とは原子核のクーロン場との相互作用による散乱のことである。一般的に散乱の扱い方は 3 つの範囲で分けられる。

1)単一散乱

一回以上散乱が起きる確率が小さい場合、角度分布は単純にラザフォードの式で与えられる。

2)複数散乱

散乱の平均回数が 20 回未満の場合、複数散乱を用いる。ラザフォード公式も統計的方法も単純に適用できないので最も扱いが難しい。

3)多重散乱

散乱の平均回数が 20 回以上でエネルギー損失が小さいもしくは無視できる場合、偏向角の確率分布の統計を通過する物質の厚さの関数として扱うことができる。対象物質が厚い場合は多重散乱が最も一般的である。

3.1.1 ラザフォードの式

ラザフォード散乱とは、衝突する原子内の全ての+電荷が原子核一点に集中しているとして、入射粒子がその点電荷からクーロン反発力を受けて散乱するという考え、つまりクーロン力による荷電粒子の散乱のことであり、クーロン散乱とも言う。散乱角を θ とした時、θ 方向に散乱する確率 $\sigma(\theta)$の微分断面積は次の式で表される。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{z_1{}^2 Z_2{}^2 e^4}{4p^2v^2} \times \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \tag{3-1-1}$$

z_1 ：入射粒子の電荷 [C]

Z_2 ：衝突する原子の電荷 [C]

$e = 1.6\times10^{-16}$：電気素量 [C]

p ：入射粒子の運動量 [kg･m/s]

v ：入射粒子の速度 [m/s]

これをラザフォードの式という。

3.2 多重クーロン散乱[11]

多重クーロン散乱において散乱角が小さい場合、その散乱角の角度分布は 0 を中心としたガウス分布で与えられる。またその標準偏差は次式で与えられる。

$$\sigma_\theta = \frac{13.6MeV}{\beta cp}|z|\sqrt{\frac{L}{L_0}}\left[1 + 0.038\ln\left(\frac{L}{L_0}\right)\right] \tag{3-2-1}$$

βc：速度 [m/s]

z：入射粒子の電荷 [C]

L：対象の厚さ [m]

L_0：放射長 [m]

放射長とは制動放射によってエネルギーが 1/e に減少するまでに通過する平均距離のことである。放射長をパラメータとして使用することで散乱角標準偏差が簡素な関数となる。

放射長として、L_0 に通過する物質の密度を掛けた X_0[g/cm^2]を用いることもある。その場合、散乱角 θ は次式で表される。

$$\theta = \frac{13.6MeV}{\beta cp} z \sqrt{\frac{X}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln\left(\frac{X}{X_0} \right) \right] \tag{3-2-2}$$

ここで X[g/cm^2]は通過する物質の長さに密度を掛けたものである。

入射粒子はミュオンなので z=±1 である。式(1)より散乱角 θ は運動量 p、通過する物質の厚さ L、通過する物質の放射長 L_0 が判れば算出できる。放射長 L_0 は次式で表される。

$$L_0 = \frac{A}{4\alpha r_e^{\,2} N_A \rho} \{ Z^2 [L_{rad} - f(Z)] + Z L'_{rad} \}^{-1} \tag{3-2-3}$$

A：通過する物質の質量 [u]

α=1/137.03599976 ：微細構造定数

N_A=6.02214199×10^{23}：アボガドロ数 [mol^{-1}]

ρ：通過する物質の密度 [g/cm^3]

Z ：原子番号

また、L_{rad} , L'_{rad} , $f(Z)$はそれぞれ

$$L_{rad} = \ln 184.15 Z^{-1/3} \tag{3-2-4}$$

$$L'_{rad} = \ln 1194 Z^{-2/3} \tag{3-2-5}$$

$$f(Z) = a^2 \left[\left(1 + a^2\right)^{-1} + 0.20206 - 00369 a^2 + 0.083 a^4 - 0.002 a^6 \right] \tag{3-2-6}$$

※ $a = \alpha Z$

で表される。ただし（3-2-4)、(3-2-5）は Z>4 の場合である。4 以下の場合は表 3-1 のようになる。

表 3-1.　Z≦4 の時の L_{rad}、L'_{rad} の値

元素	Z	L_{rad}	L'_{rad}
H	1	5.31	6.144
He	2	4.79	5.621
Li	3	4.74	5.805
Be	4	4.71	5.924

これまでの議論は対象が単体の場合の議論である。対象が化合物の場合は次式を使用する。

$$\frac{1}{X_0} = \sum_i \frac{w_i}{X_i} \tag{3-2-7}$$

w_i：各原子のウェイト（分子量割合）

X_i：各原子の放射長 [g/cm^2]

この式から放射長を算出し、式(3-2-1)を用いると対象が化合物の場合の散乱角も求められる。

L_{rad}、L'_{rad}、$f(z)$は全て原子番号 Z の関数であるが、Z の影響は小さい。そのため (3-2-3) 式より放射長は Z に逆比例するので、表 3－2 に示すように散乱角標準偏差は Z と共に増加する。この事実を物質の判別に利用する。

表 3－2. ガウス分布標準偏差の Z による変化

物質	Al	Fe	Ag	U
σ [mrad]	1.39	3.35	4.94	8.43

3.3 測定装置の提案

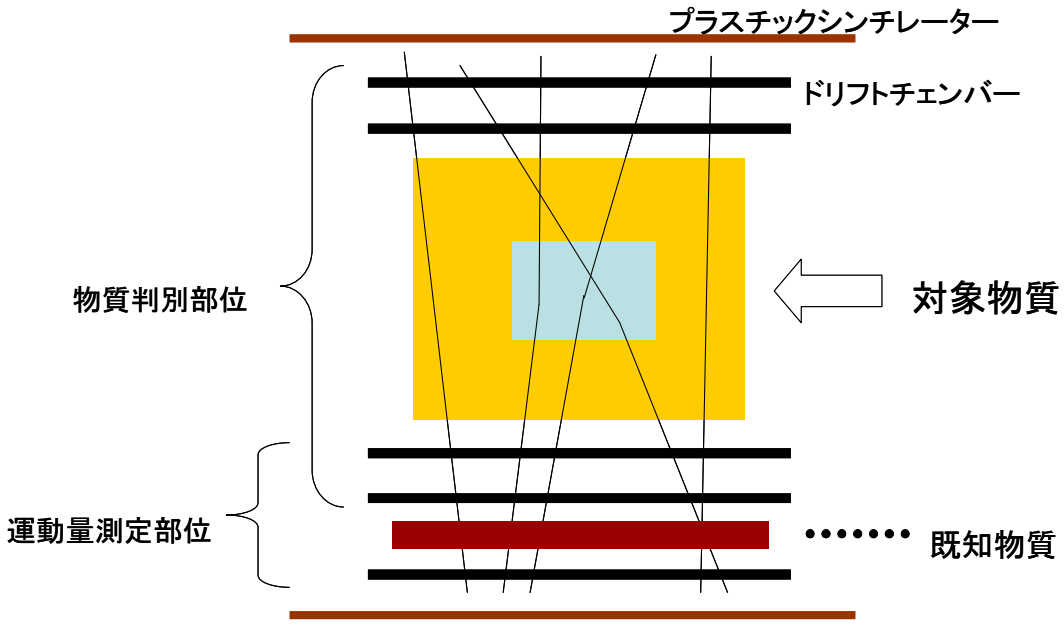


図 3－1. 測定装置概略図

提案する測定装置の略図は図 3－1 に示す通りである。装置は対象物質を入れる部分、検出器、既知物質から成り、上部分は物質判別部位、下部分は運動量測定部位である。これらのさらに外側の上下に、プラスチックシンチレータを各 1 枚ずつ設置する。

箱部分に対象物質を入れ、装置上方からミュオンを照射し、検出器で得た情報を元に対象物質を入れた箱部分内部の様子を再構築する。

物質判別部位は対象と箱型装置を上下各 2 枚の位置有感型放射線検出器(ドリフトチェンバー)で挟んだ装置である。ドリフトチェンバーとはガス中に放射線が入ってきた場合に電離が起こり、電離により生じた電子を増幅して信号を得ることで入射粒子の位置を特定する検出器であり、素粒子・原子核実験等で使用されている。

地上に到達する宇宙線はミュオンのみではないので、ミュオン粒子を特定するには宇宙線の識別をする必要がある。ミュオンの判別を行うことと、測定トリガーとすることを目的としてプラスチックシンチレータを使用する。シンチレータの信号でミュオンと判断された粒子のみを測定していく。

上 2 枚の検出器を通過するミュオンの位置を測定し、位置情報から入射位置と入射方向ベクトルを決定する。同様に下 2 枚の検出器での測定値から出射位置と出射方向ベクトルを決定する。

運動量測定部位は既知の物質を 2 枚の検出器で挟んだ装置である。既知物質を用いているのでその放射長も既知であり、厚さもわかる。2 枚の検出器で測定した位置情報から散乱角を算出し、その散乱角から式(3-2-1)用いて通過ミュオンの運動量を決定する。

両部位で決定したミュオンの入射位置、入射方向ベクトル、出射位置、出射ベクトル、運動量を元に散乱角を計算する。計算した散乱角の違いを元に箱型装置内部の様子を再構築する。再構築アルゴリズムは次項で述べる。

3. 4. 再構築アルゴリズム

対象のイメージを再構築するためには散乱位置を特定する必要がある。本研究では、位置特定に、PoCA(Point of closest approach)アルゴリズム[12]を使用する。

PoCA アルゴリズムとは実際に起こっている多重散乱をある一点での散乱と考え、その散乱角と散乱位置から対象の様子を推定するアルゴリズムである。下図は PoCA アルゴリズムの模式図である。

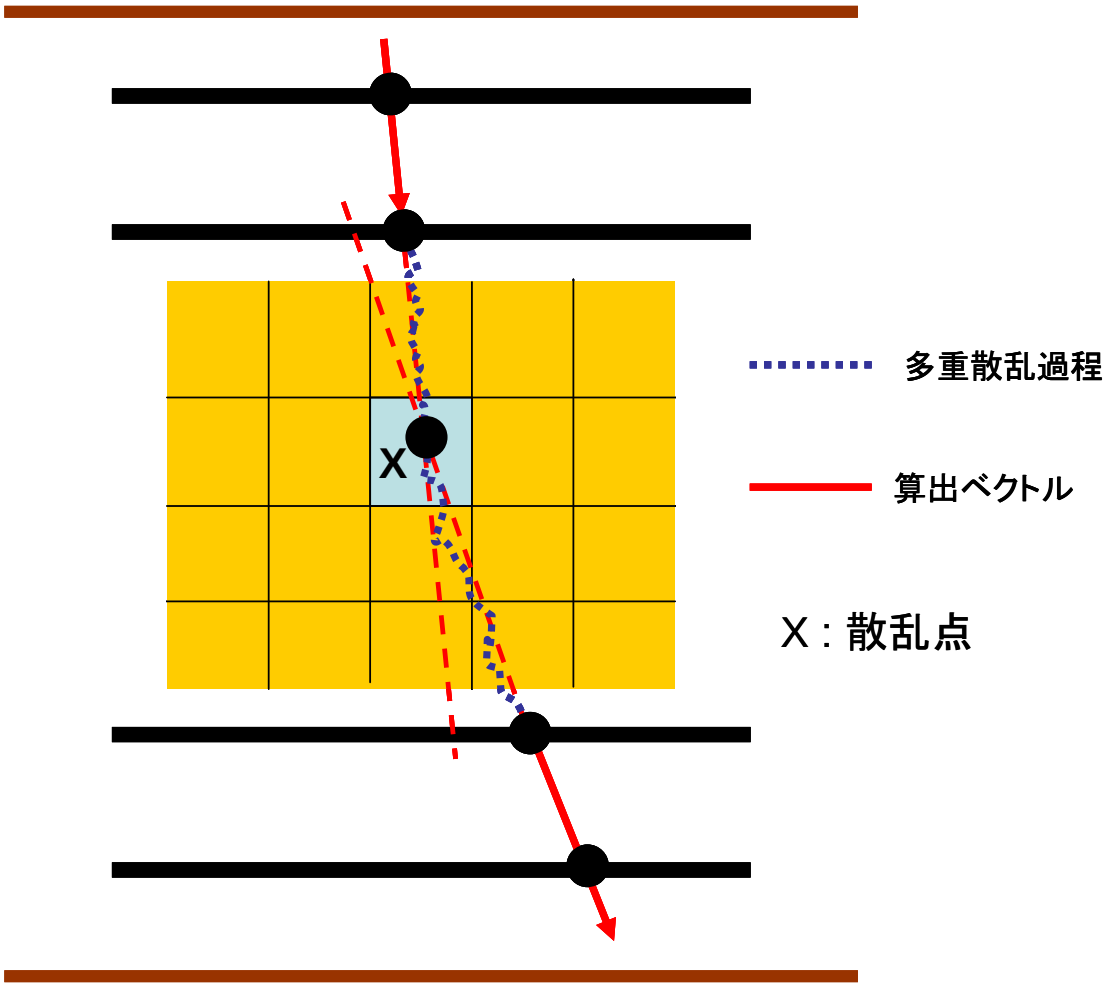


図 3－2. PoCA アルゴリズム模式図

以下、PoCA アルゴリズムの手順を示す。

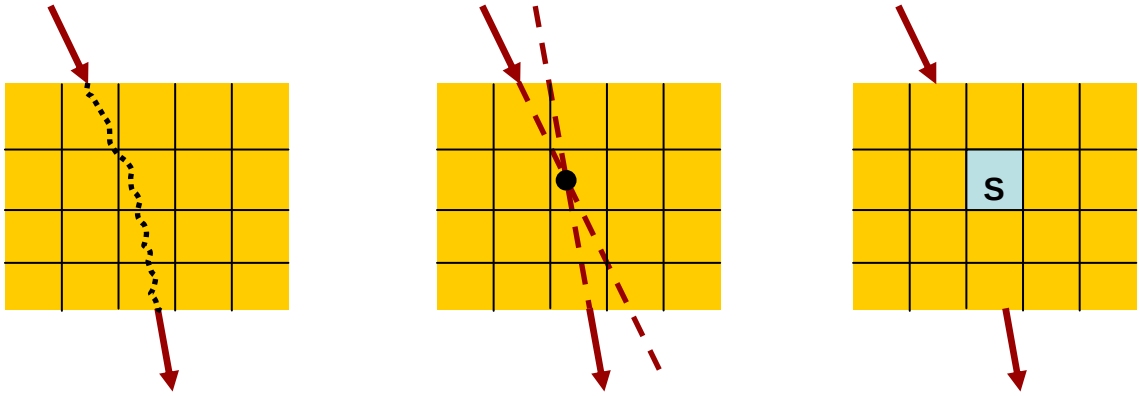


図 3－3.　PoCA アルゴリズム手順図

①上下各 2 枚の検出器の位置情報から入射ベクトルと出射ベクトル決定する。
②散乱が一点で起きていると仮定する。
　入射ベクトルと出射ベクトルの交点を散乱点とする。
③散乱点を含むボクセル(ピクセルの 3 次元版)　に次式で定義する散乱信号 S を与える。

$$S = \frac{\Delta\theta^2}{2L(1+E_p{}^2)}\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 \tag{3-4-1}$$

$\Delta\theta$：角度変化
L：経路長
$E_p=\Delta p/p$：運動量誤差
p：測定した運動量
p_0：設定した標準運動量

この操作を全ての検出器通過ミュオンで行う。最終的には各ボクセルに与えた S の総和を、そのボクセルを通過したミュオンの数 N_i で割ることで平均し、ボクセル毎のパラメータを確定する。i 番目のボクセルに与えるパラメータは以下の式で表せる。

$$\lambda_i = \frac{\sum_j S_{ij}}{N_i} \tag{3-4-2}$$

この λ_i を散乱強度と定義する。λ_i の大小に応じて物質の組成を判断することができる。
下図は 4 種の物質の散乱強度の違いである。4 種の物質はアルミニウム、鉄、銀、ウランであり、10cm の各物質にミュオンを 10000 個垂直照射した時の λ の分布を示して

いる。図より物質に応じてλの範囲が変化していることがわかる。

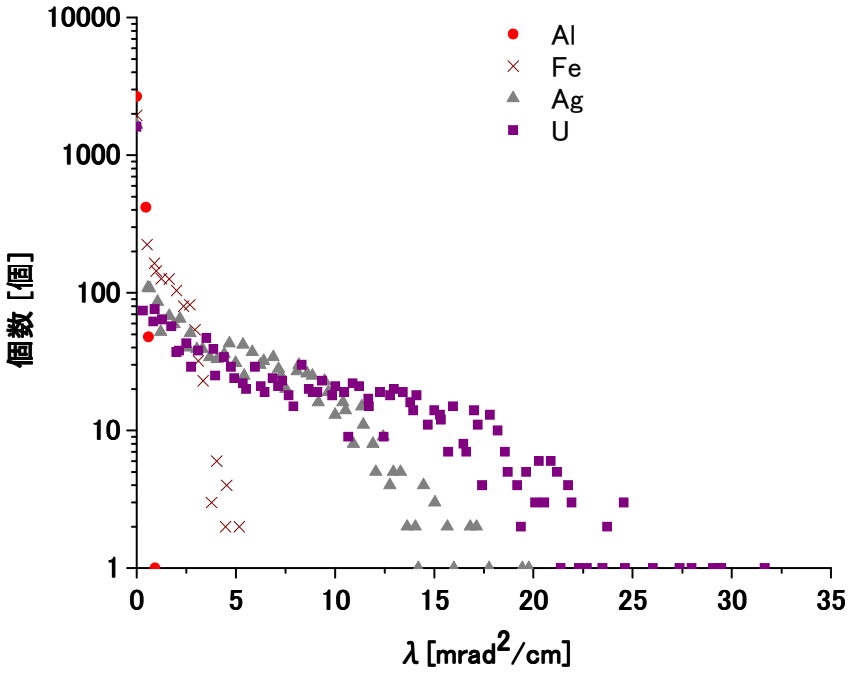


図 3－4. 物質でのλの相違

4. 模擬数値実験

宇宙線ミュオンを利用した非破壊イメージングには放射線源が不要という長所がある。これにより加速器を必要としなくなるので装置の小型化が可能となる。しかしこれを実用化するにはいくつかの課題がある。現実問題として最も重要なのは費用の問題であろう。そこでまず、小型のプロトタイプ・ミュオンラジオグラフィー装置製作を考慮する。この過程で必要経費や現時点での問題点等を洗い出し、3 次元非破壊イメージングの実用可能性を検討する。

プロトタイプのサイズは 1 [m] × 1 [m] ×1 [m] とし、ボクセルのサイズを$(1\mathrm{cm})^3$とする。また、今回はひとまず運動量測定部位は考慮せず、運動量は何らかの手段で得られたものと仮定して話を進める。よって式(3-4-1)の E_p は考慮しない。ミュオン識別に関しても出来たものと仮定して研究を行った。計算機を用いて 3 次元イメージングの模擬数値実験を行い、実験結果を考察する。

4.1 PHITS コード

4.1.1　PHITS とモンテカルロ法

計算機として高エネルギー粒子輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)を使用する。PHITS コードは重イオンを含むほとんど全ての粒子に対する輸送を扱うことができる汎用粒子輸送計算コードであり、モンテカルロ法を使用している。モンテカルロ法とは乱数を利用する計算の総称であり、元々は、中性子が物質中を動き回る様子を探るためにジョン・フォン・ノイマンにより考案された手法である。カジノで有名なモナコ公国のモンテ・カルロからノイマンが名づけた。モンテカルロ法の精度は乱数の性質に依存する。計算をコンピューターで行う場合、擬似乱数を用いることが多い。擬似乱数による乱数列は初期値を決めるとすべて決定されるので、ランダムな数列ではないが、簡単に利用できるという特長がある。PHITS では反応のサンプリングの過程でモンテカルロ法を使用している。

4.1.2　PHITS コードの誕生と現状

PHITS は日本原子力研究所（原研）で開発した高エネルギー粒子輸送コード NMTC／JAM を基に、東北大学及び高度情報科学技術研究機構（RIST）において 2002 年に開発され、現在は RIST、日本原子力研究開発機構（原子力機構）及び GSI（Gesellshaft für Schwerionenforschung mbH　ドイツ重イオン研究所）でその改良が進められている。PHITS は、MCNP（Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code System）などの炉物理で用いられている粒子輸送モンテカルロコードと比較して、高エネルギー粒子及び重イオン（原子核）の輸送が取り扱えるのが特長であり、加速器工学分野だけでなく、有人宇宙飛行や航空機の搭乗員の宇宙線放射線による被曝などの航空宇宙分野、放射線によるがん治療などの医療分野で広く利用されている。

4.2 PHITS コード適応性の検証

PHITS コードはハドロン輸送に広く利用されている。レプトンであるミュオンはオプションとして含まれている。

まず、PHITS コードがミュオンに適用できるかどうかを確認した。PHITS コードを用いてミュオンの多重クーロン散乱過程におけるシミュレーションを行い、その結果とガウス分布を比較することでミュオンの PHITS コード適応性を検証した。

シミュレーションは 1、2、5、10cm の厚さの異なるウランに負ミュオンを 10000 個垂直照射する、というものである。対象にウランを用いたのは、原子番号の大きさから散乱角が大きくなるためである。そのシミュレーション結果を元に計算した散乱角と次

式で求めるガウス分布とを比較した。図 4-1 はその比較結果である。

$$g(\theta)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\theta_0}}\exp\left(\frac{-\theta^2}{2\theta_0}\right) \tag{4-2-1}$$

ここで θ_0 は式(3-2-1)で求めた σ_θ である。

図 4−1 において実線が(3-2-1)式、各点が PHITS による結果である。両者が殆ど一致したことから、PHITS コードがミュオンの多重散乱を再現できることがわかった。PHITS コードのミュオン適応性が確認できたので、PHITS 計算により模擬数値実験を行うことにした。

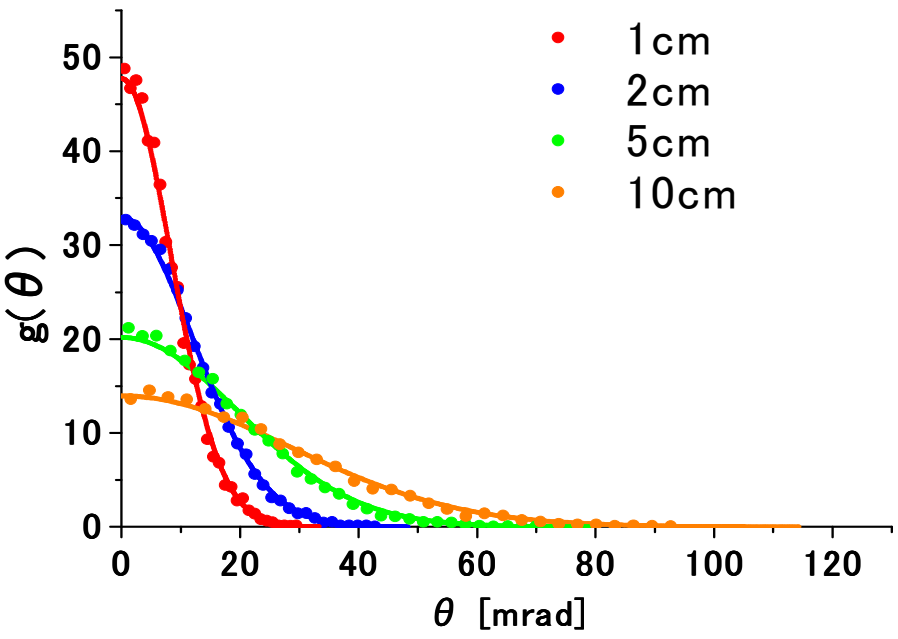


図 4−1. PHITS 計算結果とガウス分布の比較

表 4−1. θ_0 のウランの厚さによる変化

厚さ [cm]	1	2	5	10
θ_0 [mrad]	8.43	12.2	20	28.9

5. 結果

5.1 実験条件

模擬数値実験の使用体系と照射するミュオンの粒子数を次項のように決定した。

5.1.1 使用体系

模擬数値実験は以下の 4 体系で行った。(Ⅱ)の球形ウラン、(Ⅳ)の棒状ウラン以外の金属は全て立方体である。尚、測定装置内の金属以外の部分は空気として実験を行っている。

用いた体系
(Ⅰ)中央にウランを置いた体系
(Ⅱ)中央に球系のウランを置いた体系
(Ⅲ)アルミニウム、鉄、銀、ウランを置いた体系
(Ⅳ)穴を空けた鉄の箱に棒状のウランを入れた体系

それぞれの体系の使用目的は以下の通りである。

使用目的
(Ⅰ)最もシンプルな体系での確認
(Ⅱ)PoCA アルゴリズムの曲線再現度調査
(Ⅲ)物質判別の可否の調査
(Ⅳ)異なる物質に囲まれた対象の再現度調査

5.1.2　照射数の決定

実際に模擬数値実験を行うにあたって、照射するミュオン数の決定を行った。

10 cm × 10 cm × 10cm のアルミニウム、鉄、銀、ウランを中央付近に置いた体系に 10 万、30 万、100 万個のミュオンを照射し、その結果を比較することでミュオン照射数の検討をした。結果は図 5－1 に示している。この結果から 30 万個ほどの入射で十分に再構築できることがわかったので基本照射量は 30 万にすることにした。ミュオンは毎分 10000 個入射しているので 30 万の照射数を得るには 30 分かかる。

5.2 模擬数値実験による再構築結果

5.2.A　垂直入射、運動量固定ミュオン使用時

5.1.1 で述べた 4 体系に各体系を対象として、運動量を 3[GeV/c]に固定したミュオンを垂直に 30 万個入射させるという条件で模擬数値実験を行った。式(3-4-1)から求める散乱信号において、経路長 L には装置の Z 方向長さ＝100 [cm] を使用した。p_0=p=3 [GeV/c]とし、E_p は考慮しないので散乱信号は下式から得る。

$$S = \frac{\Delta\theta^2}{2\times 100[cm]} \tag{5-2-1}$$

(Ⅰ)(Ⅱ)(Ⅲ)体系での実験の再構築結果は図 5A(Ⅰ)、(Ⅱ)、(Ⅲ)に示している。図(a)は各体系の配置図、図(b)は計算コードを使用し再現した 3 次元イメージングの結果、図(c)は 3 次元イメージングの XZ 写像、図(d)は 3 次元イメージングの YX 写像の図となっている。それらに加え、表 1 に各体系に置いた物質の座標範囲を、表 2 に模擬数値実験に使用したミュオンの数をまとめた。表 2 における各 N は、N_0 が照射したミュオンの総数を、N_{all} が検出器で測定できたミュオンの数、N_{out} が計算の結果交点が箱の外になったミュオンの数、N_{in} が箱内に入ったミュオンを表している。この定義より N_0=N_{all}－N_{out} である。(Ⅳ)体系での実験結果は図が増えたために異なる表記を取っている。

各々の実験結果の詳細は次項で述べる。

5.2.A(Ⅰ)　中央にウランを置いた体系の結果

(Ⅰ)の「中央にウランを置いた体系」は箱中央に 10 cm × 10 cm × 10cm のウランを置いた体系である。図 5A(Ⅰ)に(Ⅰ)体系での模擬実験結果を示している。

図(b)より、再構築図は元の体系をよく再現できていることがわかる。また図(d)からＸ，Ｙ方向の位置特定はほぼ完全にできていることが、図(b)、(c)からＺ方向の位置特定はおよそできているものの完全ではないことが見て取れる。また、図(c)より、中央のλが高くなっている、つまり中央の散乱角が大きくなっていると判断できる。

以上より、中央に一つ金属を置くような非常に単純な体系はイメージの再構築が可能である。

5.2.A(Ⅱ)　中央に球形ウランを置いた体系の結果

(Ⅱ)の「中央に球形ウランを置いた体系」は箱中央に半径 10 cm の球形のウランを置いた体系である。図 5A(Ⅱ)に(Ⅱ)体系での実験結果を示している。

図(b)より、再構築図は元の体系をよく再現できていることがわかる。λが(Ⅰ)より大きいのは球形ウランが(Ⅰ)に設置したウランよりも大きいことによるものと考えられる。ウランのサイズが大きいことで散乱角が大きくなりλの増大に繋がっていると思われる。また図 5A(Ⅰ)(b)同様にX，Y方向の位置特定はほぼ完全にできているが、Z方向の位置特定は完全ではないことが見て取れる。中央のλが大きくなるというのも(Ⅰ)同様の結果である。さらに、図(d)が円を示していることから曲線の再現は可能である。

以上より、中央に球を置いた体系でのイメージ再構築も可能である。

5.2.A(Ⅲ)　4種の物質を置いた体系の結果

(Ⅲ)の「4種の物質を置いた体系」は箱内に10 cm × 10 cm × 10cmのアルミニウム、鉄、銀、ウランを置いた体系である。図5A(Ⅲ)に(Ⅲ)体系での実験結果を示している。

図(b)より、再現結果に物質の違いがλの違いとなって表れていることが、図(d)より、写像をとることで各物質のλの相違がより顕著になるとわかる。図(c)からはZ方向のぼやけがアルミニウム、鉄、銀、ウランの順に、つまり原子番号の増加に伴って大きくなっていることがわかる。これはウランの多重散乱過程における一つ一つの散乱角が大きいことが、散乱角を固定して決定するPoCAアルゴリズムによる結果との間に、誤差となって表れたと考えられる。アルミニウムではウランとは逆に各々の散乱角が小さいことが、内側への誤差という形で表れていると考えることができる。また、(Ⅰ)、(Ⅱ)同様にX，Y方向の位置特定はほぼ完全で、Z方向の位置特定は不完全である。

これらの結果より、異なる物質の判別は可能である。

以上より異なる物質を置いた体系のイメージ再構築も可能である。

5.2.A(Ⅳ)　穴を空けた鉄の中に棒状のウランを入れた体系

(Ⅳ)の「穴を空けた鉄の中に棒状のウランを入れた体系」は箱内に10 cm × 10 cm × 50cmの穴を2つ空けた50 cm × 50 cm × 50cmの鉄を置き、その一方の穴に10 cm × 10 cm × 50cmのウランを入れた体系である。図5-2で体系の配置について説明している。図5-2(b)は体系をZ方向から見た図、図5-2(c)は体系のY=50[cm]面における断面図である。図5A(Ⅳ)-1、(Ⅳ)-2、(Ⅳ)-3で(Ⅳ)体系での実験結果を示している。

図5A(Ⅳ)-1において、図(a)では再現できているか判断し難いため、Y=50面における再構築図の様子を図5A(Ⅳ)-2(a)に、この断面図をZ方向から見た図を図5A(Ⅳ)-2(b)に示す。これらの図より棒状ウラン、空気孔ともに再現できていることがわかる。また、図 5A(Ⅳ)-1(c)を見ても棒状ウラン、空気孔が区別できていることがわかる。図5A(Ⅳ)-1(c)を見ると、棒状ウランの位置（X=35～45）ではΣλの値が高く、空気孔の位置（X＝45～55）ではΣλの値が低くなっている。しかし、中央部分のΣλが高くなるという現象のため、Z＝50近傍では少しわかりにくくなっている。そこで2次元写像をさ

らに 1 次元に写像した。その結果が 5A(Ⅳ)-1(e)である。それぞれの位置での Σλ が異なることからウラン、鉄、空気が分別可能なことがわかる。

鉄の影響により再構築図がわかりにくくなっているので、再構築の λ 範囲指定を行った。図 5A(Ⅳ)-3-(c)、(d)で λ≧10 とした結果とそれを Z 方向から見た図を、図 5A(Ⅳ)3-(e)、(f)で λ≧20 とした結果とそれを Z 方向から見た図を示している。これらの結果より、低い領域の λ 範囲を除くことでウランのみを特定できることがわかる。

以上より、異なる物質に囲まれた体系も再現可能である。

ここで 5.2.A(Ⅰ)～(Ⅳ)の結果をまとめると、以下の通りである。

- 1 方向の照射のみで 3 次元図の再構築が可能。
- X、及び Y 方向の位置特定がほぼ完全に再現可能。
- Z 方向の位置特定はおよそ出来るが、ぼやけが生じる。
- 散乱強度は対象物質の中央付近で高くなる。
- 曲線を再現可能。
- 異なる物質を判別可能。
- 異なる物質に囲まれた体系の再現可能。

5.2.B 擬似宇宙線ミュオン使用時

地上に到達する宇宙線ミュオンはエネルギー分布及び角度分布を有している。より現実的な模擬数値実験として、エネルギー分布と角度分布を考慮したミュオンを擬似宇宙線ミュオンとし、(Ⅰ)、(Ⅲ)体系を対象に模擬数値実験を行った。この場合の式(3-4-1)の経路長 L には、入射ベクトルの入射角 φ を用いて次式で計算した値を利用する。

$$L = \frac{100[cm]}{\cos(\phi)} \tag{5-2-1}$$

ここで 100 [cm]は装置の Z 方向長さである。また、p_0=3[GeV/c]、p は一つ一つの擬似宇宙線ミュオンのエネルギーから算出した運動量、E_p は 0 として式(3-4-1)より S を求める。

まず、入力したエネルギー分布及び角度分布と実際に出力された両分布との比較を行った。つまり PHITS で与える入力と、その結果による PHITS 出力を比較した。比較した両分布のグラフを図 5-3 に示す。比較図(a)、(b)が共に一致していることから両分布を加味した擬似宇宙線ミュオンの照射は可能である。

簡易実験の結果、検出器で測定できる擬似宇宙線ミュオン粒子数は、照射粒子数の 4 割程とわかったので、照射数を 750000 個として模擬数値実験を行った。750000 個の照射数を得るには 75 分の測定時間を要する。このことから鮮明なイメージを得るためにはかなりの時間がかかるとわかる。

擬似宇宙線使用下での模擬数値実験は以下の２体系で行った。

(Ⅴ)中央にウランを置いた体系
(Ⅵ) 4 種の物質を置いた体系

実験結果は 5B(Ⅴ)、(Ⅵ)に示している。図(a)、(b)、(c)は擬似宇宙線ミュオン入射時の 3 次元再構築図、XZ 写像、YX 写像の結果、図(d)、(e)、(f)は垂直入射時の 3 次元再構築図、XZ 写像、YX 写像の結果である。図(d)、(e)、(f)については 5A の結果の再掲載であるが比較のため並べて表記した。

(Ⅴ)、(Ⅵ)体系での擬似宇宙線使用実験の結果から以下のことがわかる。

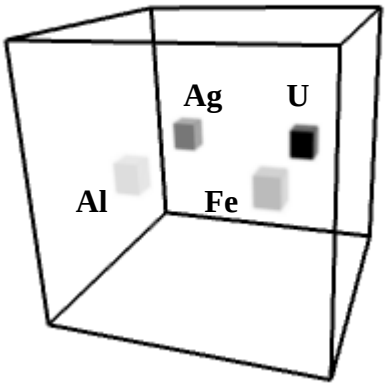
・ Z 方向のぼやけは減るが、X、Y 方向に僅かなぼやけが生じるようになる。
・ 垂直入射時に比べ、λの値が小さくなっている。

これらは共に角度分布の影響によるものである。垂直入射時と比べ、照射ミュオンの X、Y 変位が増すことから X,Y 方向へのぼやけが生じる。Z 方向のぼやけが減るのは垂直入射時と比べ Z 方向を通過するミュオン割合が減少するためである。また、λの値が小さくなるのは入射方向に広がりが出来ることから垂直入射と比べて各ボクセルに入るミュオンの数にばらつきが生じるためと考えられる。

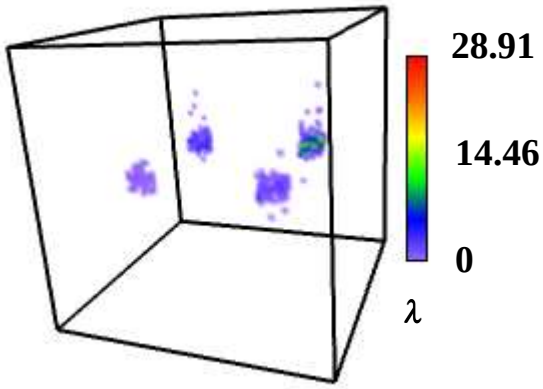
5.2.C 擬似宇宙線による、p=3[GeV/c]固定時の結果

擬似宇宙線を使用した際に、運動量測定ができなかった場合を考える。この場合 p=3[GeV/c]として散乱信号を計算し、その結果を見て運動量の影響を考える。

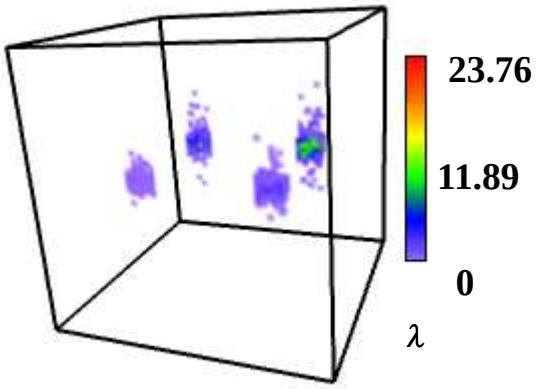
図 5C(Ⅶ)-1、2 に擬似宇宙線による結果と、運動量測定が出来なかった場合の結果をまとめた。これより運動量データが得られない場合のλは異常に高くなることがわかる。図 5C(Ⅶ)-1(b)より X、Y 方向の位置特定はおよそ出来ているものの、運動量が測定できた場合に比べてぼやけがかなり発生していることがわかる。図 5C(Ⅶ)-1(c)より Z=50 [cm] 近傍でぼやけが発生すること、及び Z 方向のぼやけも非常に大きくなっていることが見て取れる。図 5C(Ⅶ)-2 ではλ範囲を限定し、λ_{max} を 1000、100 とした時の再構築を示した。この結果より運動量が測定不能の場合、λ範囲を指定しなければ物質判別は期待出来ないが、λ範囲を指定することである程度の再構築は可能と判った。



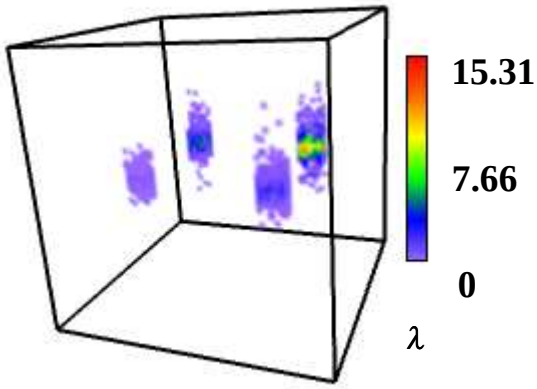
(a) 体系配置図



(b) 100000 照射時の再構築図

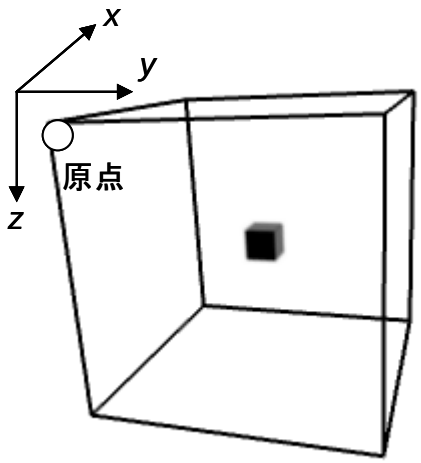


(c) 300000 照射時の再構築図



(d) 1000000 照射時の再構築図

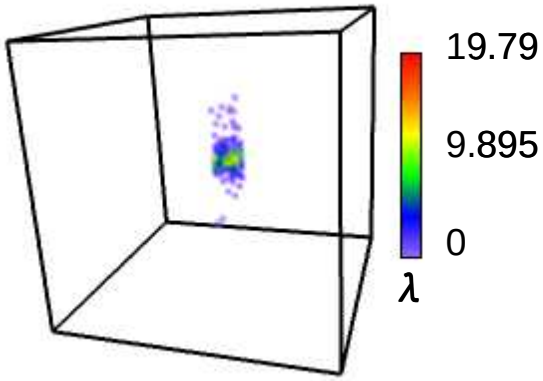
図 5-1. 照射時間比較図



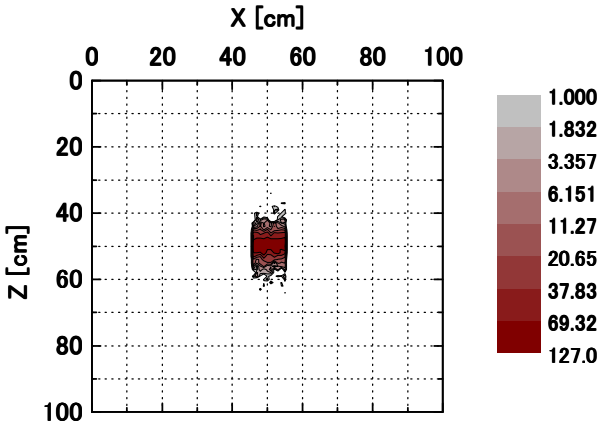
(a). 元の体系

	U
X [cm]	45-55
Y [cm]	45-55
Z [cm]	45-55

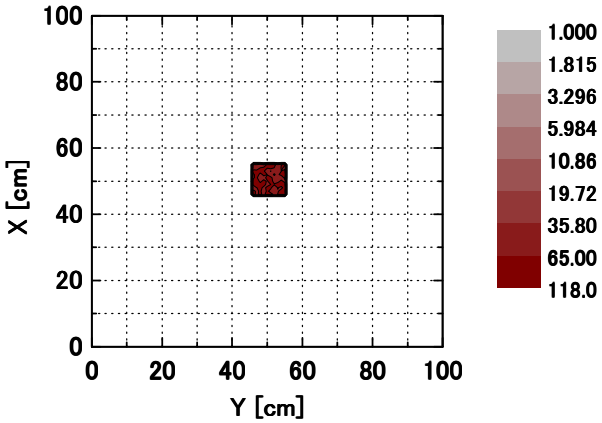
表 5A(Ⅰ)-1. 対象設置座標範囲



(b). 再構築図



(c). XZ 写像



(d). YX 写像

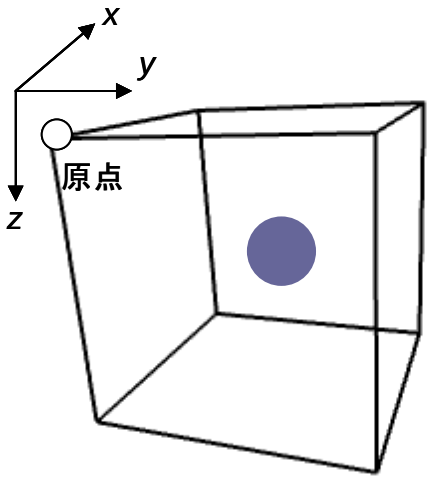
表 5A(Ⅰ)-2. 使用粒子数

	粒子数 [個]	割合 [%]
N_0	300000	100
N_{all}	299914	99.9
N_{out}	43474	14.5
N_{in}	256440	85.5

N_0：照射粒子数　N_{all}：検出器で測定した粒子数

N_{out}：交点が箱外になる粒子数　N_{in}：箱に入った粒子数

図 5A(Ⅰ). 中央に置いたウランに垂直入射した体系の結果

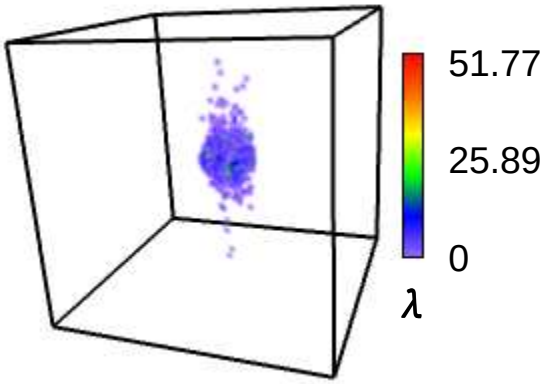


(a). 元の体系

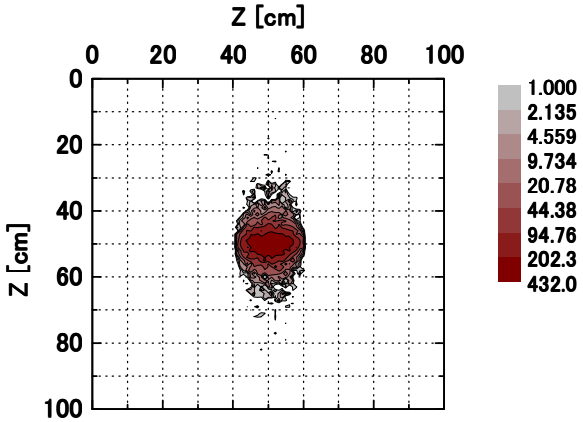
中心(50,50,50)、半径 10[cm]の球

表 5A(Ⅱ)-1. 対象設置座標範囲

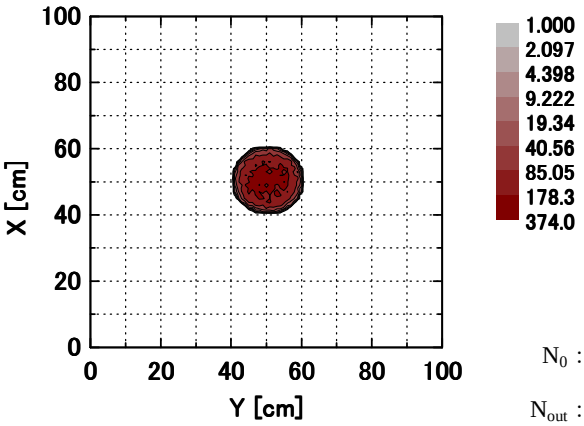
	U
X [cm]	45-55
Y [cm]	45-55
Z [cm]	45-55



(b). 再構築図



(c). XZ 写像



(d). YX 写像

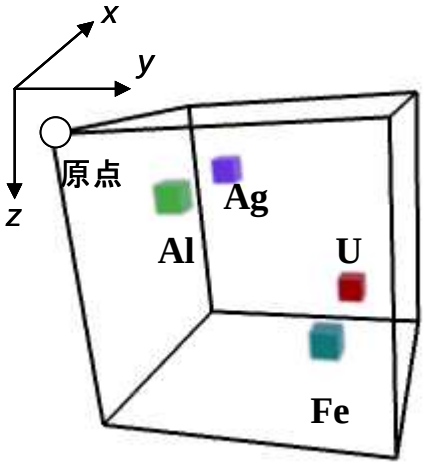
表 5A(Ⅱ)-2. 使用粒子数

	粒子数 [個]	割合 [%]
N_0	300000	100
N_{all}	299929	99.9
N_{out}	42501	14.2
N_{in}	257428	85.8

N_0：照射粒子数　N_{all}：検出器で測定した粒子数

N_{out}：交点が箱外になる粒子数　N_{in}：箱に入った粒子数

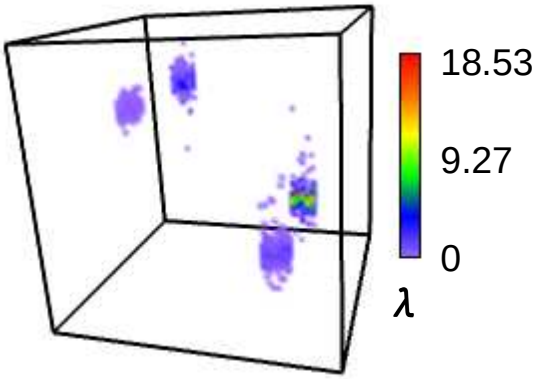
図 5A(Ⅱ). 球型ウランに垂直入射した体系の結果



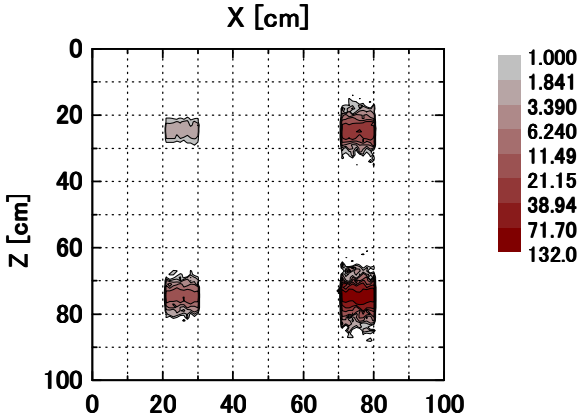
(a). 元の体系

表 5A(Ⅲ)-1. 対象設置座標範囲

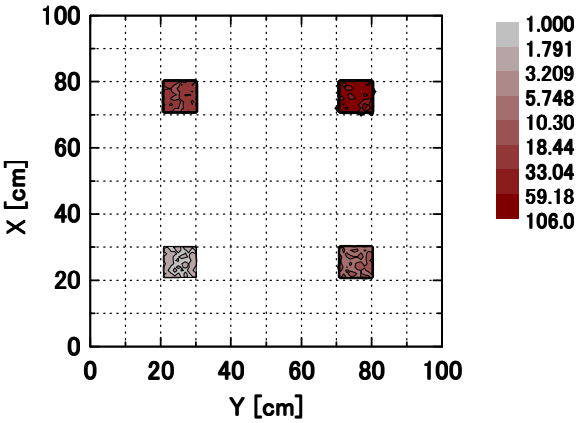
	Al	Fe	Ag	U
X [cm]	20-30	20-30	70-80	70-80
Y [cm]	20-30	70-80	20-30	70-80
Z [cm]	20-30	70-80	20-30	70-80



(b). 再構築図



(c). XZ 写像



(d). YX 写像

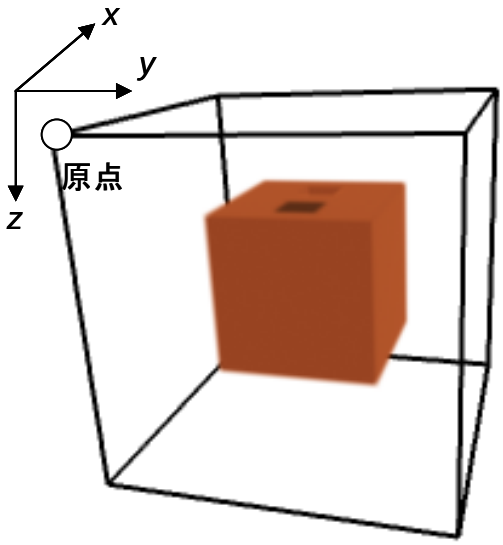
表 5A(Ⅲ)-2. 使用粒子数

	粒子数 [個]	割合 [%]
N_0	300000	100
N_{all}	299914	99.9
N_{out}	42216	14
N_{in}	257698	85.9

N_0：照射粒子数　N_{all}：検出器で測定した粒子数

N_{out}：交点が箱外になる粒子数　N_{in}：箱に入った粒子数

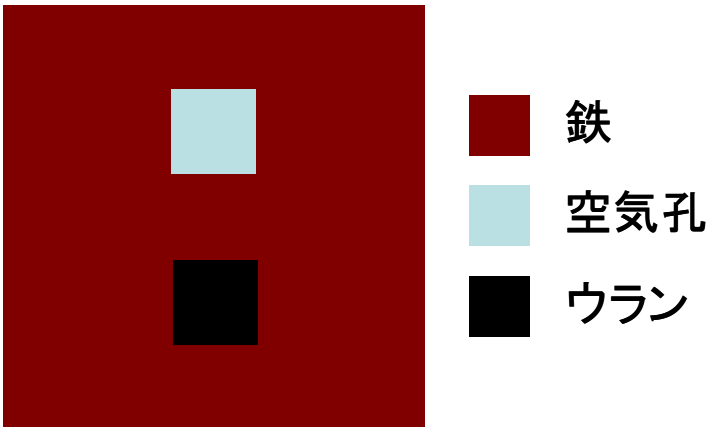
図 5A(Ⅲ). 4 物質に垂直入射した体系の結果



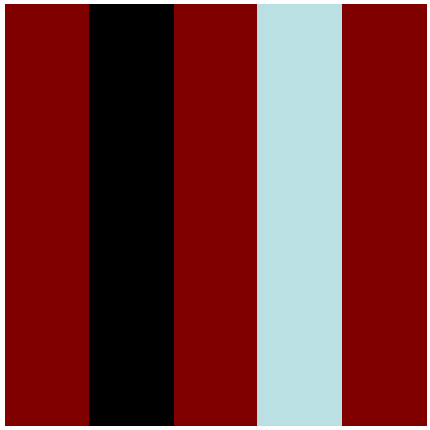
(a) 元の体系

表 5-2-1. 対称配置座標範囲

	Air	Fe	U
X [cm]	55-65	25-75	35-45
Y [cm]	45-55	25-75	45-55
Z [cm]	25-75	25-75	25-75

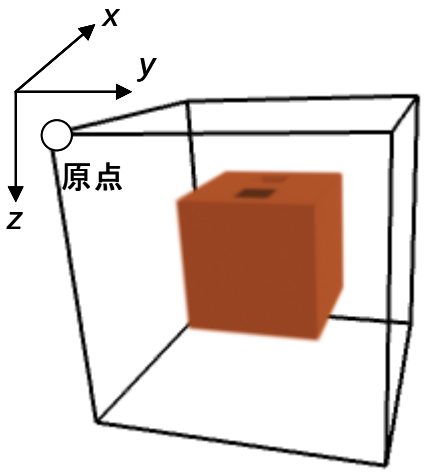


(b). Z 方向から元の体系を見た図



(c). Y=50 [cm]断面図

図 5-2. 鉄箱、空気孔、ウラン棒位置関係図



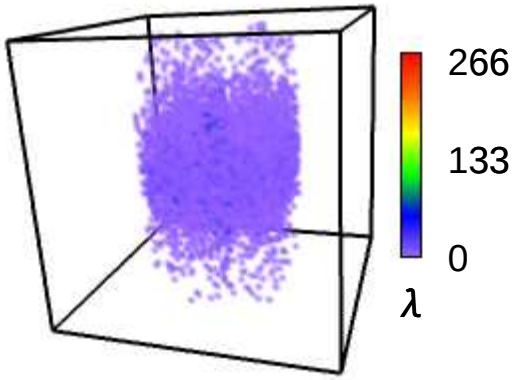
(a). 元の体系

	粒子数 [個]	割合 [%]
N_0	300000	100
N_{all}	299915	99.9
N_{out}	42188	14
N_{in}	257727	85.9

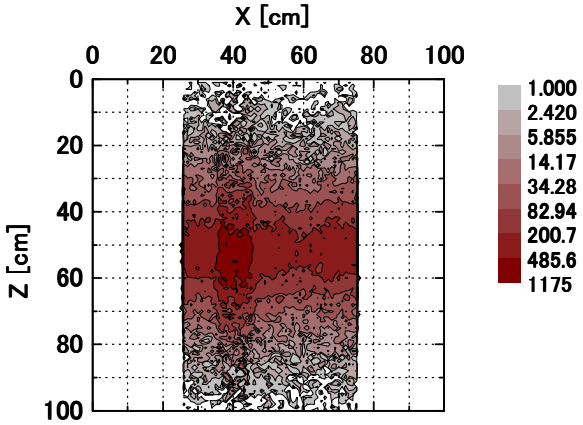
表 5A(IV)-1. 使用粒子数

N_0：照射粒子数　N_{all}：検出器で測定した粒子数

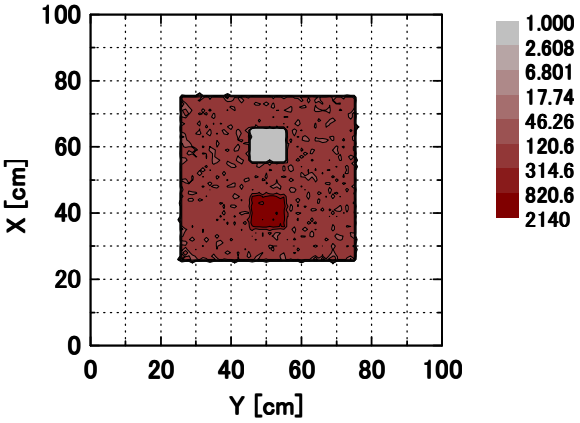
N_{out}：交点が箱外になる粒子数　N_{in}：箱に入った粒子数



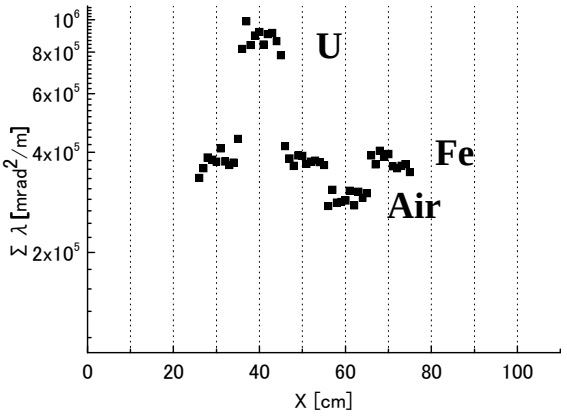
(b). 再構築図



(c). XZ 写像

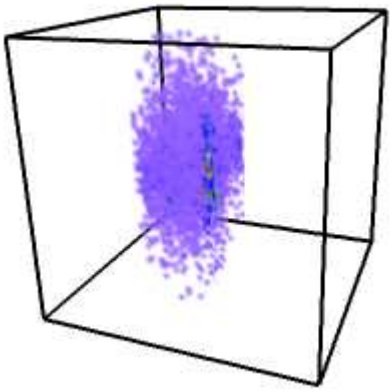


(d). YX 写像

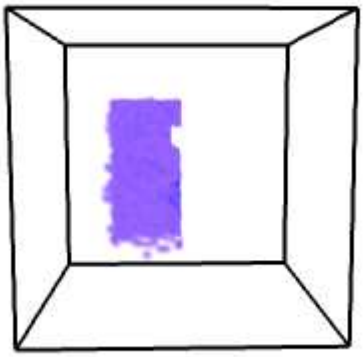


(e). X 写像

図 5A(IV)-1. 鉄に囲まれた体系の再構築図の結果

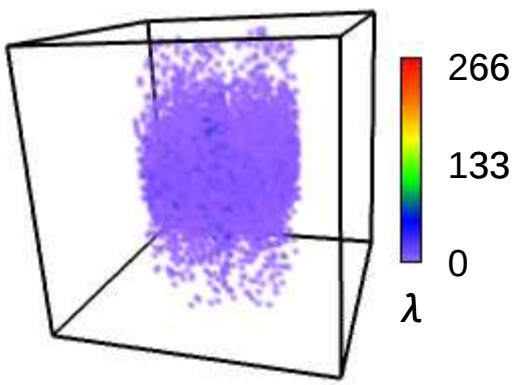


(a). 再構築図の Y=50 断面図

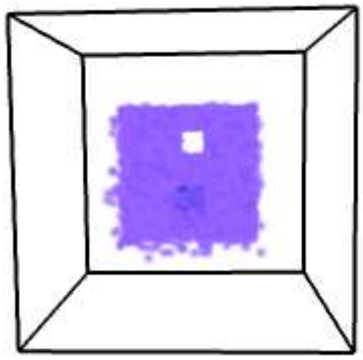


(b). 再構築図の Y=50 断面図
を Z 方向から見た図

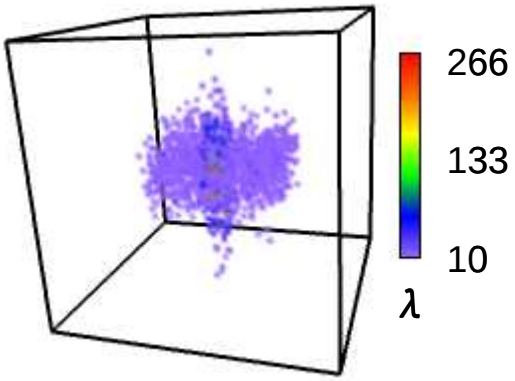
図 5A(Ⅳ)-2. 鉄に囲まれた体系の再構築図の断面図



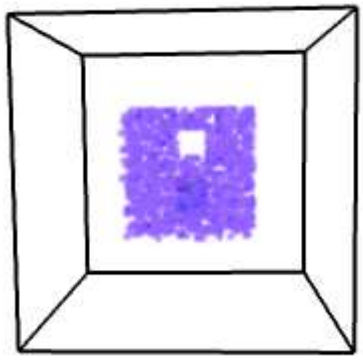
(a). 再構築図



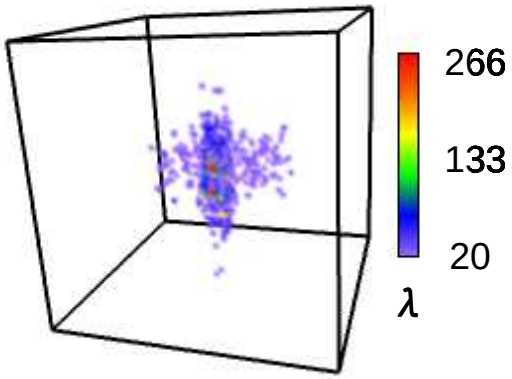
(b). 再構築図を Z 方向から見た図



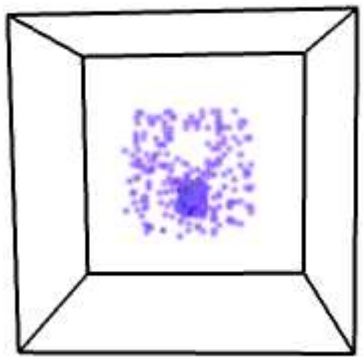
(c). 再構築図(λ≧10)



(d). 再構築図(λ≧10)を Z 方向から見た図

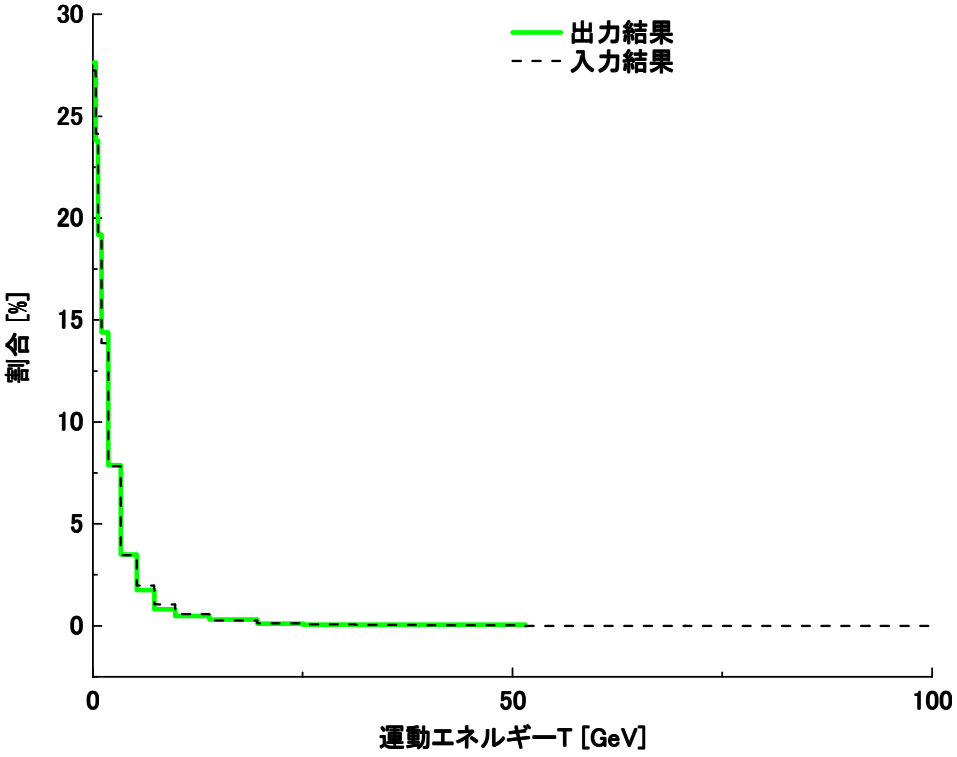


(e). 再構築図(λ≧20)

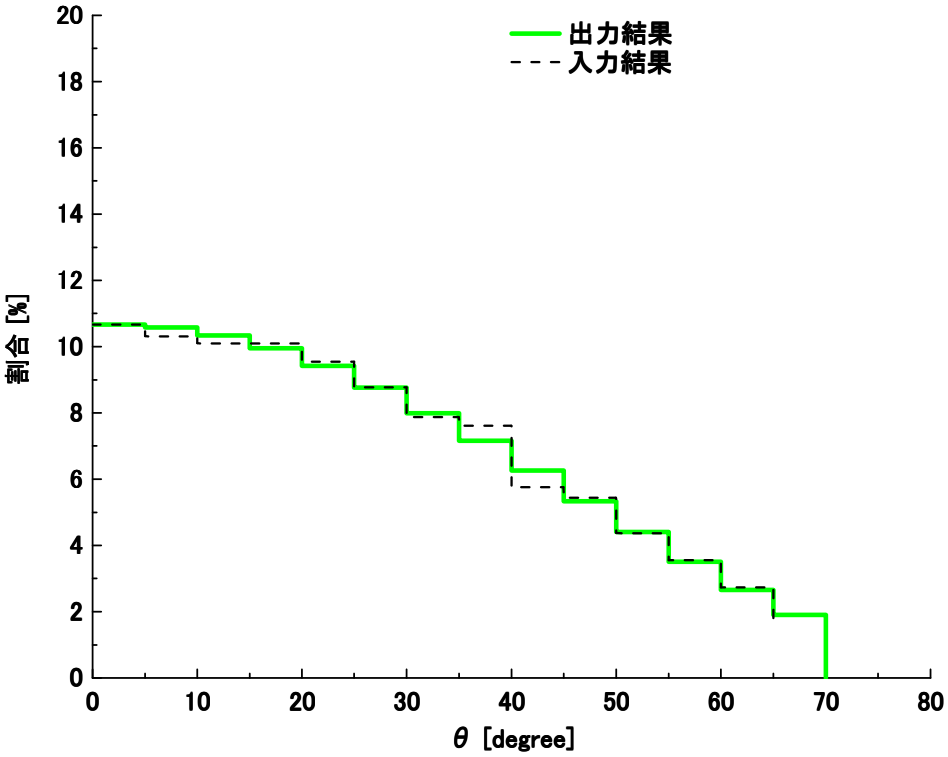


(f). 再構築図(λ≧20)を Z 方向から見た図

図 5A(Ⅳ)-3. λ範囲を指定した、鉄に囲まれた体系の再構築図

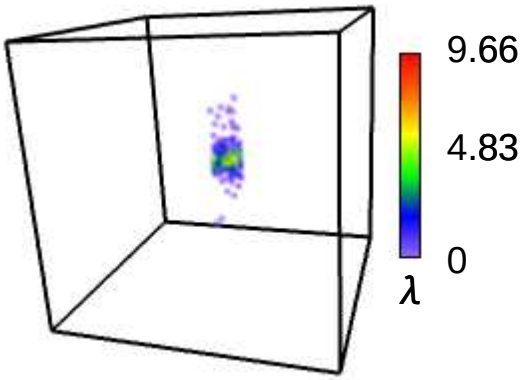


(a). 加味した運動エネルギー分布

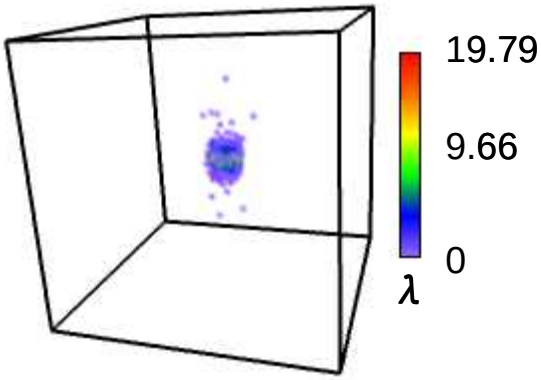


(b). 加味した角度分布

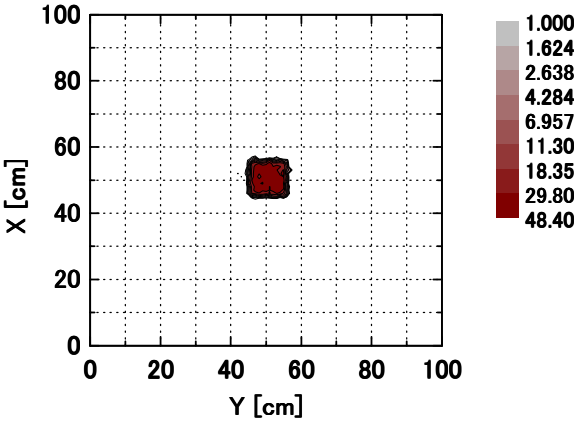
図 5-3. 入射ミュオンに与える分布



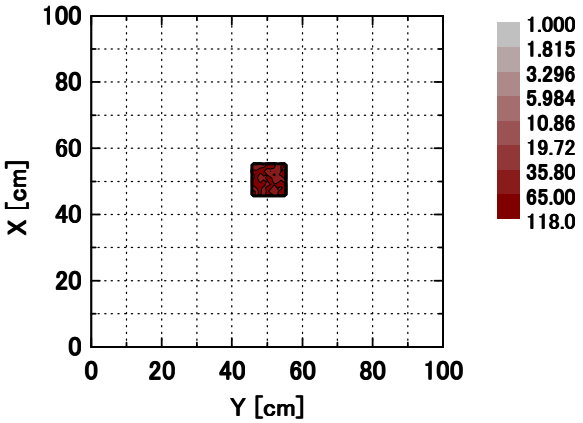
(a). 擬似宇宙線ミュオンによる
再構築結果



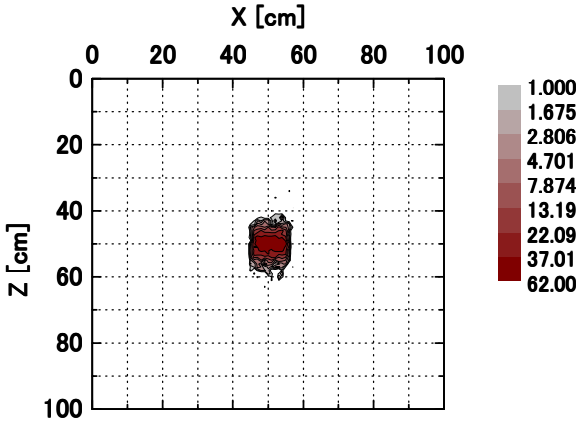
(d). 分布を考慮しないミュオンによる
再構築結果



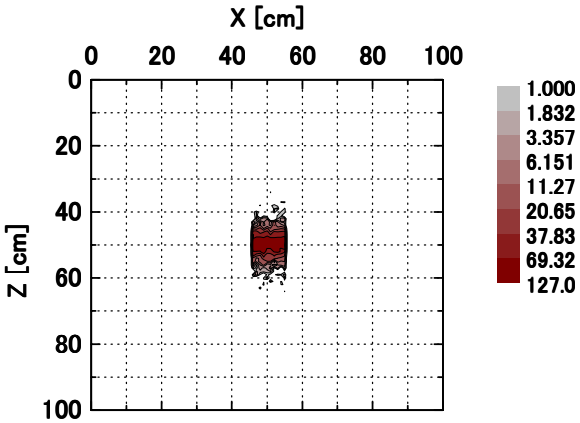
(b). YX 写像



(e). YX 写像

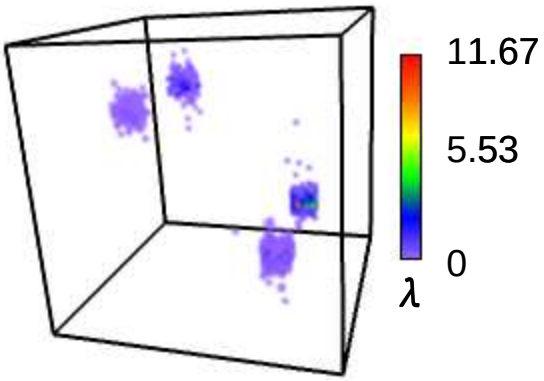


(c). ZX 写像

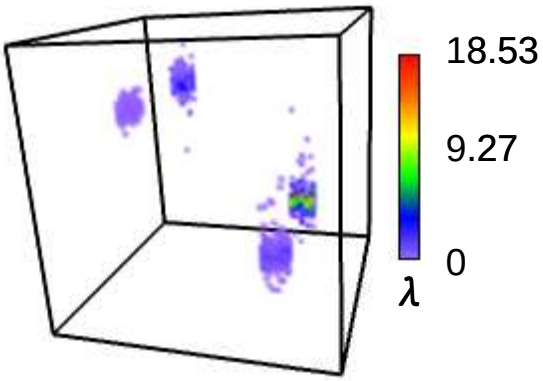


(f). ZX 写像

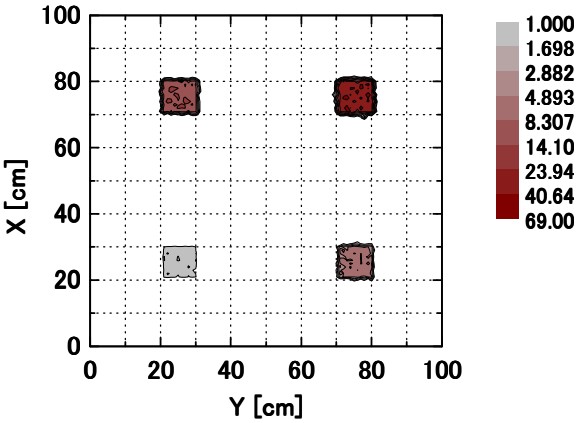
図 5B(V). 中央に設置したウランの擬似宇宙線ミュオンによる再構築図



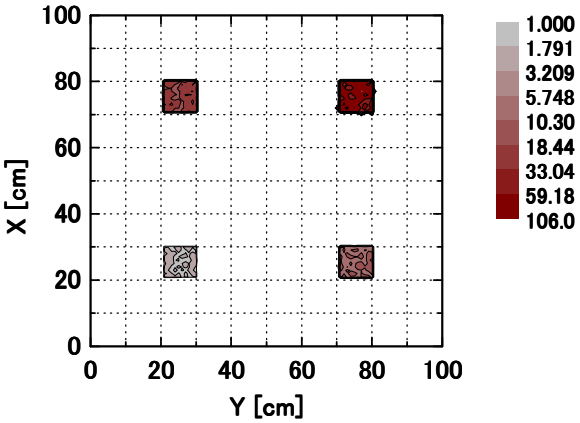
(a). 擬似宇宙線ミュオンによる
再構築結果



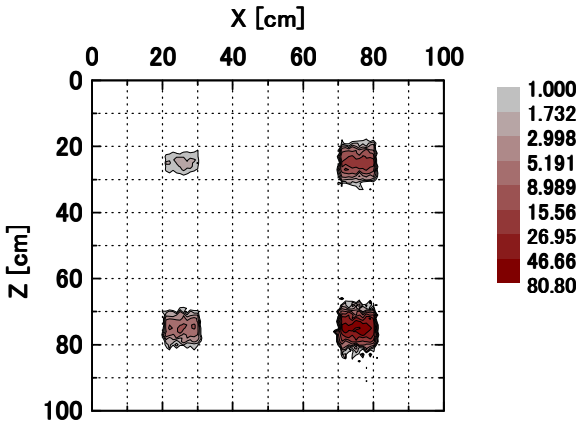
(d). 分布を考慮しないミュオンによる
再構築結果



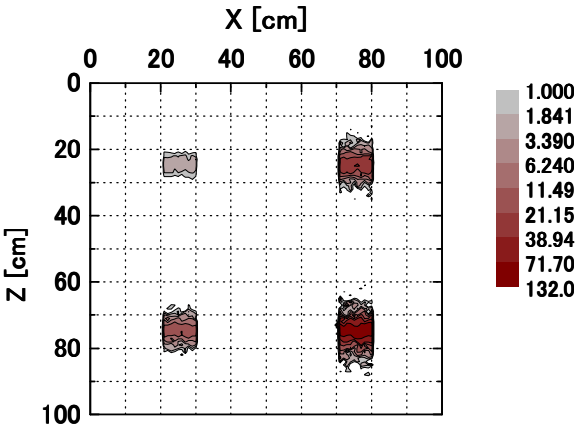
(b). YX 写像



(e). YX 写像

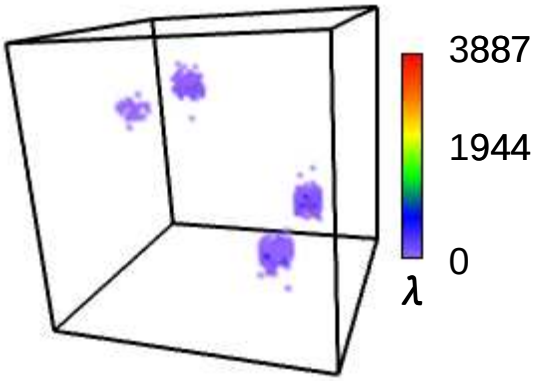


(c). XZ 写像

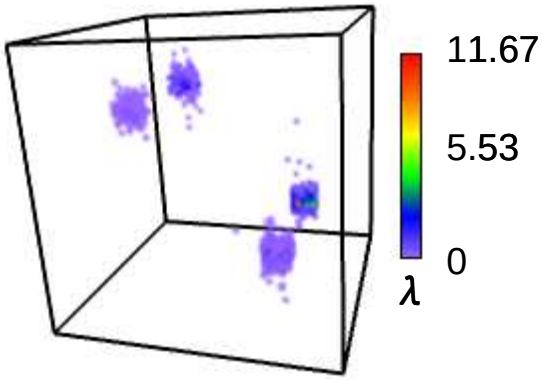


(f). XZ 写像

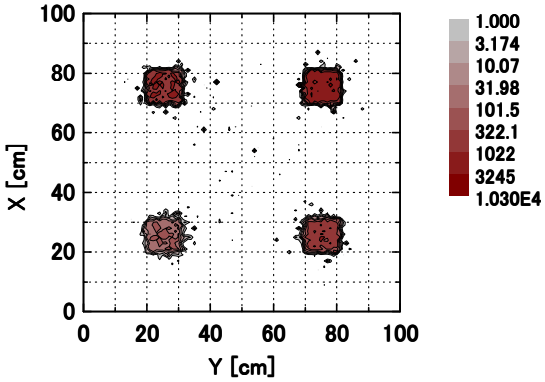
図 5B(VI). 4 種類の物質の擬似宇宙線ミュオンによる再構築図



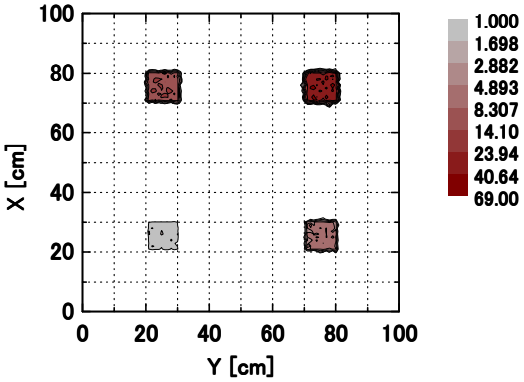
(a). 運動量固定時の再構築



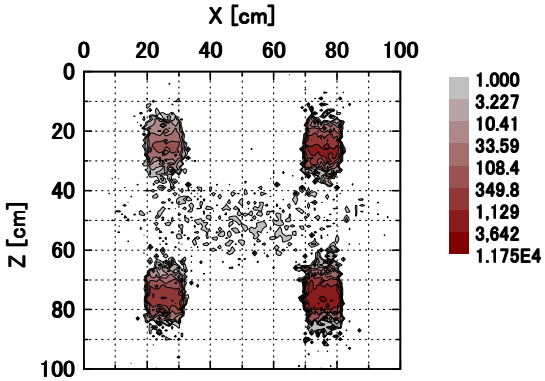
(d). 運動量を得ている場合の再構築結果



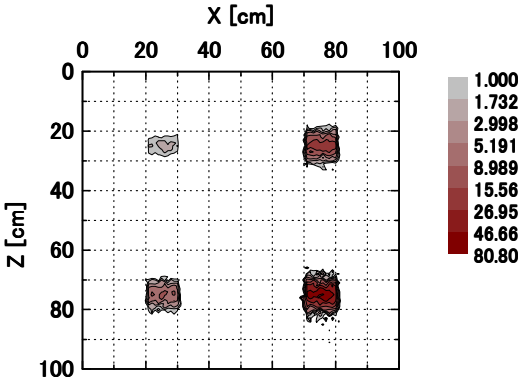
(b). XY 写像



(e). XY 写像

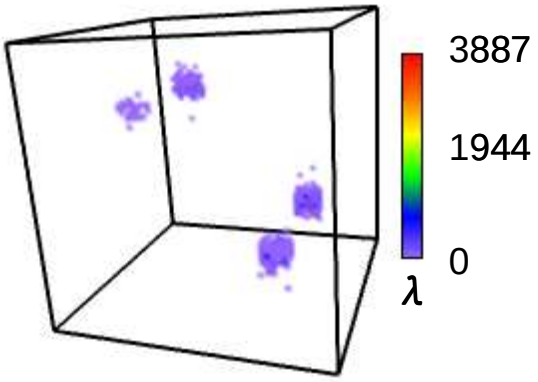


(c). XZ 写像

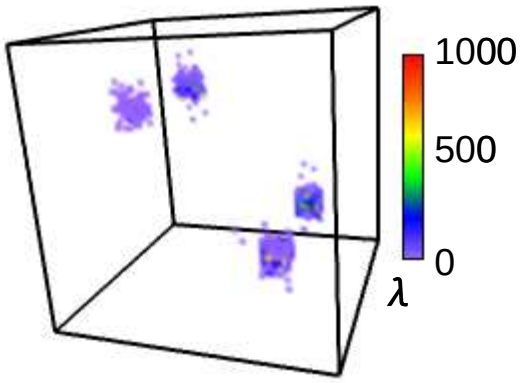


(f). XZ 写像

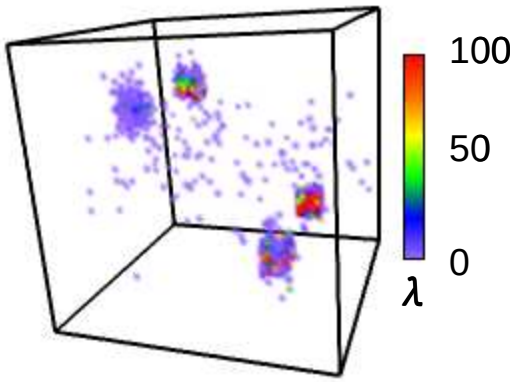
図 5C(Ⅶ)-1. 運動量を固定した際の再構築結果



(a). 運動量 3[GeV/c]固定時の再構築結果



(b). λ≦1000 とした再構築結果



(c). λ≦100 とした再構築結果

図 5C(Ⅶ)-2. λ 上限を設定した時の再構築結果

6. 考察とまとめ

6.1 考察

考察に関しては、中心にウランを置いた体系に垂直に 300000 個照射した結果を使用した。考察は以下の二つに関して行った。

・Z 方向エラー
・分解能

6.1.1 Z 方向のエラー

各実験結果に表れた Z 方向のエラーについて考察した。

(Ⅰ)～(Ⅳ)の体系で垂直入射と分布を考慮した入射での再構築模擬実験を行ったわけだが、全ての実験において Z 方向のぼやけがあり、散乱点が測定装置外になるケースが検出器測定粒子に対し 14%ほどあった。

まずぼやけについてだが、これは PoCA 近似の粗さのためと考えられる。検出器設置の関係上、照射方向は限定されるため、入射および出射ベクトルはその方向に準じて進む。前述の通り、PoCA アルゴリズムでは多重散乱が一点で起きているという仮定、及び入射ベクトルと出射ベクトルの交点を散乱点とするという前提の下で諸計算を行っており、PoCA 近似はかなり大胆と言える。この近似で概ね問題ないことは再構築結果からわかるが、より高精度の再構築には PoCA に代わるアルゴリズムを考える必要がある。一例としては、現在の医療分野で使われている CT の技術を参考にすることなどが考えられる。

次に、散乱点が測定装置の外側になるケースについてである。散乱点つまり交点が外側になる場合と内側になる場合の散乱角を比較することで考察を行った。交点が内側になる場合 N_{in} と交点が外側になる場合 N_{out} の Z 座標と散乱角 θ の関係をグラフにした。比較図 6-1 より N_{out} 時の散乱角は N_{in} 時に比べて極端に小さいことがわかる。図 6-2 は N_{out} 時のみの Z-θ グラフである。θ がこのように非常に小さな場合、入射ベクトルと出射ベクトルは平行に極めて近い状態となる。そのために両ベクトルの交点が異常な値をとる結果になっている。

また、N_{out} の時の Y、X 座標を YX グラフにしたところ、図 6-3 のようになった。灰色の部分が N_{out} の Y、X 座標である。グラフの白い部分はウランを配置した位置と概ね一致する。ウランを通過する際は散乱角が大きくなるためベクトルが交点を持ちやすくなる。これらのことから小さい散乱角は空気部分の通過によるものと推測される。

6.1.2. 分解能

対象物質の 3 次元非破壊イメージングを行うにあたって、分解能は無視できない要素である。再構築の精度は分解能の精度に依存している。また、分解能の精度は検出器の値段に直結しており、プロトタイプ装置に要するであろう費用は全て分解能に依存していると言っても過言ではない。

分解能を議論するにあたり、設定メッシュを細かくした。今までの$(1cm)^3$メッシュから、$(0.1cm)^3$メッシュに変更した。Z 再現度は X、Y 再現度に比べ劣るので X、Y 方向の分解能のみを考える。中央ウラン体系は XY 対称なので、考慮するのはどちらか一方でよい。今回は X 方向について考えることとする。

分解能は半値幅 fwhm [cm] を持った分布を照射ミュオンに与えた上で再構築を試み、その再限度を見ることで決定する。与える分布はガウス分布に従っており、乱数を振りながら X、Y 座標に付加していく。そのデータを用いてこれまでと同様のやり方で再構築を行い、その結果をもとに分解能を判断する。判断するべきは再構築にて再現する対象物質の端部分であり、その近傍での再現度を見る。中央ウラン体系の X 座標は 45～55 [cm]なので X＝40～60 [cm] の領域に注目する。統計を増やし、一方向での位置を特定するために結果を 1 次元まで写像した。その結果が図 6-4、図 6-5 である。図は共に横軸は X 座標、縦軸は写像に際しての Y、Z 方向の λ を足し合わせた Σλ を、$(20cm)^3$領域内に入った粒子数 N_{in} で割った値である。

まず図 6-4 は大まかな分解能を予測した結果である。半値幅を 1、0.5、0.1、0.01[cm]として再構築を行い、その X 写像をまとめたものが図 6-4 である。図より半値幅 1 または 0.5 の時は全くといってよいほど位置特定ができていないことがわかる。0.1、0.01[cm]の時は特定できている。そこで次に半値幅を 0.1 以下とした時の結果を図 6-5 に記した。図を見ると、少なくとも 10^{-1} [cm]、理想的には 10^{-2} [cm]オーダーの分解能が望ましいことがわかる。但し、分解能調査時のメッシュは$(0.1cm)^3$メッシュに設定しているので、厳密にはそれ以下の分解能を決定できない。しかし半値幅の変動に伴う再構築への影響は考慮できるので、実際に要する分解能の目安は判断できる。

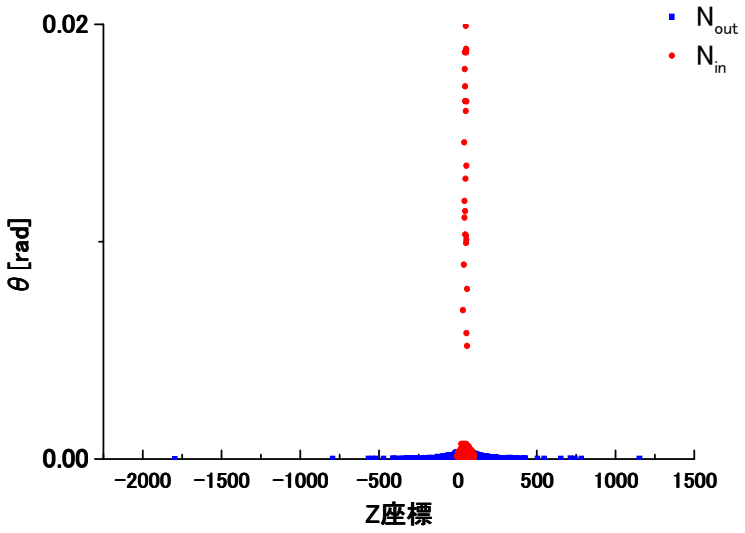


図６-１． N_{in}-N_{out} 比較図

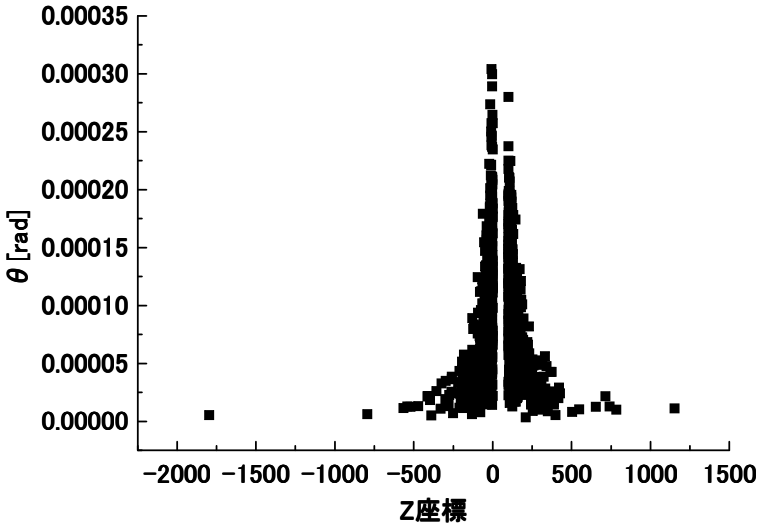


図６-２． N_{out} の Z 座標と散乱角

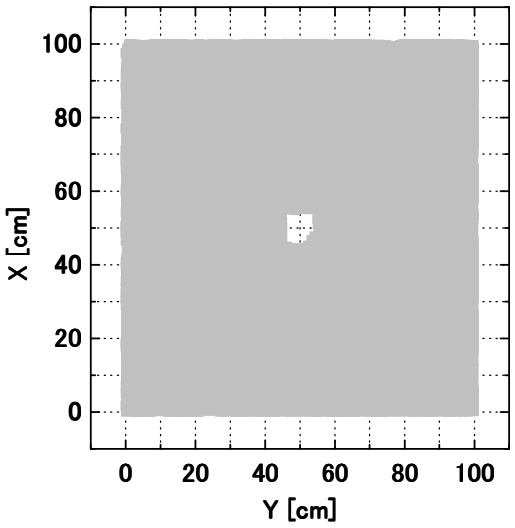


図６-３． N_{out} における X,Y 座標

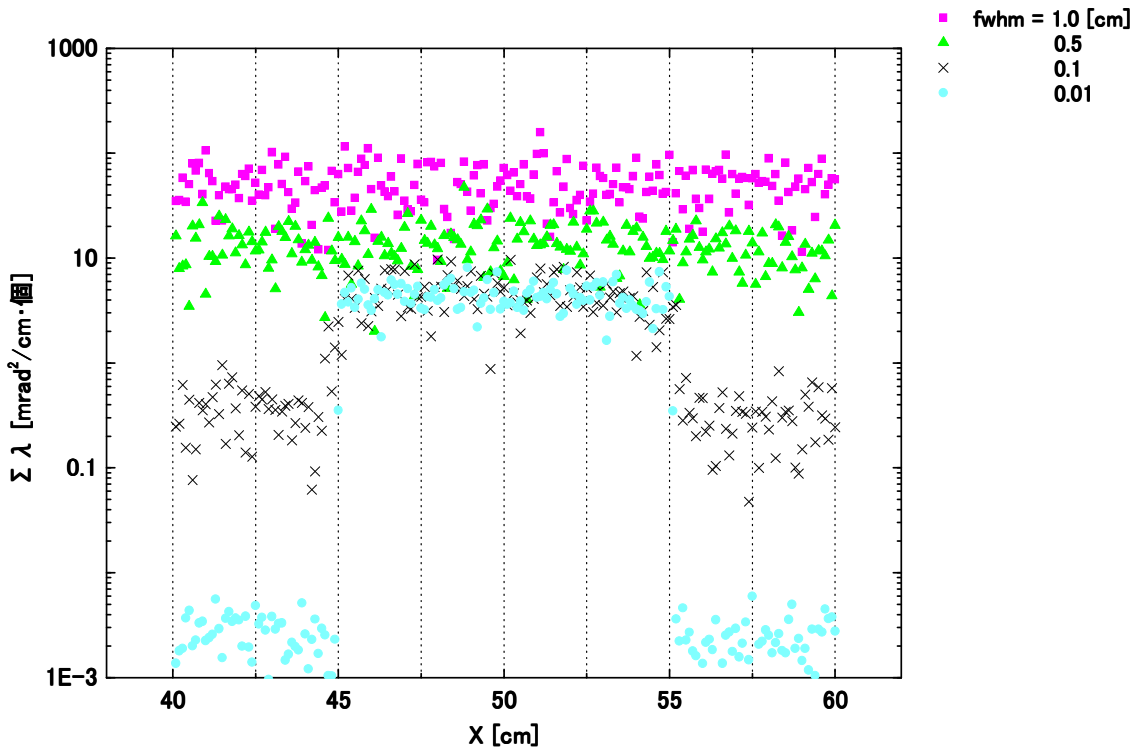


図 6-4.　半値幅比較図 1

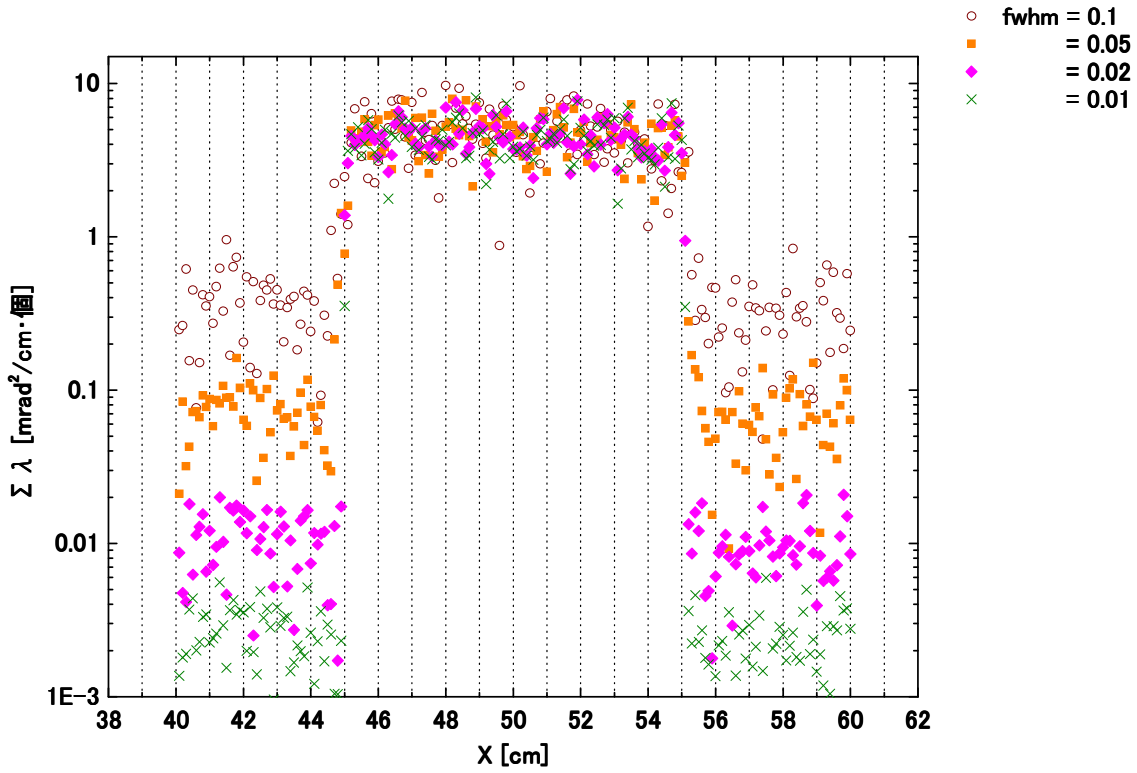


図 6-5.　半値幅比較図 2

6.2 まとめ

本研究を通して、少なくとも簡単な体系では対象物質を判定できることがわかり、宇宙線ミュオンを用いた 3 次元非破壊イメージングの実現可能性を確認することができた。PoCA アルゴリズムを利用した 3 次元非破壊イメージングには以下の特徴があることも判明した。

- １方向からの入射のみで３次元像の再構築が可能。
- X、及び Y 方向の位置特定はかなり高い精度で可能。
- Z 方向の位置特定はおよそできるが、ぼやけが生じる。
- 散乱強度が対象物質の中央付近で高くなることから、再現図は対象中央が濃くなる。
- 異なる物質を判別することが可能。
- 異なる物質に囲まれた体系での再現も可能。散乱強度の範囲指定を行うことでより明確になる。

また、プロトタイプの小型実験装置で模擬数値実験を行った結果、小型実験装置の設計指針として、以下のことがわかった。

- 精度の高いイメージングを行うには 10^{-2} [cm] 程度の検出器位置分解能を要する。現在入手可能なドリフトチェンバーは 2.0×10^{-2} [cm] 程度の位置分解能を達成できているので現在の測定技術で十分な精度のイメージングが可能と考えられる。
- 運動量測定を行わない場合は λ 範囲を指定して再構築することで、ある程度の再現は可能になる。

以上の研究結果を踏まえ、本研究の目的である三次元非破壊イメージングの可能性の検討及び小型実験装置の指針を得ることに成功したといえる。

参考文献

(1) KEK：高エネルギー加速器研究機構　HP
(http://www.kek.jp/ja/index.html)

(2) K. Borozdin, et al., Nature 422 (2003) 277

(3) Joel Gustafsson, Diploma Thesis, Tomography or canisters for spent nuclear fuel using cosmic-ray muons, Uppsala University(2005)

(4) H. Iwase, et al., J. Nucl. Sci. and Technol. 139 (2002) 1142-1151

(5) Los Alamos National Laboratory HP
(http://www.lanl.gov/)

(6) 田中舘愛橘記念科学館 HP (http://www.civic.ninohe.iwate.jp/aikitu.html)
日本の科学者・技術者１００人　湯川秀樹　主要な業績の説明
(http://www.civic.ninohe.iwate.jp/100W/02/020/page2.htm)

(7) Joel Gustanfasso Peter K.F. Grieder.,“COSMIC RAYS AT EARTH”(2001),p.407

(8) 小川修三　沢田昭二　中川昌美、“素粒子の複合模型“(1980),p15

(9) 小田稔　“宇宙線”(1960)p20

(10) W.R.Leo .,“Techiniques for Nuclear and Particle Physics Experiments”(1987),p40

(11) K. Hagiwara, et al., Particle data group, review of particle physics, Physical Review D 66 (1) (2002) 198

(12) L.J. Schltz, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Reach A 519 (2004) 687-694

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にお世話になりました。

中島秀紀教授には研究の場を与えて頂きましたことに心から感謝致します。渡辺幸信助教授には本研究を進めるにあたって丁寧にご指導頂きました。研究のみならず、社会生活を営む上での心構えをご教授下さったことを心から感謝致します。

本研究を進める上で、同研究グループの皆様には大変お世話になりました。加来大輔さん、西嶋康太さんには特にお世話になりました。研究に行き詰まった時にお二人のおかげでうまく行ったことが多々ありました。林真照さんには研究内容について、いくつかの重要な助言を頂きました。Kadrev Dimtre Nikolov 氏と叶涛氏には英会話をご教授頂きました。

研究グループは異なりましたが、中島グループの皆さんにも色々とお世話になりました。皆様の暖かい雰囲気には日々癒されました。

本研究に際してお世話になった方々にこの場を借りて御礼申し上げます。

最後に、常日頃から誰よりも私を祝福してくれる両親に心より感謝いたします。