

加速器ビーム実験による
GLAST 衛星搭載ガンマ線検出器のシミュレータの評価

広島大学理学部物理学科
佐藤葉子 (u0972019)

素粒子実験・高エネルギー宇宙学研究室
指導教官 大杉節教授
2001・2・9

要旨

目で見ることのできない高エネルギー宇宙の描像を探る手段として最近注目されているのが、宇宙ガンマ線観測である。2005年に打ち上げが予定されている次世代ガンマ線衛星 GLAST は、広い視野を持ち、広範囲のエネルギー領域での測定が可能な最新の検出器が搭載されるため、天体の詳しい情報、また宇宙の新たな発見が大いに期待されている。

GLAST 検出器での観測データの解析では、ガンマ線領域に対する検出器の応答をシミュレータで予測し、実際に得られるデータと比較検討することが有力な手法と考えられている。本研究室では、Geant4 を用いてこのシミュレータを開発している。昨年、シミュレータが正しいことを確認するために加速器ビーム実験が行われた。本研究では、開発の一環として、検出器シミュレータで加速器ビーム実験を再現し、シミュレーション結果と理論値や加速器ビーム実験で得られたデータとを比較して検出器シミュレータの評価を行った。

目次

1章 GLAST 衛星計画	4
2章 加速器ビーム実験	
2.1 GLAST 検出器	5
2.2 加速器ビーム実験	
2.2.1 加速器ビーム実験	6
2.2.2 実験の種類	7
2.3 検出器の構造	8
2.3.1 トラッカー部	9
2.3.2 カロリメータ部	11
2.4 検出器シミュレータ	11
3章 ガンマ線反応率の評価	
3.1 ガンマ線と物質の相互作用.....	12
3.2 電子・陽電子対生成の反応確率.....	13
3.3 反応した layer 数の頻度分布.....	18
4章 Hit multiplicity	
4.1 Hit multiplicity	21
4.2 評価方法とデータ	21
4.3 20GeV の陽電子による評価	
4.3.1 実験データの処理	23
4.3.2 Geant4 データの処理	25
4.4 さまざまな条件で入射する粒子による評価	
4.4.1 垂直入射で異なる入射エネルギーでの比較	29
4.4.2 斜めの角度で入射する粒子での比較	33
4.5 ガンマ線による評価.....	42
5章 まとめと今後の課題.....	47
謝辞.....	48
参考文献.....	49

1 章 GLAST 衛星計画

次世代ガンマ線衛星 GLAST(Gamma-ray Large Area Space Telescope)は、10MeV から 100GeV 以上にわたる広いエネルギー範囲での天体観測を目的とした高エネルギーガンマ線天文衛星で、2005 年に打ち上げが予定されており、現在 NASA やスタンフォードを始め多くの研究機関で開発が進められている。

高エネルギー領域の X 線などによる天体観測によって多くの天体を観測できるようになった。特異な現象であるガンマ線バーストや中性子星などの発見、高エネルギー宇宙線がパルサーやクエーサーなどいろいろなところから放射されていることなどがわかり、天体物理学において、高エネルギー領域の宇宙線観測が注目されている。

GLAST 衛星に搭載予定の検出器は、入射ガンマ線の到来方向とエネルギーを同時に決定することができる電子陽電子対生成型ガンマ線検出器であり、数分角の空間分解能と、全天の約 20% を一度にカバーする広視野観測性能が実現される。

GLAST 検出器での観測データの解析では、ガンマ線領域に対する検出器の応答をシミュレータで予測し、実際に得られるデータと比較検討することが有力な手法と考えられている。本研究室では、Geant4 を用いてこのシミュレータを開発している。昨年、検出器の試験のための加速器ビーム実験が行われた。本研究では、開発の一環として、検出器シミュレータで加速器ビーム実験を再現し、シミュレーション結果と理論値や加速器ビーム実験で得られたデータとを比較して検出器シミュレータの評価を行った。

2章 加速器ビーム実験

2.1 GLAST 検出器

GLAST 検出器 (図 2.1) はモジュール構造になっており、 4×4 のアレイ状に配列することによって全検出器を構成する。各モジュールは、入射ガンマ線を鉛などの板で電子・陽電子対に変え、それらの飛跡を記録する飛跡検出器(トラッカー部と呼ばれる)、入射ガンマ線のエネルギーを測定するためのカロリメータ部、荷電粒子バックグラウンドを検出し、ベトーカーンターとして用いる Anti-coincidence システム (ACD) などに分かれる。この構造は、エネルギーが GeV 領域のガンマ線を検出する際の標準的なモデルとなっているものであるが、今回トラッカー部には高エネルギー素粒子実験分野で開発されたシリコンストリップ検出器が使われ、数分角の分解能と、広視野観測性能を実現する。

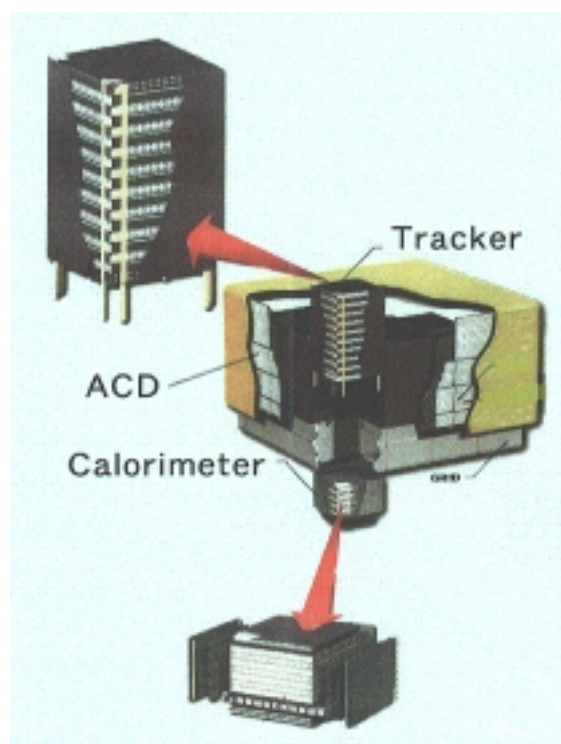


図 2.1 GLAST 検出器

2.2 加速器ビーム実験

2.2.1 加速器ビーム実験

GLAST 検出器の試験のために、1つのタワーが製作され(図 2.2) 加速器で作ったビームを打ち込む加速器ビーム実験が 1999 年末、SLAC で行われた。この実験の目的は、システムの動作確認、キャリブレーションデータの獲得、モンテカルロシミュレーションの確認などである。

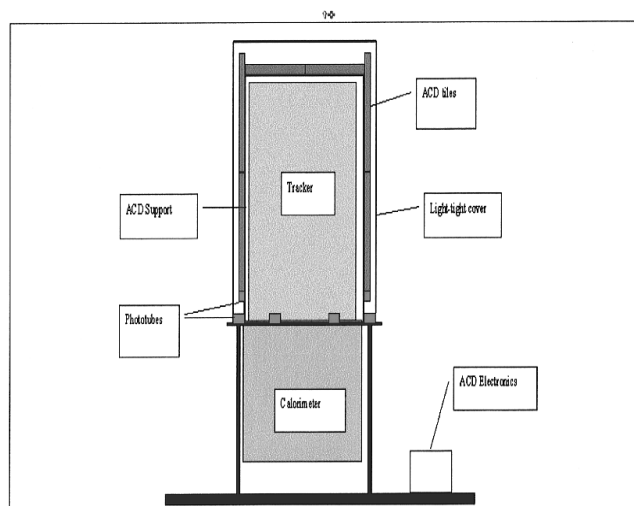
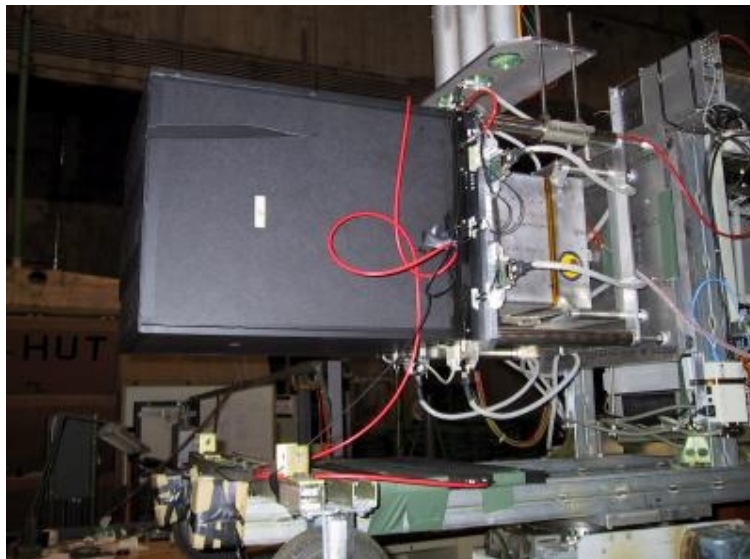


Figure 9 Configuration of the ACD tiles in the testbeam tower (not to scale). The top tiles are bent at the outer edges (extreme y), which is not shown in the drawing (from URL [21]).

図 2.2 加速器実験用に製作されたタワー

2.2.2 実験の種類

入射したビームは主に陽電子・ガンマ線・陽子である。ビームのエネルギーと入射角度については簡単に表 2.1 に示す。

表 2.1 実験の種類

		E(GeV)	y (deg)									
positron	1.6	0, 30, 50, 60, 90										
	2	0										
	5	0, 18, 30, 60										
	10	0, 18, 30										
	20	0, 15, 18, 30, 45, 60, 75, 90, 60 (z=-45°)										
gamma	1.6	0, 30, 60										
	5	0, 30, 60										
	13.5	0, 30, 60										
	20	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 150, 180										
	20	0, 30, 60	(z=-45°)									
hadron	5	0, 30										
	10	85										
	12.5	0										
	13.5	0, 30, 60, 80, 85, 90, 127, 180										

2.3 検出器の構成

加速器ビーム実験のために製作された検出器の全体図を図 2.3 に示す。トラッカー部 (TKR) とカロリメータ部 (CAL) が縦列に置かれ、そのまわりには、効率よくガンマ線イベントを取り出すために、荷電粒子バックグラウンドを検出しベトーカーとして用いるプラスチックシンチレータ (ACD) が配置されている。これは GLAST の最終的な検出器の 1/16 に相当する。

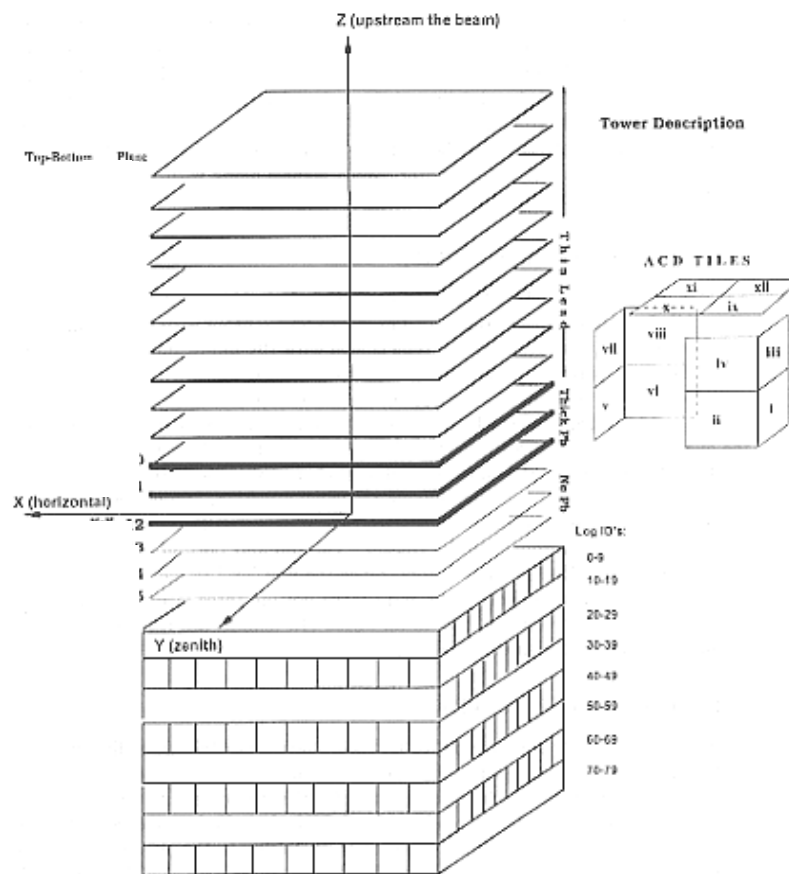


図 2.3 検出器の全体図

2.3.1 トラッカー部

トラッカー部の役割は、入射ガンマ線に対生成を起こさせ、生成された電子・陽電子の飛跡をシリコンストリップ検出器で検出して到来方向を割り出すことである(図 2.4)。内部はシリコンストリップ検出器と、相互作用を起こす物質としての薄い鉛のシートとで構成されている。

シリコン検出器の原理は、半導体に逆方向の電圧をかけ、そこに荷電粒子が入射すると電子・正孔対が生成され、エネルギー損失に比例した電流が流れ、パルスを測定する(図 2.5)。この実験に使用した検出器は、厚さ $0.395\text{ }\mu\text{m}$ の薄いシリコンの板に、電極を幅 $0.194\text{ }\mu\text{m}$ の間隔でストリップ状に配置したシリコンストリップである。広島大学で開発されてきた。

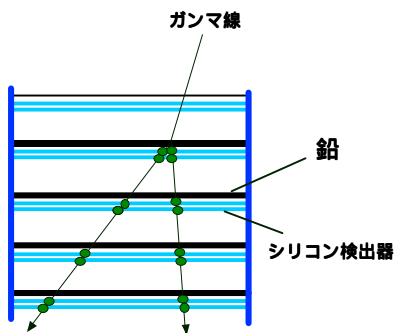


図 2.4 到来方向検出の原理

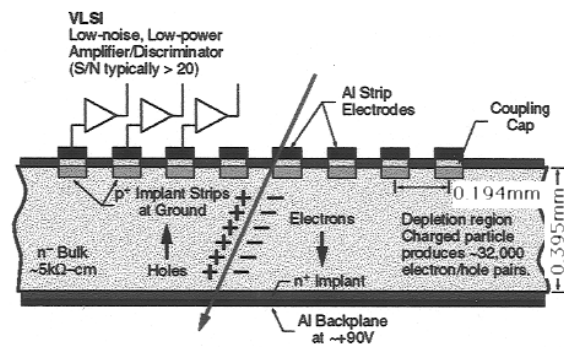


図 2.5 シリコンストリップ検出器

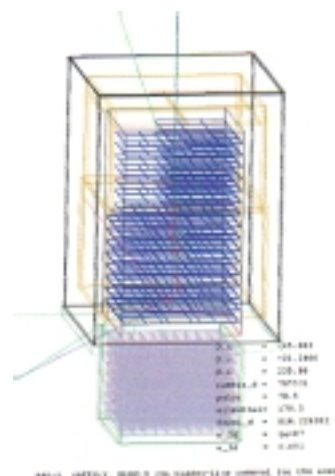


図 2.6 Geant4 によるジオメトリ

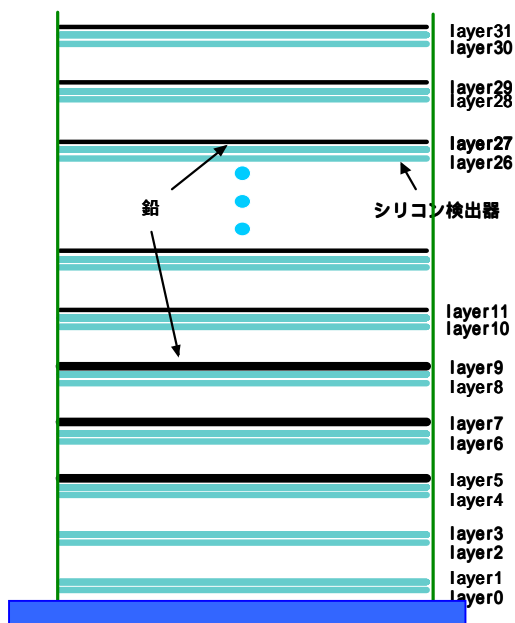


図 2.7 シリコン検出器と鉛の配置

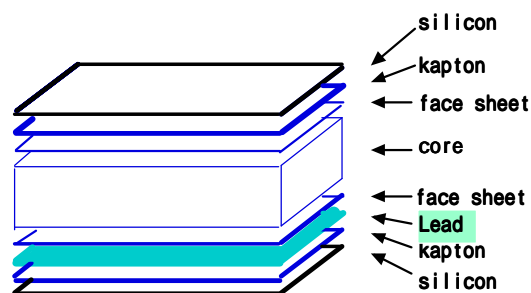


図 2.8 トラッカーレイの構成物質

このトラック一部には、シリコン検出器 2 枚の間に鉛や他の物質をはさんだトレイ (図 2.8) が 17 個縦列に置かれている。ただし、最上段と最下段のシリコン検出器は 1 枚ずつで、合わせて 32 層である。隣合うトレイの互いに近いシリコンは、電極が交差するような向きになっており、この 2 枚で位置が決定できる。ただし今回の実験に使われたシリコンストリップ検出器は、数が不足していたため最終的に予定されている量の 81% で構成されている。実験では、上方のシリコン検出器を偏らせ (図 2.6)、ビームの入射位置を中心からずらすなどの処置をしている。鉛の厚さは位置で異なっており、トラック上方の 1 枚の厚さは 0.02cm (放射長にして約 3.6%)、下方 (カロリメータ側) の 3 枚は 0.16cm (放射長にして約 28%) である (図 2.6)。ただし、最下の 3 段には鉛を配置しない。上方を薄くするのは、多重散乱を避けて電子・陽電子の飛跡決定の精度を良くするためである。

2.3.2 カロリメータ部

エネルギーの測定には CsI カロリメータが用いられた。縦 2.35cm、横 3.005cm、長さ 31.05cm の細長いブロック (図 2.9) を、横に 10 本、8 段、トラッカー部と同様に位置を決定するためにブロックの向きを順に交差するように並べている(図 2.3 参照)。CsI は全部で約 8.4 放射長である。トラッカー部で飛跡を記録された電子・陽電子が CsI に入射すると電磁シャワーが起こる (図 3.2 参照)。その際 CsI シンチレーション光を発生し、CsI ブロックの両側のフォトダイオードで読み込むことで、デPOSITエネルギーが各 CsI ブロックで測定される。

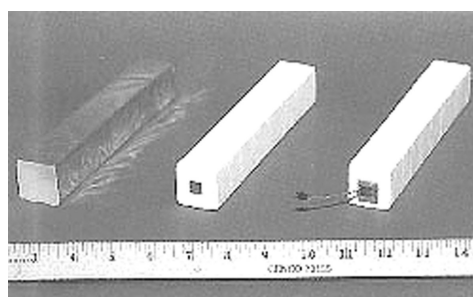


図 2.9 CsI ブロック

2.4 検出器シミュレータ

GLAST 計画の準備として検出器応答の研究がなされている。これまで開発が進められてきた GLAST 用シミュレータは、その団体となるシミュレーションツールキットのサポートが失われたため、これに替わるあらたなシミュレータが必要となった。GLAST では、検出器の構造を精密に記述でき、また国際的に共同開発がなされている Geant4 というシミュレータを用いて GLAST 検出器のシミュレータが開発されることになった。Geant4 は、近年注目を集めているオブジェクト指向技術と C++ 言語を用いた粒子と物質の相互作用のシミュレーションプログラムで、高エネルギー、原子核実験、放射医学などにおける測定器シミュレーションプログラム作成のためのツールキットである。Geant4 による GLAST 検出器シミュレータ開発は本研究室が主導して始めており、開発の最初の段階として加速器ビーム実験のシミュレータを作成した。

本研究では、Geant4 シミュレータで加速器ビーム実験のシミュレーションを行い、そのデータを実際のデータ、TBSIM とデータと比較して、現段階で Geant4 によるシミュレータが正しく動作しているかどうかの評価を行った。

3章 ガンマ線反応率の評価

3.1 ガンマ線と物質の相互作用

光子のエネルギーが 1keV 以上のとき、ガンマ線 (X 線) は物質と主に光電効果・コンプトン散乱・電子-陽電子対生成の三つの相互作用によって物質にエネルギーを吸収される。光電効果は光子と軌道電子の相互作用で、光子のエネルギーはすべて吸収され光は消滅する。コンプトン散乱は、光子が電子と弾性散乱を起こしてエネルギーの一部を落とす現象で、光子は消滅しない。電子-陽電子対生成は、光子が原子核のクーロン場と相互作用して電子と陽電子を生成する現象で、そのとき光子は消滅する。図 3.1 に鉛の質量吸収係数と入射光子のエネルギーとの関係を示す。GLAST のガンマ線領域 (20MeV ~ 300GeV) では、電子・陽電子対生成が主な相互作用であるが、低エネルギー側でコンプトン散乱が無視できなくなる。

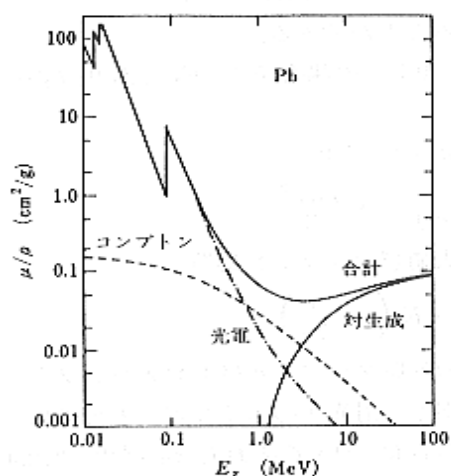


図 3.1 鉛における光子の質量吸収係数 $\mu /$

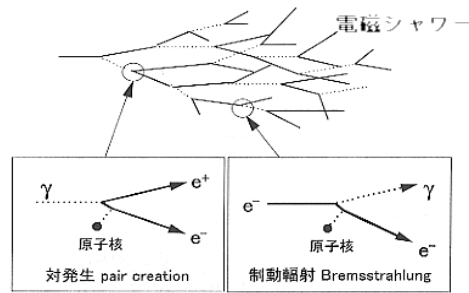


図 3.2 電磁シャワー

また、電子・陽電子対生成で生成した電子・陽電子のエネルギーが高いと、電子の制動放射により高エネルギー光子が作られ(図 3.2)、この光子が電子・陽電子対をつくる。これらの電子・陽電子対はまた制動放射で光子を作るという過程が繰り返され、光子のエネルギーが電子・陽電子対生成を作れなくなるまで電子、陽電子、光子の増殖が行われる。ある厚さに達すると、電子や光子のエネルギーが低くなり、電子・陽電子対を作るよりも、電子の電離、光子のコンプトン散乱によるエネルギー損失の方が大きくなり、粒子数が減少していく。この現象を電磁シャワーとよぶ。シャワーの発達は電子・陽電子対生成によってなされる。

3.2 電子・陽電子対生成の反応確率

ガンマ線がトラッカー部で電子・陽電子対生成を起こす確率、およびカロリメータ部も含めて電子・陽電子対生成を起こす確率を、反応断面積の値から計算し、シミュレーション結果と比較した。この反応断面積の値が、文献に載っている式を用いて計算した値と変わらないことは確認した。

光子が、厚さ d の層を通過するとき電子・陽電子対生成を起こす確率は、光電効果、コンプトン散乱、電子・陽電子対生成の質量吸収係数を $\mu_{phot}, \mu_{comp}, \mu_{conv}$ とすると、

$$K = \frac{\mu_{conv}}{\mu} \{1 - \exp(-\mu d)\}$$

ただし、 $\mu = \mu_{phot} + \mu_{comp} + \mu_{conv}$

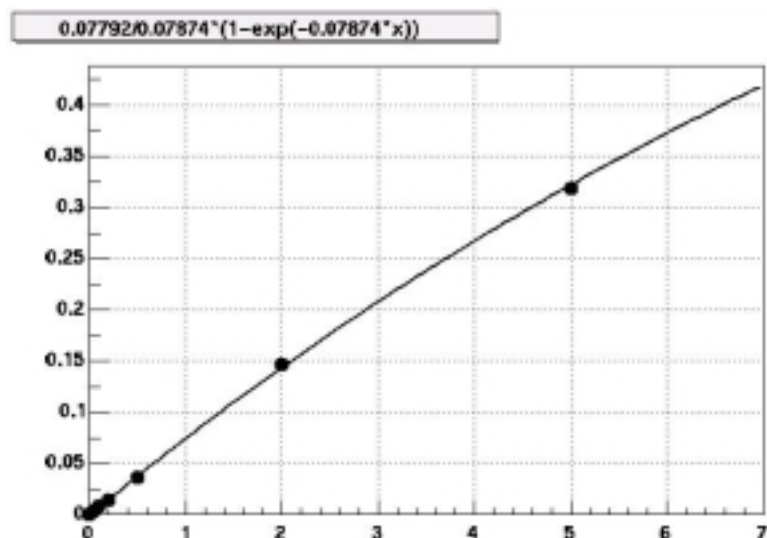


図 3.3 シリコンにおける電子・陽電子対生成確率の比較
横軸がシリコンの厚さ(cm)、縦軸が確率

と表される。

まず、1種類の物質、ここではシリコンだけにガンマ線を入射したときに電子・陽電子対生成の確率が正しくシミュレーションできているかどうかの確認を行った。厚みの異なるシリコンの板に、それぞれ入射エネルギー1GeVのガンマ線を10000回入射させ、電子・陽電子対生成が起こったイベント数から確率を求めた。シミュレーション結果をとしてプロットし、反応断面積で求めた理論値と比較した(図3.3)。理論値とよく合っていることがわかる。

次に、図3.4のように異なる物質を何層も通過したときの確率を考える。 n 層目で反応が起こる確率は、 $n-1$ 層目までの物質を通過する確率、

$$B_{n-1} = \sum_{i=1}^{n-1} \exp\{-(\mu_{phot_i} + \mu_{comp_i} + \mu_{conv_i})d_i\}$$

を用いて、

$$k_n = B_{n-1} A_n \{1 - \exp(-\mu_n d_n)\}$$

ただし、
$$A_n = \frac{\mu_{conv_n}}{\mu_{phot_n} + \mu_{comp_n} + \mu_{conv_n}}$$

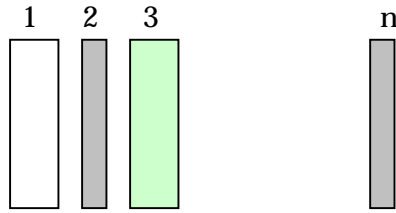


図 3.4

で表される。よって、複数の異なった N 層を通過するときに反応が起こる確率は、

$$K = \sum_{i=1}^N k_i$$

となり、複雑である。

しかし、1GeV 以上では μ_{phot} と μ_{comp} は μ_{conv} に対して無視できるので、

$$K = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^N \mu_{conv} d_i\right)$$

と簡単になる。10MeV~1GeV では μ_{phot} は無視でき、 μ_{comp} と μ_{conv} の比はどの物質でもほぼ同じであるので、鉛の比を用いて、

$$K = \frac{\mu_{convPb}}{\mu_{photPb} + \mu_{compPb} + \mu_{convPb}} \left[1 - \exp\left\{-\sum_{i=1}^N (\mu_{comp_i} + \mu_{conv_i}) d_i\right\} \right]$$

と近似した。

ここでは、トラッカー部を通過するまで、またカロリメータ部を通過するまでの、それぞれの場合での電子・陽電子対生成が起こる確率を、Geant4 に組み込まれている各物質の反応断面積より求め、シミュレーションが正しく動作しているかどうかを確認した。確認は、入射ガンマ線のエネルギーがそれぞれ 10MeV、100MeV、1GeV、10GeV、100GeV の場合で行った。トラッカー部の構成は図 2.8 に示す。カロリメータ部では、CsI の断面積に対して他の断面積が無視できるほど小さいため、CsI についてのみ計算した。

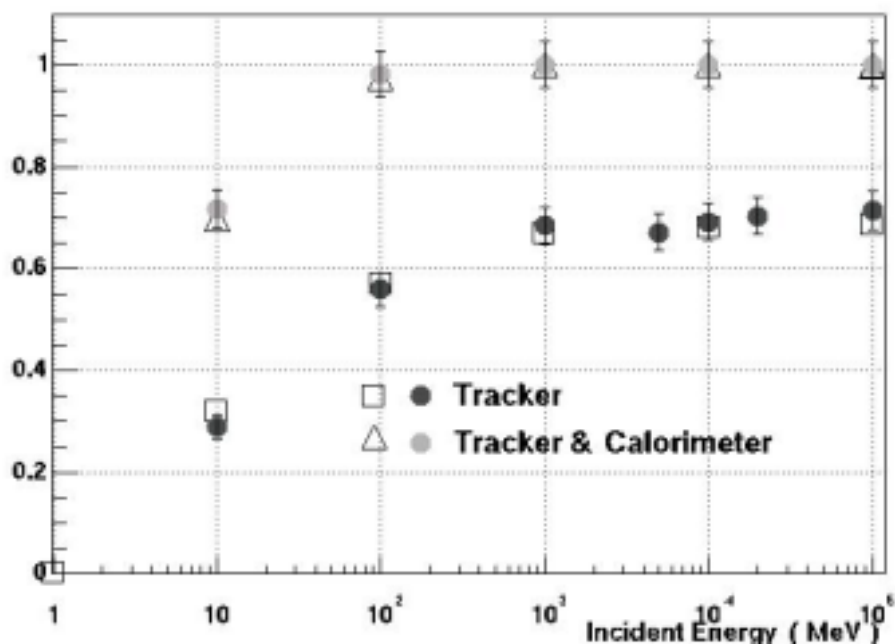


図 3.5 電子・陽電子対生成の反応確率

横軸は入射エネルギー、縦軸は確率

はトラッカーまで、 はカロリメータまでの理論値とシミュレーション結果

シミュレーションでは、前述した入射エネルギーのガンマ線を検出器に対して垂直に 500 回ずつ入射させて、最初の物質との反応が電子・陽電子対生成であったイベント数を数えて確率を求めた。これらと理論値 (Tracker と Tracker & Calorimeter) とをプロットしたものが図 3.5 であり、理論値とよく一致していることがわかる。このことから、Geant4 シミュレータは、正しい電子・陽電子対生成反応率を示すことが確認できた。

低エネルギー側では反応率が下がっており、このことは観測バンドの下限を示している。また 10MeV では、

$$\frac{\mu_{convPb}}{\mu_{compPb} + \mu_{convPb}} \sim 0.7$$

となっており、コンプトン散乱が無視できない。コンプトン散乱を起こしたイベントは、ガンマ線の入射方向が正しく示さないことにも注意する必要がある。一方、このグラフでは、100MeV 以上で電子・陽電子対生成の起こる確率がほぼ 100%になっている。しかし、エネルギーが高くなると不都合なことが出てくる。シミュレーションのそれぞれのイベントで、入射エネルギーに対するカロリメータ部にデポジットしたエネルギーの割合を図 3.6 に示す。

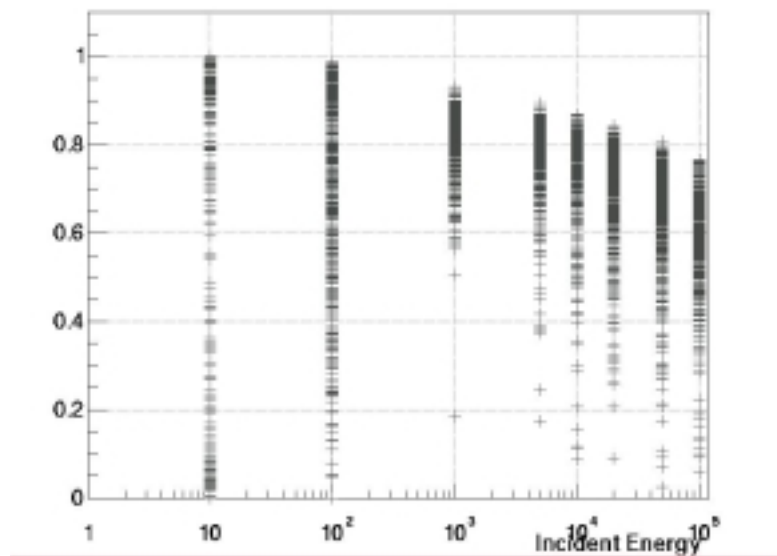


図 3.6 カロリメータ部にデポジットしたエネルギーの割合
横軸は入射エネルギー、縦軸はデポジットした割合

入射エネルギーが大きくなると、相互作用により生成された電子・陽電子のエネルギーが大きくなり、電子・陽電子が、カロリメータ内でエネルギーを十分にデポジットしないまま突き抜けていく。したがって、高エネルギーのガンマ線になるほどエネルギー測定ができなくなり、使えないデータが増えてしまうので、観測バンドの上限となる。

表 3.1 に、1GeV のガンマ線 10000 個を入射させたシミュレーションにおいて、電子・陽電子対生成がトラッカー部内のどの物質中でどれくらい起こったかをまとめた(物質は図 2.8 を参照)。Geant4 シミュレータによるガンマ線入射でトラッカー部を通過するまでに起こる電子・陽電子対生成は、80%以上が鉛で起こっていることを示している。

表 3.1

物質	個数 (10000 イベント中)
シリコン	684
鉛	5326
facesheet	33
kapton	125
core	157
ACD*	148
Carbon Wall*	169
合計	6642

注：ただし、*はトラッカー部の上方に位置する物質

3.3 反応した layer 数の頻度分布

検出器にガンマ線を入射させた際、反応（ヒット）が起こったヒット layer 数のヒストグラムを、実験データとシミュレーションデータ、それぞれで作成し、比較を行った。このヒストグラムは、トラック内部のどのあたりで電子・陽電子対生成が起こったかに依存する。

実験データは、入射ガンマ線のエネルギー、4~6GeV、9~11GeV、14~16GeV の 3 通りのガンマ線を選別した。ガンマ線の処理は第 4 章に記す。シミュレーションでは、それぞれのエネルギーの幅で乱数を振って入射ガンマ線エネルギーを入射した。ヒストグラムを図 3.7 に示す。ただし総イベント数はそれぞれで異なっていることに注意。layer31 が最上層、layer0 が最下層に相当する（図 2.7 を参照）。

< 実験データ >

< Geant4 データ >

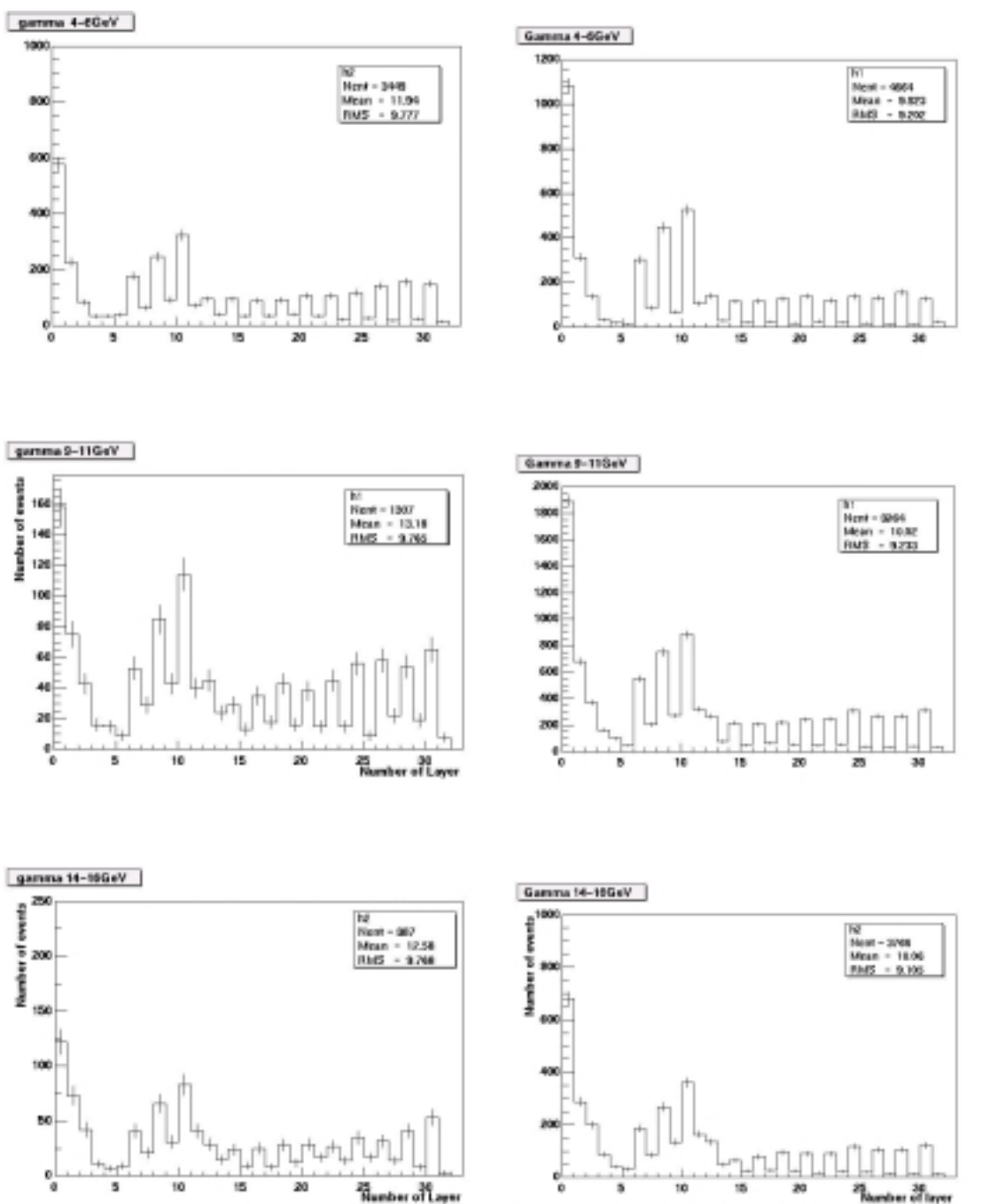


図 3.7 反応した layer 数の頻度分布

< 考察 >

各イベントでのヒットのあった layer の数というのは、ガンマ線の電子・陽電子対生成がトラック部のどの位置で起こったかに影響される。電子・陽電子が生成されてから検出器で検出されるため、反応が上方で起これば多くの layer で検出され、下方で起これば下方のみの layer で検出されるからである。

実験データとシミュレーションを比較すると、どちらも偶数のヒット layer 数になるイベントは多く、奇数のヒット layer 数になるイベントが少なく、似た形になっている。特に頻度の多いヒット layer 数も一致しており、よくシミュレーションできているといえる。

特徴をみると、どの分布も 10 枚、8 枚、6 枚ヒットしたというイベントが多いが、このことはトラックの下方にある厚い鉛の 3 層で多く反応したことを示している。また、どのグラフでもヒット layer 数が偶数個になるイベントが多い。これはトラック内部のシリコン検出器が同じレイ内の 2 枚並んだ配置になっている(図 2.7、図 2.8 を参照)ことが影響しているといえる。粒子が電子・陽電子対生成を起こしたり物質に吸収され消滅したりするのは、ほとんどが隣り合った 2 枚の間以外の場所であるはずであり、粒子がシリコン検出器を通過するときは 2 枚とも通過することが多いと考え、ヒット layer 数が偶数になるイベントが多いことが理解できる。

実験データの分布は、シミュレーションに比べヒット layer 数が大きいところの分布が多くなっている。ガンマ線のイベントの他に、バックグラウンドの荷電粒子が混ざって入射しているのではないかと推測している。

高エネルギーになるにつれて、実験データでは奇数の分布が多くなっている。しかし、シミュレーションの方では形に大きな変化はない。ただ、ヒット layer 数が 10 枚あたりを中心に左右にイベント数が少なくなっている部分があるが、ガンマ線エネルギーが大きくなるにしたがって、その部分のヒット layer 数が奇数となるイベントが増えていく。カロリメータ部からの粒子数が関係することを推測しているが、今後の調査が必要である。

4章 Hit multiplicity の評価

4.1 Hit multiplicity

トラッカー部に配置されている薄いシリコンストリップ検出器は全部で 32 層 (layer と呼ぶ) で、各 layer には多数の電極が並べられている (図 2.5)。荷電粒子がシリコンストリップ検出器を通過するとき、粒子が電子・正孔対を生成し、近くの電極で電荷を捕える (図 4.1)。

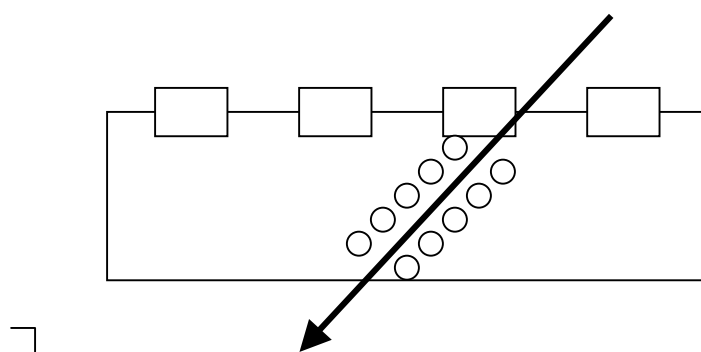


図 4.1 シリコンストリップ検出器

1 個の粒子の入射 (1 イベント) のあたりの信号を検出した電極の数 (ヒット数と呼ぶ) の分布は Hit multiplicity と呼ばれ、入射粒子に対するトラッカーのレスポンスの重要項目である。Hit multiplicity を、実験結果とシミュレーションで比較する。ここでは、layer 毎の平均ヒット数の分布と、トラッカー全体でのヒット数の頻度分布という 2 つのプロットで比較する。

4.2 評価方法とデータ

シミュレーションにより取り出したデータ (TrackerOut.dat) を次に示す。

ビームが layer を通過する際の、

- ・その layer の番号 (下から何番目の layer か)
- ・その layer に入射した位置、layer から出た位置 (x、y、z)

・その layer を通過する間のエネルギー損失

ビームがトラッカー部を通過する間、シリコンストリップ検出器を通過しエネルギーを損失するたびに上記のデータが記録される。このデータから Hit multiplicity を作成するためのデータ処理を、次に示す数段階にわたって行った。

- [1] ビームが layer を通過する度に、単純にその layer のヒット数を 1 カウントとする。
- [2] layer をストリップ領域に分割したとき、複数の粒子が同じ領域に入射した場合は 1 カウントとする。
- [3] ビームが斜めに通過する際、複数のストリップ領域を通過することを考慮して複数カウントする。
- [4] エネルギー損失に対して、スレッシュホールド以下のエネルギー損失の場合はカウントしない。
- [5] 最上層の layer でのヒット数が 0 であるデータだけでプロットする。

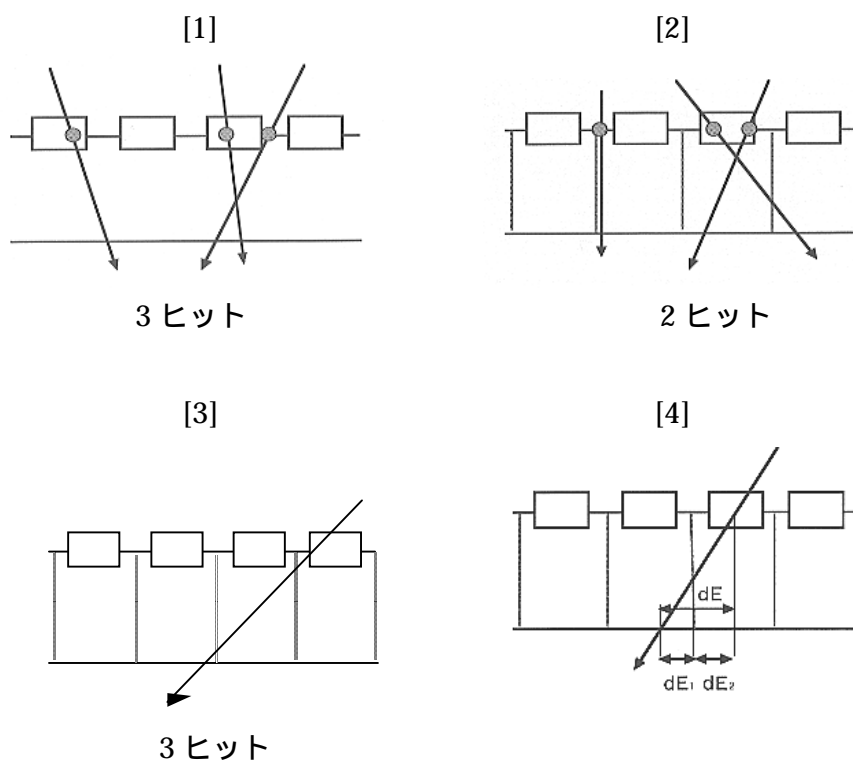


図 4.2 処理の概念図

比較には陽電子とガンマ線のデータを用いた。データの種類を表 4.1 にまとめる。

表 4.1 データの種類

ビーム	入射エネルギー	入射角度	(実験名称)
陽電子	20GeV	0度	run283
	5GeV	0度	run332
		30度	run340
	1.6GeV	0度	run360
		30度	run366
ガンマ線		0度	run298

加速器ビーム実験（以後、実験と記す）のデータには、粒子が1個入射したときの、

- ・各 layer でのヒット数
- ・電荷を捕えた電極の番号（チャンネル番号）のリスト
- ・カロリメータの各ブロックの ADC 値を足し合わせた値

がある。ADC 値は必ずしも入射エネルギーに比例していないが、その大きさを示す指標としてデータの選択に用いる。陽電子の入射エネルギーは、ビームラインのマグネットから保証されている。ガンマ線は、定めたエネルギーのガンマ線を生成することができないため、2GeV から 18GeV の入射エネルギーのデータが混在している。また、加速器実験とは別に、TBSIM の出力との比較も行った。TBSIM はこれまで GLAST 用に使われてきたシミュレータであり、Geant4 と TBSIM の比較は、Geant4 シミュレータが正しく動作しているかを評価するために行う。

4.3 20GeV の陽電子による評価

4.3.1 実験データの処理

陽電子 20GeV のデータを用いて、Hit multiplicity を作成した。

実験では、シリコンストリップ検出器の不足を考慮し、入射位置は layer の中心から (7, 7) cm にしている。加速器による陽電子の入射は、検出器に 0 個、1 個かまたは

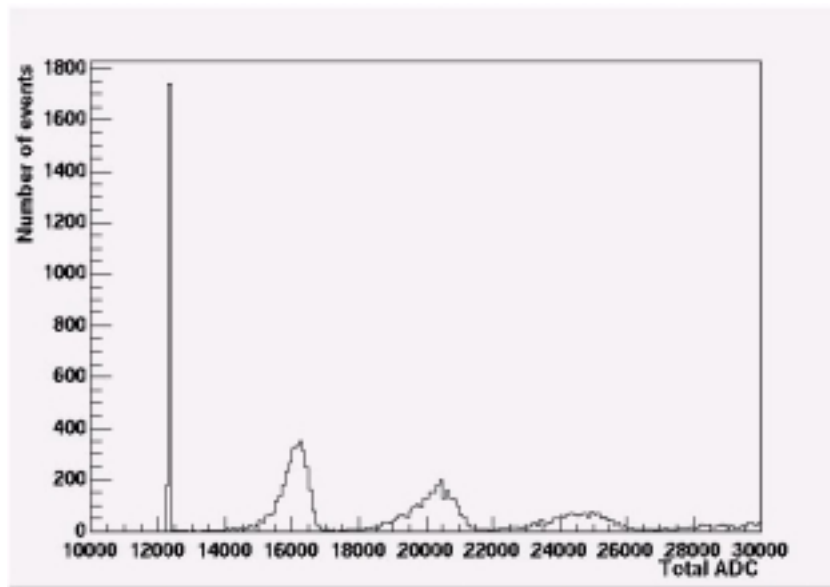


図 4.3 実験データの ADC 値の頻度分布

複数個同時の入射となる。したがってまずそれらが混在したデータの中から、1 個入射のイベントのデータのみを選別する。

各イベントの ADC の値をヒストグラムにした。図 4.3 に示す。ピークを持つ分布が複数見られる。ADC の値が 12000 付近にある分布は ADC の pedestal (陽電子が 1 つも入射しなかった場合の回路の雑音) で、それを除いた分布は、左から順に 1 個、2 個、3 個同時の入射のイベントを意味する。グラフより、ADC の値が 13000 から 17000 のイベントを陽電子 1 個の入射イベントとして選別した。

シリコンストリップ検出器の電極の中には少数ではあるが正常に作動しないストリップ (noise strip という) が含まれており、ヒットしている、していないに関わらず、その電極からの信号はデータから除いた。Noise strip を除く前と除いた後の、各 layer でのヒット数の平均のプロットを図 4.4 に示す。上方 (ビームの到来方向側) から、layer31、layer30、...、layer0 となっている。layer と薄い鉛、厚い鉛の位置関係を図に示す。上方の layer でのヒット数に比べ、下段になるにつれてヒット数が増えている。特に厚い鉛のすぐ下の layer でヒット数が著しく増えており、厚い鉛のシートとの相互作用で電子・陽電子が生成される確率が高いことを反映している。

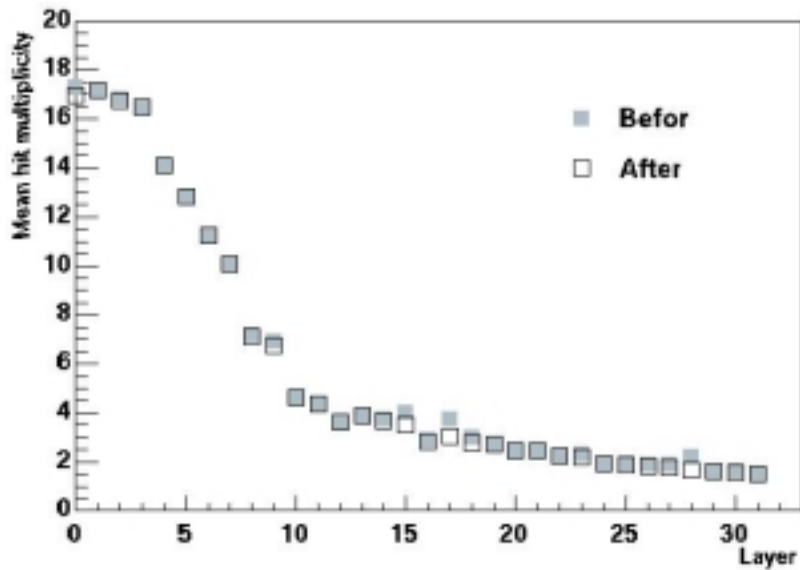


図 4.4 実験データにおける各 layer での平均ヒット数
(イベント数は 3206)

4.3.2 Geant4 データの処理

次に、Geant4 シミュレータを用いて、実験と同じ 20GeV の陽電子を同じ位置に 1 粒子ずつ入射した。その Geant4 シミュレーションデータ（以下、Genat4 データとする）を、4.2 に記述した評価方法[1]～[5]で Hit multiplicity を作成し、それぞれ実験データと比較する。

[1] ビームが、エネルギーのデポジットを伴った layer の通過をしたとき、その layer のヒット数を 1 カウントした。入射した位置は考慮していない。この処理で得られたデータから各 layer でのヒット数の平均のプロットを図 4.5 に示し、実験結果と比較した。

が実験データ、薄い黒丸が処理後の Geant4 データである。実験データと同じように厚い鉛になるところからヒット数が増えているが全体的に少ない。厚い鉛を通過した直後は急激にヒット数が増えている。このことは、この処理より得られたヒット数が layer を通過した粒子の数を意味することから理解できる。

[2] しかし、実際は複数の通過が同じ場所で起こった場合は、その近くにある電極で 1 ヒットしか示さないため、次の処理では、検出器を単純に電極と電極の幅 0.194mm で分け、粒子が入った位置が同じ領域のものは合わせて 1 ヒットとした。この処理で、[1]

より全体的にヒット数は減ることが予想される。プロットしたものを図 4.5 に示す。が、処理後のもので、全体的にヒット数が減った。特に鉛が厚い layer5 から layer10 の辺りでは、ヒット数の減少が大きくなっている。これは厚い鉛で生成された多くの粒子が、検出器の同じ領域でヒットしたことを示している。また、実験データに比べ全体的にかなり少ない。

[3] 次に、粒子が検出器を斜めに入射して、複数の電極のそばを通過する場合を詳しく考える。生成した複数の電子はそれぞれ近い電極へ流れるので、複数のヒットとなる。そこで次の処理では、これを考慮してそのヒット数をカウントする。この処理により、ヒット数が増えることが予想され、図 4.6 のように、ヒット数が増え、実験データに近付いた。厚い鉛のシートを通過した直後の layer でのヒット数の増加率が大きい。このことからシリコン検出器の層に対して垂直だった粒子が、物質との反応で徐々に角度を変え、特に厚い鉛で角度を持った粒子が増えていることがうかがえる。

[4] 次にスレッシュホールドを考える。実際には 1 本の電極に流れる電流がある程度の大きさを持たなければ信号を検出できない。検出できる下限のエネルギーの値をスレッシュホールドという。加速器ビーム実験でのスレッシュホールドは 1.29fC であり、1 個の電子・陽電子対を生成するのに必要なエネルギー 3.65eV を用いて、スレッシュホールドを 0.0294MeV とした。次の処理では、1 個の粒子が各 layer を通過したときにデポジットしたエネルギーを通過距離の割合でストリップ領域に分割し、1 イベント中の複数の粒子について同領域にデポジットしたエネルギーを足し合わせた値がスレッシュホールドの値に達しなければ、そのストリップでは検出されなかったとしてカウントしないものとする。この処理により、ヒット数が減ることが予想される。この処理をしたものとして図 4.7 に示す。全体的に一割ほど減少した。

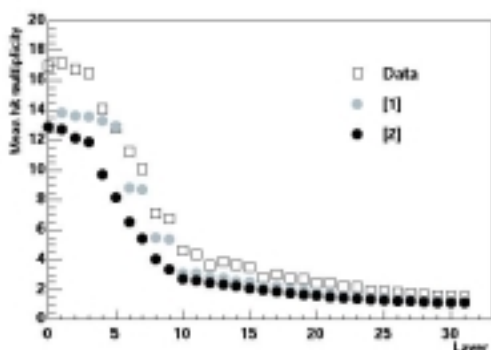


図 4.5 処理[1][2]の結果

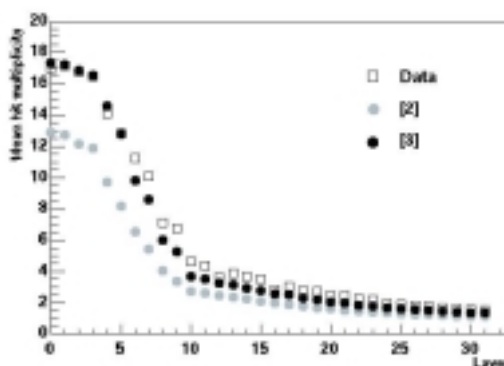


図 4.6 処理[3]の結果

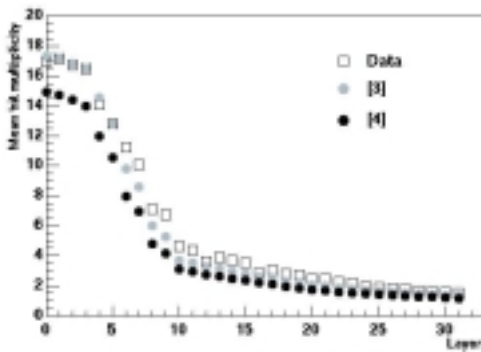


図 4.7 処理[4]の結果

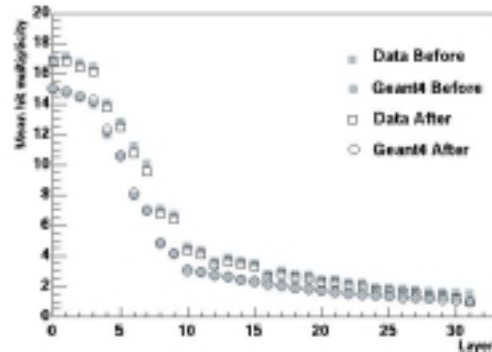


図 4.8 処理[5]の結果

[5] これまでの処理の結果では、実験データの方が全体的に平均ヒット数が多い。荷電粒子が入射する際、上流にある空気などの物質の影響により、低エネルギーガンマ、ハドロンがわずかに含まれている可能性がある。したがって、layer31(Top)でのヒット数が1である実験データだけを選別した。この処理は、複数の陽電子の入射イベントを除去することの補足的役割も含む。シミュレーション結果のデータも同じ処理を行った。この処理により、実験データとシミュレーションデータのイベントを、より近い条件で比較できる。この処理による、実験データとシミュレーションデータの変化を図 4.8 に示す。シミュレーションデータは変化が小さいが、実験データは各 layer の平均ヒット数は減り、シミュレーションデータに近付いた。シミュレーションデータの Hit multiplicity は、実験データより全体的に小さく、トラック下部の layer で約十数% 小さい。

TBSIM データにも同じ処理を行い、実験データ、TBSIM データ、Geant4 データを比較した(図 4.9)。TBSIM データもまた実験データより全体的に小さくなっている。TBSIM データに比べ Geant4 のデータの方が小さいが、大きくは違ってない。図 4.10 に、layer25、layer13、layer5、layer1 での Hit multiplicity を示す。

20GeV の陽電子を垂直に入射させたデータを使った比較においては、ある程度 Geant4 は正しく動作しているといえる。シミュレーションによる Hit multiplicity を実験データのそれに近づけるには、さらなるシミュレーションのチューンが必要である。

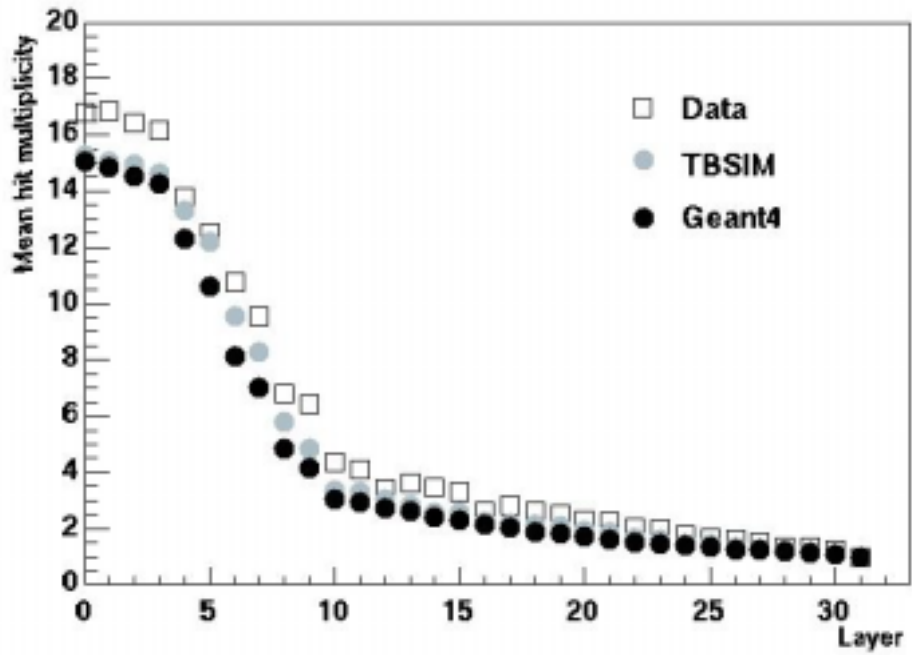


図 4.9 実験データ、TBSIM、Geant4 での比較 (処理[1]~[5]の結果)
 イベント数は、実験データ 2249、TBSIM データ 832、Geant4 データ 2904

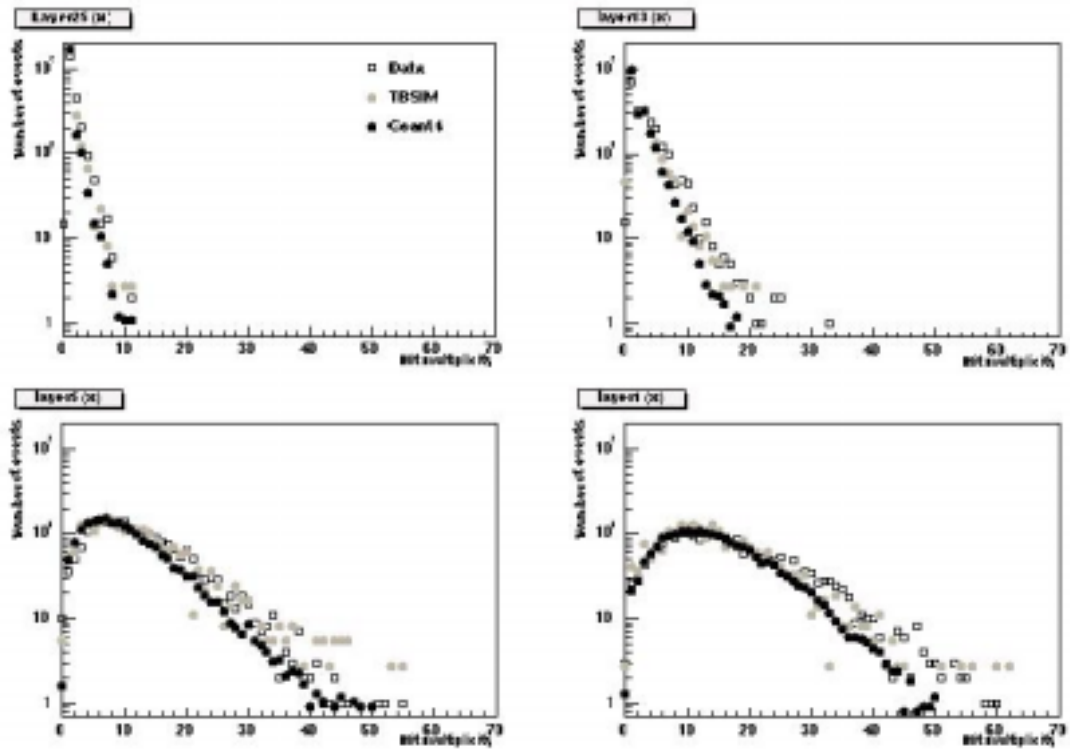


図 4.10 実験データ、TBSIM、Geant4 の Hit multiplicity の比較

4.4 さまざまな条件で入射する粒子での比較

4.4.1 垂直入射で異なる入射エネルギーの場合

[1]～[5]の処理方法で、陽電子の入射エネルギーが 5GeV、1.6GeV のときの Hit multiplicity を作成し比較した。それぞれ図 4.11、図 4.12 に示す。

図 4.11(a)

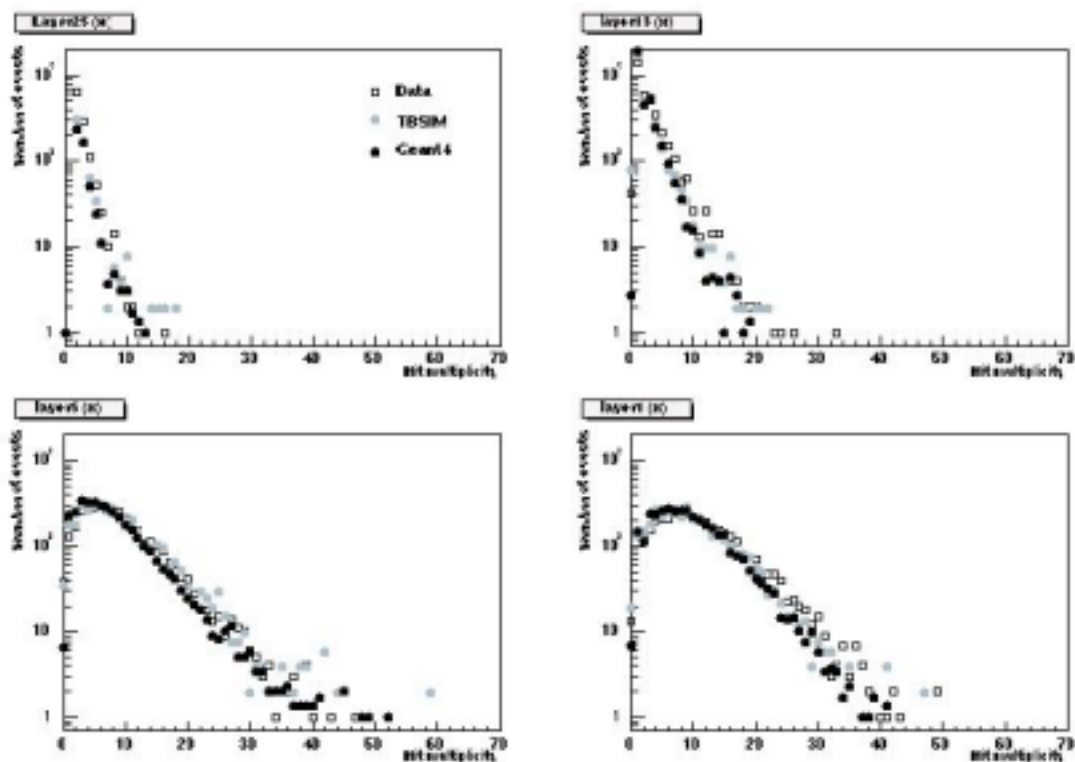


図 4.11(b)

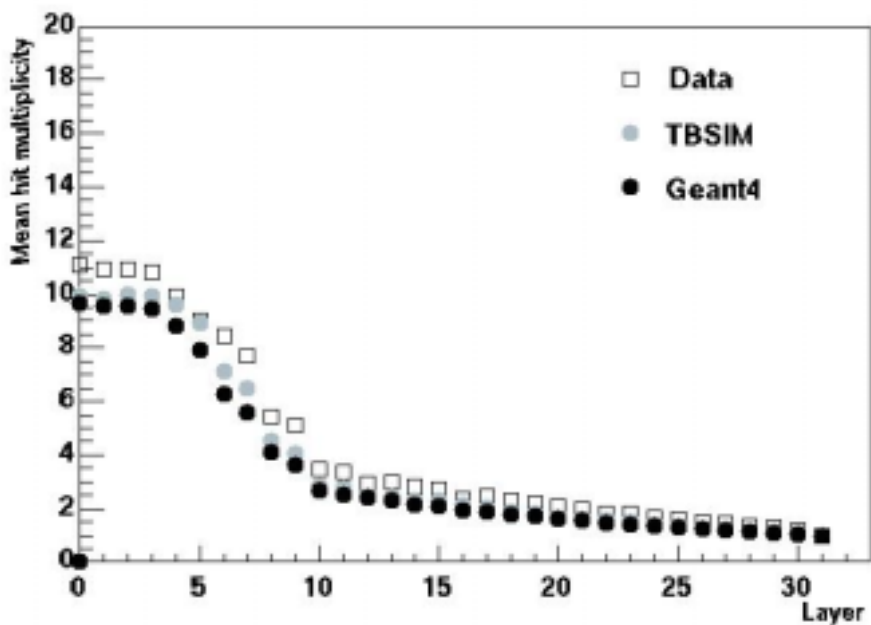


図 4.11 5GeV の陽電子を垂直に入射したときの(a)トラッカー内での Hit multiplicity (頻度分布) (b)各 layer での平均 Hit multiplicity。イベント数は、実験データ 3558、TBSIM データ 1859、Geant4 データ 10634。

図 4.12(a)

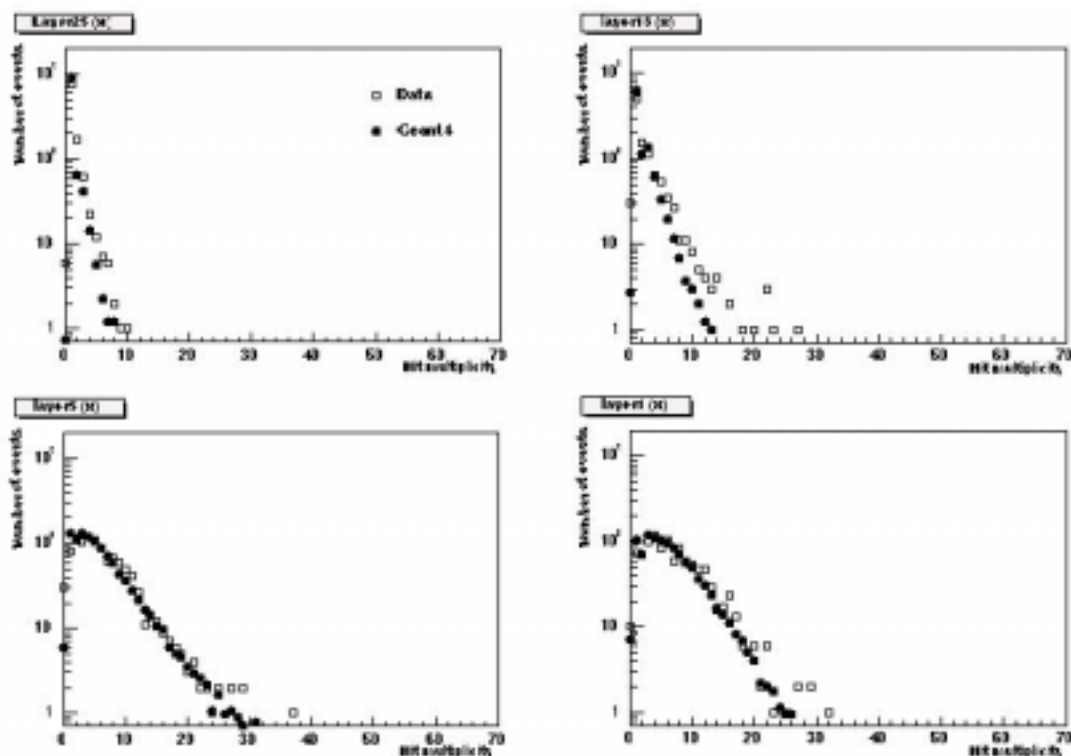


図 4.12(b)

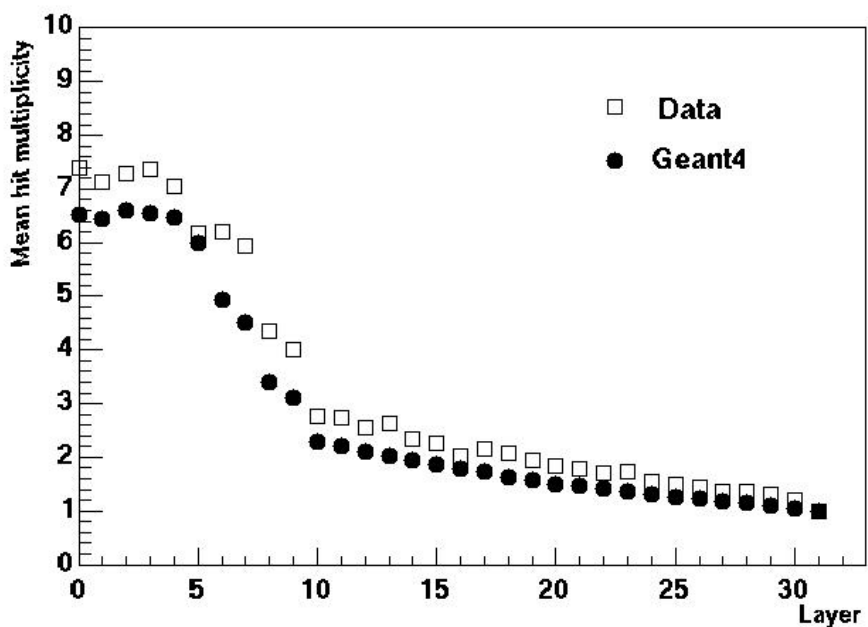


図 4.12 1.6GeV の陽電子を垂直に入射したときの(a)トラッカー内での Hit multiplicity(頻度分布)、(b)平均 Hit multiplicity (頻度分布)。イベント数は、実験データ 1039、Geant4 データ 29926。

< 考察 >

5GeV、1.6GeV どちらも、陽電子 20GeV の垂直入射と同じように、シミュレーションデータは実験データよりほぼ 1 割ほど少なくなっている。5GeV の TBSIM と比較しても、20GeV と同じようにわずかに TBSIM データの方が多くなっている。入射エネルギーを変えてみても同じような結果が得られたことから、陽電子の垂直入射において、Geant4 シミュレータは正しくシミュレーションできるといえる。実験データに近づけるには、シミュレーションデータの更なるチューンが必要である。また TBSIM データとのわずかなずれ、また特に layer10~layer5 のヒット数のずれが大きいことについて、今後の調査が必要である。

4.4.2 斜めの角度で入射する粒子の場合

シリコンストリップ検出器に、30度で粒子が入射する場合の Hit multiplicity を作成し、実験データと Geant4 シミュレーションデータを比較した。用いた実験データは、5GeV、1.6GeV の陽電子を図 4.13 のように 30 度の角度で入射させたものである。また、layer によって電極の向きが異なるが、図 4.13 に示すように 30 度入射に対して x-layer、y-layer とする。1 つのタワーでは、30 度以上の大角度になると電磁シャワーがカロリメータを十分通過しないので、実験データの中から陽電子が 1 個しか入射しなかったイベントを選択することができず、シミュレーションとの比較はできないので用いなかった。陽電子の入射方向を図 4.13 に示す。これらも 0 度入射と同じように[1]～[5]の処理をした。

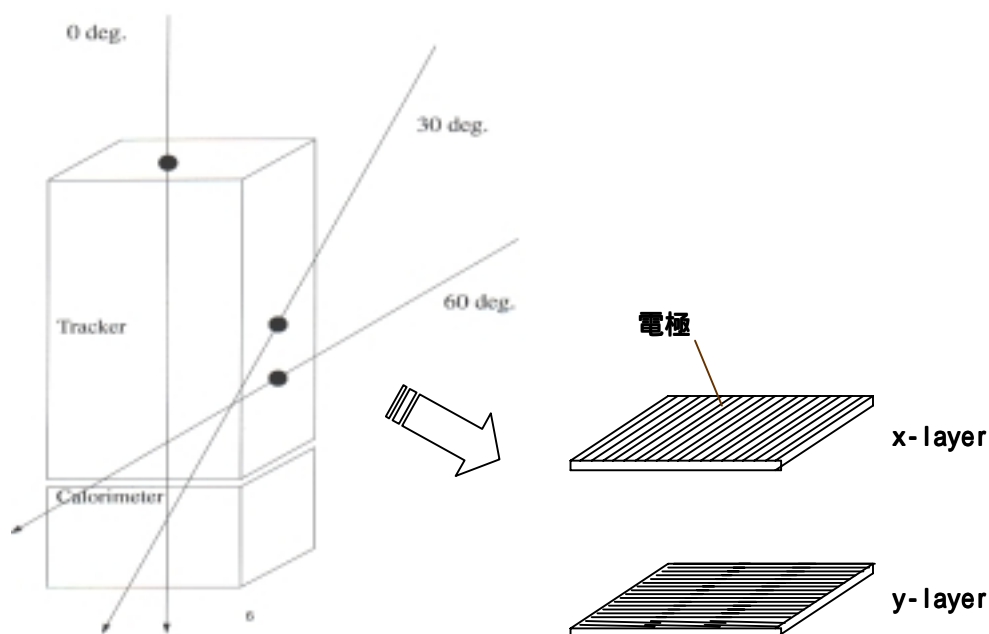
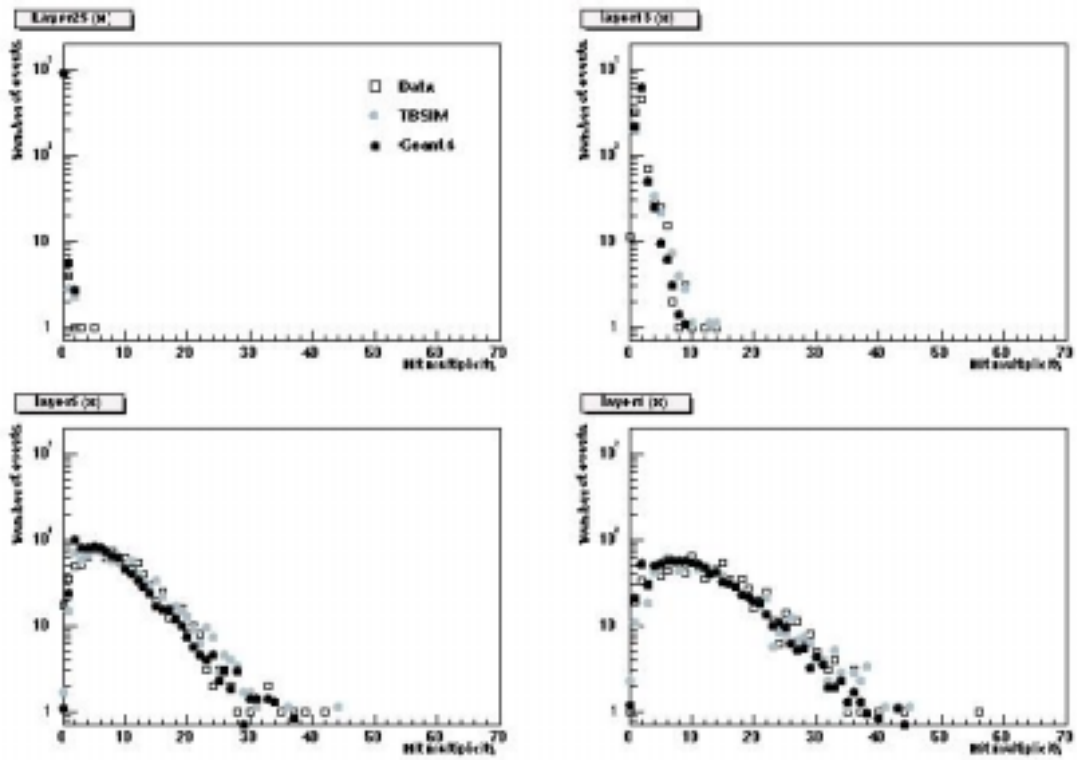


図 4.13 入射角度

☒ 4.14(a)



☒ 4.14(b)

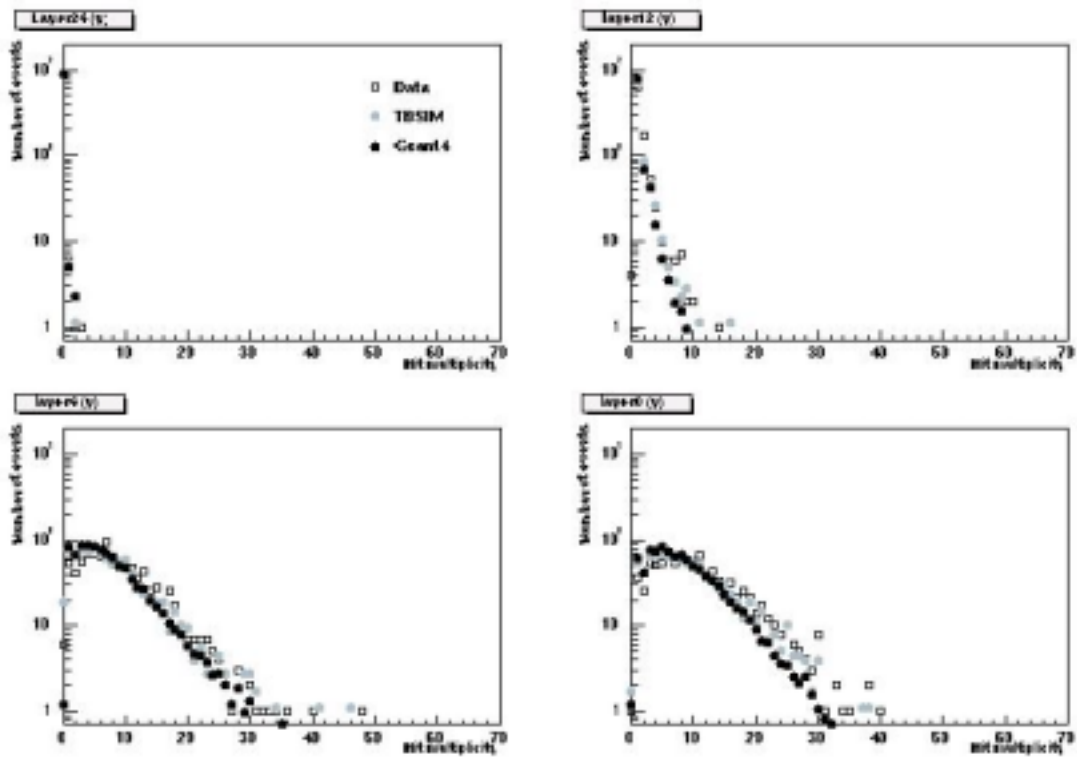


図 4.14(c)

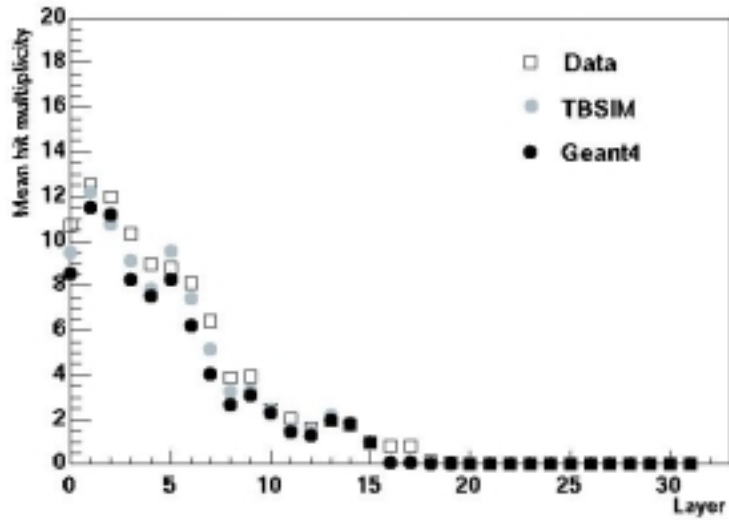


図 4.14 5GeV の陽電子を 30 度の角度で入射したときの (a)x-layer の Hit multiplicity (b)y-layer の Hit multiplicity (c)平均 Hit multiplicity。イベント数は、実験データ 921、TBSIM データ 1644、Geant4 データ 7815。

図 4.15(a)

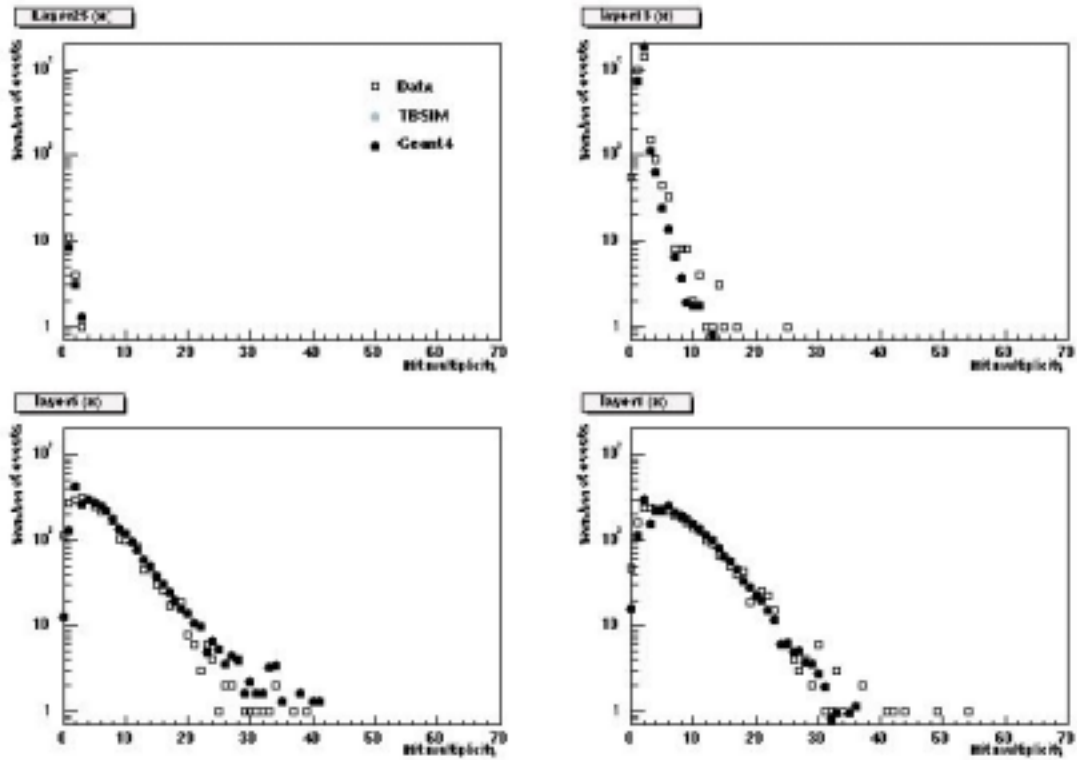


図 4.15(b)

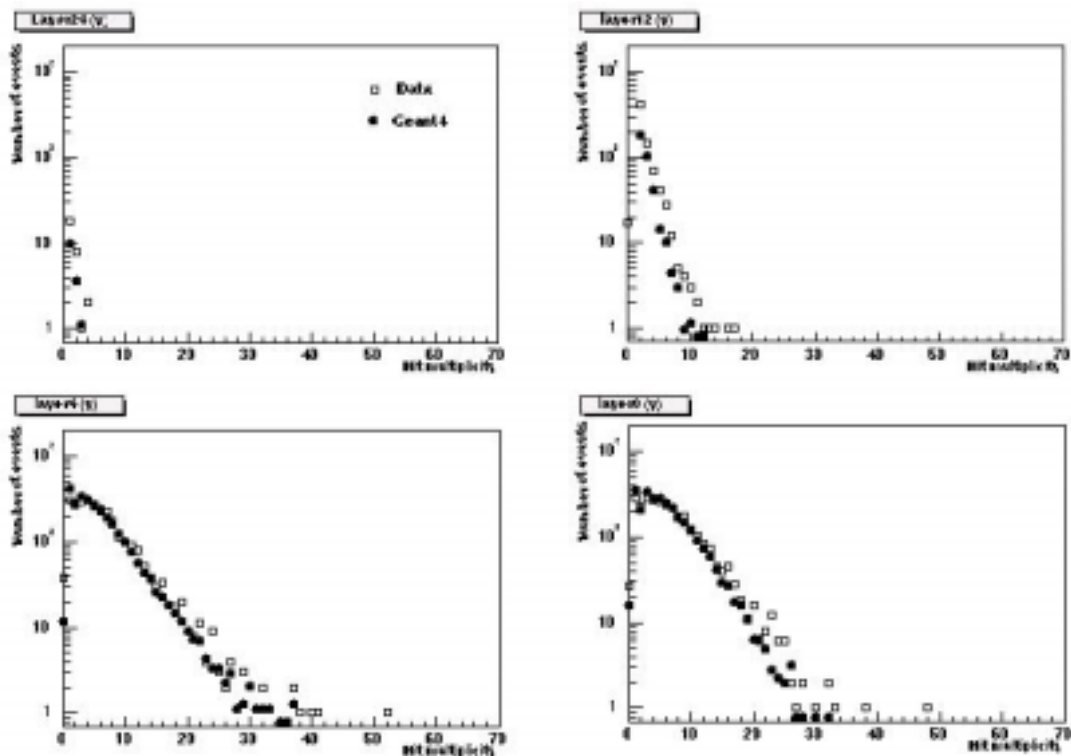


図 4.15(c)

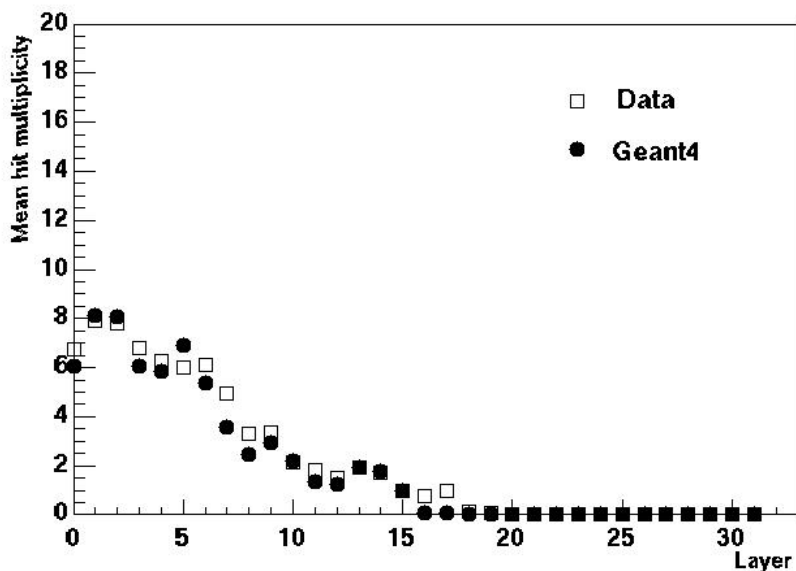


図 4.15 1.6GeV の陽電子を 30 度の角度で入射したときの (a)x-layer の Hit multiplicity (b)y-layer の Hit multiplicity (c)平均 Hit multiplicity。イベント数は、実験データ 2758、Geant4 データ 17191。

< 考察 >

最初にヒットするときから斜めの入射であるために、ヒット数が急激に増える。x方向の layer には電極の向きに交差するように入射する。y方向の layer には電極と同じ方向に入射するため、x方向の layer のヒット数の方が多い。また、y方向の実験データに対するシミュレーションデータの比が、x方向のそれよりも小さい。電極の方向を考えると、y方向の layerの方が、チャージシェアリングの寄与が大きいためと予想できる。各レイヤー毎の平均ヒット数は、実験データとシミュレーションで0度入射のときより合っているように見える。

チャージシェアリングの効果

シミュレーションデータと実験データのずれの原因に、チャージシェアリングが考えられる。本論で行った[1]～[5]の処理では、粒子が通過した領域にあるストリップチャンネルしかヒットしないようにしてあるが、実際にはシリコン内で発生した電荷は拡散しながら電極に集められるので、粒子が通過してない隣の領域にまで電荷がしみ出して、ヒットしてしまう。このため、実験データの方がシミュレーションよりもヒット数が多くなっている可能性がある。以下では、チャージシェアリングの効果について実際にSLACの半田さんにより調べられたことを紹介する。

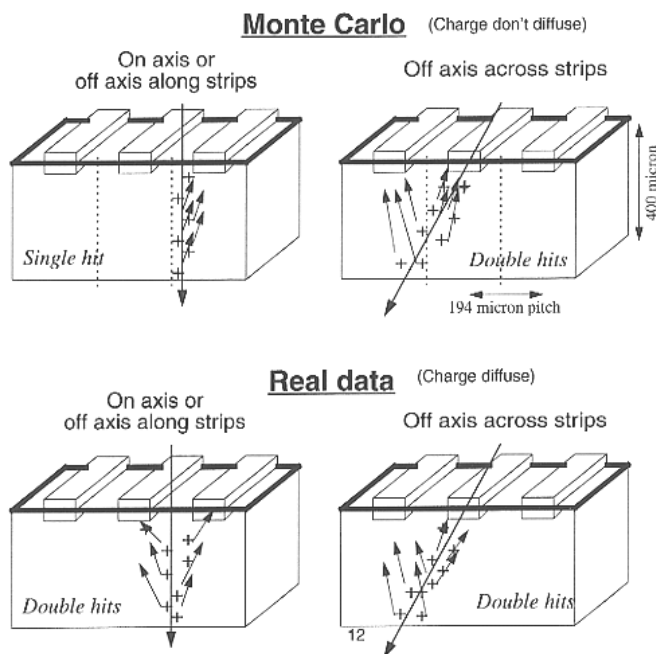


図 4.16 チャージシェアリング

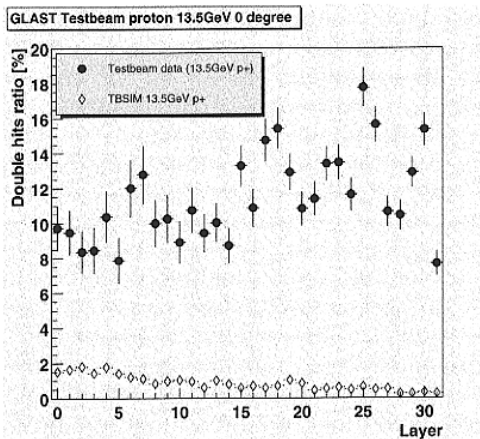


図 4.17 1 ヒット 2 ヒットの割合
13.5GeV の陽子、垂直入射

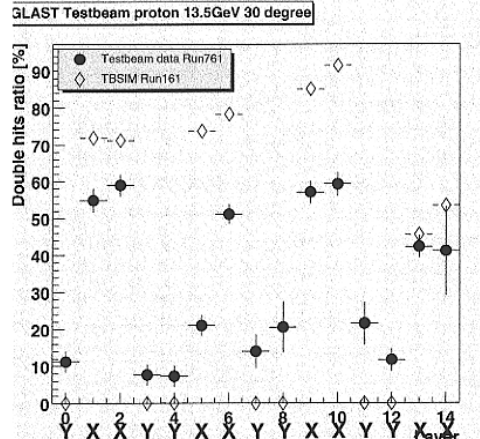


図 4.18 1 ヒット 2 ヒットの割合
13.5GeV の陽子、30 度入射

(SLAC の半田さんによる結果)

図 4.17 は、13.5GeV の陽子、垂直入射のデータから、1 つの粒子の入射で 2 ヒットになった割合を調べ、プロットしたものである。が実験データ、 が TBSIM データである。このプロットより、2 ヒットになる割合が、実験データの方が 10%ほど多くなっている。図 4.18 は 13.5GeV の陽子、30 度入射の場合である。x-layer では、電極の向きと入射方向が交差するためにシミュレーションの方が 2 ヒットになる割合が多く、y-layer では実験データの方が多い。各 layer の平均ヒット数において、この結果を使って補正をした TBSIM データと実験データとの比較を図 4.19 に示す。20GeV の陽電子、垂直入射のデータである。左が補正前、右が補正後である。実験データに近付いているのがわかる。

**Number of Tracker Hits vs. Layer
[20 GeV e+ 0deg]**

Before charge sharing correction

After charge sharing correction

0deg, 20 GeV e+ : Testbeam Run 283, TBSIM Run 83

0deg, 20 GeV e+ : Testbeam Run 283, TBSIM Run 83

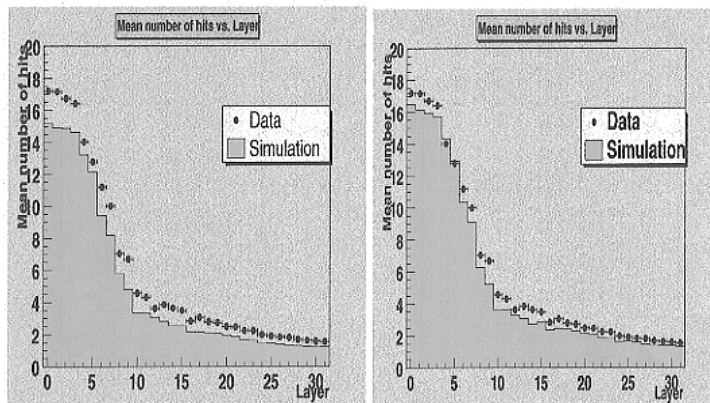


図 4.19 チャージシェアリングの効果 (SLAC の半田さんによる結果)

チャージシェアリングの補正を次に示す。

乱数を用いて、

- ・ 垂直入射の TBSIM データと、30 度入射での y-layer の TBSIM データには 10% のヒット数を加える。
- ・ 30 度入射の x-layer の TBSIM データからは 10% ヒット数を差し引く。

図 4.20 は 5GeV 陽電子の垂直入射データの各 layer のヒット数で、左がチャージシェアリング効果の補正前、右が補正後である。Layer13 で TBSIM データが実験データに近付いたことがよくわかる。図 4.21 は 5GeV 陽電子、30 度入射の各 layer のヒット数である。Layer5 でヒット数の多かった TBSIM データが、補正後実験データに近付いたことがわかる。

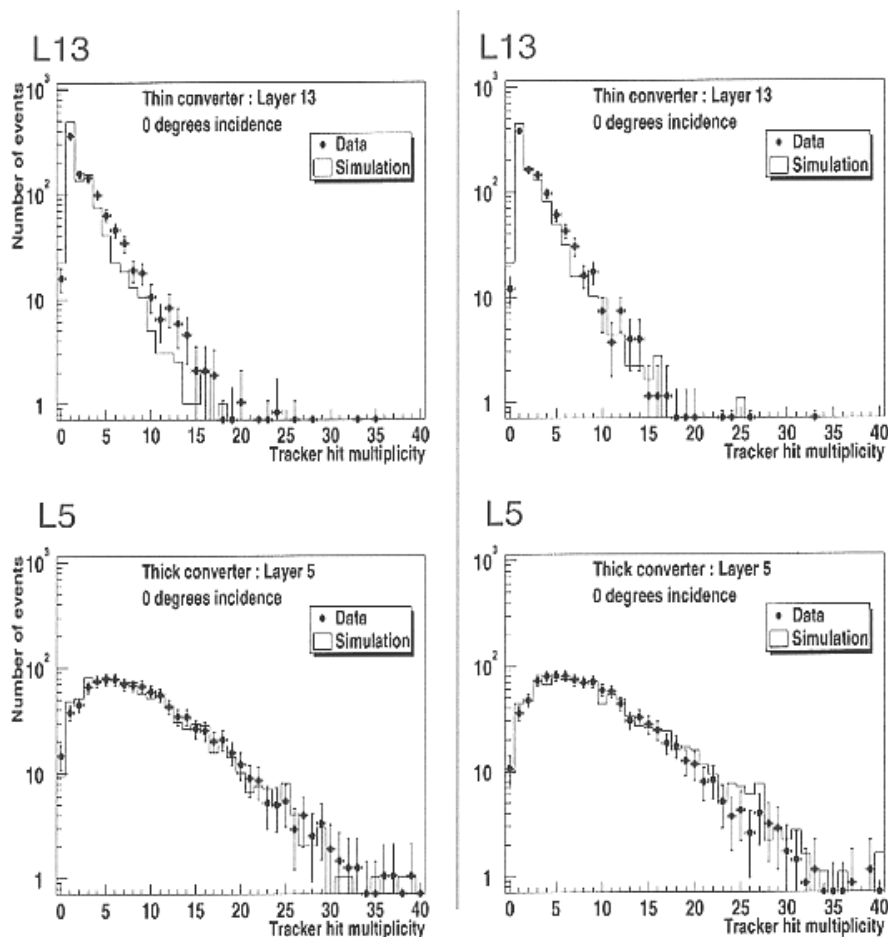


図 4.20 5GeV、陽電子の垂直入射の、layer13、layer5 でのヒット数
左が補正前、右が補正後。
(SLAC の半田さんによる結果)

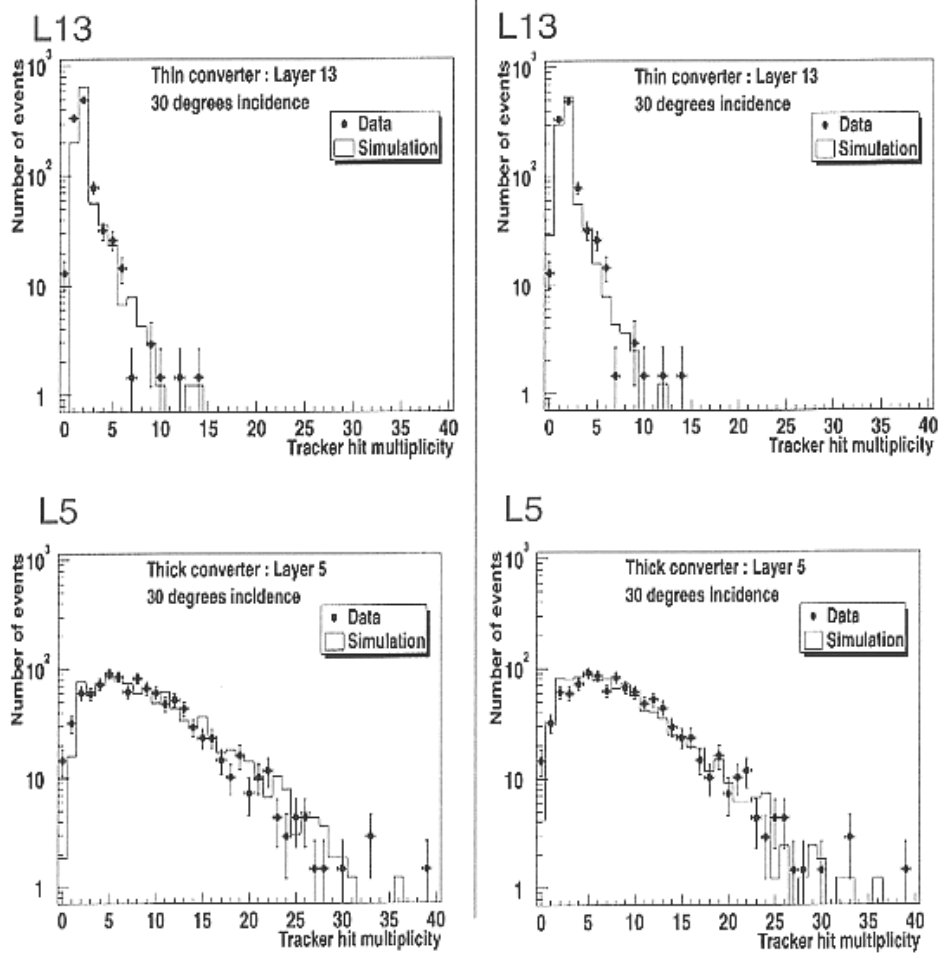


図 4.21 5GeV、陽電子の 30 度入射の、layer13、layer5 でのヒット数
 左が補正前、右が補正後。
 (SLAC の半田さんによる結果)

図 4.22 は 5GeV 陽電子、垂直入射の各 layer の平均ヒット数の、補正前、補正後である。TBSIM データと実験データがよく合っている。これらのことから、シミュレーションデータと実験データを合わせる最後の手段としてチャージシェアリング効果の補正が有力な手法といえるが、さらに基礎実験などを通して描像を理解する必要がある。

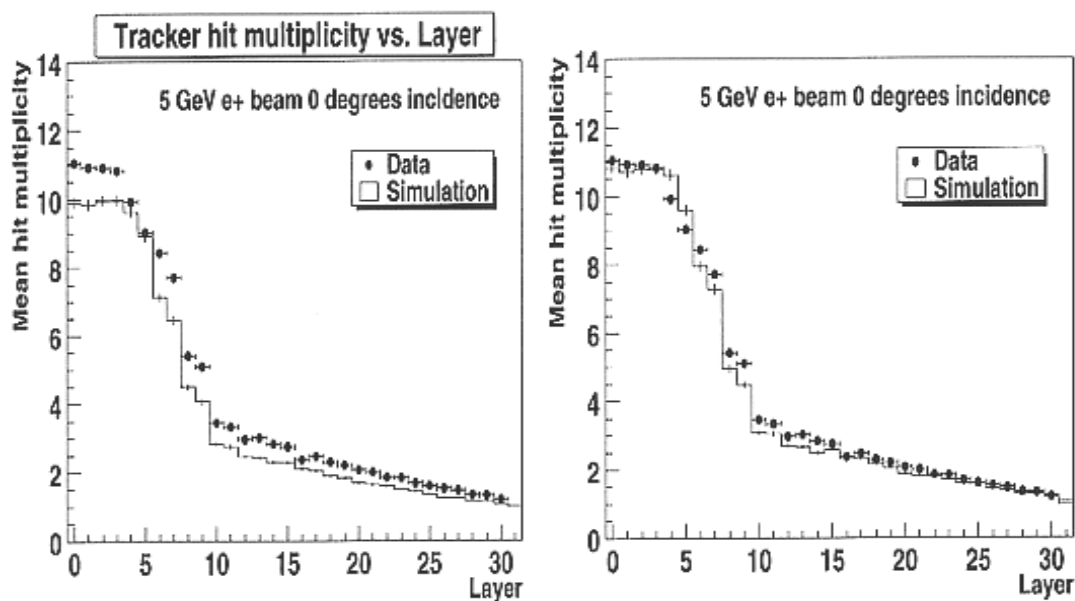


図 4.22 5GeV 陽電子、垂直入射の各 layer の平均ヒット数
 左が補正前、右が補正後。
 (SLAC の半田さんによる結果)

4.5 ガンマ線

検出器に打ち込むガンマ線は、高エネルギー電子と物質の衝突による制動放射によって生成される。従って、ガンマ線のデータにはさまざまなエネルギーのものが混在する。生成されたガンマ線のエネルギーは、制動放射後の電子のエネルギーを測定して割り出しているが、ガンマ線は複数発生する可能性があり、ガンマ線が1個の入射イベントであるかどうか知る方法は今のところない。ここでは、全てのガンマ線のデータが1個の入射イベントとして処理を行った。

入射エネルギーにある範囲を決めてデータを選別する。ガンマ線の入射エネルギーのスペクトルを図 4.24 に示す。

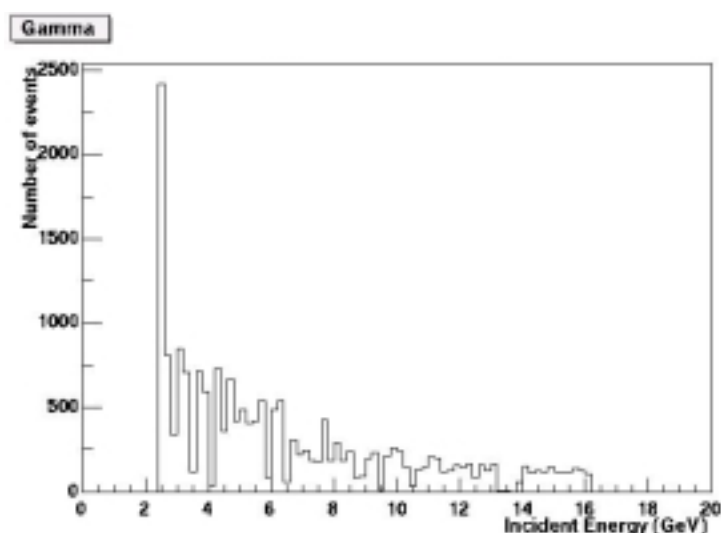


図 4.24 ガンマ線の入射エネルギースペクトル

これより、入射エネルギーが 4 ~ 6GeV、9 ~ 11GeV、14GeV ~ 16GeV の Hit multiplicity を選択した。実験データから、それぞれの入射エネルギーの範囲でデータを選別した。

シミュレーションでは、例えば、実験データの入射エネルギーが 4 ~ 6GeV のものに対しては、4 ~ 6GeV の範囲の乱数を用いて入射した。実験データには荷電粒子などのバックグラウンドが含まれている可能性があるため、layer31 (最上層) のヒット数が 0 であるデータだけを取り出した。Geant4 データ、そして TBSIM データからもそれと同じ条件のデータを取り出し、Hit multiplicity をプロットした。ただし、TBSIM のデータは一定のエネルギーのガンマ線でシミュレーションしており、5GeV、10GeV のデータをプロットした。

図 4.25(a)

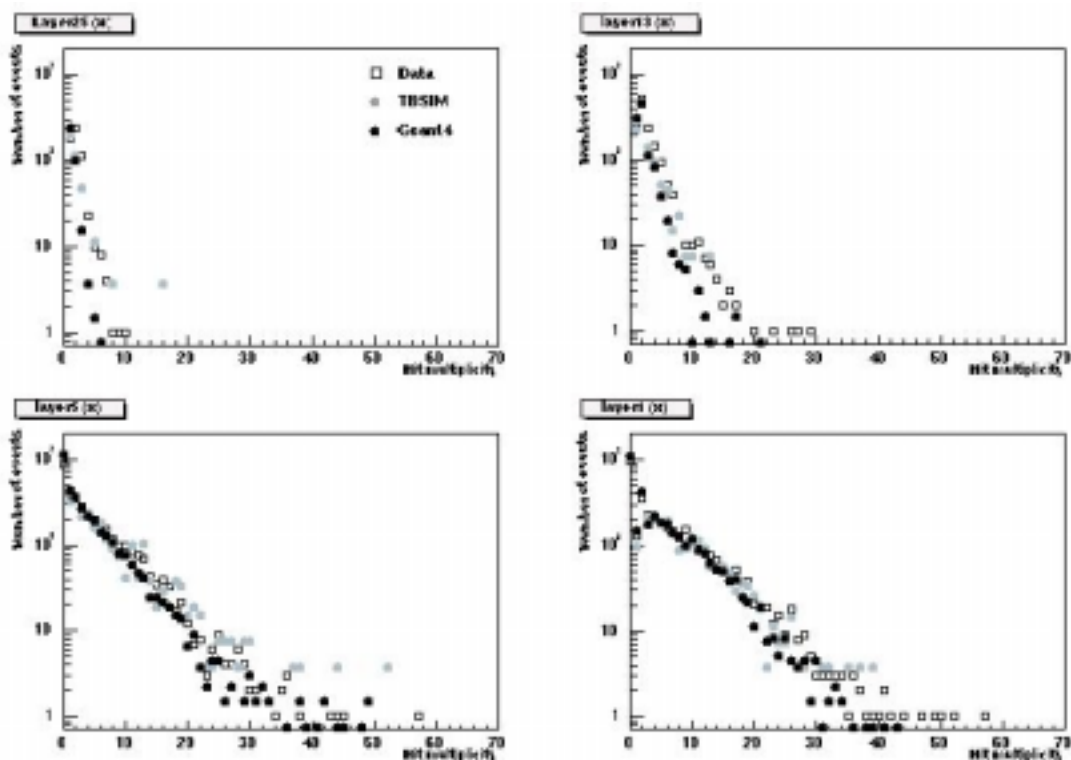


図 4.25(b)

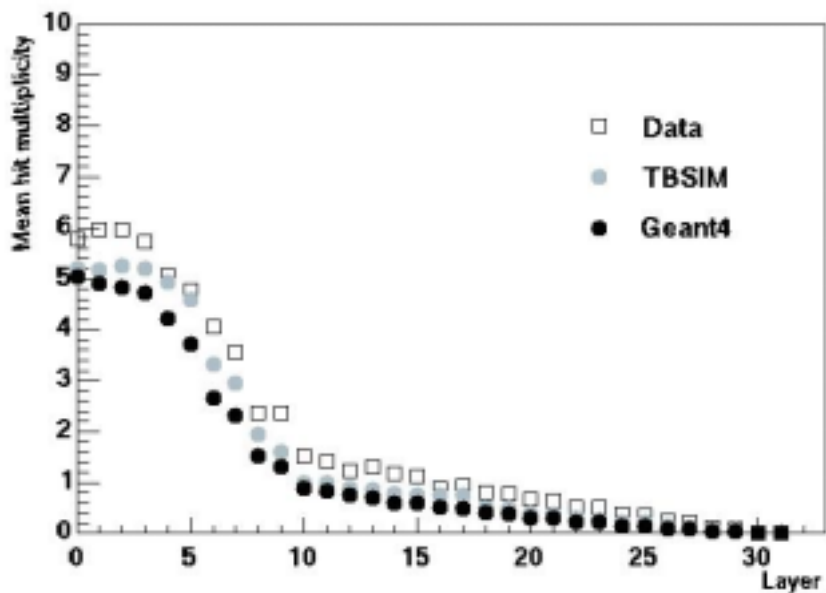


図 4.25 4~6GeV のガンマ線を垂直に入射したときの(a)Hit multiplicity(b)平均 Hit multiplicity。イベント数は、実験データ 3449、TBSIM データ 935、Geant4 データ 4664。

図 4.26 (a)

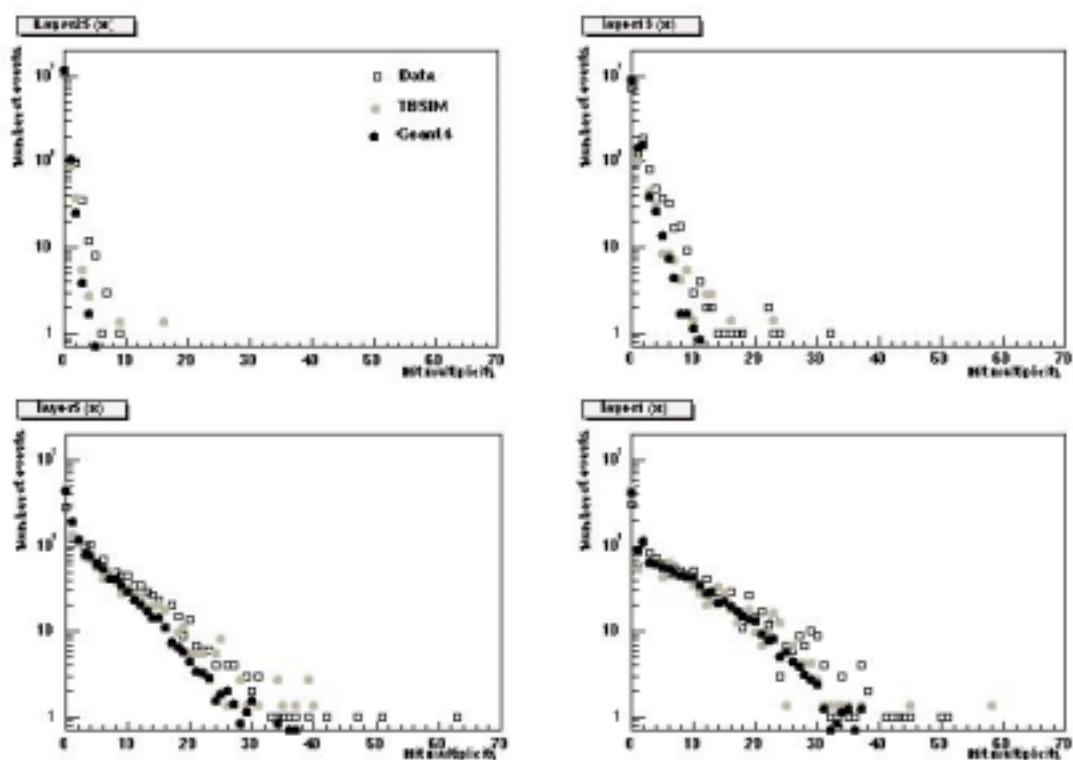


図 4.26(b)

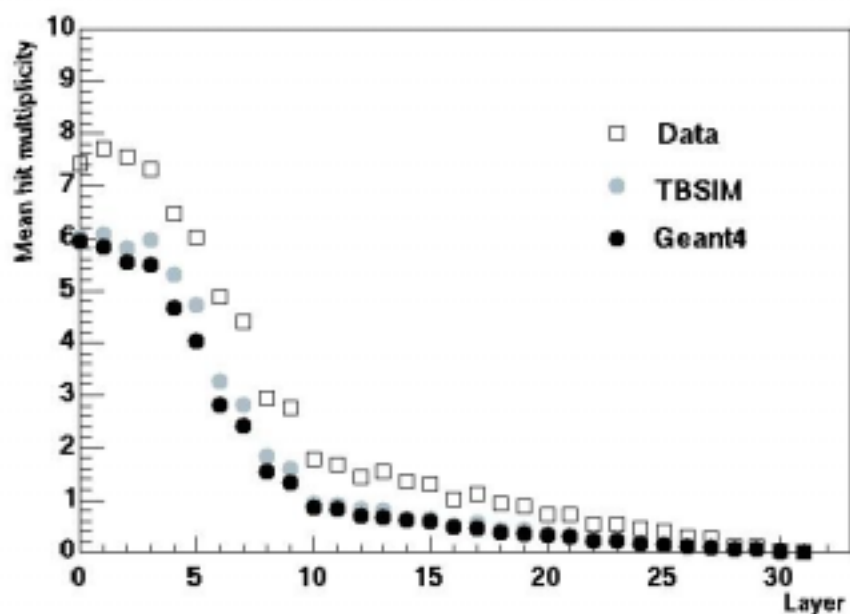


図 4.26 9~11GeV のガンマ線を垂直に入射したときの(a)Hit multiplicity(b)平均 Hit multiplicity。イベント数は、実験データ 1306、TBSIM データ 942、Geant4 データ 9265。

図 4.27(a)

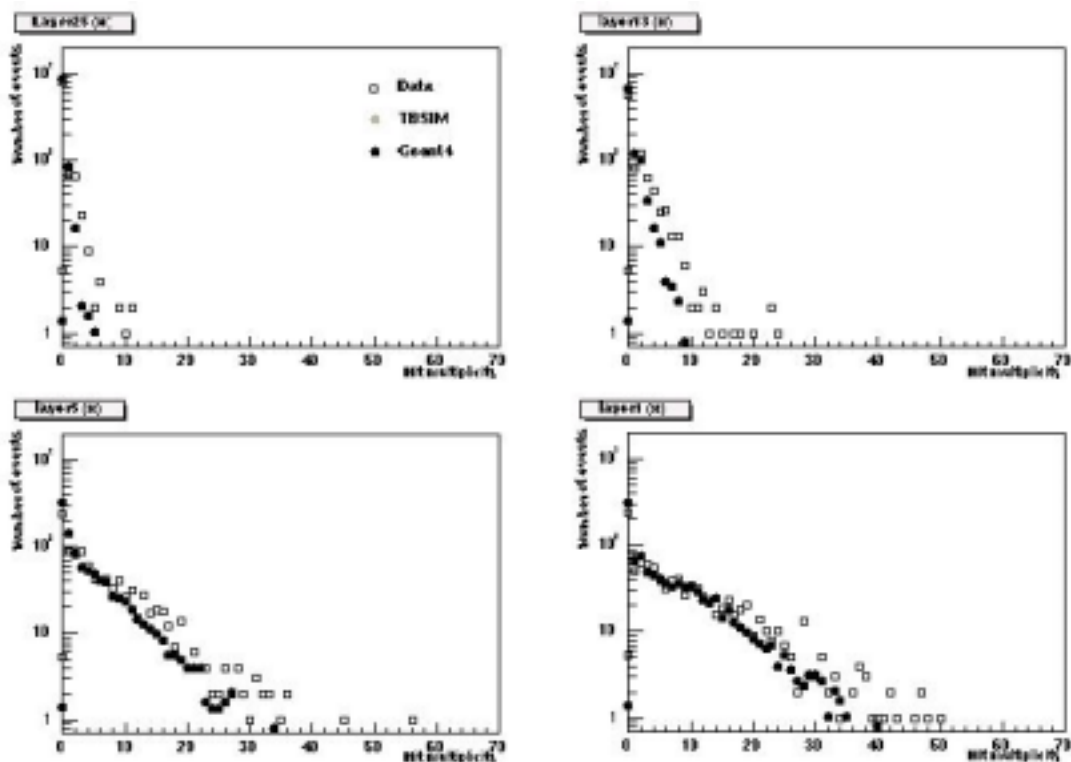


図 4.27(b)

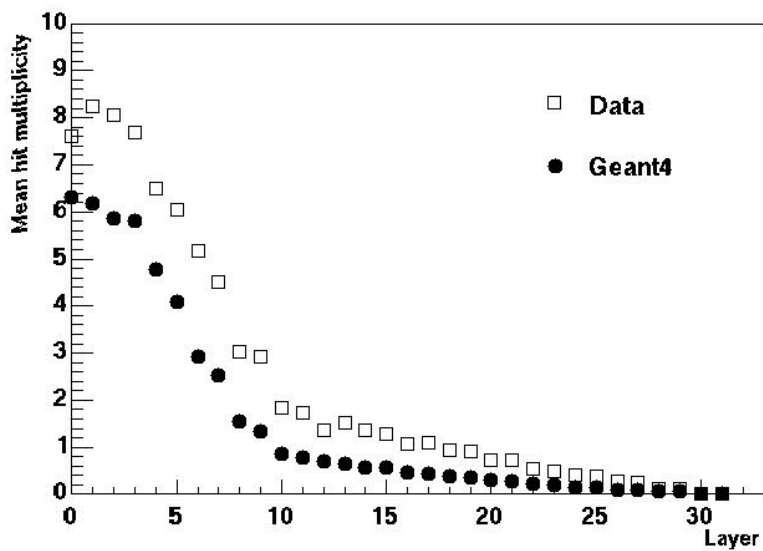


図 4.27 14~16GeV のガンマ線を垂直に入射したときの(a)Hit multiplicity(b)平均 Hit multiplicity。イベント数は、実験データ 986、Geant4 データ 3767。

< 考察 >

ガンマ線入射のデータによる Hit multiplicity も、陽電子と同じように TBSIM データが実験データよりも少なく、Geant4 データはさらに少ない分布となった。ガンマ線では、陽電子のプロットに比べその差が大きいことについては今後の調査が必要である。

ガンマ線データと陽電子データのヒット数の頻度分布を比較すると、ガンマ線ではヒット数の少ない頻度（0~4 ヒットのあたり）が多く、陽電子では逆に少ないことがわかる。このことは、陽電子の入射では layer を通過すると必ずヒットするのに対し、ガンマ線入射では電子・陽電子対生成が起こる深さが様々であることから理解できる。

5章 まとめと今後の課題

Geant4 シミュレータによる検出器のガンマ線反応率を調べた結果、トラッカー部、カロリメータ部ともに理論値とよく合っており、Geant4 シミュレータが反応率を正しく再現することが確認できた。また、ガンマ線入射の各イベントでのヒット layer 数の頻度分布では、Geant4 データが実験データとほぼ似た形状を示したことから、Geant4 シミュレータが電子・陽電子対生成を起こす layer の位置を正しく再現しているといえる。

Geant4 シミュレータの出力に処理をほどこして Hit multiplicity の分布をつくり、さまざまな実験データと比較した結果、特に変な挙動を示すものはなかった。また TBSIM とは比較的近い数値を示した。このことから、シミュレータは、実際の粒子と物質の反応をほぼよく再現しているといえるが、詳しくみると、ヒット数が実験データに比べ 1 割以上少ないので、まだ改善の余地があることがわかった。

今後、Geant4 シミュレータが正しく動作しているかどうかをもっと正確に確認するには、TBSIM とのわずかなずれを詳しく調べる必要がある。また、Hit multiplicity において Geant4 データを実際のデータと近付けるためには、陽電子のデータにはチャージシェアリング効果の補正が最有力と思われる。ガンマ線に関しては、ずれが大きいことから他の効果を検討する必要があるであろう。実験データとのずれについては、この他に、もっと精密なジオメトリの再現、複数の粒子の入射イベントが混ざっている実験データの処理、などが考えられる。

謝辞

本論文の製作にあたり、多くの御指導、御協力を頂きました、大杉節教授、深沢泰司氏、水野恒史氏に大変感謝致します。幾度となる御協力、助言を頂きました半田隆信氏に大変感謝致します。この研究を進めるにあたってお世話をして頂いた平野勝也氏、栗野浩一氏、そして研究室の皆様に、心より感謝致します。

参考文献

- The Beam Test Engineering Model of the GLAST Large Area Telescope
GLAST Testbeam Users guide / SLAC Stanford Liner Accelerator Center
次世代ガンマ線天文衛星 GLAST で期待される科学
/ 日本 GLAST ワーキンググループ
- Comparison between the testbeam data and TBSIM data - Tracker Part -
/ Takanobu Handa SLAC
- Tracker hit multiplicity final plots for the NIM paper / Takanobu Handa SLAC
平野勝也氏の修士論文

