

半導体飛跡検出器の宇宙線データの解析

京都教育大学大学院 教育学研究科
教科教育専攻 理科教育専修

山下良樹

2007年1月19日

概要

欧州原子核合同研究所 (CERN) では 2007 年 11 月より LHC(Large Hadron Collider) の運転が開始される。現在高エネルギー物理学分野では、[TeV] 領域のエネルギーでの実験が始まろうとしている。この背景には、粒子を点と考えると、その粒子の持つエネルギーは点の中心に向かうにつれ非常に大きくなり最終的には無限大に発散する。このことを解決するためにゲージ理論がある。しかしこれによると無限大にエネルギーが発散することを抑えるが、基本的に全ての粒子の質量が 0 になることを仮定する。しかし、現実には質量をもつことが確認されている。そこで Higgs という質量の起源となる粒子の存在が注目されている。この Higgs 粒子は大きな質量を持っていると仮定され、そのような未知の粒子探索のためには高エネルギー加速器の建設が必要であり、現在までに様々な加速器が開発・改良されてきた。それにともない、検出器の開発も行われてきた。

本研究では LHC での ATLAS 実験に組み込まれる、半導体飛跡検出器 SCT(SemiConductor Tracker) の宇宙線テストを本実験が始まる前のステップ段階とし、その動作状態をデータ解析した。

目次

第1章	ATLAS 実験	3
1.1	LHC 計画	3
1.2	ATLAS 実験	7
1.2.1	ATLAS 実験の目的	7
1.3	ATLAS 検出器	7
1.3.1	Muon Spectromete	9
1.3.2	Calorimeter	9
1.3.3	InnerDetector	10
第2章	SemiConductor Tracker(SCT)	12
2.1	半導体検出器	12
2.1.1	空乏層 (The dpletion Depth)	15
2.1.2	キャパシタンス (Cpittance)	17
2.2	SemiConductor Tracker	18
2.2.1	動作原理	18
2.2.2	レイアウト	19
第3章	Cosmic Run(宇宙線試験)	22
3.0.3	Cosmic Run の目的	22
3.0.4	実験レイアウト	22
3.1	Cosmic Run	24
3.1.1	SCT Noise threshold scan with TRT off	24
3.1.2	New SCT only noise threshold scan	29
3.1.3	SCT only noise trigger rate scan	33
3.1.4	SCT only long noise run at 0.9fC threshold	34
3.2	宇宙線イベントの表示	36
3.2.1	Space Point	37

第4章	まとめと今後の課題	40
付録A	atlantis	42
A.1	トラックとスペースポイント	42
A.2	ϕ, η 面	44
付録B	理科教育における半導体検出器	45
B.1	序章	45
B.2	教材としての半導体	45
B.3	授業への導入	46
B.3.1	授業の目的	46
B.3.2	授業(実験) 方法	46
B.3.3	結果	47
B.3.4	考察	48
B.4	まとめ	48

第1章 ATLAS実験

1.1 LHC 計画

現在ヨーロッパのスイス郊外にある欧州合同素粒子原子核研究機構 (CERN) では2007年11月より開始される、LHC(Large Hadron Collider) が建設中である。

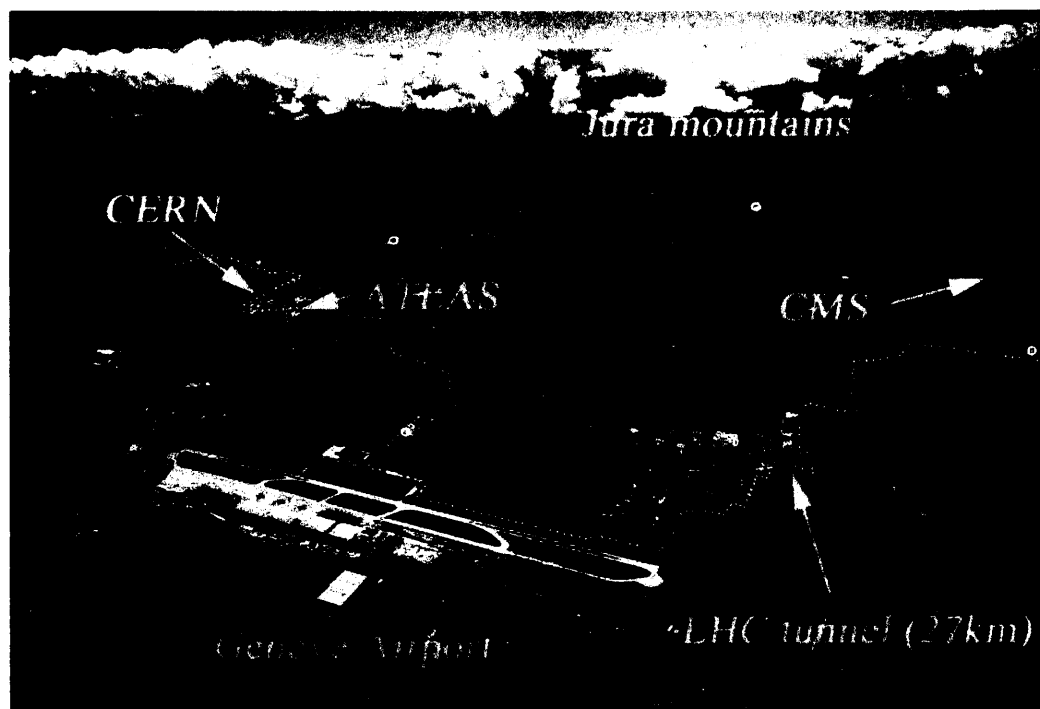


図 1.1: LHC

LHC では以前の LEP 実験¹で使用された 27[km] のトンネルに新しいコライダー (衝突型粒子加速器) が現在設置されている。軌道を曲げるための超電導磁石は既にトンネルに設置されている (図 1.2)。LHC は重心系において 14[TeV] で陽子同士を衝突させるように設計された陽子ビームコライダーである。また LHC は重イオンのコライダー実験としても使用される。



図 1.2: リング内に設置された超電導磁石

ビームに使用される陽子は素粒子ではない。しかしパートン、すなわちクォークやグルーオンから成る合成物である。それ故に、全ての重心系質量がパートン-パートン反応に利用可能ではない。しかし陽子のエネルギーの一部だけがふたつのパートンの相互作用に用いられる。これを考慮すると、約 5[TeV] までエネルギー領域に新しい物理があるかということを調べる事が可能である。

LHC は図 1.3 に示すように、CERN に既存する施設の中に作られ、統合される。injector と pre-accelerator は Linac, Booster, PS そして SPS からなる。そして陽子または鉛イオンの二

¹Large Electron Positron collider

つの高強度のビームをLHCに供給する。陽子陽子衝突の場合各ビームは450[GeV]のエネルギーでLHCリングに注入される。注入後、エネルギーは各陽子につき最終的に7[TeV]の値まで上げられるされる。超電導磁石は陽子ビームを加速リングに通すため8.3[T]の磁場を発生する。

2つの汎用検出器であるATLAS(A Toroidal Lhc ApparatuS)とCMS(Compact Muon Solenoid)が2つの高ルミノシティが作用する位置に設置される、これらの検出器はLHCでの発見の可能性を最大限に利用する。

更に低いルミノシティでの実験が2つあり、B粒子の性質を測定することにより、物質と反物質の非対称性を研究するであるLHCbと陽子・陽子散乱を超前方で測定するTOTEMがある。最後に、重イオン衝突実験でクォーク・グルーオン・プラズマの探求のALICE(A Large Ion Collider Experiment)がある。

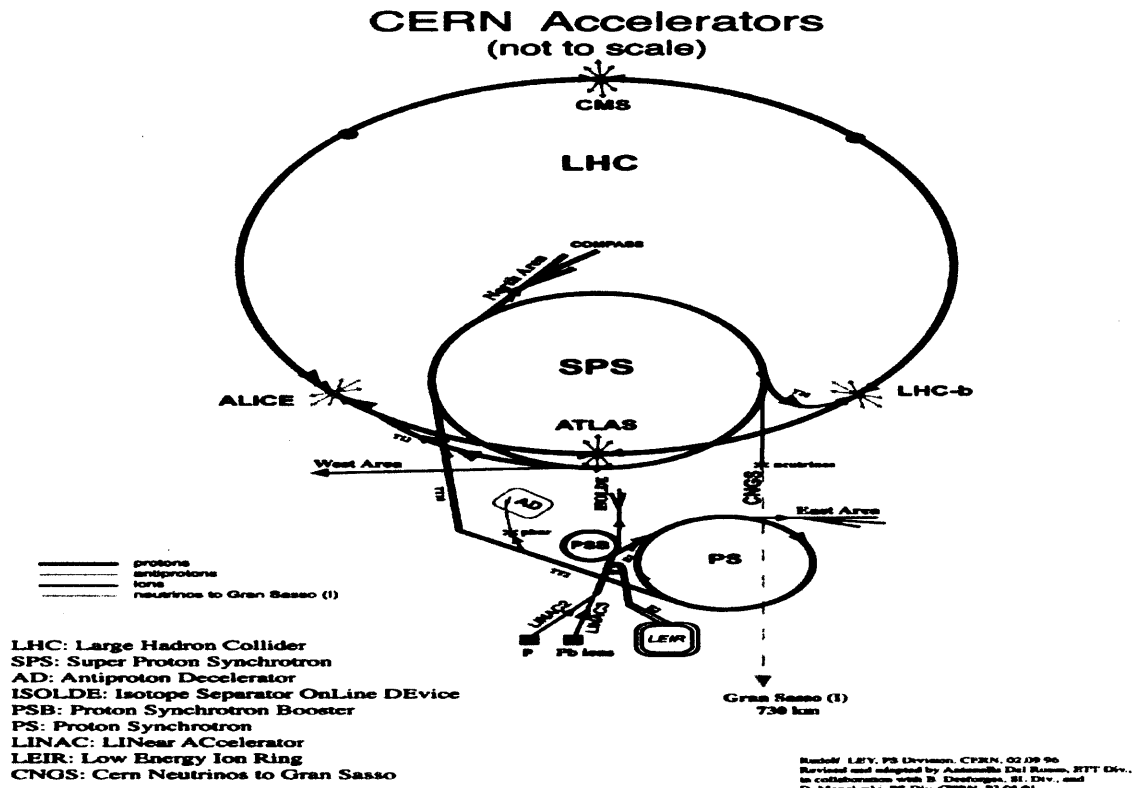


図 1.3: LHC 加速器の全体図



図 1.4: 建設中の ATLAS 検出器

1.2 ATLAS 実験

1.2.1 ATLAS 実験の目的

ATLAS 検出器は LHC において、Higgs 粒子や SUSY 粒子などの新しい物理現象の発見に最適な設計をされた汎用検出器である。ATLAS での物理計画の重要な項目を以下に示す。

- 弱電磁対称性の破れのメカニズムの原因のひとつである Higgs 粒子の発見
- 超対称性粒子または余次元事象または暗黒物質の候補のような、標準模型を越えた理論の実験的特徴の予言に対する探求
- W 粒子やトップクォークの質量、B 粒子の崩壊による CP 非保存のような、素粒子の標準模型の特徴の精密測定

1.3 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は物理計画の項目からの要求を達成するために設計されている。図 1.4 では地下で建設中の ATLAS 検出器全体を示す。建設が完了した ATLAS は図 1.5 に示すようになる。ATLAS 検出器は洗練されたデバイスであり、Technical Design Reports に詳細が描かれている。ここでは、ATLAS 検出器を構成する sub detector について触れておく²。以下に ATLAS 検出器の外側から順にあげる、

- Muon Spectrometer
- Calorimeter
- InnerDetector

検出器の前に ATLAS のマグネットシステムについて示す、図 1.6。超電導ソレノイドは Inner Detector の内部に均一に 2[T] の磁場をかける。Muon Spectrometer はそれ自身が独自の磁場を発生する、トロイダル磁場 (最大磁場は 4[T]) は End-cap と Barrel 部分の 8 個の超伝導トロイドにより生成される。

放出 2 次粒子を特徴づける物理量は、運動量の大きさと放出角度 ϕ と疑似ラビティ η である。陽子陽子衝突実験においては、2 つのパートンは異なった運動量で衝突する。そのた

²本研究での SemiConductor Tracker(SCT) については第 2 章で詳しく述べる

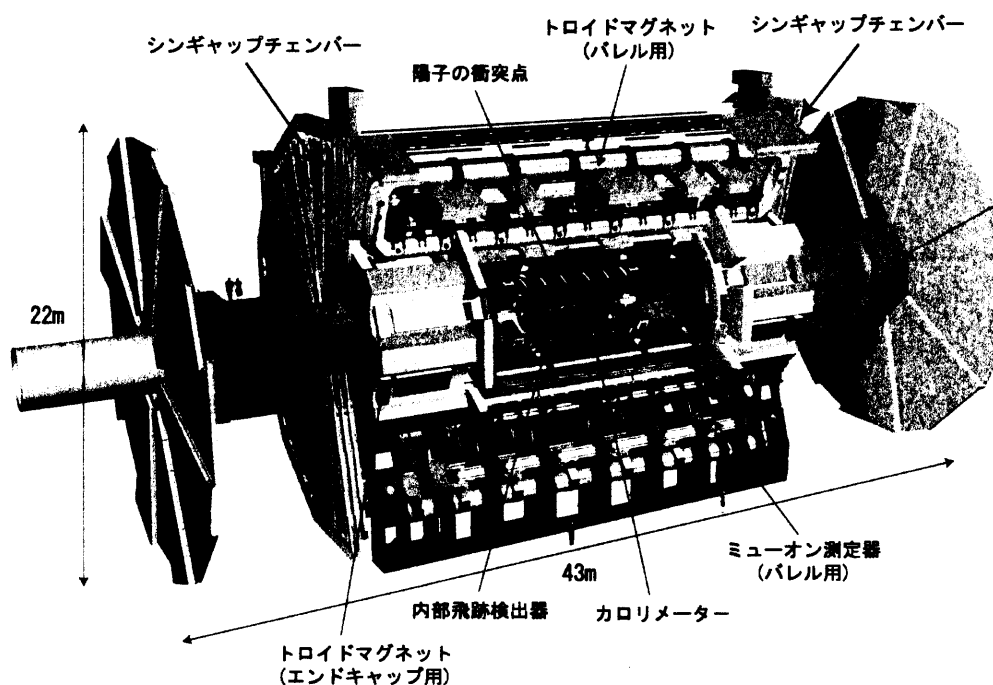


図 1.5: ATLAS 検出器

め反応 2 次粒子の放出角度分布強度はビームラインに近づくほど高い。したがって、ビームラインになるべく近い角度領域までをカバーすることが重要である。高エネルギー実験で一般的に使われる放出角度を示す変数は pseudorapidity η であり、その定義は

$$\eta = -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (1.1)$$

である。これは質量や運動量が分からないとき、相対論的粒子の rapidity の非常に良い近似値である。反応 2 次粒子数はこの変数によらない数になることも知られている。

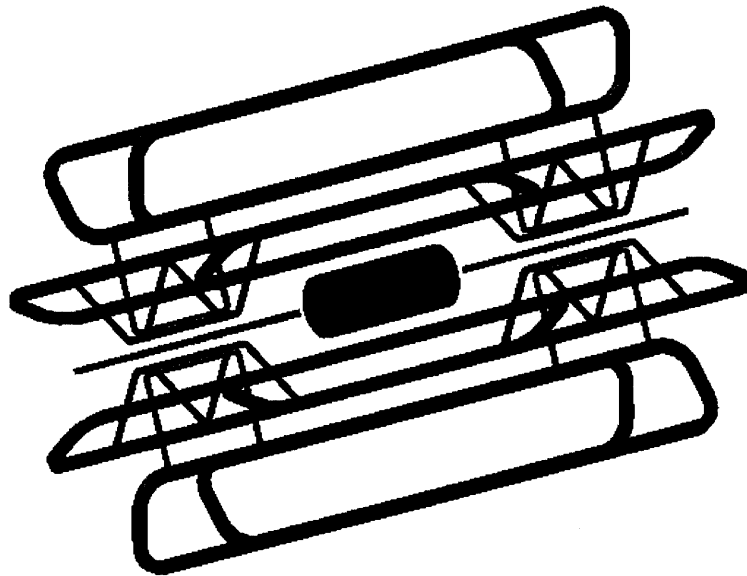


図 1.6: ATLAS のマグネットシステム

1.3.1 Muon Spectromete

ATLAS muon システムは最大の sub detector であり、ATLAS 検出器の巨大なサイズの原因である。これは、精密な muon spectrometer と独立した Trigger のサブシステムを兼ね備える。その正確な測定は $|\eta| < 2.7$ をカバーする Monitord Drift Tubes(MDTs) や、放射線に強い Cathode Strip Chambers(CSCs) により、 $2 < |\eta| < 2.7$ の領域をカバーする。Trigger システムは Resistive Plate Chambers(RPCs) や Thin Gap Chambers(TGCs) の両方により $|\eta| < 2.4$ の領域をカバーする。

1.3.2 Calorimeter

Calorimeter システムは $|\eta| < 3.2$ の領域をカバーする electromagnetic calorimeter(EMC)、 $|\eta| < 1.7$ の領域をカバーする hadronic barrel calrimeter(TileCal)、 $1.5 < |\eta| < 3.2$ の領域をカバーする hadron end-cap calorimeters(HEC) そして $3.2 < |\eta| < 4.9$ の領域をカバーする forward calorimeters(FCAL) から構成される。ATLAS の calorimeter 全ては検出 calorimeter

である、しかしそれらは違った吸収剤と活性剤を使用してある³。TileCal は鉄を吸収剤としプラスチックシンチレータを活性剤として使用してある。鉄は中央のソレノイド磁場の偏向コイルに磁束反響を与える。他の calorimeter(EMC、HEC そして FCAL) においては liquid argon(LAr) が活性剤として使用される。EMC は吸収剤として鉛を使用し、HEC は硫酸銅を使用しそして FCAL は電磁石の部分には硫酸銅、ハドロン部分にはタングステンを使用してある。

1.3.3 InnerDetector

ATLAS の InnerDetector は $|\eta| < 2.5$ の範囲において荷電粒子の Track の運動パラメータの超精密測定のため設計されている。InnerDetector は更に、Transiton Radiation Tracker(TRT)、SemiConductorTracker(SCT) そして Pixel detector の 3 つの sub detector から構成されいる。図 1.7 は InnerDetector の概観を示している。

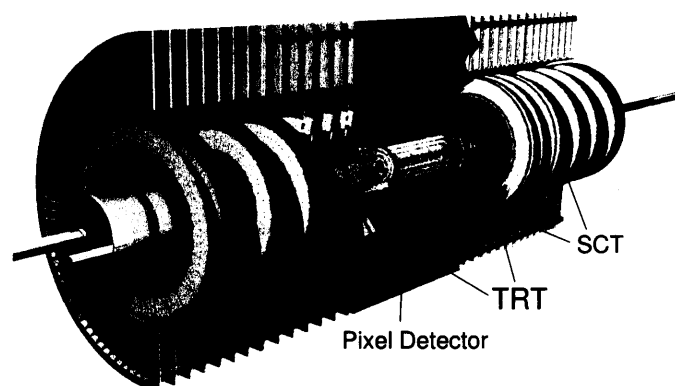


図 1.7: ATLAS InnerDetector

TRT は 40[MHz] のバンチ衝突に対応するように設計された straw detector である。Barrel 領域では 50×10^3 、End-cap 領域では 320×10^3 本のストローを有する。TRT は遷移放射光子の測定による粒子識別と運動量測定に必要な各荷電粒子のトラックにつき、30 点測定する。SCT は荷電粒子のトラックに対し、正確な 8 点を得る silicon strip detector である。2 枚ずつのウェファァーを 40[mrad] 傾けた状態で裏面同士を接着させ、1 つの SCT モ

³活性剤:電磁シャワーを起こさせるための素材、吸収剤:測定するための検出器を表す

ジュールが構成してある。その為ノイズヒットの殆どない3次元的なヒット点を生成し(スペースポイント)、他の検出器のヒットデータを、トラック候補に付随するヒットとして選択する為のトラックパラメータ計算の基となる。Barrel 領域には2112モジュールが存在し、Forward 領域の2つの End-cap の合計は1976モジュールある。Pixel detector は衝突点に最も近くにあり、1744モジュールから構成される。Pixel detector は $50[\eta m] \times 400[\eta m]$ のピクセルポイントで第1または第2崩壊点の精密測定を行う。特に z 方向の特定の値を得ることができ、ミニマムバイアスイベントと呼ばれる物理的に興味のない事象の飛跡を分離することに使われる。

第2章 SemiConductor Tracker(SCT)

2.1 半導体検出器

半導体検出器は、古くからダイヤモンドや塩化銀等の個体結晶を用いて試みられていたが、1949年 K.G.Mckay(マッケイ)が Ge を用いてはじめて検出器として成功した。主に低エネルギーの放射線のエネルギーを測るのに用いられる。その原理は半導体に逆方向に電圧をかけ¹、そこに放射線が入射すると電子・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るので、それをパルスとして測定する。

半導体には、不純物を含まない完全結晶の真性半導体と、不純物を含んだ不純物半導体がある。真性半導体の電気伝導は熱的に価電子帯から励起された電子とそのあとの正孔によって起こされる。温度 T で電気伝導に関与する電子、正孔 (n_n, n_p) の数は、L.Boltzmann(ボルツマン)分布より、

$$n_n = n_p = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.1)$$

で表される。 A は温度に関係しない定数であり、 k は Boltzmann 定数である。不純物半導体には Si や Ge の半導体に (P) 等のドナー原子を少量加えた n 型半導体と、ホウ素 (B) 等のアクセプタを加えた p 型半導体がある。不純物半導体のエネルギー準位と Si 結晶を図 2.1 に示す。また半導体検出器として広く使用されている Si と Ge の性質を表 2.1 に示す。

半導体に放射線が入射すると、その飛跡に沿って価電子バンド (valence band) から伝導バンド (conduction band) に電子が励起され、価電子バンドに正孔 (hole) が生ずる。この電子・正孔対 (electron-hole pair) の平均数 N_0 は、放射線のエネルギー損失を E_0 として、

$$N_0 = \frac{E_0}{\epsilon} \quad (2.2)$$

で与えられる。 ϵ は電子・正孔対を作るのに必要な平均エネルギーである。放射線が通過したあとにはその飛跡を中心として対生成の場合 ϵ は 3.6[eV]、 E_0 は 285[μm] のシリコン

¹逆バイアス

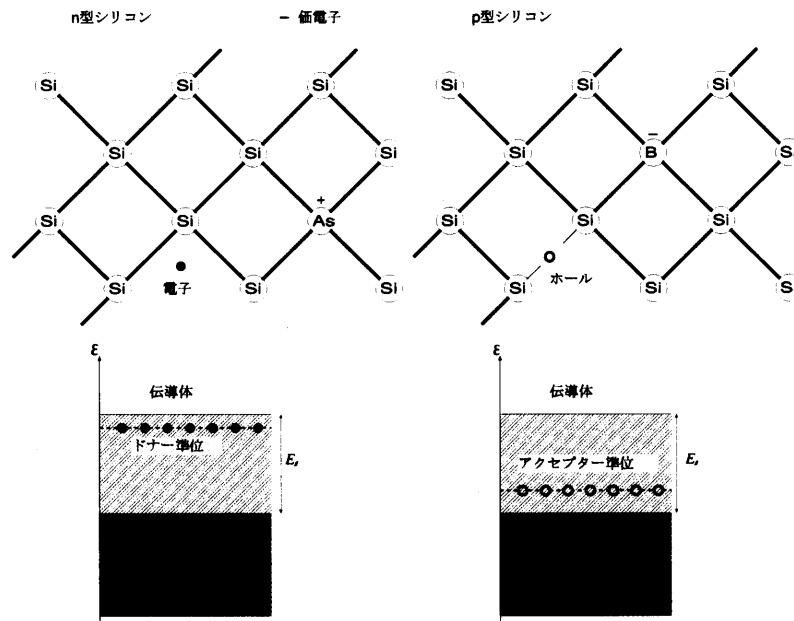


図 2.1: 半導体のエネルギー準位と Si 結晶構造

で約 77[KeV] なので N_0 は約 21400 個となる。粒子の飛跡に沿って生じた電子や正孔は拡散により広がり、電場が無いとその対は不純物に捕獲される。しかし、p-n 接合のあるダイオード構造をもった検出器に、逆電圧をかけると半導体内に電場 E が生じて、電子と正孔はそれぞれ、ドリフト速度は

$$v_e = \mu_e E, v_h = \mu_h E \quad (2.3)$$

で n 側電極、p 側電極に集められる。ここで μ_e, μ_h は電子、正孔移動速度である。半導体検出器における出力の発生機構は電離箱²とほぼ同じである。半導体と電離箱の構造の違いは、正孔の速度は電離箱内の陽イオンと違い電子の移動度に近いことである。この整流性接合(ダイオード構造)により自由電子、正孔が移動してドナー原子、アクセプタ原子、キャリアが失われた領域ができる。この電場の存在する領域が空乏層 (depletion) である。この領域が検出器として使われる。この空乏層内での電場分布が半導体検出器によって一

²装置内を荷電粒子が通過すると充填した気体が電離され、生成した電子とイオンを電極に集め信号として取り出す

表 2.1: Si と Ge の比較

半導体	Si	Ge
原子番号	14	32
原子量	28.1	72.6
密度 (300[K])[g/m ³]	2.33	5.32
相対誘電率	12	16
体積抵抗率 (300[K])[Ωcm]	2.3×10^5	45
バンド・エネルギーギャップ (300[K])[eV]	1.1	0.7
バンド・エネルギーギャップ (0[K])[eV]	1.21	0.785
電子移動度 (300[K])[cm ² /Vs]	1350	3900
正孔移動度 (300[K])[cm ² /Vs]	480	1900

様でないことが電離箱との大きな違いである。半導体検出器の回路を図 2.2 に示す。

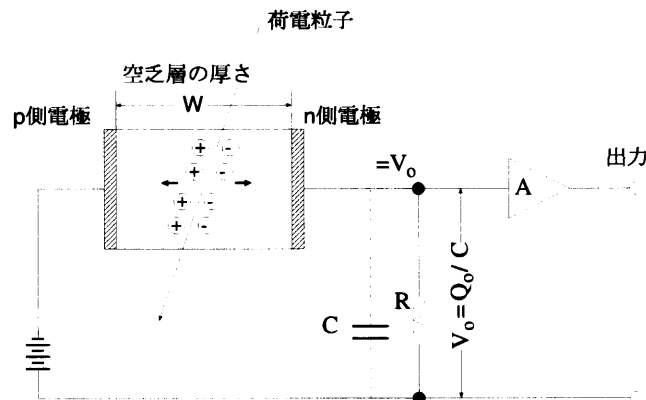


図 2.2: 半導体検出器の回路

半導体検出器は、空乏層の厚さが印加電圧により変化する障壁型 (barrier type) と、印加電圧に余りよらない均一電場の均一型 (homogeneous type) に大別される。障壁型の典型的なものは p-n 接合型と表面障壁型であり、これらの素材はほとんどが Si である。半導体検出器の特徴は、電子・正孔対発生エネルギーがガスの電離エネルギーの 1/10 であることから、エネルギー分解能がよくなる。しかし大きな検出器を作成することは結晶の製造上困難である。

2.1.1 空乏層 (The depletion Depth)

空乏層の幅は一般的に小さく、n または p の不純物の密度に依存する。今荷電密度 $\rho(x)$ が分かっているれば、ポアソン微分方程式に従うので、

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (2.4)$$

で記述できる。ここで、 ϵ は誘電率である。

図 2.4 は x_n が n 側の空乏層領域に存在し、 x_p が p 側にの深い所にあることを意味する。

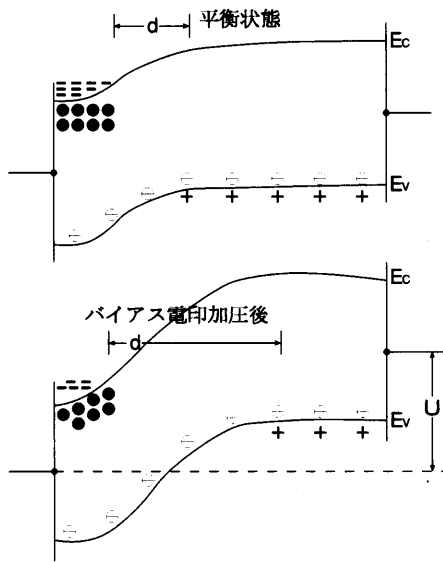


図 2.3: 非対称 p-n 接合でのエネルギー帯構造, d: 空乏層の厚さ, E_c : 伝導帯の下限值, E_v : 価電子帯の上限値, U: 逆バイアス

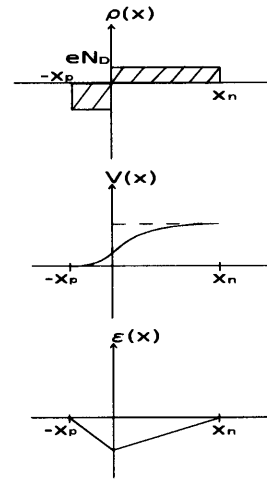


図 2.4: p-n 接合型検出器の不純物濃度

n 側、p 側の空乏層の厚さをそれぞれ x_n 、 x_p 、ドナーとアクセプター不純物の密度を N_D 、 N_A とすると荷電密度は

$$\rho(x) = \begin{cases} eN_D & 0 < x < x_n \\ -eN_A & -x_p < x < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

となる。また、全電荷は保存されるので下記の式で示すことができる。

$$eN_A x_p = eN_D x_n \quad (2.6)$$

今、式 2.4 を一階積分すると

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\epsilon}x + C_n & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\epsilon}x + C_p & -x_p < x < 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

となる。ここでの C_n 、 C_p は積分定数である。 $x = x_n$ 、 x_p のとき $dV/dx = 0$ となるとすると??は、

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\epsilon}(x - x_n) & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\epsilon}(x + x_p) & -x_p < x < 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

となる。式 2.8 は電場を意味する。更に第二階積分は

$$dV = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} - x_n x \right) + C & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} + x_p x \right) + C' & -x_p < x < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

2.9 は $x = 0$ のとき $C = C'$ となり。今、 $x = x_n$ で接触電位 $V(x) = V_0$ より、

$$V_D = \frac{eN_D}{2\epsilon} x_n^2 + C \quad (2.10)$$

p 側において $x = -x_p$ のとき $V = 0$ と近似でき

$$0 = -\frac{eN_A}{2\epsilon} x_p^2 + C \quad (2.11)$$

C を消去すると、

$$V_0 = \frac{e}{2\epsilon} (N_D x_n^2 + N_A x_p^2) \quad (2.12)$$

を得る。式 2.6 を使うと、

$$x_n = \left(\frac{2\epsilon V_0}{eN_D(1 + \frac{N_D}{N_A})} \right)^{\frac{1}{2}}, x_p = \left(\frac{2\epsilon V_0}{eN_A(1 + \frac{N_A}{N_D})} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

式 2.13 より、もし片方のドーピング量が多い場合、もう片方より空乏層の領域は広がる。例えば、もし $N_A \ll N_D$ なら、 $x_n \ll x_p$ であり、これは結合境界が n 側に寄ること意味する。

全空乏層の厚さは容易に求められ

$$d = x_n + x_p = \left(\frac{2\varepsilon V_0 (N_A + N_D)}{e N_A N_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

であり、 $N_A \ll N_D$ より式 2.14 は近似でき、

$$d \simeq x_n \simeq \left(\frac{2\varepsilon V_0}{e N_D} \right) \quad (2.15)$$

と表す。不純物濃度はベース物質の電気抵抗率 r に電荷担体の移動度 μ をかけたものに逆比例する、よって $1/\rho = e N_D \mu_e$ であるので式 2.15 は、

$$d \simeq (2\varepsilon \rho_n \mu_e V_0)^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

となる (ρ_n は n の領域の抵抗率)。n 側の密度が大きい場合 ($N_D \gg N_A$)、p 側に空乏層無く、式 2.16 より $\rho_n \mu_e$ の値が大きく $\rho_p \mu_h$ が無視できる。定数を求めると、

Silicon

$$d \simeq \begin{cases} 0.53(\rho_n V_0)^{\frac{1}{2}} [\mu\text{m}] & \text{n-type} \\ 0.32(\rho_p V_0)^{\frac{1}{2}} [\mu\text{m}] & \text{p-type} \end{cases} \quad (2.17)$$

Germanium

$$d \simeq \begin{cases} (\rho_n V_0)^{\frac{1}{2}} [\mu\text{m}] & \text{n-type} \\ 0.65(\rho_p V_0)^{\frac{1}{2}} [\mu\text{m}] & \text{p-type} \end{cases} \quad (2.18)$$

ρ 、 V_0 は [Ωcm]、[V] である。

2.1.2 キャパシタンス (Capacitance)

電気回路であるため、空乏層もキャパシタンスを持つ、p-n 結合を検出器として使う場合キャパシタンスノイズも影響するためそれを追ってみる。回路デザインでキャパシタンスは、

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2.19)$$

である。ここでの A は空乏層の面積、 d は幅である。式 2.17、2.18 を使い、代入すると、

Silicon

$$C \simeq \begin{cases} 2.2(\rho_n V_0)^{\frac{1}{2}} [\text{pF/mm}^2] & \text{n-type} \\ 3.7(\rho_p V_0)^{\frac{1}{2}} [\text{pF/mm}^2] & \text{p-type} \end{cases} \quad (2.20)$$

Germanium

$$C \simeq \begin{cases} 1.37(\rho_n V_0)^{\frac{1}{2}} [\text{pF/mm}^2] & \text{n-type} \\ 2.12(\rho_p V_0)^{\frac{1}{2}} [\text{pF/mm}^2] & \text{p-type} \end{cases} \quad (2.21)$$

となる。

2.2 SemiConductor Tracker

InnerDetector の目的は Track の発見と崩壊点、運動量の復元である。InnerDetector の個別の sub detector だけではこれらの目標を達成できない。TRT、SCT そして Pixel detector が Track 生成に使われる粒子についての情報を互いに補い与えることでその目標に達する。ここではその中の SCT について詳しく見ていく。

2.2.1 動作原理

シリコン検出器は非対称 p-n 結合ダイオードであり、n 側に+電圧を加え逆バイアスとして荷電粒子の検出器として稼働させる。そのためには逆電圧を加えて、ダイオードの中のキャリアの無い領域が作られる。空乏層をイオン化した粒子が通過した場合、その道筋に沿って電子・正孔対が作られ、それに見合ったエネルギー損失が起きる。それらが再び結合する前に、外部からの電場をかけることにより、そのペアをわけける。つまり、電子は陽極に、正孔は陰極にそれぞれ流れる。この過程を図 2.5 に示す。

ATLAS SCTにおいて、高電圧 (HV) はダイオードの後側にかけられる (図 2.5 の n⁺ ohmic bulk contact)。ATLAS SCT ダイオードは一般的な高電圧の値は、150[V] である。

SCT の信号読み出しを以下に述べる。付着された p⁺ ストリップ (Strips) は細いシリコン酸化物の層によりダイオードから孤立されたアルミニウムの読み出しストリップである。p⁺ ストリップに貯められた電荷は、アルミニウムストリップに移り読み出される。この信号は読み出し、増幅し、整形され、分類される。バイナリー信号はそれからデータ取得システムへ送られる、この信号とは threshold を越えた場合 1、越えない場合は 0 になる。このデータは 40[MHz] の衝突全てに渡って記録されている。また、チップから読み出されるときは、トリガーのあった衝突の前後のビットを含めて 3 ビットが読み出される。この 3

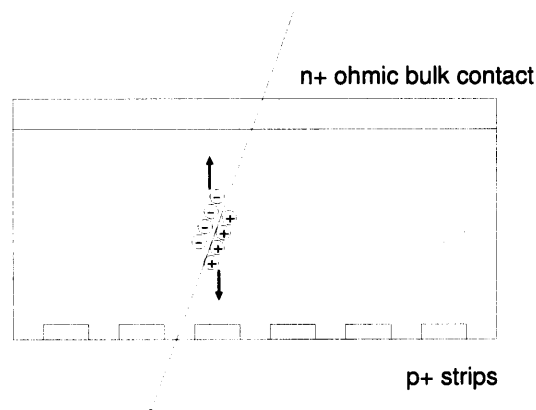


図 2.5: SCT Wafer の原理

ビットにヒットがあるもののみが、ストリップ番号を加えて、光ファイバーで、リードアウトドライバと VME モジュールにデータとして送られる。光ファイバーはモジュールの個数分だけ個別に接続されている。

本来のシリコン検出器の持つ分解能の能力は $5[\mu\text{m}]$ であり、これは荷電を収集する間に電子・正孔の横方向の拡散による限界である。SCT の空間的分解能は 2 つ隣の読み出しストリップのまでの距離が限界である。その間隔に付いては第 2.2.2 で示す。

計算の中で用いられるために必要なもうひとつの重要な影響はローレンツ力と呼ばれるものである。2[T] の磁場の中で作動する SCT なので、空乏層をイオン化放射線により生成される自由荷電キャリアは読み出しストリップに向かい流れるとき、ローレンツ力の支配下にある。これにより、イオン生成位置と表面での

の位置がずれる。ATLAS ではこの効果を、検出器に 10 度程度の傾きを与えることにより補正している。この傾きは本来 4 度程度であるが、検出器のスキ間をうめる為、実際は 10 度程度になっている。

2.2.2 レイアウト

ATLAS SCT detector の最小のユニットは SCT モジュール (Module) である。各モジュールは 2 つの読み出しサイドがあり、さらに各サイドに 786 個のアルミニウムの読み出しストリップがある。それらはステレオ面に対してもう一枚を $40[\text{mrad}]$ 傾けて設置してある。

検出器の Barrel 部分に設置してある SCT モジュールは図 2.6 に見られるように 2 つのサ

イドに、4 角形のシリコンダイオードを持つ。r- ϕ -side と呼ばれる、一方の読み出しサイドはビームラインに沿って並べてあり、もう一方の stereo-side と呼ばれるサイドはビームラインより 40[mrad] 傾けてある。SCT Barrel モジュールの検出部分は 80[μ m] 間隔にストリップが張られる、有効な領域は 12[cm] $\times$ 6[cm] である。この為、各ウエファァーでの位置分解能は $\frac{80}{\sqrt{12}} = 23[\mu\text{m}]$ と評価される。これがある 8 面あることが運動量分解能を決める指標となる。

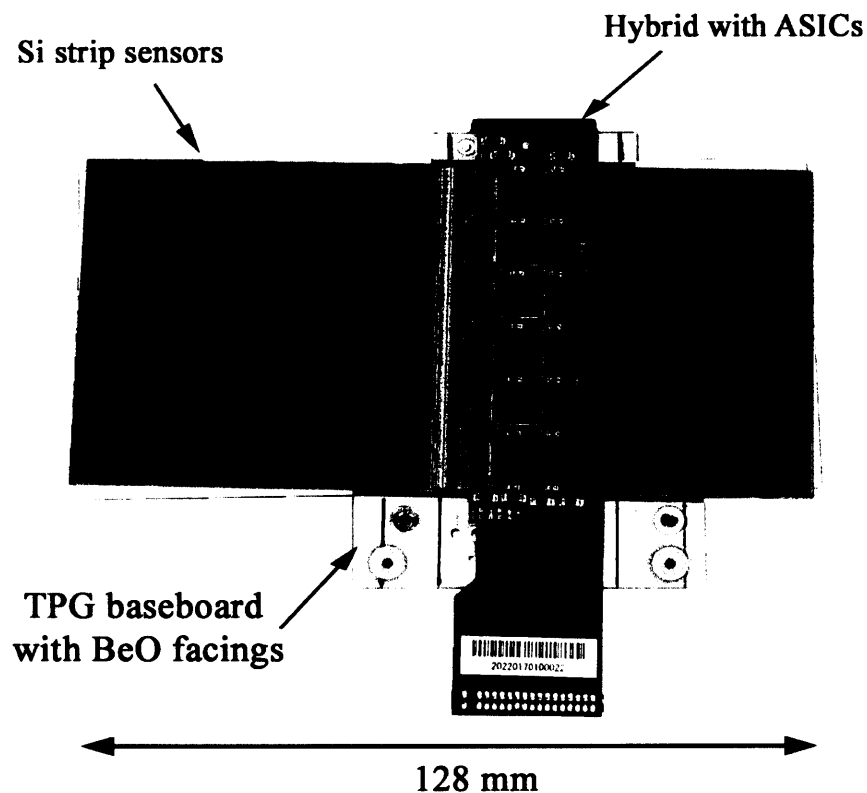


図 2.6: SCT Barrel Module

SCT の Barrel 部分は 4 層の円筒構造から成る、この層をレイヤー (Layer) と呼び、2112 枚の SCT モジュールが設置されている。SCT Barrel モジュールは円柱構造の表面に対し 10° 傾けて設置されており、隣接のモジュールとは重なるように設計してある。Barrel SCT の

構造について詳細を表 2.2 に示す。図 2.7 はモジュールを設置した SCT Barrel 部分の実際の写真である。

表 2.2: SCT Barrel の構造

SCT barrel layer	mean radius[cm]	number of module
0	30	384
1	37	480
2	44	576
3	51	672

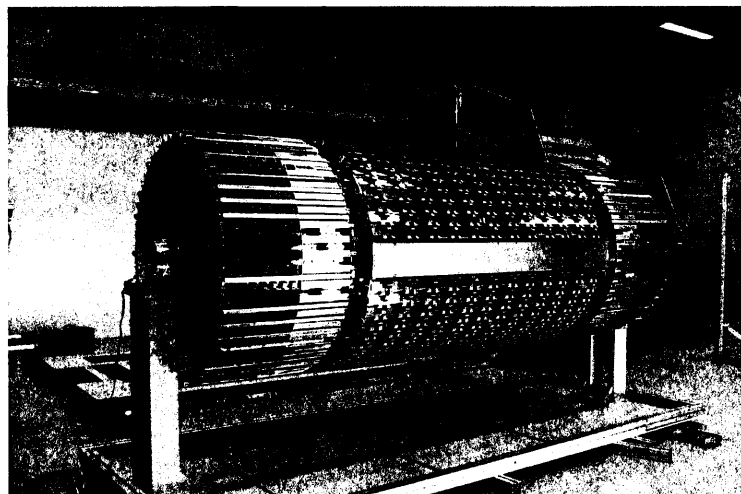


図 2.7: SCT barrel layer

第3章 Cosmic Run(宇宙線試験)

2006年夏にCERNのSR1でSCT barrel部分及びTRTの宇宙線による試験運転が行われた。そのCosmic Run(宇宙線試験)の詳細に付いてこの章で述べる。

3.0.3 Cosmic Runの目的

宇宙線を用い、2007年11月より始まる実験でより正確な値を得るための試験運転としてSCT barrel部分及びTRTが正常に動作するか、また本来期待している分解能を出力できるか、どの程度の割合で各モジュール及びチャンネルが生きているか死んでいるかを調べ、その程度によって処置をとる(ノイズが大きい場合マスクをするなど)。更には各モジュールの動作性能だけではなく、その得た測定値から多数あるモジュールのAlignmentの為のデータを得ることも今回の実験での大きな目的のひとつである。SCTはイギリスのOxfordでロボットにより組み立てが行われた。ロボットでと正確に思えるが、実際にはネジ穴などの遊びによるズレが生じている。そのズレを把握するためにAlignmentの作業が必要となる。

3.0.4 実験レイアウト

今回のCosmic RunにはSCTのbarrel部分のモジュールで行われた。しかし計測は全barrelモジュールでは無く、一部分が使われた。実験でのレイアウトを図3.1に示す。今回のCosmic Runでは検出器の上下にシンチレータを置き、それによりTriggerを掛け宇宙線とみなし観測した。Triggerの条件とし、宇宙線であるMuonの持つエネルギーの範囲が0.5~200[GeV]のものと見なし測定した。これは上下のシンチレータの間をMuonが通り過ぎるのにかかる時間が短いものほどhigh Momentumの粒子と見なし求める。このときに使う概念としてTOF(Time of Flight)がある。

図3.1において、検出器の上部に1つ、下部に2つTriggerのためのシンチレータが設置してある。次に検出器であるが、外側にTRTがありその内部にSCTがある。LHCが走り

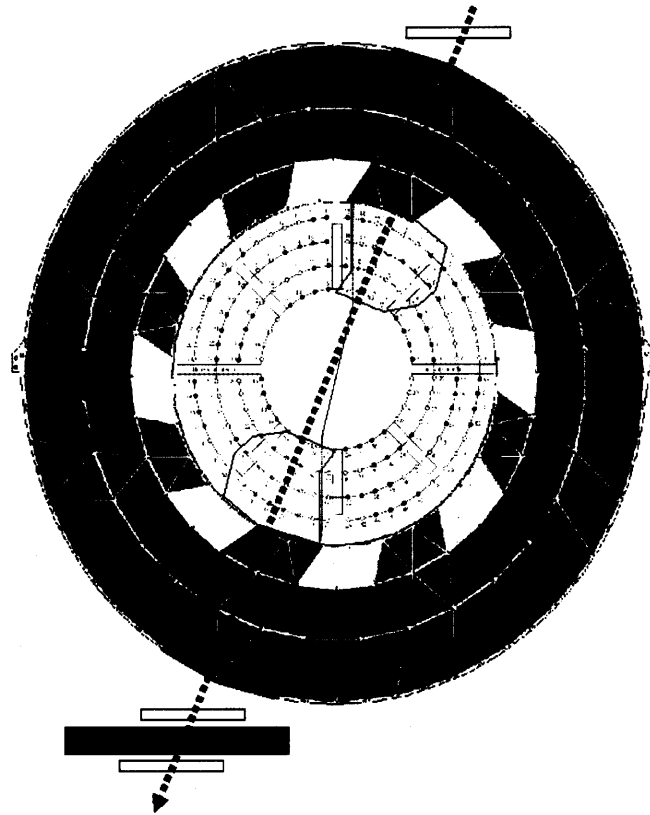


図 3.1: Cosmic Run のレイアウト

1

出すと SCT の内部に更に Pixel 検出器が入るが、Cosmic Run では設置していない¹。

SCT Barrel 部分の各モジュールには名前が付いており、第 2.2.2 で示したように、Layer が 4 層ある (layer0~3)、また Eta 方向に 12 枚 (eta-6~6)、Phi 方向に最外層で 51 枚 (phi0~56) である (eta、phi については 3.2 参照)。しかし、先にも書いた通り Cosmic Run では全 Barrel モジュールの約 1/4 モジュールを使用し観測を行った。

¹Pixel は独自に宇宙線試験を行った

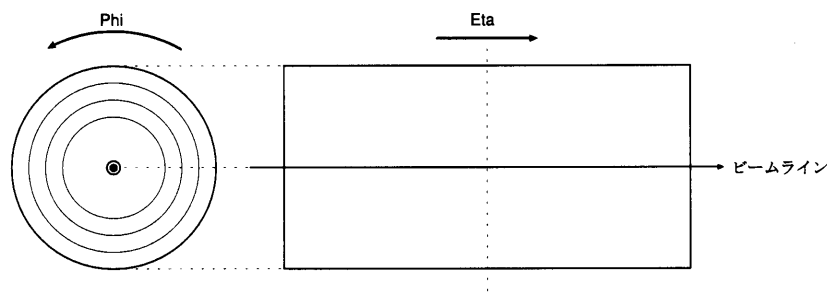


図 3.2: SCT モジュールの概念図

3.1 Noise Test

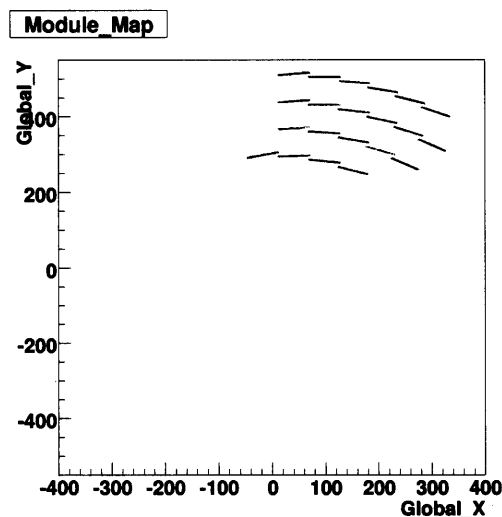
Cosmic Run は本実験で SCT が本来期待されている性能を発揮できるのかを調べるための試験運転をいくつかの条件を変え行うことにより確かめた。

3.1.1 SCT Noise threshold scan with TRT off

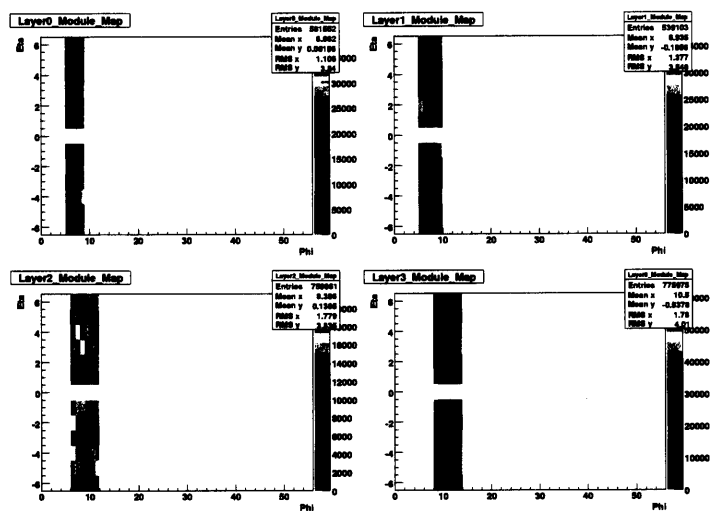
この一連のノイズランでは SCT だけの noise を threshold の値を変え測定し、データを得た。トリガーはパルスジェネレータから作られ、宇宙線とは無関係なものである。使用したモジュールは SCT Barrel 部分の上部モジュールを用い測定を行った。図 3.3 において (a) は各 layer の phi 方向のモジュールを示し、(b) は eta 方向のモジュールを示す。(b) の図の色の違いは、各グラフの右端に示すように、色が赤色に近いほどそのモジュールのヒット数が多いことを示す。

Threshold

データの解析に入る前に、threshold について触れておく、threshold とは日本語で表すと閾値である。ここでは検出器を荷電粒子が通過した際、SCT で得た信号が真に粒子によるものかを分別するための基準となる値を示すパラメータである。LHC が走り出すと、ATLAS SCT では 1.0[fC] をその設定とする。



(a) 各 layer の phi 方向のモジュール



(b) 各モジュールのヒット分布図

図 3.3: Top sector SCT モジュール

測定条件

表 3.1 に SCT Noise threshold scan with TRT off の条件で測定された Run ナンバー²を上げた。

表 3.1: SCT Noise threshold scan with TRT off

Run Number	Events	SCT Threshold
2644	10123	1.3[fC]
2646	10174	1.2[fC]
2648	10264	1.1[fC]
2650	9911	1.0[fC]
2651	10106	0.9[fC]

この Run の目的は threshold の値を変化させることにより、ノイズオキュパンシー NO(Noise Occupancy) の変化を調べ、equivalent noise charge(ENC) の値を導く。この SCT 検出器は第

²個の数字は測定の通し番号である

2章で述べたように半導体検出器である。このSCTの1枚のウエファ³ーが荷電粒子が通り過ぎたとき、その1つのチャンネルでは約20000個の電子・正孔対が発生する。その対生成されるとき信号に生じる揺らぎは $\sqrt{n}$ と計算すると140程度である。今測定しているノイズは、リーク電流の統計的変動に関係するショットノイズで、温度依存を示すサーマルノイズによって発生したノイズの合計である。

まず Occupancy を求める式は

$$\text{Occupancy} = \frac{\text{hit 数}}{\text{event 数} \times \text{channel 数}} \quad (3.1)$$

により求める。各モジュールごとの平均の Occupancy を Occupancy_M とすると、モジュール1個には読み出しストリップが786チャンネルあるため、

$$\text{Occupancy}_M = \frac{\text{hit 数}}{\text{event 数} \times 786} \quad (3.2)$$

となる。全モジュールの平均を Run 毎に求めた Occupancy_M を次に示す。

図3.4、3.5において、tbin とは timebin の省略であり、特定の25[nsec]中で、threshold を越えるパルスをヒットとしているが、この前後にヒットのあるストリップは全て (Test Mode) に送られてくる。実際にはトリガーのあったバンチ衝突のデータにヒットがあるものだけをモジュールから送出する。この条件を tbin:X1X と呼んでいる。したがって、評価すべきノイズはX1Xのパターンを持つもののみである。

各 Run の Occupancy の値を表3.2に示す。

表 3.2: 各 Run ごとの Occupancy

Run Number	Threshold	Occupancy tbin:条件無し	Occupancy tbin:X1X	統計誤差
2644	1.3[fC]	9.406×10^{-6}	2.025×10^{-6}	1.15[%]
2646	1.2[fC]	1.3457×10^{-5}	3.333×10^{-6}	0.89[%]
2648	1.1[fC]	4.2650×10^{-5}	1.5103×10^{-5}	0.42[%]
2650	1.0[fC]	1.6797×10^{-4}	5.4656×10^{-5}	0.22[%]
2651	0.9[fC]	7.4555×10^{-4}	2.0341×10^{-4}	0.11[%]

各 Run の Occupancy 値を見ると、threshold の値が小さく成るに伴い、ヒット数が多くなっていることが分かる。

³1つのモジュールは2枚のウエファ³ーよりなる

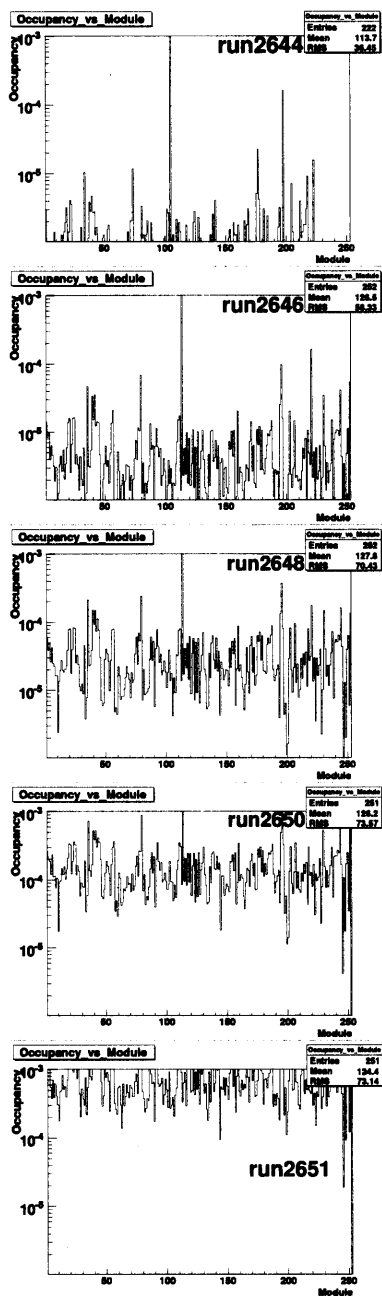


図 3.4: tbin:条件無し

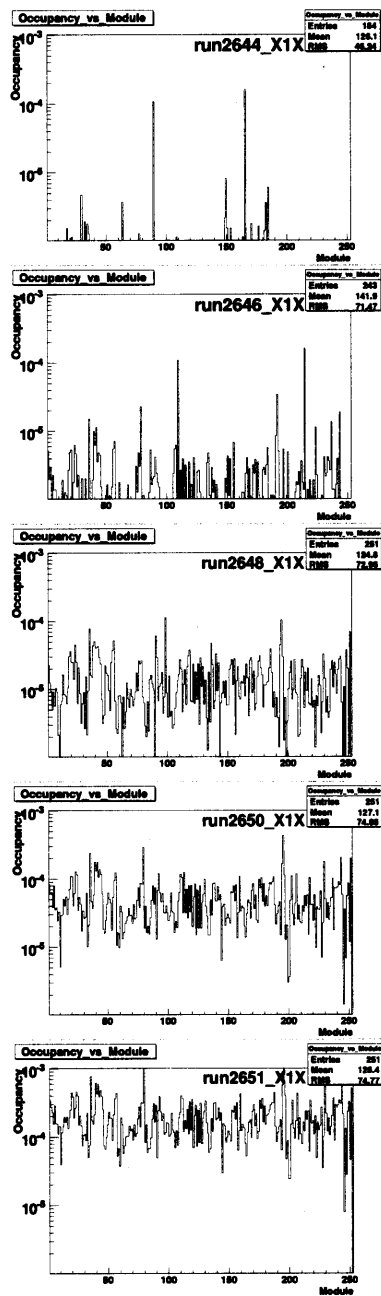


図 3.5: tbin:X1X

Equivalent Noise Charge(ENC)

ENC をここで求める。Occupancy は threshold に関係する。式 3.3 の σ が ENC である。よって表 3.2 の Occupancy と threshold の値より ENC を求める。

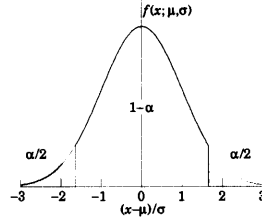


図 3.6: 正規分布

ノイズの電圧波高分布が正規分布に従うとして、threshold を越える割合が正規分布の σ を越える所を積分して得られる領域 $\frac{\alpha}{2}$ が Occupancy となる。正規分布の積分関数は error function(erf) と呼ばれていて、以下のように定義される。

$$1 - \alpha = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\mu-\delta}^{\mu+\delta} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \text{erf}\left(\frac{\delta}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (3.3)$$

より、Occupancy は $\frac{\alpha}{2}$ となり、

$$\text{Occupancy} = \frac{1 - \text{erf}\left(\frac{\delta}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{2} \quad (3.4)$$

となる。この erf()⁴ の中の σ が ENC の値となる。

ENC は電子数で表される。

この関数で fit すると、図 3.10 のようになる。図は横軸が threshold、縦軸が Occupancy となり、その分布図に fit したとき ENC が求められる。今、threshold は電荷量に換算されているので、その揺らぎも電荷量 [fC] となる。これを電子数に換算したものが Equivalent Noise Charge と呼ばれている量である。信号、約 20000 個との比が信号ノイズ比 (S/N) となる。

fit した結果は表 4.1 に示す。X1X の fit において高い threshold で fit からはずれる理由は、現時点でノイズの多いチャンネルをマスクしていないことによるものと思われる。また、

⁴erf():error function

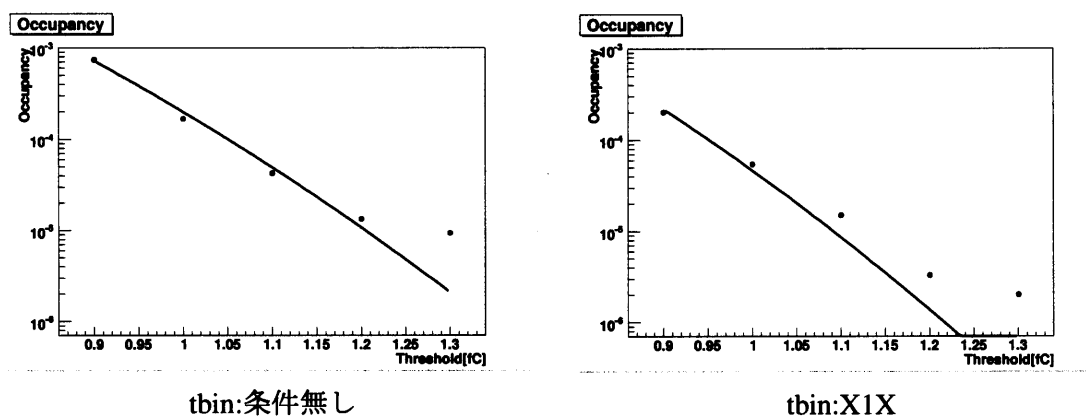


図 3.7: 式 3.3 で fit した図

fit した結果は表 4.1 に示す。X1X の fit において高い threshold で fit からはずれる理由は、現時点でノイズの多いチャンネルをマスクしていないことによるものと思われる。また、各モジュールのチップごとに fit した ENC の値をヒストグラムに詰めた結果を図 3.11 に示す。この結果を見ると SCT の ENC は期待される値 $1500e^-$ に近いといえる。

表 3.3: Top sector の tbin に対する ENC

tbin	ENC	チップの平均の ENC
条件無し	$1.7657 \times 10^3 e^-$	$1.71 \times 10^3 e^-$
X1X	$1.6001 \times 10^3 e^-$	$1.57 \times 10^3 e^-$

3.1.2 New SCT only noise threshold scan

セクションのタイトルにあるように新しいノイズスキャンを行った。前回に対し今回は Top、Bottom 両 sector を用いた。場合の ENC について見ていく。図 3.9 に今回使用するモジュールの分布を示す。図の (b) は Phi の値が大きい所に分布するのが Bottom のモジュールを表す。

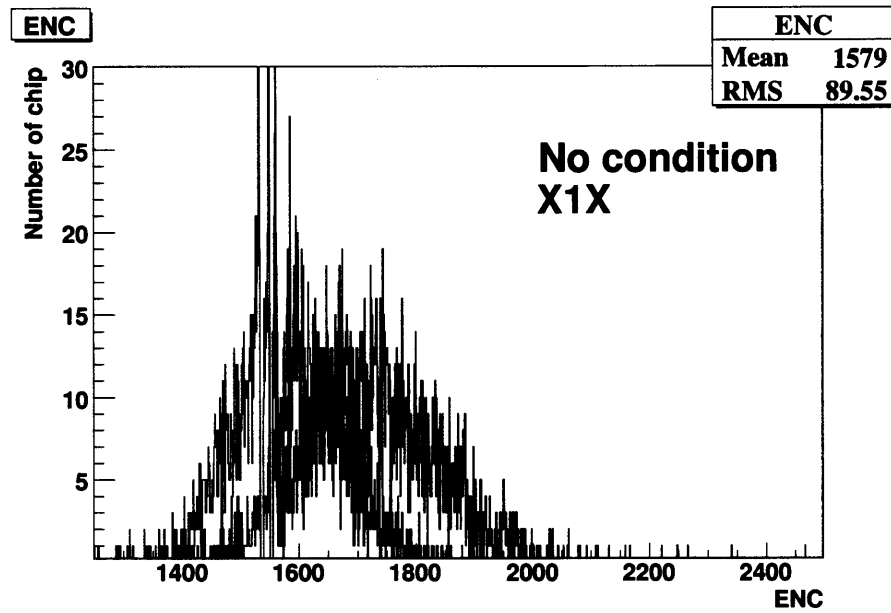


図 3.8: Top sector のチップごとの ENC

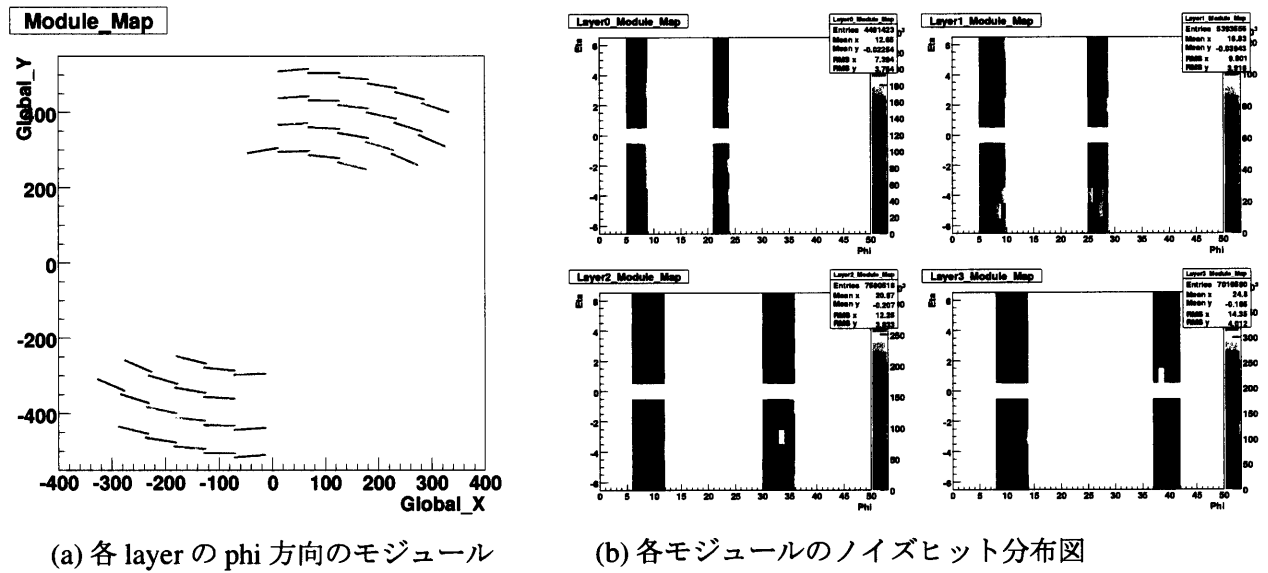


図 3.9: Top and Bottom sector SCT モジュール

この測定 of Run の条件と統計誤差を表 3.4 に示す。今回の noise threshold scan は各 Run のイベント数が前回の scan に比べ多いため統計誤差は小さくなっている。

表 3.4: New SCT Noise threshold scan with TRT off

Run Number	Events	SCT Threshold	統計誤差
3069	25K	0.9[fC]	0.053[%]
3070	50K	1.1[fC]	0.13[%]
3071	100K	1.2[fC]	0.13[%]
3072	232K	1.0[fC]	0.035[%]

3.1.1 と同様に、ENC を求めるため、式 3.3 より fit した。

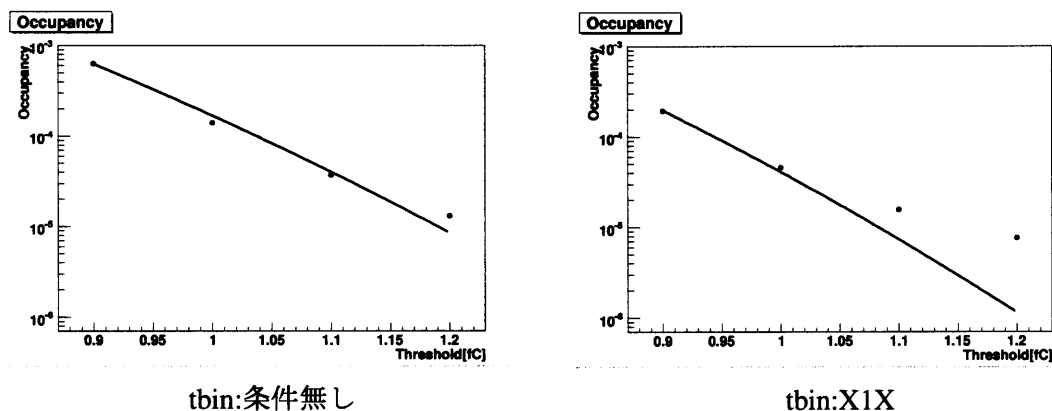


図 3.10: 式 3.3 で fit した図 2

求めた ENC を表 4.2 に示す。

Threshold の値が大きいところでは fit がはずれている、これはノイズの多いチャンネルがマスクされていない為だと思われる。ENC の値は Top だけの場合より、ENC は $1500e^-$ に近付いている。Top だけの場合は Trigger Rate が 50~60[Hz] であったのに対し、ここでは 500[kHz] であった。この違いが影響しているのかどうかは次のセクションで Trigger Rate についてのノイズ解析を行っている。

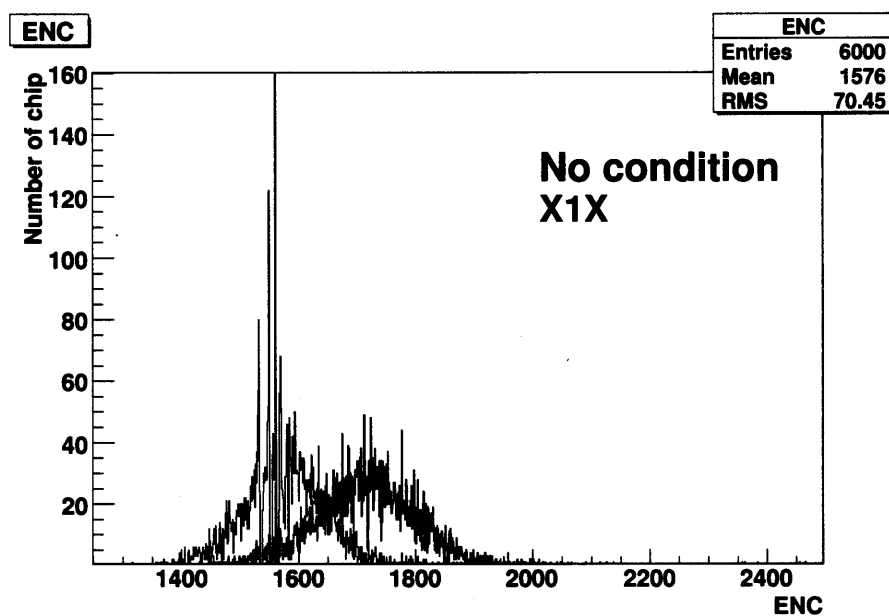


図 3.11: Top and Bottom sector のチップごとの ENC

表 3.5: Top and Bottom sector の tbin に対する ENC

tbin	ENC	チップの平均の ENC
条件無し	$1.74380 \times 10^3 e^-$	$1.714 \times 10^3 e^-$
X1X	$1.58724 \times 10^3 e^-$	$1.574 \times 10^3 e^-$

3.1.3 SCT only noise trigger rate scan

ここでは threshold を 1.0[fC] にし、Trigger Rate を変化させたときノイズ Occupancy にどのような影響が出るかを調べた。

測定条件

この測定で使用したモジュールと、その Run 毎の条件を記述する。まず、この測定では、モジュールは Top、Bottom 両 sector を用いた。このセクションのテーマである、Trigger Rate の変化であるが、単位が [Hz] であるように、トリガーの回数の違いによる影響があるのかを調べるための測定である。

まず今回の Run の条件を表 3.6 に示す。

表 3.6: SCT only noise trigger rate scan

Run Number	Events	Trigger Rate
3065	42K	500[Hz]
3066	90K	5[kHz]
3067	70K	50[kHz]

また同様に、

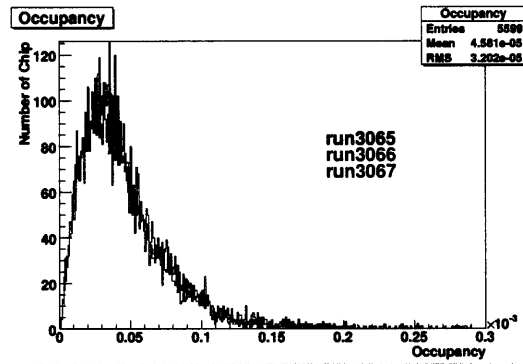
共通の条件として、全ての Run の threshold は 1.0[fC] である。

結果

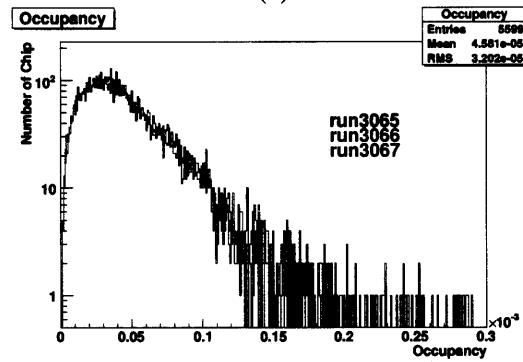
3つの Run の Occupancy を求めた。この解析では、モジュールごとではなく、モジュールに付属するチップ (chip) 毎の Occupancy について求めた。チップの Occupancy を $Occupancy_C$ とすると、

$$Occupancy_C = \frac{\text{hit 数}}{\text{event 数} \times 128} \quad (3.5)$$

となる。そのヒストグラムを図 3.12 に示す、横軸が Occupancy、縦軸がチップ数である。この結果より、Trigger Rate は NO に影響を及ぼしているようには見えない。



(a)



(b)

図 3.12: Trigger Rate の変化に伴う NO の分布図,(a):リニアスケール,(b):ログスケール

3.1.4 SCT only long noise run at 0.9fc threshold

これまでの測定とは異なり、名前の通り 900K にも及ぶイベントを測定してある。この Run の目的は、長い Run を走らせその中に異様なイベントが無いかを調べる。

測定条件

Logn Run の条件を表 3.7 に示す。

表 3.7: SCT only long noise run

Run Number	threshold	Events	Trigger Rate
3076	0.9[fC]	900K	30[kHz]

結果

この Run では、各イベントに対しそのイベントが持つヒット数をヒストグラムに詰めた。

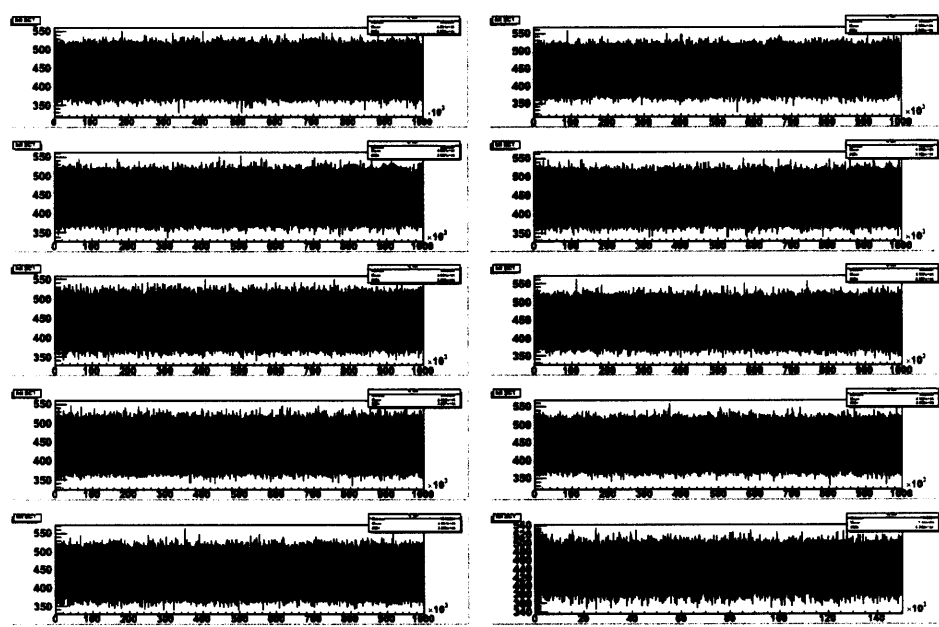


図 3.13: Logn Run at SCT 900K

図 3.13 は横軸がイベント数、縦軸がそのイベントがもつヒット数を表す。図を見る限り、特に目立ったイベントは見当たらない。このヒストグラムは軸をオートセットするため、とてつもないヒットがあればピークが一本立つ、しかしそのようなイベントは見当たらない。

3.2 Cosmic Data

3.2.1 宇宙線イベントの表示

このセクションでは、実際に測定された粒子がどこを通過したかを直接目で追うためのツールについて記述する。今回の Cosmic Run において我々が用いたソフトウェアに atlantis がある。このツールは、2次元で表現するイベントディスプレイである。その1イベントが検出器を通った様子を図 3.14 に示す。

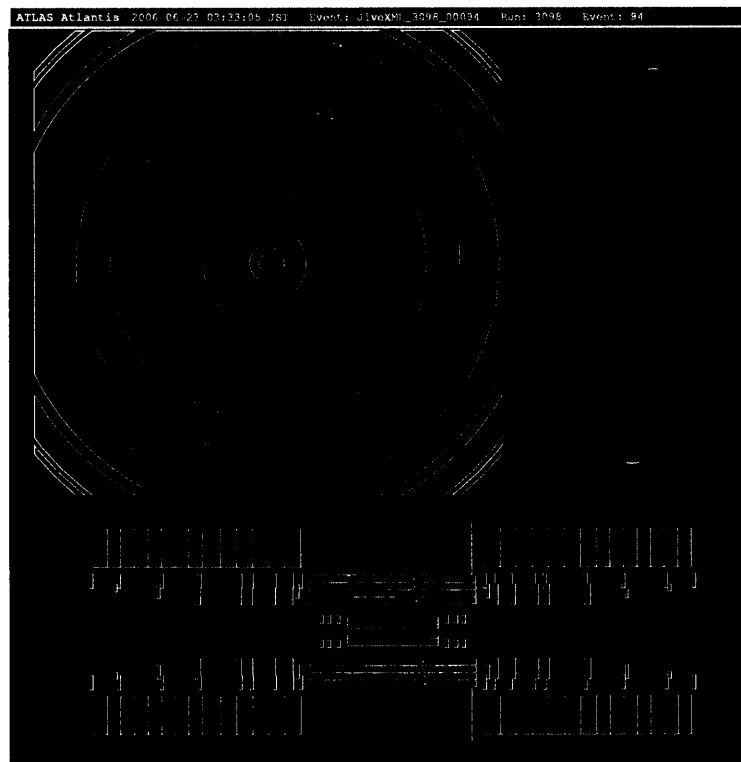


図 3.14: Atlantis: event display

図 3.14 であるが、左上は InnerDetector を正面、右上は通った粒子の ϕ, η 面上に、 $\eta \pm k(r - r_{max})$ の点としてスペースポイントプロットしたもの(付録 A で説明)。下は InnerDetector を横側から見た図である。

atlantis からの情報を見ていく。

3.2.1 Space Point

イベントを見ていく上で大事な概念がある、それがスペースポイント (Space Point) である。スペースポイントとは測定と誤差において、3次元の重要な情報である。スペースポイントは Track を見分けるときに pattern recognition として使われる概念である。SCT の目的は、Track Seed の発見、つまり様々なイベントの分別に重大な約割りを担うことである。そこでスペースポイントは意味を持つ。スペースポイントの定義は、SCT モジュールは 2.2.2 で述べたように、2枚のウエファァーを 40[mrad] 傾けて固定してある。この2枚ウエファァーのストリップに信号がきたとき、その重なる点にスペースポイントとする。これにより Track のパターン認識に役立てる。

ここで、Cosmic Run でのイベントでスペースポイントを見る。

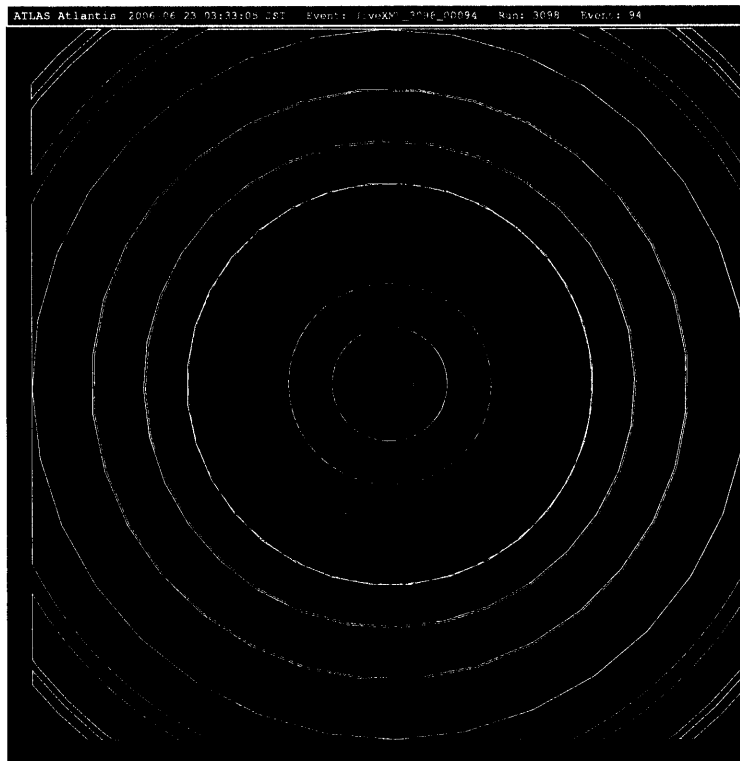


図 3.15: Space Point

図 3.15 には Comic Run での、あるイベントを atlantis で表示した。最外に TRT があり、

その内側に4層 SCTがある。SCTの上下にスペースポイントが描いてある。
次にスペースポイントを更に詳しく見ると、

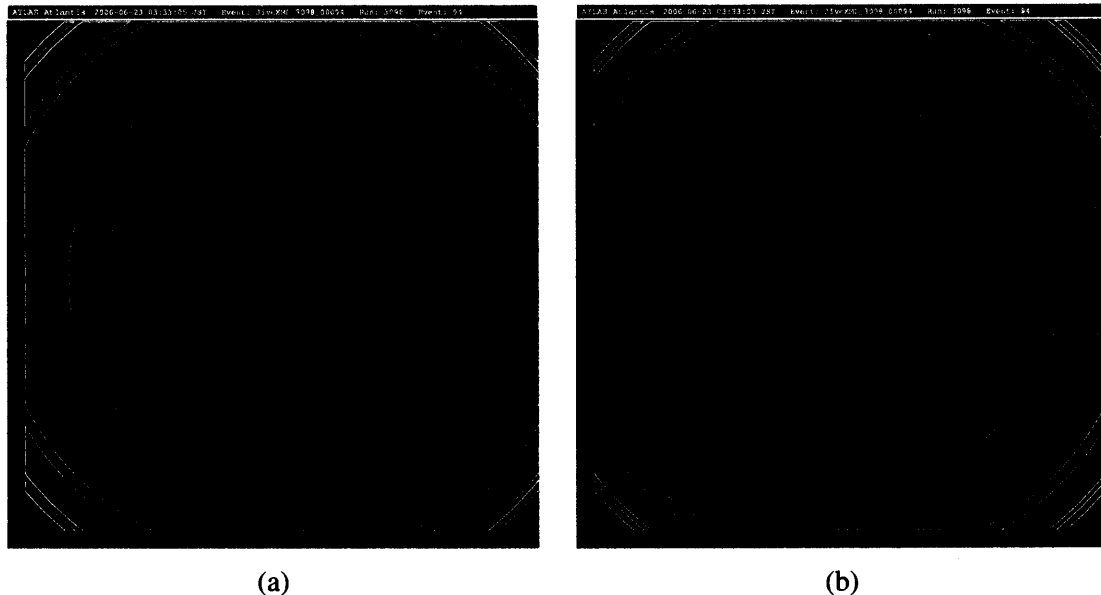


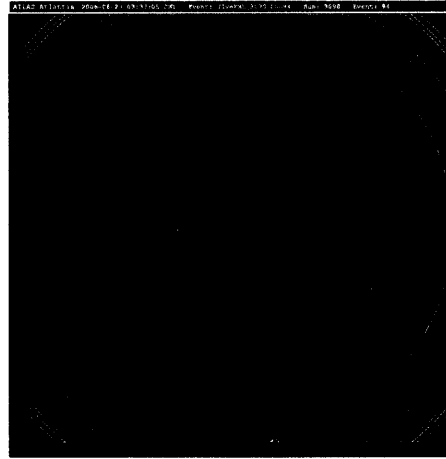
図 3.16: Space Point2

この図 3.16 は同じイベントにおいて、(a) はスペースポイントのみ、(b) はヒット情報を全て描いている。この (b) の中から先ほど示した条件よりスペースポイントを決めている。これにより Track を決定したものを、図 3.17 に示す

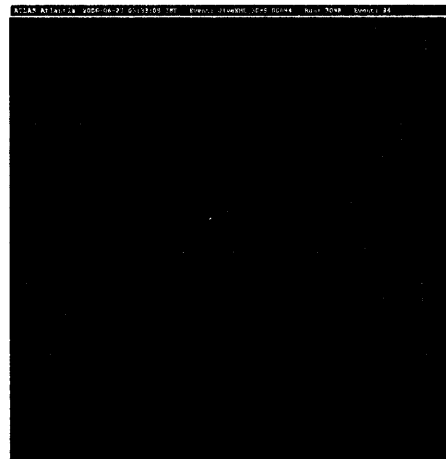
これは、スペースポイント8個を通る直線を結ぶことにより描かれる。もちろん、全てのイベントが各 layer にスペースポイントを作る訳では無く、8個以上作る場合もある⁵。スペースポイントが少ない場合どれ程の効率で Track が引けるのかの Efficiency についても研究は進んでいる。今、検出器の正面から見ているが、図 3.18 に横から見た状態を示す。

ここで注目することは、TRT にはスペースポイントが無いことである。これは、1.3.3 で示したように、TRT はストロー検出器であるため、2次元の情報しか持たない。SCT は3次元の検出器という強みを持っている。

⁵このイベントでは8個以上ある



☒ 3.17: Track from Space Point



☒ 3.18: Space Point

3.2.3 検出器効率

宇宙線データによる SCT Barrel 部分の検出器効率について記述する。SCT の 1 つのモジュールが 2 枚ずつウエファァーからなることは既に述べた、検出器効率 (Efficiency) は調べようとする Layer のウエファァーを 1 枚除いてトラック・フィットを行い、その除いたウエファァー上にトラックの位置から 1.5[mm] 以内のヒットの有無で求めた。式で表すと 3.6 になる。

$$Efficiency = \frac{\text{トラックから 1.5[mm] 以内にヒットがる}}{\text{除いたウエファァー上にあるトラックの数}} \quad (3.6)$$

この条件から検出器効率を求めるために用いた宇宙線データを表 3.8 に示す。

表 3.8: 検出器効率の解析に使用した宇宙線データ

Run Number	Events	Threshold	Layout
3007	10K	1.0[fC]	Top and Bottom sector

結果

各 Layer のウエファァー毎の検出器効率の平均を図 3.19 に示す。

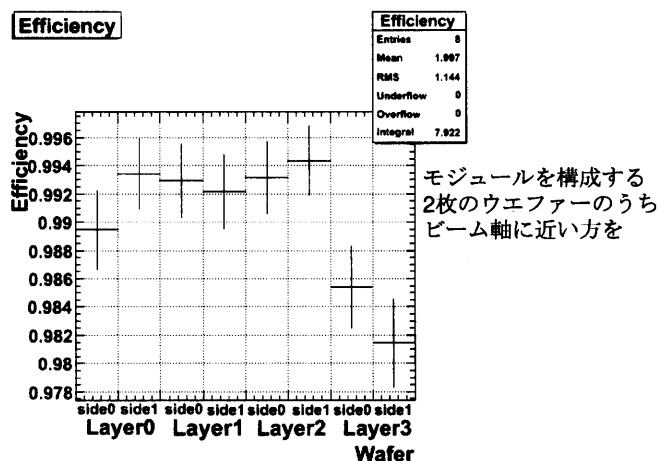


図 3.19: 各 Layer のウエファァーの平均の Efficiency

この結果より、Layer3 の検出器効率が低いのは、Cosmic Run で使用された検出器のレイアウトの幾何学上の問題であると思われる。モンテカルロ (Monte Carlo) シミュレーションでも同じように Layer3 の検出器効率は下る。しかし、検出器効率は 98[%] を得ており、他の Layer との差は約 1 % である。

第4章 まとめと今後の課題

今回の研究では、ATLAS 検出器の1つの半導体飛跡検出器である SCT の宇宙線による試験運転を CERN の SR1 で条件を変行われた。そのデータから検出器のノイズについての解析を行い以下のような結果が出た。

- Top sector 252 枚のモジュールを使用した測定データの解析を行った。この測定では、threshold を変化させ、各モジュールのノイズ Occupancy とそのときの equivalent noise charge(ENC) を求めた結果を示す。

表 4.1: tbin に対する ENC(Top sector)

tbin	ENC
条件無し	$1.7657 \times 10^3 e^-$
X1X	$1.6001 \times 10^3 e^-$

これより、ENC は 1500~2000 の間に納まり、製造の個別のモジュールのノイズと同等であることが示された。

- Top 及び Bottom 両 sector 468 モジュールでの ENC 評価を示す。

表 4.2: tbin に対する ENC(Top and Bottom sector)

tbin	ENC
条件無し	$1.74380 \times 10^3 e^-$
X1X	$1.58724 \times 10^3 e^-$

両 sector での ENC も Top sector のと違いは認められなかった。

- Trigger Rate の違いによる Occupancy への影響は図 3.12 より無かった。

- Cosmic Run による Barrel 部分のモジュールの試験運転において、測定に影響するようなノイズは無かった。また、468/2112 のモジュールではあるが、全く動作していないモジュールは無かった。

今後の課題としては、

- 現在 InnerDetector の End Cap 部分の測定が行われており、そこでもノイズ解析が進められている。Barrel 部分同様、Occupancy や ENC の解析を行い、検出器の状態を把握すること。
- 地下での全モジュールの宇宙線試験が行われる。そこでもノイズ、効率、デッドチャンネルについて調べる必要がある。
- 本年、2007 年 11 月より LHC の運転が開始される、そこでの正確な測定をするため測定器の Alignment も早急の課題である。

ϕ 、 η 面を図 A.1 に示す、横軸は η 、縦軸は ϕ であり、 η の値が大きい領域の大小の赤色の点は電磁カロリメータの信号、青色はハドロンカロリメータの信号の位置と大きさを示す。このイベントは宇宙線のプロットではない。この図の中にいくつか赤色の V または逆 V 字がある、その付近を拡大した図が A.2 である。

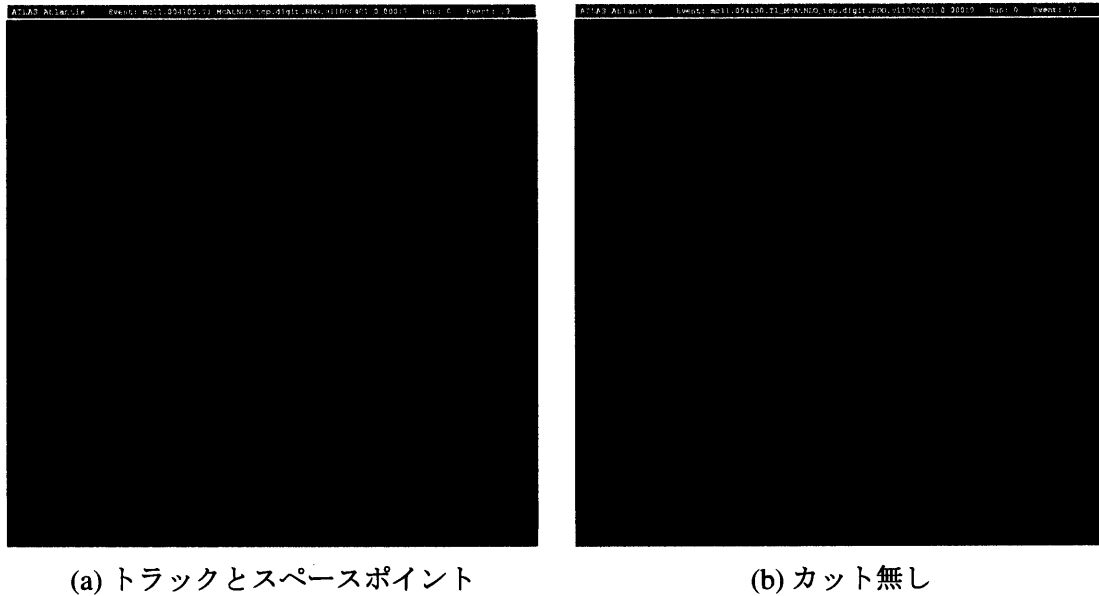


図 A.2: V 字付近を拡大した図

この図 A.2 の (a) について、赤色の V 字は白色の点に沿って形成されている。この白色の点は 3.2.2 で説明したスペースポイントであり、V 字は粒子のトラックを示す。つまり、トラックの認識にはスペースポイントが使われていることを示す。赤色の線は xKalman や iPatrec などのパターン認識とトラックフィッティングを行うアルゴリズムが見つけたトラックを示す。今 (a) の右上部分にスペースポイントが V 字になっている所がある、しかしトラックが引かれていない。次に (b) の図は (a) と同じ部分の拡大である、この図では V 字が引かれている。この違いは (a) では運動量が 1[GeV] 以下のトラックはカット (Cut) されている、そのカットを外すと (b) のように V 字が引かれる。低い運動量のトラックに関心がない場合や高い運動量の場所を同定する為にカットを高めに設定して表示する。V 字の開いた辺の端はピクセルのスペースポイントを示す (図 A.3)。

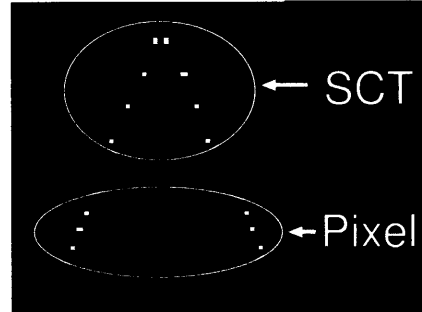


図 A.3: トラックに使用されるスペースポイント

A.2 ϕ, η 面

ϕ, η 面上でのトラックの V 字の大きさの意味について説明する。このスペースポイントは $\phi, \eta \pm k(r - r_{max})$ で描かれる。 ϕ はどれだけ粒子が磁場の影響下で曲がったかを示し、 $\eta \pm k(r - r_{max})$ は最大半径からどの点かを示す。これを踏まえて V 字を見ると、V 字が平らなほど ϕ の値に変化が少ない、つまり大きい運動量を持つ。V 字の尖った所は外側のスペースポイントで、V 字、逆 V 字は電荷の正負を示す。

付 録 B 理科教育における半導体検出器

B.1 序章

本論文では半導体検出器について研究してきた、半導体検出器と名前を聞くと大それたものように聞こえるが、半導体そのものは実際は生活している空間に多数存在する。半導体素子の中で最も簡単なものがダイオードである。我々の身近にありよく目にするダイオードでは発光ダイオード (LED:light emitting diode) がある。発光ダイオードは、わずかな電流により発光するので、表示板や信号用の光源として広く利用されている。この他にも半導体は開発されおり身近なものといえる。

B.2 教材としての半導体

B.1 で上げた発光ダイオードとは逆の特性を持つフォトダイオードという名前のダイオードがある。名前のごとくフォトとは光、つまり、光を感知すると電流を流す特徴を持つダイオードである。このフォトダイオードを利用した教材として、中村理科工業株式会社販売元の『p.a.「まなぼっと」』(以下 p.a.) がある。中村理科のホームページに

光に関する実験器具がフル完備。セットを開けばすぐに実験が始められます。付属の光センサを使って振り子の周期の測定や、光で音楽を演奏するなど、これまでの光センサの概念を超えたさまざまな「おもしろ実験」が行えます。また、簡単なものから難しいものまで、「おもしろ実験」のノウハウやヒントがたくさん詰まった、充実内容のマニュアルブックが付属しているのも大きな魅力です! (web ページより抜粋)

とあるように、教材としての基本的な観測のための器具が付属し、その器具を用いり授業を行え、更にはその教材を基礎とし発展することももちろん可能である。

B.3 授業への導入

この教材 p.a. を使い、京都教育大学附属高校で物理の授業の TA として授業に参加した。今回参加した授業では、p.a. を含むいくつかの教材を用いた実験であった。主にセンサーに関する教材であり、その中の p.a. を担当した。今回の授業では、事前に生徒に教材の情報を提供し希望を聞いた。

B.3.1 授業の目的

今回の授業では、

- 基礎となる教材を与え、生徒が興味・関心を持つ内容を追求させる探求授業である。
- 探求授業であるため、教科書に載っている実験とは異なり様々なものを利用し学習する。
- こちらが教えるのではなく、生徒自ら原理原則に気づくことが大切である。
- その探求して終わりではなく、そのことがいかに理科 (物理) に結び付くかをフィードバックさせる

などがある。

B.3.2 授業 (実験) 方法

この授業に参加した生徒達は光センサ¹を使い、透過率について調べだした。それに応じてこちらの用意したものは以下の通りである。

- セロハン (赤色、緑色)
- アクリル板
- 寒天
- 対角に敷居がある、長方形の水層
- 光源 (白熱電球、レーザーポインタ)

測定には、実験室に付属する暗室を用いて行った。

¹測定範囲 0～5000[Lux]

セロハン、アクリル板

この二つ²は、数枚を用意し重ねることにより光の透過率がどのように変化をするかを調べる。

寒天

ある程度の長さがある直方体の寒天を用意し、その片側に光源を置く。そして反対側から p.a. により光度を測る。測り終わると寒天を包丁などにより切断し、短くし再び光度を測る。

対角に敷居がある、長方形の水層

これは、底が長方形の水層に対角になるように敷居を設けてある水層である。この水層の仕切ってある一方には透明の水を入れ、もう一方には水性絵の具により色を付けた水を入れる。そして、水層を間に置き光度を測る。

B.3.3 結果

各教材による実験の効果を教材ごとに以下にまとめる。

セロハン、アクリル板

この教材は透過率という概念を学ぶ上で基礎となる原理に付いて学習出来る。同じ厚さのセロハンやアクリル板により透過率がある一定の割合、つまり法則的に変化することを学ぶ。

寒天

これは寒天を生徒自らが切ることにより、セロハンやアクリル板に比べ、寒天の厚さの変化が一定ではない減少値からその変化の割合はどのようなものかを学ぶ。

²数枚用意し、各種類は同じ厚さ、大きさとした

対角に敷居がある、長方形の水層

この教材も一定でない光度の増減少の割合について学ぶ。これは仕切りがあるため、透明な水と、着色水の割合を任意で決めることが出来る。さらには、一度切ってしまうと再度実験ができない寒天とは違いどの割合で何度も測定出来る。

B.3.4 考察

今回の授業では自らこの実験装置を選び、参加した生徒達ということもあり、こちらからの指示を仰がずとも進んで考え実験を進めていた。生徒はセロハンやアクリル板により、透過率の減少・増加について概念を掴んだ。寒天・水層の実験で、更に発展的内容にも意欲的に参加し、その結果より透過率とはどのようなものの概念を掴んでいるようだった。

B.4 まとめ

半導体の一種であるフォトダイオードを利用した教材による授業に参加し、どんな教材でもそうであるが、この p.a. は使う人により様々な学習が出来るとよく分かった。今回は光であったが、音や熱といった物理量に関しても可能であるようだ³。

探求学習は生徒が興味関心をもつ方向により同じ教材を使用してもどの方向へ進むかは原則分からない。そこで、直接的ではないにしろ教師がある程度の誘導しあたかも生徒自ら方向性を決めて実験を進めているように思わせ、興味関心を持ち探求学習を進めるのも1つの方法だと思われる。それも教師として、教科教育の責任を果たす上で大切ではある、しかし願わくば、そのようなことは極力避け生徒が突拍子でもない発言や、実験希望を提案した場合そこで対応できるよう、物ごとに付いて様々な見方が出来ることが大切である。

³本体とは別に手にいれる必要がある

謝辞

本研究を行うにあたり、数多くの方々にお世話になりました。アトラス日本グループの先生、学生さんたち特にシリコンソフトグループでは高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 近藤敬比古先生、岡山大学 田中礼三郎先生、内藤大輔さん、美馬寛君、筑波大学 原和彦先生、中村浩二さん、永井義一君、井上孝紀君、大阪大学 花垣和則先生、CERN 滞在中には東京大学素粒子物理国際研究センター 上田郁夫先生、QMW 永井康一先生その他アトラス実験に参加されている先生、学生の方々には上げればきりが無い程の御指導を頂き深く感謝します。

本学、沖花彰先生、谷口和成先生その他先生方にはアトラス実験グループのメンバーとして行動するにあたり、融通をきかせて頂いたことを深く感謝致します。また研究室の先輩である河内知己さんには、質問にたいする優しくそして丁寧な返答を頂きありがとうございました。更には理科教育専修の修士生2回生の皆様との2年間の学生生活は有意義なものになりました。

最後になりましたが、指導教官である京都教育大学助教授 高嶋隆一先生には公私にわたりお世話になりました。学部生からの3年間に、物理の分野に限らず、広い範囲での御指導と、CERN に滞在・最前線の研究という非常に貴重な体験をさせて頂き心より感謝いたします。

参考文献

- [1] ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report: 1999
- [2] 新物理学シリーズ 26 放射線計測: 加藤 貞幸: 培風館 1994
- [3] Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: W.R.Leo: Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 1987
- [3] 粒子線検出器-放射線計測の基礎と応用-: 原著者 K. クラインクネヒト, 訳者 高橋 嘉右・吉城 肇: 培風館: 1987
- [4] Iterative local χ^2 alignment approach for the ATLAS SCT detector: Roland Härtel: 2005
- [5] メカトロニクスのための電子回路基礎: 西堀賢司: コロナ社: 1993
- [6] BLUE BACKS 図解・わかる電子回路: 加藤肇 見城尚志 高橋久: 講談社: 1995
- [7] ATLAS Tracking Event Data Model: Wolfgang Liebig, Edward Moyse, Andreas Salzburger: 2006
- [8] 中村理科工業株式会社: <http://www.rika.com/>
- [9] Particle Data Group: <http://pdg.lbl.gov/>