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

ヨーロッパは CERN で 2007 年 11 月より LHC(Large Hadron Collider) が走り出す。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。素粒子はその時代により異なる、LCH での素粒子は質量の起源とされるヒッグス粒子がそのひとつである。

このように未発見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事項である。それにともない、検出器の発展も行われてきた。

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) を本実験が始まる前のステップ段階とし、動作状態を宇宙線を測定することにより解析した。

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 (Cppacitance) 18
2.2 SemiConductor Tracker 18
2.2.1 動作原理 18
2.2.2 レイアウト 20

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 31
3.1.4 SCT only long noise run at 0.9fC threshold 32
3.2 Event Display 33
3.2.1 Space Point 34

第 **4** 章　まとめと今後の課題 **38**

付 録 **A**　理科教育における半導体検出器 **40**
A.1　序章 40
A.2　教材としての半導体 40
A.3　授業への導入 41
A.3.1　授業の目的 41
A.3.2　授業 (実験) 方法 41
A.3.3　結果 42
A.3.4　考察 43
A.4　まとめ 43

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CERN(欧州合同素粒子原子核研究機構)では2007年11月より開始される、LHC(Large Hadron Collider)が建設中である。

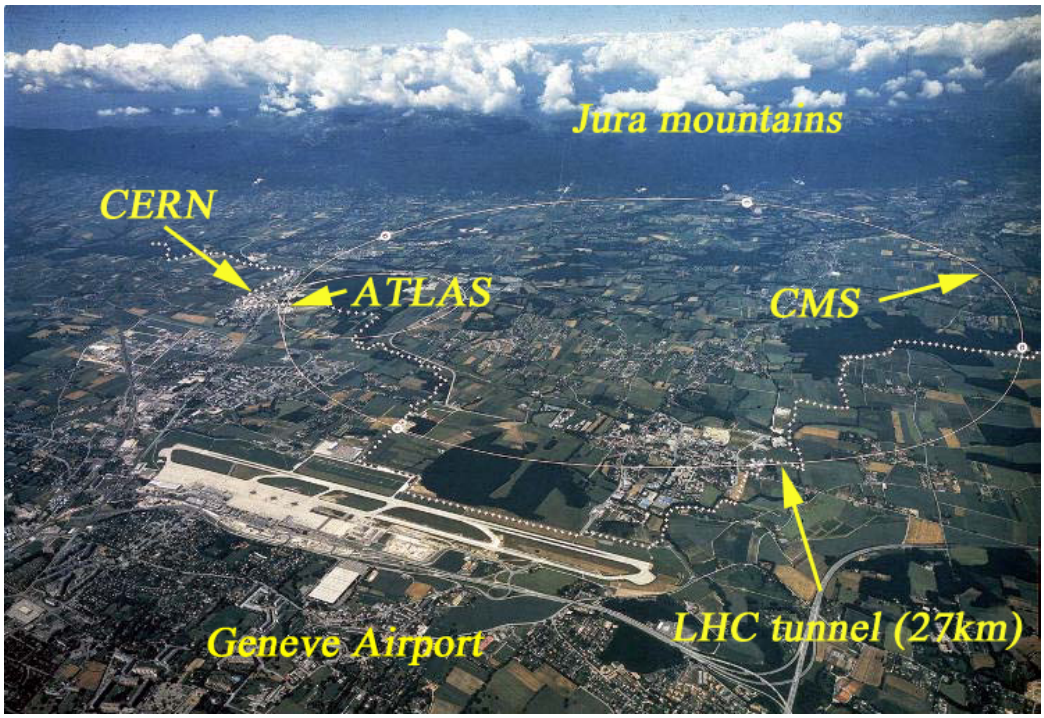


図 1.1: LHC

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**??**)。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。

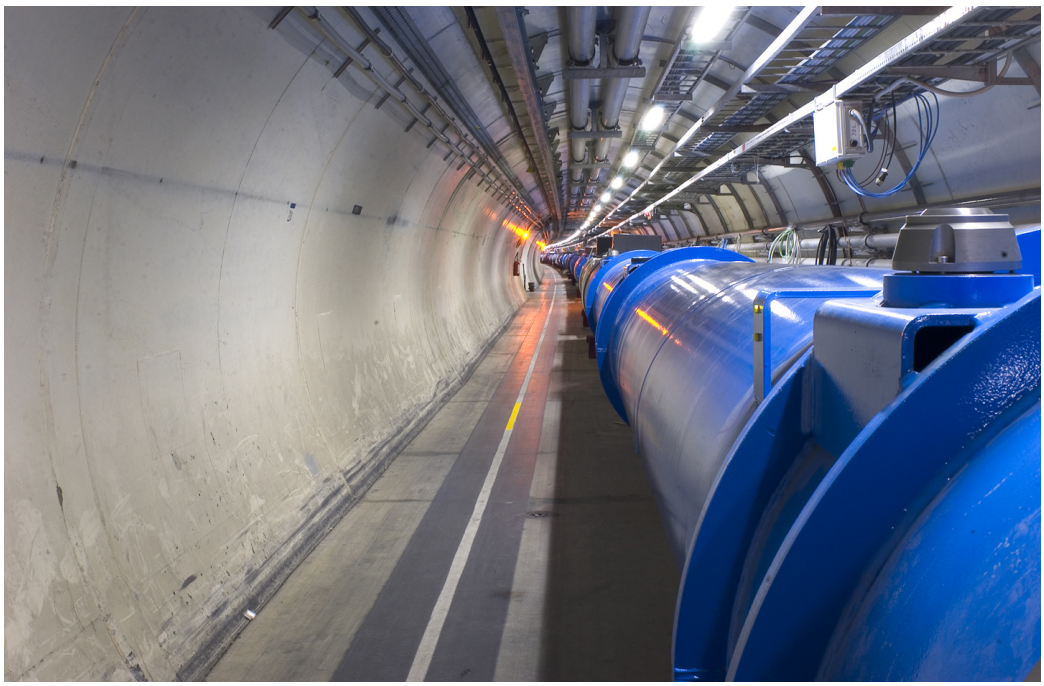


図 1.2: リング内に設置された超電導磁石

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、しかし断片だけがふたつの相互作用のパートンにより用いられる。これを考慮すると、5[TeV] までエネルギー領域を試みることが可能である。

LHC は図**??**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-accelator 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

[1]Large Electron Positron collider

ギーで LCH 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。

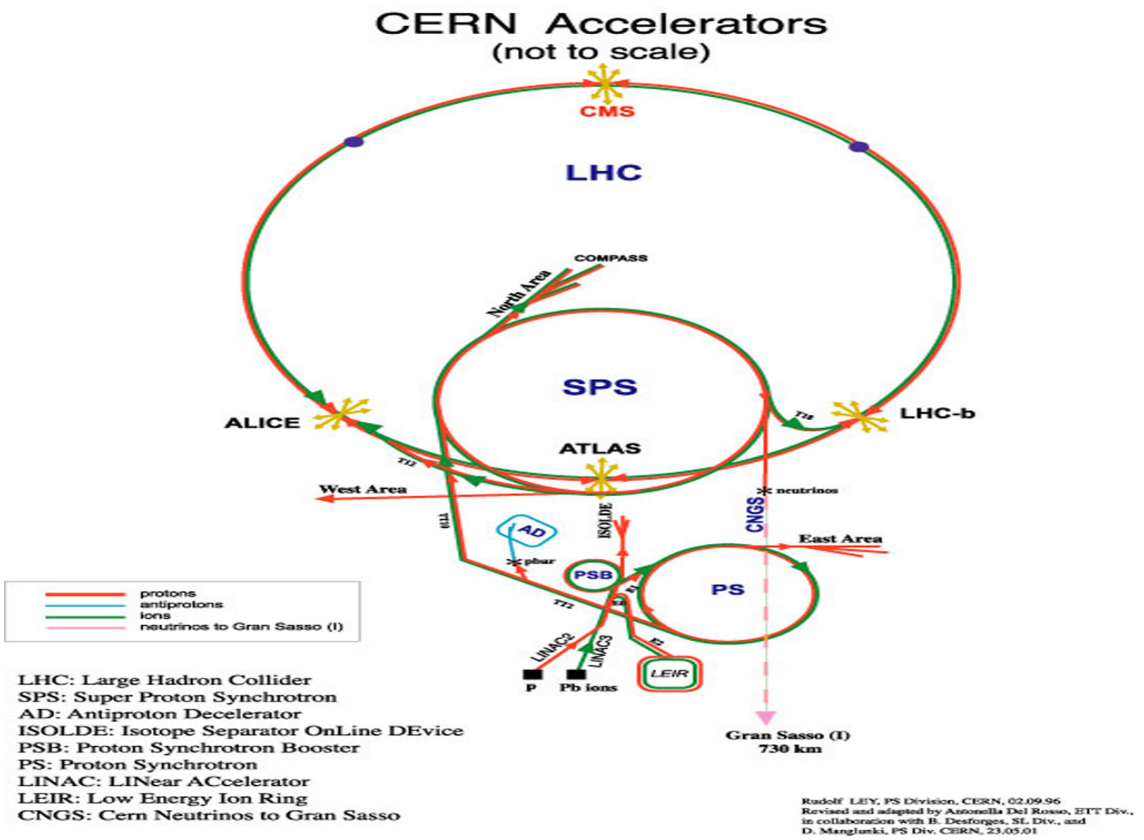


図 1.3: LHC 加速器の全体図

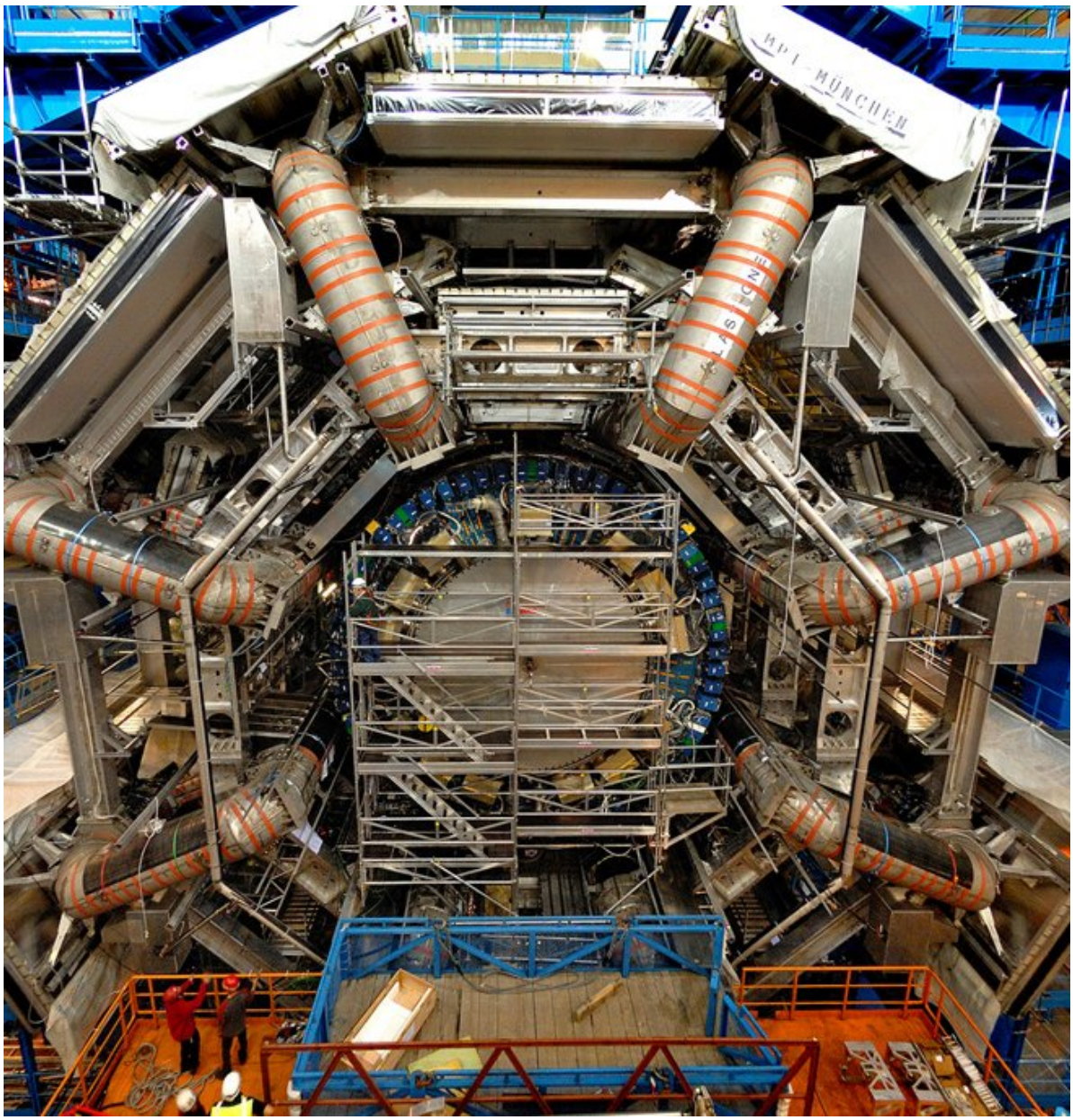


図 1.4: 建設中の ATLAS 検出器

1.2 ATLAS 実験

1.2.1 ATLAS 実験の目的

ATLAS 検出器は LHC において、そ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上げる、

- 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。

既に述べたが、気密性試験は ATLAS の設計に対し粒子を導くことである。陽子陽子衝突実験において、 2 つのパートンの相互作用は最も運動量の違いを生じる、したがって質

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

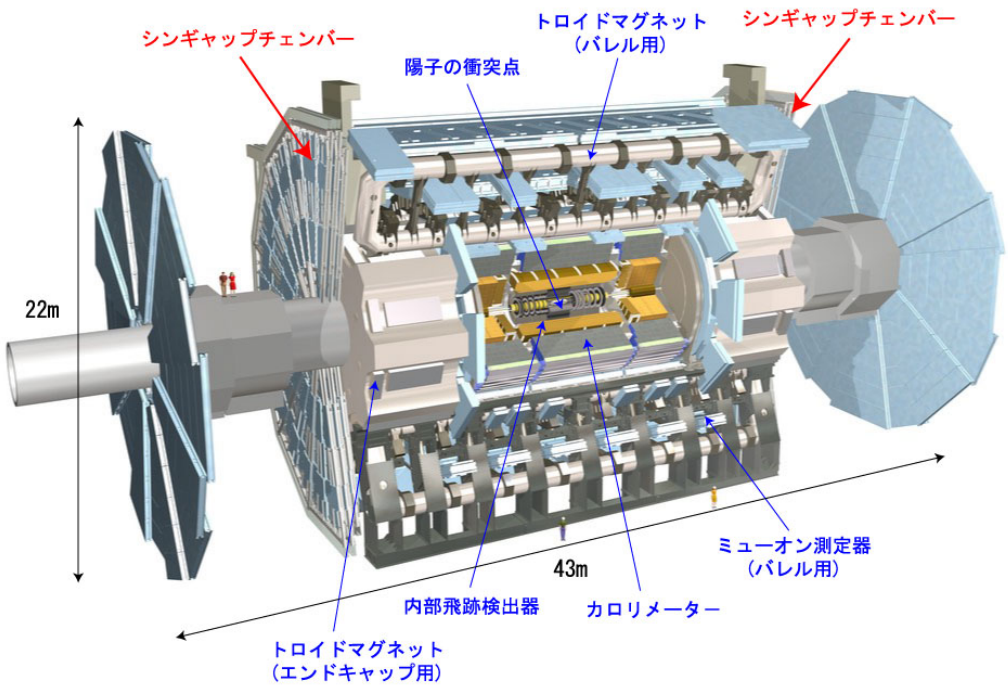


図 1.5: ATLAS 検出器

量系の集中はビームラインに近付くほど高い。したがって、ATLAS に関してビームラインから θ の広い範囲をカバーすることが重要である。ビームラインと関係し、偏向を述べるために高エネルギー実験で一般的に使われるもうひとつの変数は pseudorapidityη であり、その定義は

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

である。これは質量や運動量が分からないとき、相対的粒子の真の相対的 rapidity の非常に良い近似値である。

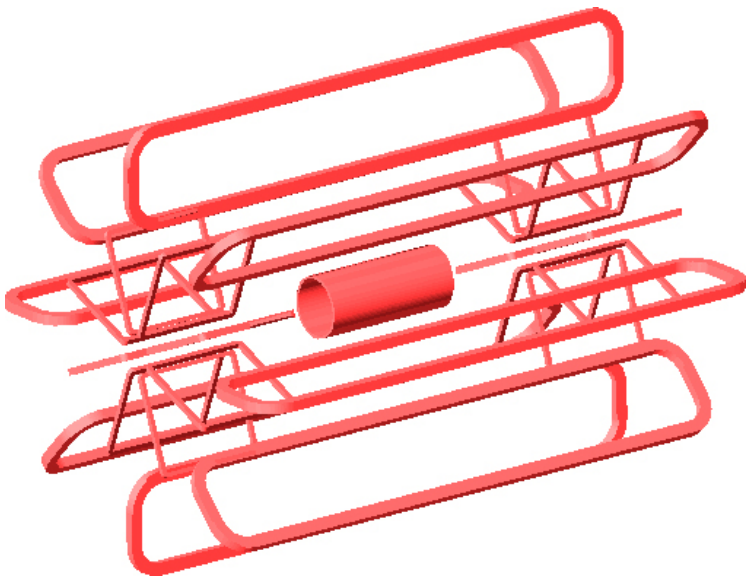


図 1.6: ATLAS のマグネットシステム

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 Monitord Drift Tubes(MDTs) や、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ある。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 1.7InnerDetector のイラストである。

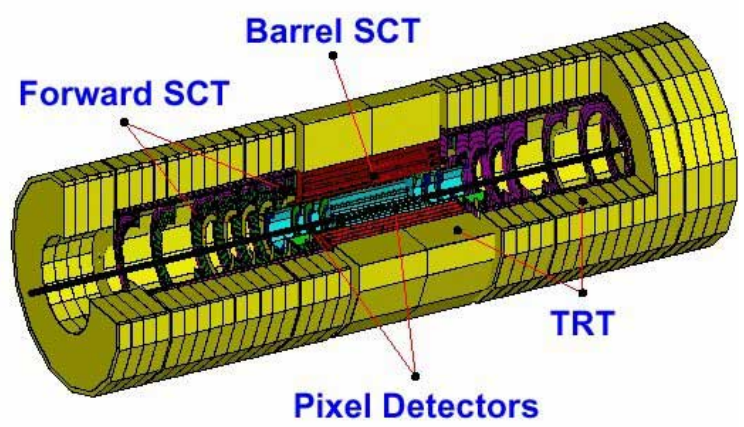


図 1.7: ATLAS InnerDetector

TRT は非常に高い割合で動作するために設計された 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、track-finding と運動量測定に必要不可欠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

[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

detector である。 2 枚のウェファーをステレオに対し 40[mrad] 傾けた状態で裏面同士を接着させ、 1 つの SCT モジュールが構成してある。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 崩壊点を精密測定を行う。

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 (exciton) が生成され、エネルギー損失に比例した電流が流れるの、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、

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

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、

$$N_0 = \frac{E_0}{\varepsilon} \tag{2.2}$$

で与えらる。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 $10^{15} \sim 10^{17}$ [個/cm^3] が発生する。このエネルギー ε と

[1]逆バイアス

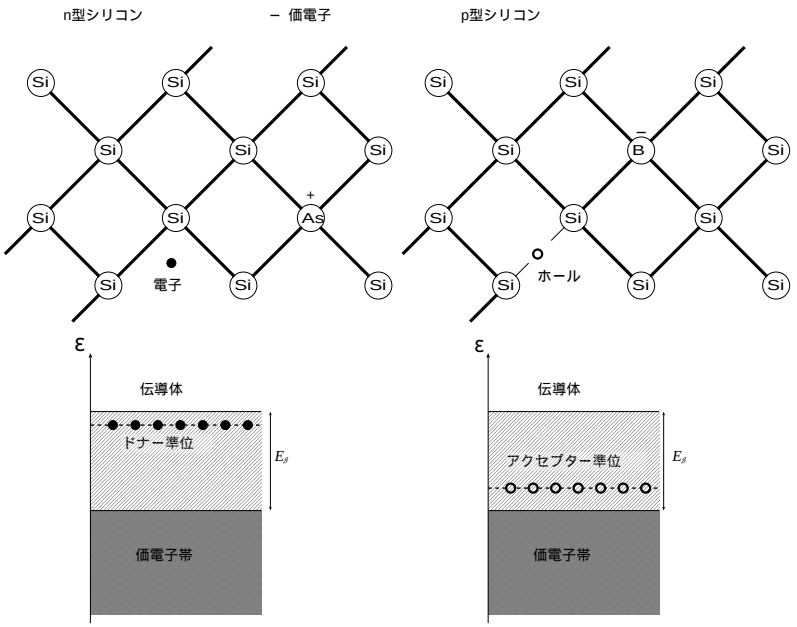


図 2.1: 半導体のエネルギー準位と Si 結晶構造

バンドギャップ E_g の関係は実験的に測定されている。電子・正孔対を発生させるにはバンドギャップの 2 倍以上のエネルギーが必要である。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 接合など表面障壁の形成によりダイオードができるので、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

$$v_e = \mu_e E, v_h = \mu_h E \tag{2.3}$$

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、アクセプタ原子のみの領域ができる。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

[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

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様でに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。

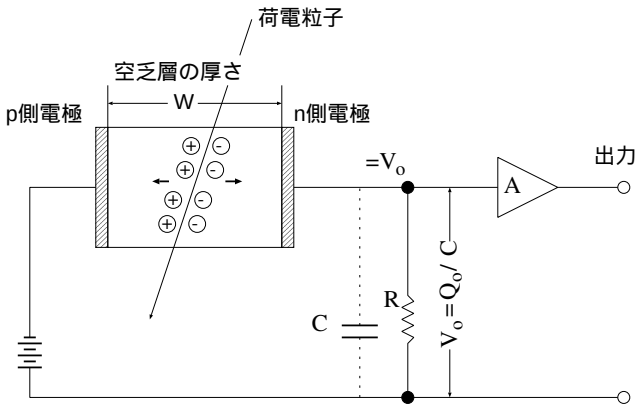


図 2.2: 半導体検出器の回路

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 (homegeneous 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 dpletion 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 $\rho(x)$ が分かっていれば、ポアソン微分方程式に従うので、

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

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。

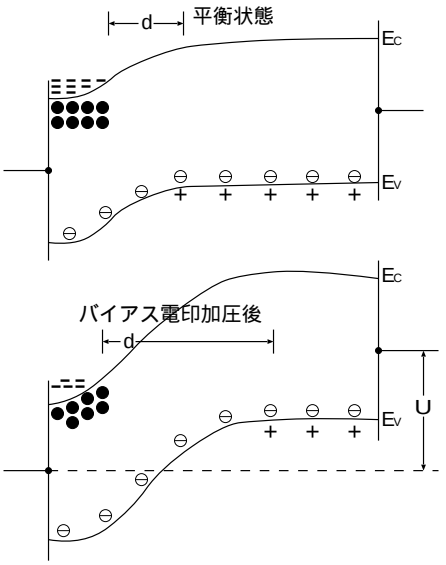


図 2.3: 非対称 p-n 接合でのエネルギ帯構造,d: 空乏層の厚さ,E$_c$:伝導帯の下限値,EE_v:価電子帯の上限値,U:逆バイアス

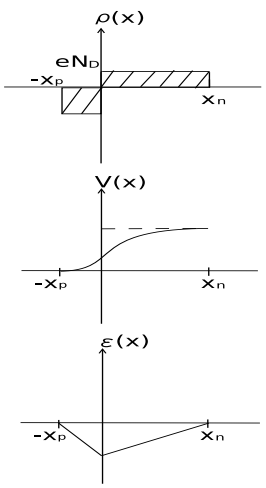


図 2.4: p-n 接合型検出器の不純物濃度

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

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

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出来る。

$$eN_A x_p = eN_D x_n \tag{2.6}$$

今、式 2.4 を一階積分すると

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

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、

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

となる。式 2.8 は電場を意味する。更に第二階積分は

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

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、

$$V_D = \frac{eN_D}{2\varepsilon}x_n^2 + C \tag{2.10}$$

p 側において $x = -x_p$ のとき $V = 0$ と近似でき

$$0 = -\frac{eN_A}{2\varepsilon}x_p^2 + C \tag{2.11}$$

C を消去すると、

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

を得る。式 2.6 を使うと、

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

式 2.13 より、もし片方のドープ量が多い場合、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

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

であり、$N_A \ll N_D$ より式 2.14 は近似でき、

$$d \simeq x_n \simeq \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D} \right) \tag{2.15}$$

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 $1/\rho = eN_D\mu_e$ であるので式 2.15 は、

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

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 ($N_D|llN_A$)、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

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

Germanium

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

ρ、V_0 は [Ωcm]、[V] である。

2.1.2 キャパシタンス (Cppacitance)

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、

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \tag{2.19}$$

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

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

Germanium

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

となる。

2.2 SemiConductor Tracker

InnerDetector は Track の発見と崩壊点、運動量の復元である。InnerDtector 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。したがって、空乏層がわざと広がるようになっており、ダイオードの中のキャリアの無い大きい領域が作られる。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

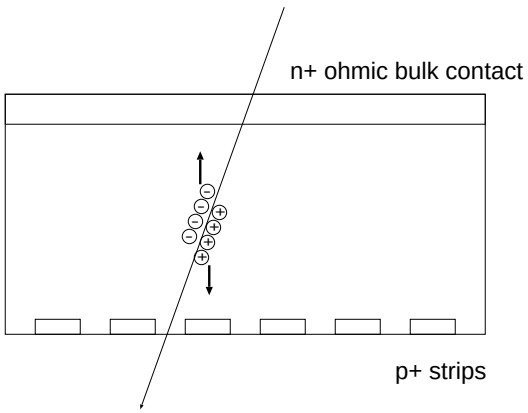


図 2.5: SCT Wafer の原理

アをわける。つまり、電子は陽極に、正孔は陰極にそれぞれ流れる。この課程を図 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、整え、分類される。バイナリー信号はそれからデータ獲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。

本来のシリコン検出器の持つ分解能の能力は 5[μm] 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変換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、読み出し位置とイオン化粒子の通り道の間にごく食わずかなスキ間が生じる。ATLAS ではこの効果を、オフラインのイベント復元の間に集められる。

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 (Moudle) 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。それらはステレお面に対しもう一枚を 40[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[μm] 間隔にストリップが張られる、12[cm]×6[cm] である。

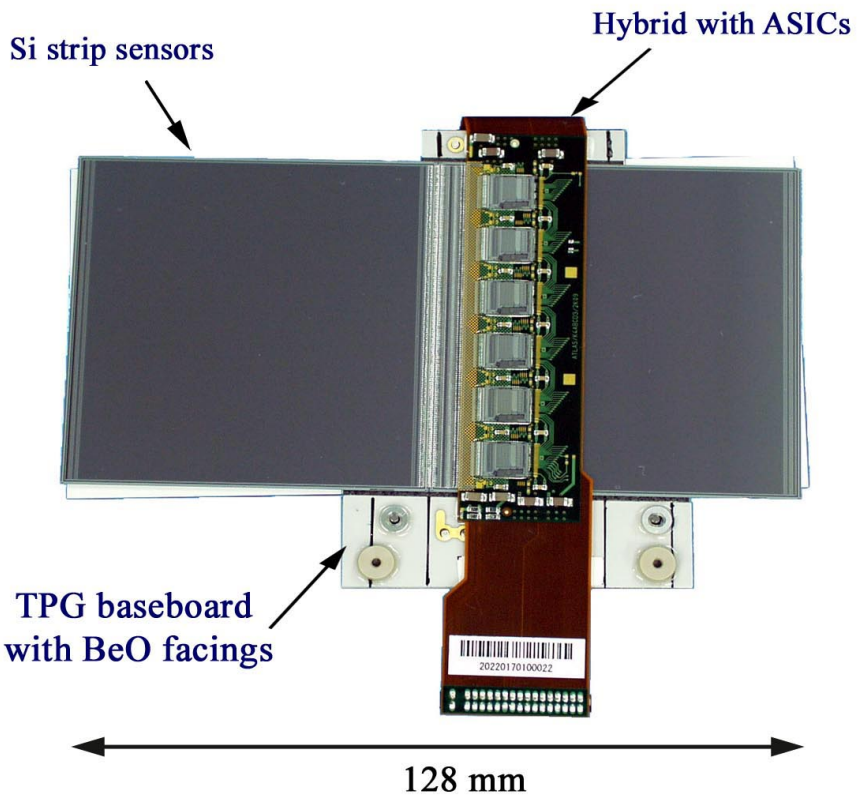


図 2.6: SCT Barrel Module

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° 傾けて設置されてあり、隣接のモジュールとは重なるように設計してある。Barrel SCT の構造に付いて詳細を表 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

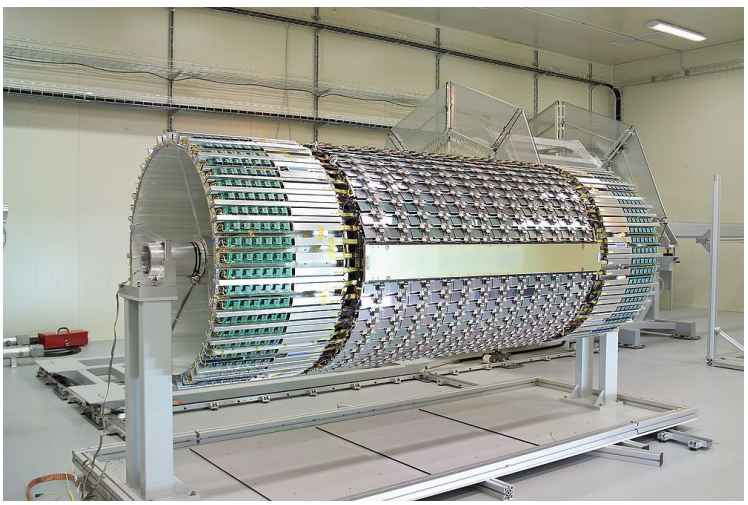


図 2.7: SCT barrel layer

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 (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 Aligment を取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 Aligment 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] のものを見なし測定した。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 highMomentum 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

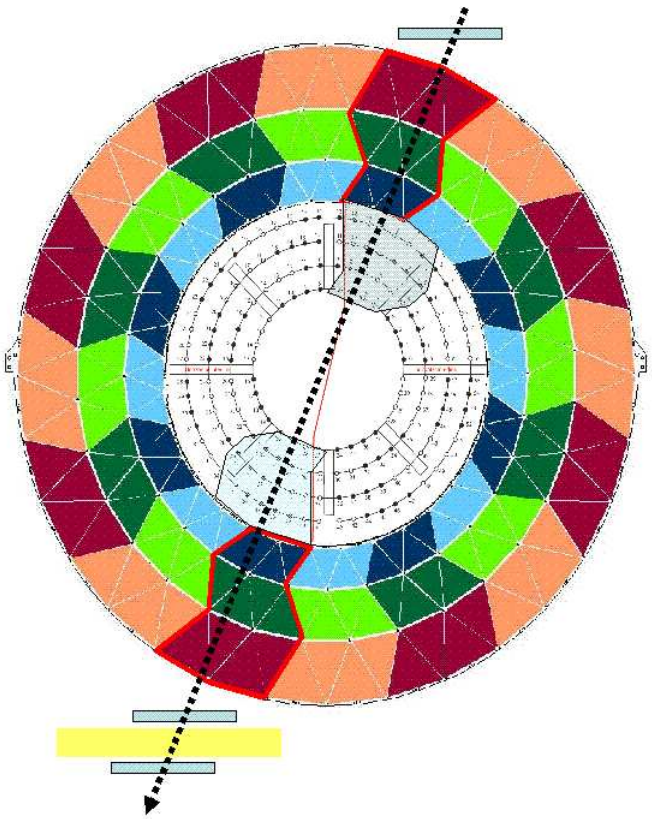


図 3.1: Cosmic Run のレイアウト

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。

[1]Pixel は独自に宇宙線試験を行った

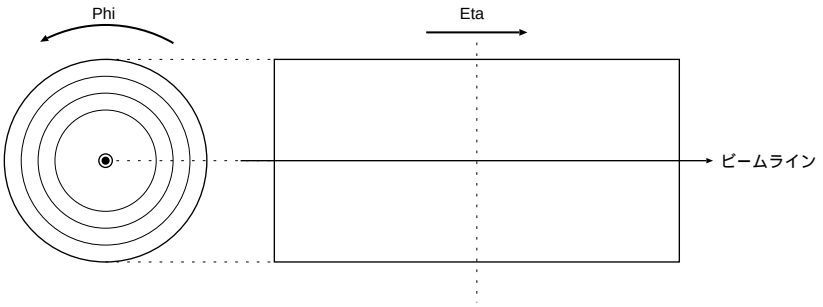


図 3.2: SCT モジュールの概念図

3.1 Cosmic Run

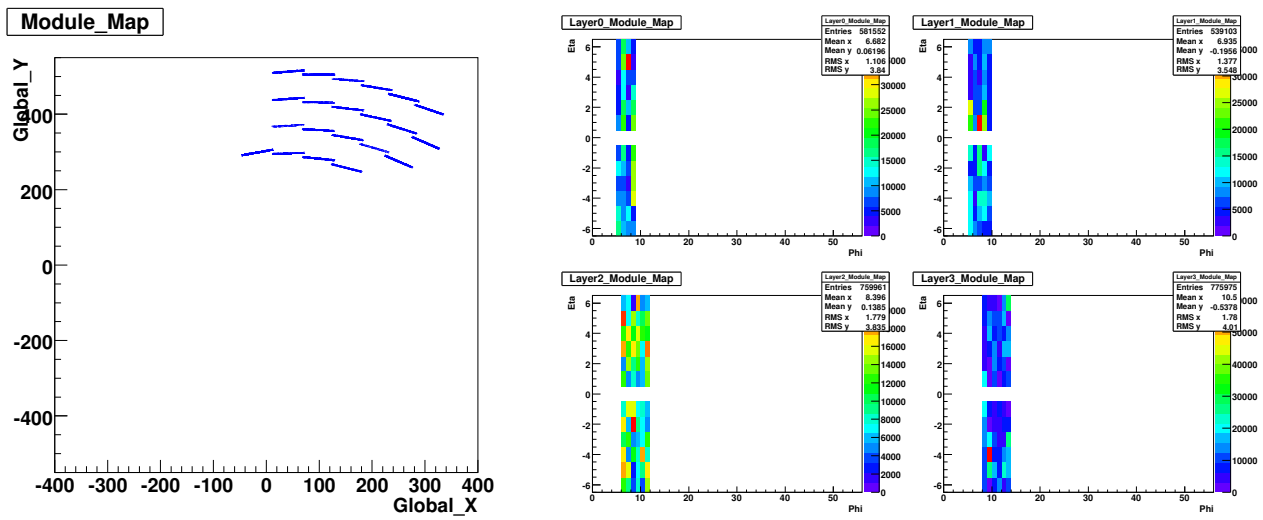
Cosmic Run は本実験で SCT が本来期待されている性能を発揮できるのかを試験運転をいくつかの条件を変え行うことにより確かめた。

3.1.1 SCT Noise threshold scan with TRT off

この実験でははでは SCT だけの noise を threshold を変え測定し、データを得た。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) (b)

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	110123	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 枚のウエファー[3]を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生じる揺らぎは $\sqrt{n}$ と計算すると 140 程度である。

まず Occupancy を求める式は

$$\text{Occupancy} = \frac{\text{hit 数}}{\text{event 数} \times \text{channel 数}} \tag{3.1}$$

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、

$$\text{Occupancy}_M = \frac{\text{hit 数}}{\text{event 数} \times 786} \tag{3.2}$$

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。

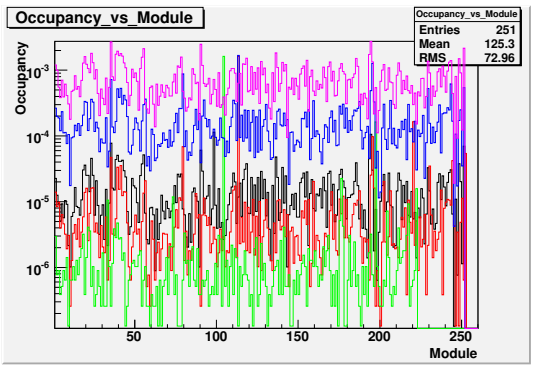


図 3.4: tbin:条件無し

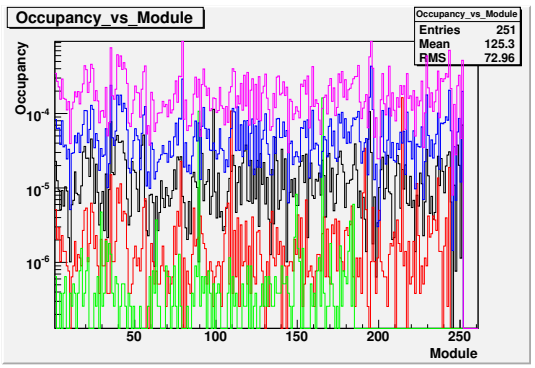


図 3.5: tbin:X1X

図 3.4、3.5[4]であるが、各 Run の色と Occupancy の値を表 3.2 に示す。

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

Equivalent Noise Charge(ENC)

ENC をここで求める。Occupancy は ENC を使って求めることもでき、その式は

[3] 1 つのモジュールは 2 枚のウエファーよりなる

[4] 図の説明にある tbin とは timebin の略であり、データの保存場所の違いを示す。

表 3.2: 各 Run ごとの Occupancy

Run Number	color	Occupancy tbin:条件無し	Occupancy tbin:X1X
2644	Green	9.40622×10^{-6}	2.02554×10^{-6}
2646	Red	1.34571×10^{-5}	3.33309×10^{-6}
2648	Brack	4.26509×10^{-5}	1.51038×10^{-5}
2650	Blue	1.67972×10^{-4}	5.4656×10^{-5}
2651	Purple	7.45559×10^{-4}	2.03414×10^{-4}

$$\text{Occupancy} \propto \exp\left(\frac{1}{2}\frac{th}{\sigma^2}\right) \tag{3.3}$$

で表すことができ、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。表 3.1、3.2 の値と、式 3.3 より、

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

$$\alpha = 1 - erf\left(\frac{\delta}{\sqrt{2}\sigma}\right) \tag{3.4}$$

式 3.4 が求められる。今 $1-\alpha$ がガウス分布に従うので ENC は $\frac{\alpha}{2}$ となり、

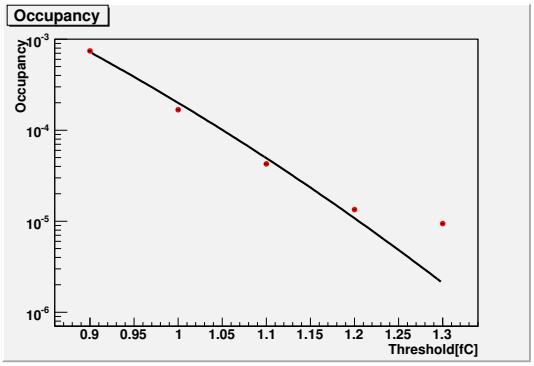
$$Occupancy = \frac{1-erf(\frac{\delta}{\sqrt{2}\sigma})}{2} \tag{3.5}$$

となる。この ref()[5]の中の σ が ENC の値となる。ENC は電子数で表さられる。

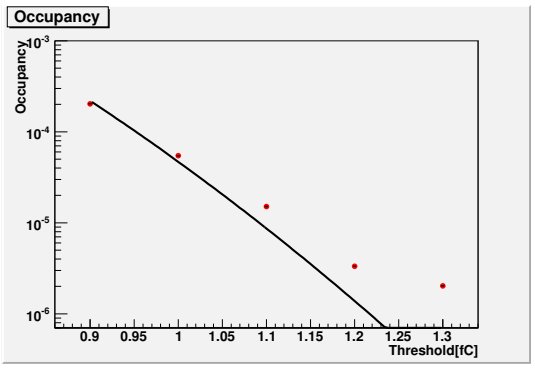
この関数で fit すると、図 3.8 のようになる。図は横軸が threshold、縦軸が Occupancy となり、その分布図に fit したとき ENC が求められる。

fit した結果は表 4.1 に示す。個の結果を見ると SCT の ENC は期待される値 $1500e^-$ に近いといえる。

[5]erf():error function



tbin:条件無し



tbin:X1X

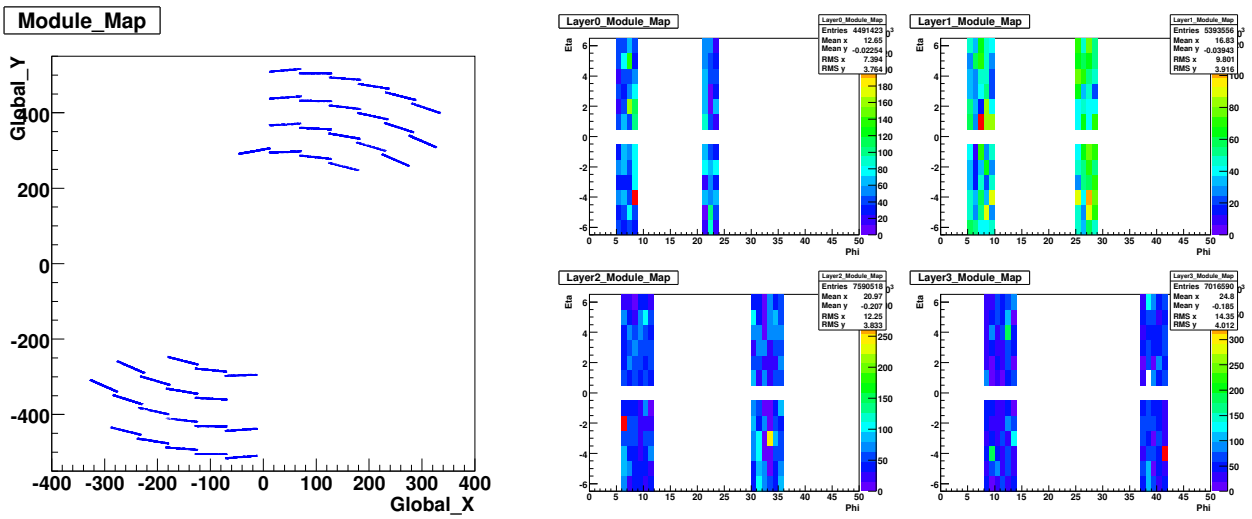
図 3.6: 式 3.4 で fit した図

表 3.3: tbin に対する ENC

tbin	ENC
条件無し	$1.76573 \times 10^3 e^-$
X1X	$1.60009 \times 10^3 e^-$

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 3.7 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。



(a) (b)

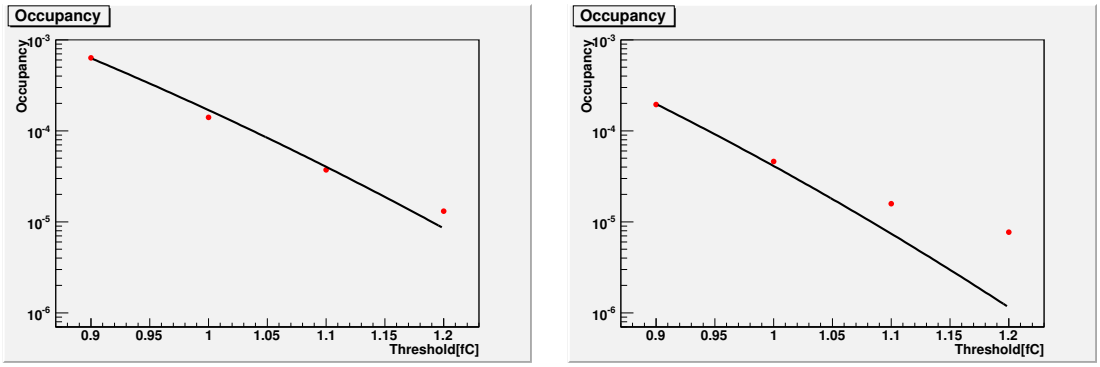
図 3.7: Top and Bottom sector SCT モジュール

この測定の Run を 3.4 に示す。

表 3.4: New SCT Noise threshold scan with TRT off

Run Number	Events	SCT Threshold
3069	25K	0.9[fC]
3070	50K	1.1[fC]
3071	100K	1.2[fC]
3072	232K	1.0[fC]

3.1.1 と同様に、ENC を求めるため、式 3.4 より fit した
fit し、求めた ENC を表 4.2 に示す。



tbin111　　tbinX1X

図 3.8: 式 3.4 で fit した図 2

表 3.5: tbin に対する ENC 2

tbin	ENC
条件無し	$1.74380\times10^{3}\mathrm{e}^{-}$
X1X	$1.58724\times10^{3}\mathrm{e}^{-}$

と求められた。今回の測定結果から 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。

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	50kHz

また同様に、

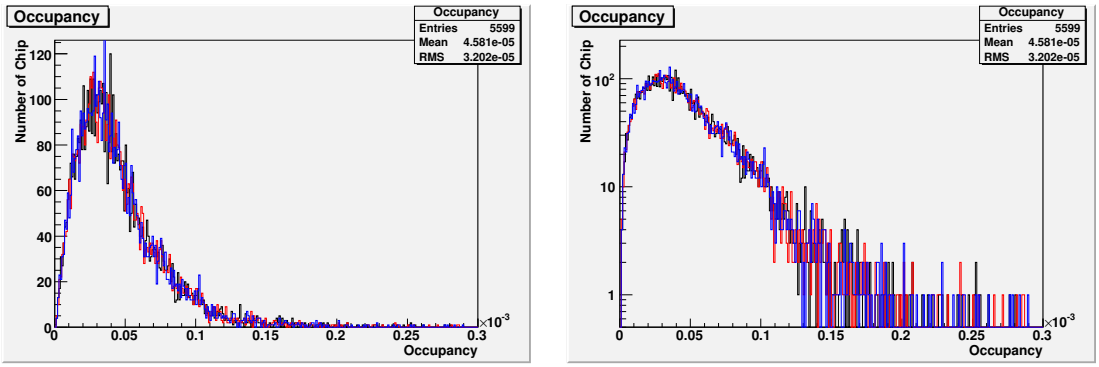
共通の条件として、全ての Run の threshold は 1.0[fC] である。

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、

$$\text{Occupancy}_C = \frac{\text{hit 数}}{\text{event 数} \times 128} \tag{3.6}$$

となる。そのヒストグラムを図 3.9 に示す、横軸が Occupancy、縦軸がチップ数である。



(a) (b)

図 3.9: 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

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。

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。

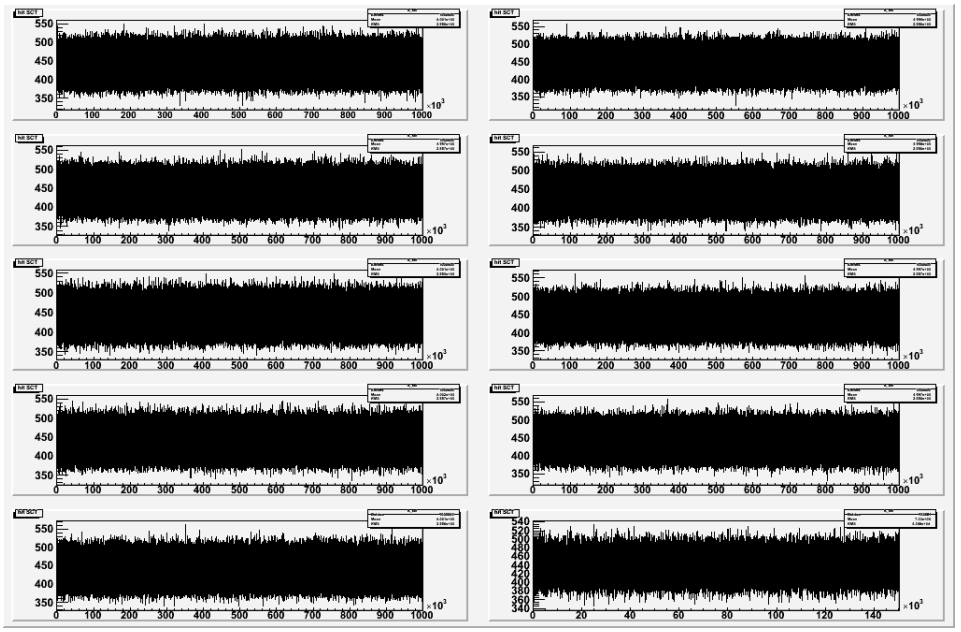


図 3.10: Logn Run at SCT 900K

図 3.10 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 Event Display

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 3.11 に示す。

図 3.11 であるが、左上は InnerDetector を正面、右上は通った粒子の ϕ、η 方向 (このパラメータについては後に説明する)、下は InnerDetector を横側から見た図である。

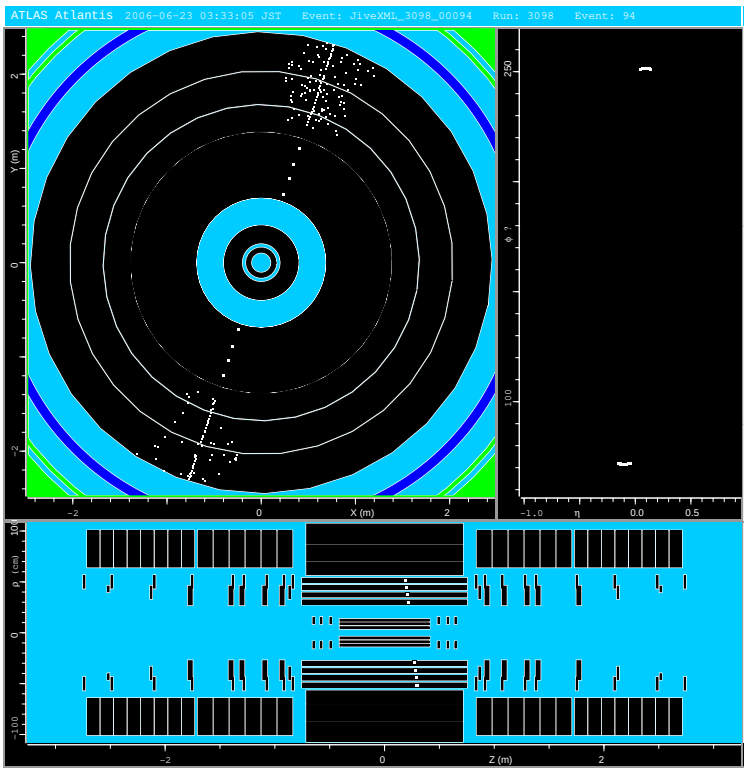


図 3.11: Atlantis: event display

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。Trigger と共に Track を見分けるときに使えるよう、研究されている。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 枚のウエファーを 40[μrad] 傾けて固定してある。この 2 枚ウエファーのストリップ

に信号がきたとき、その重なる点にスペースポイントを置く。これにより Track の分別に役立てる。

ここで、Cosmic Run でのイベントでスペースポイントを見る。

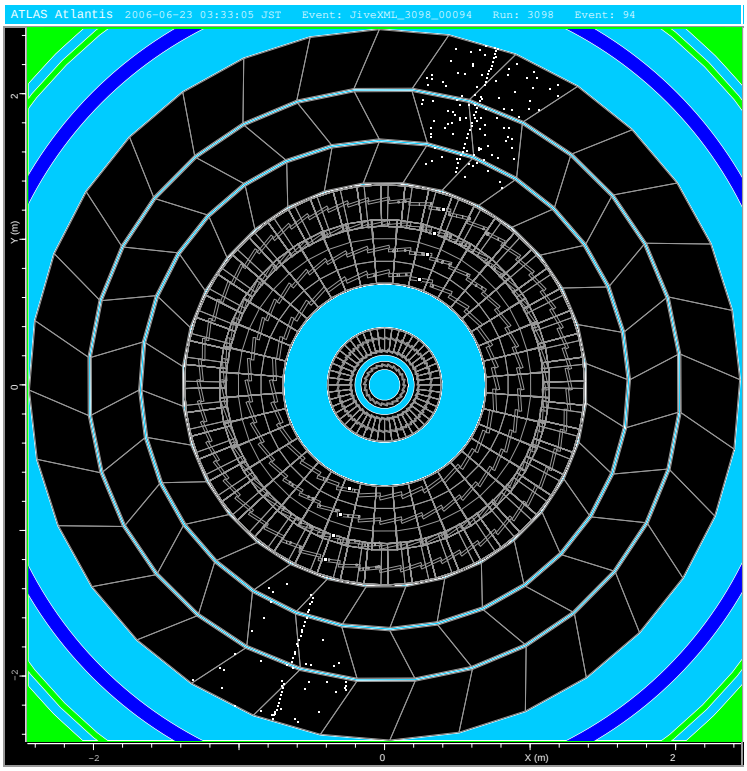


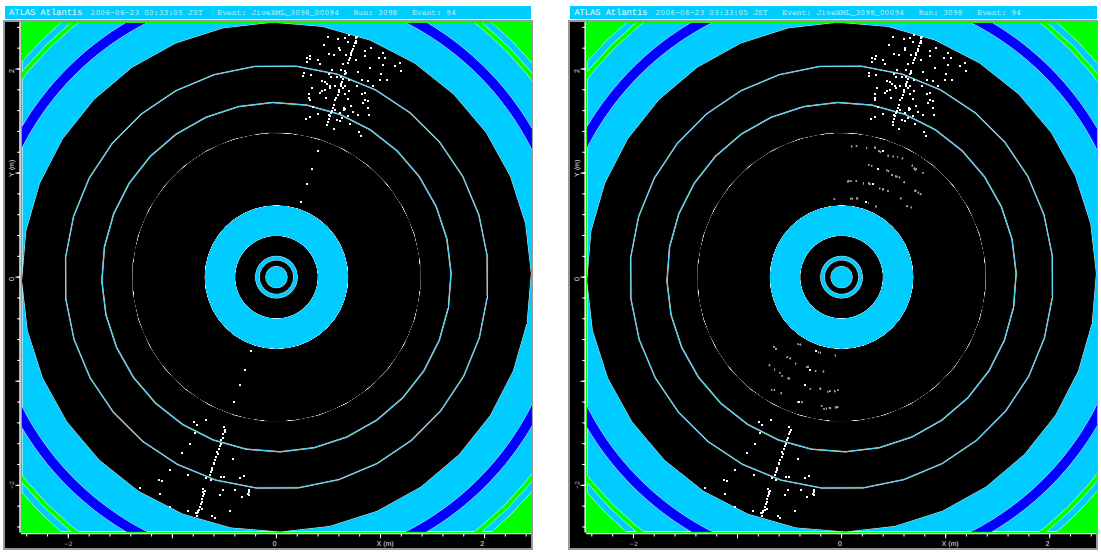
図 3.12: Space Point

図 3.12 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、

この図 3.13 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定している。これにより Track を決定したものを、図 3.14 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ことにより描かれる。もちろん、全



(a) (b)

図 3.13: Space Point2

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[6]。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 3.15 に横から見た状態汚示す。

ここで注目することは、TRT にはヒット情報が無いことである。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 次元の検出器とう強みを持っている。

[6]このイベントでは 8 個以上ある

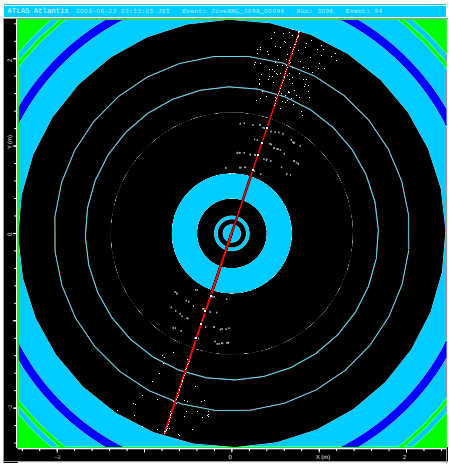


図 3.14: Track from Space Point

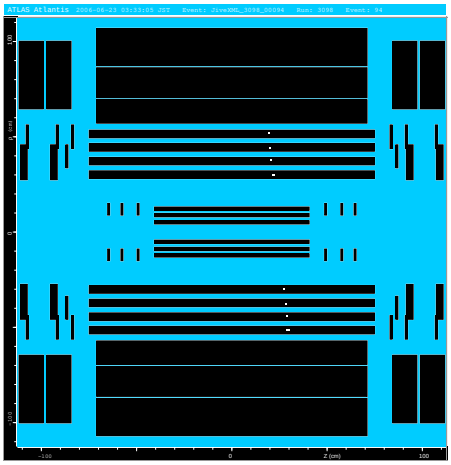


図 3.15: Space Point

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 sector252 枚のモジュールを使用した測定の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 equivarent 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
X1X	$1.76573\times10^{3}e^{-}$
111	$1.60009\times10^{3}e^{-}$

これより、ENC は 1500∼2000 の間に納まり、評価出来る結果である。

- Top 及び Bottom 両 sector468 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	$1.74380\times10^{3}e^{-}$
X1X	$1.58724\times10^{3}e^{-}$

sector での ENC も評価できる結果である。

- Trigger Rate の違いによる Occupancy への影響は図 3.9 より無かったと評価できる。

- Cosmic Run 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、全く死んでいるモジュールが無かった。

今後の課題としては、

- 現在 InnerDetctor 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 が走り出す、そこでの正確な測定をするため、測定器の Aligment も早急の課題である。

付 録A　理科教育における半導体検出器

A.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。

A.2　教材としての半導体

A.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)

の謳い文句があるように、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。

A.3　授業への導入

この教材 p.a. を使い、京都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。

A.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無く、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。

A.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。

A.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、同じ割合で厚さを変化させないで測定を行う点に注目できる。一定で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。これは敷居があるため、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賀できない寒天とは違いどの割合で何度も測定出来る。

A.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かの概念を掴んでいるようだった。

A.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。それも教師としての約割りや、教科教育の責任を果たす上大切ではある、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、美馬覚くん、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な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行動するにあたり、無茶を通さ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り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 回の皆様には 2 年間の学生生活を

最後になりましたが、指導教官の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。学部生のころ化の 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] Techiques 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 H$\ddot{a}$rtel: 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] http://www.rika.com/