

ATLAS実験SCTシリコン飛跡検出器での精密飛跡再構成

目黒立真

金信弘,原和彦(筑波大 数理),池上陽一,海野
義信,高力孝,寺田進(高I研),
中野逸夫(岡山大),高嶋隆一(京都教育大),花
垣和則(阪大),他アトラスSCTグループ

Outline

導入

LHC加速器・ATLAS検出器
SCT飛跡検出器

目的とモチベーション

SCT検出器の形状測定試験結果

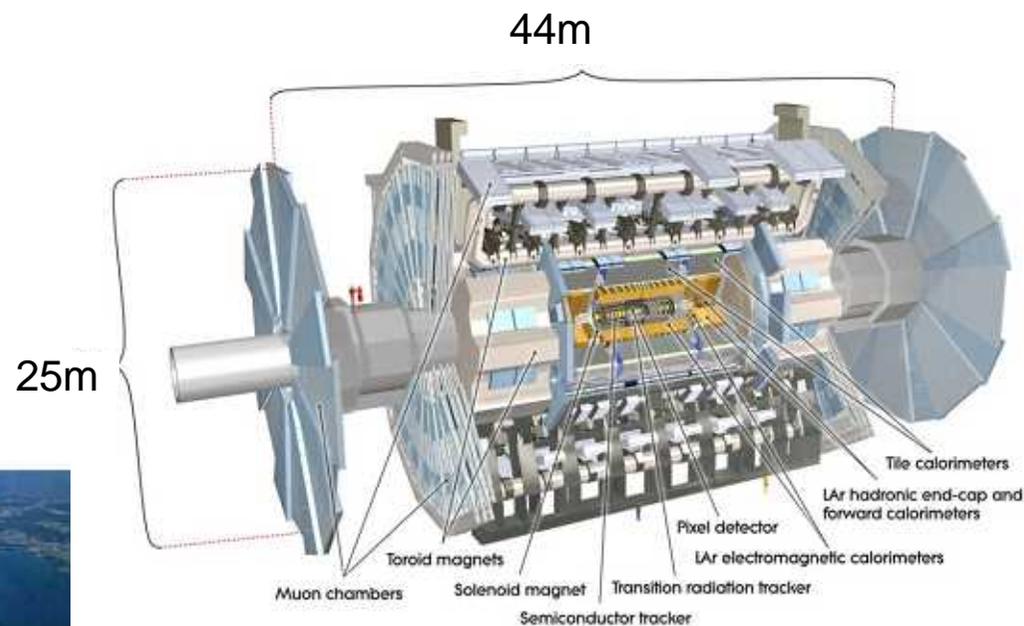
シミュレーションセットアップ

結果

残差分布
トラッキングパラメータ分解能
 Z^0 質量再構成

LHC加速器・ATLAS実験

重心系エネルギー 14TeV
瞬間ルミノシティ $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



Higgs boson の発見
Top quark , heavy boson の精密測定
新しい物理の探索

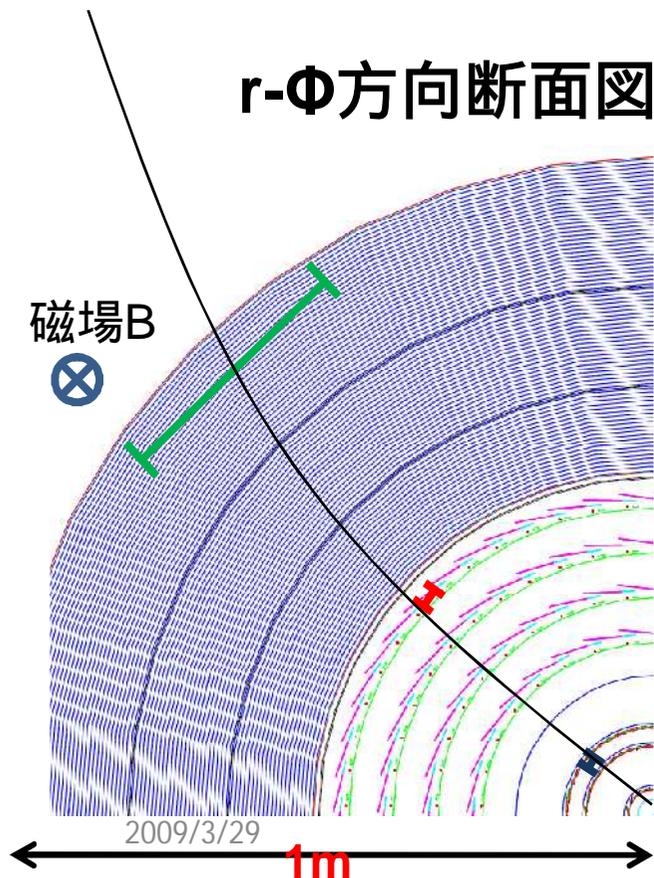
内部飛跡検出器

磁場(2T)中で荷電粒子の飛跡を測定し、
粒子の運動量や生成座標の再構成を行う

$$P_T [\text{GeV}/c] = 0.3\rho B [\text{Tm}] \quad (\rho: \text{曲率半径}, B: \text{磁束密度})$$

飛跡情報は**W/Zの再構成**、**b-jetの同定**、**H→4lの探索**等で重要!!

r-Φ方向断面図

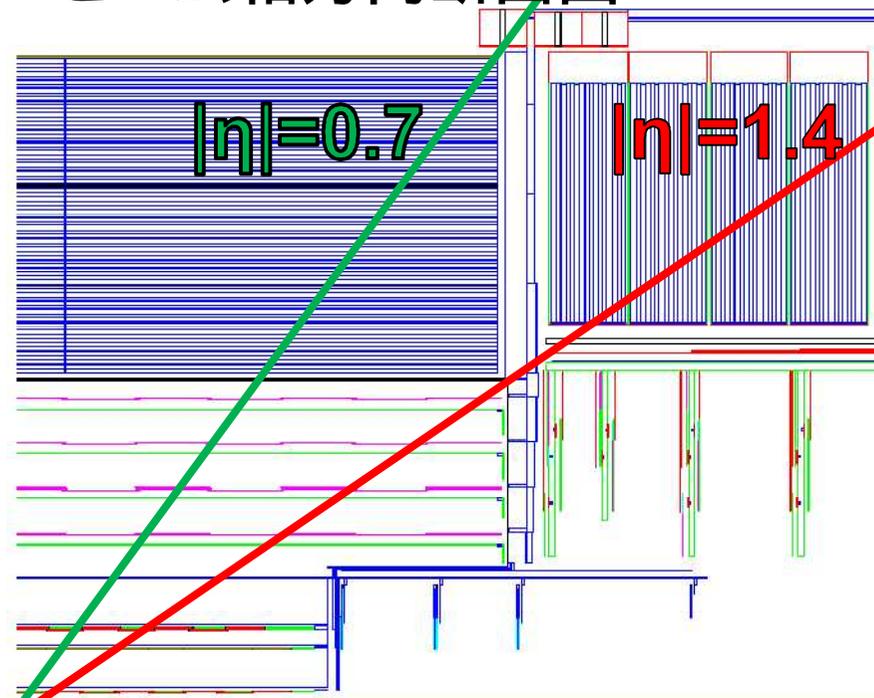


ビーム軸方向断面図

TRT
(36層, $\sigma=170\mu\text{m}$)

SCT
(4層, $\sigma=16\mu\text{m}$)

Pixel
(3層, $\sigma=14\mu\text{m}$)



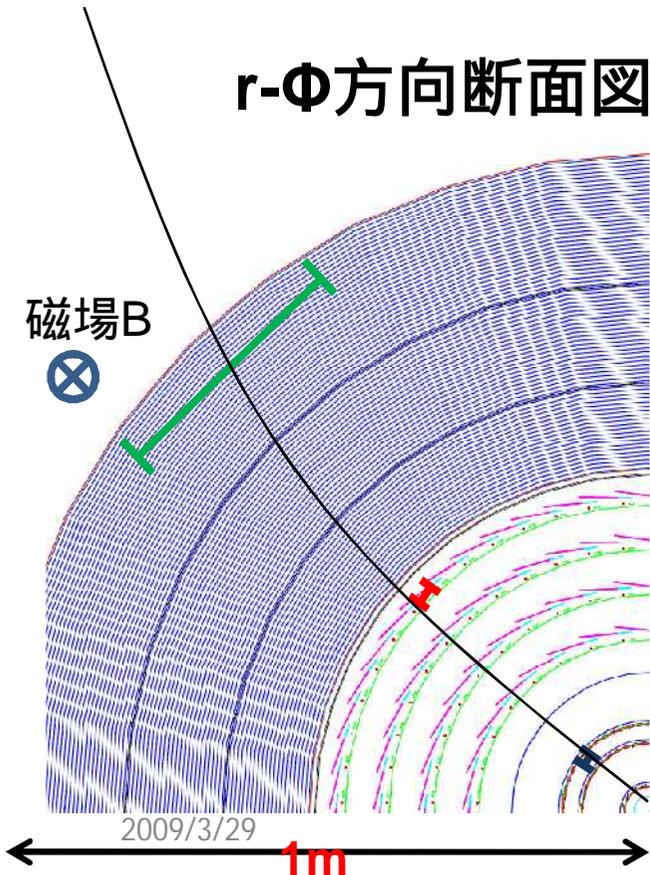
内部飛跡検出器

磁場(2T)中で荷電粒子の飛跡を測定し、
粒子の運動量や生成座標の再構成を行う

$$P_T [\text{GeV}/c] = 0.3\rho B [\text{Tm}] \quad (\rho: \text{曲率半径}, B: \text{磁束密度})$$

飛跡情報は**W/Zの再構成**、**b-jetの同定**、**H→4lの探索**等で重要!!

r-Φ方向断面図



ビーム軸方向断面図



TRT
(36層, $\sigma=170\mu\text{m}$)

SCT
(4層, $\sigma=16\mu\text{m}$)

Pixel
(3層, $\sigma=14\mu\text{m}$)

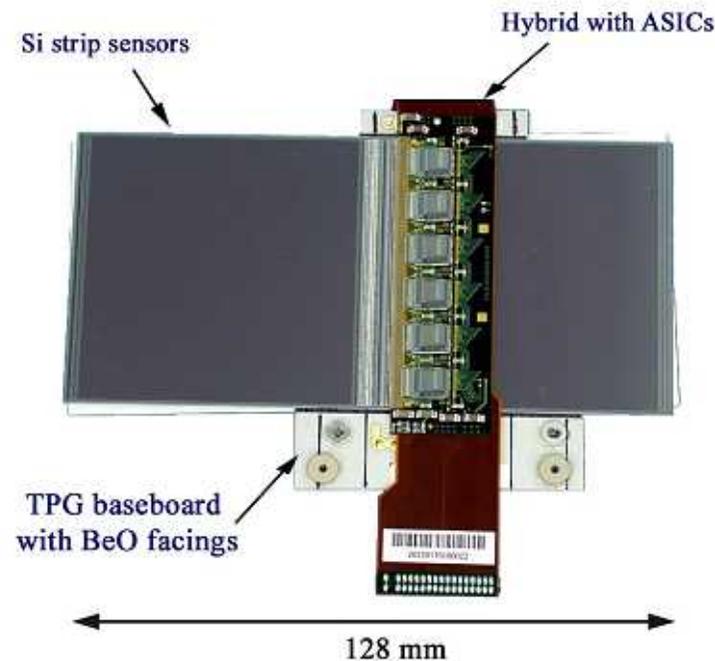
Semi-Conductor Tracker(SCT)

飛跡検出器と歪み

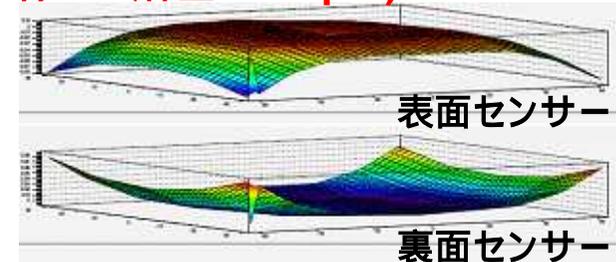
形状測定: 25

シリコンマイクロストリップ検出器

- ・表裏のセンサーにステレオ角(40mrad)
- ・ストリップ(80 μ m間隔)の交点から粒子の通過位置の2次元情報を得る
- ・位置分解能: 16 μ m(r- Φ 方向)、800 μ m(ビーム軸方向)

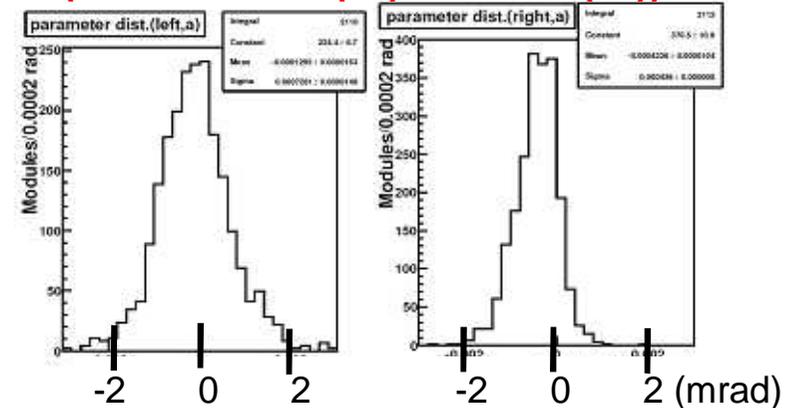


1, センサーの湾曲(センサー間のばらつき小) (終端での落差: ~80 μ m)



2, ベースボードの湾曲による

—— 中心軸での折れ曲がり角度
(rms:0.7mrad(左),0.4mrad(右))



飛跡再構成においてセンサーの歪みは考慮(補正)されていないため、歪みは飛跡再構成精度を悪化させ、物理結果に影響を与える可能性がある。

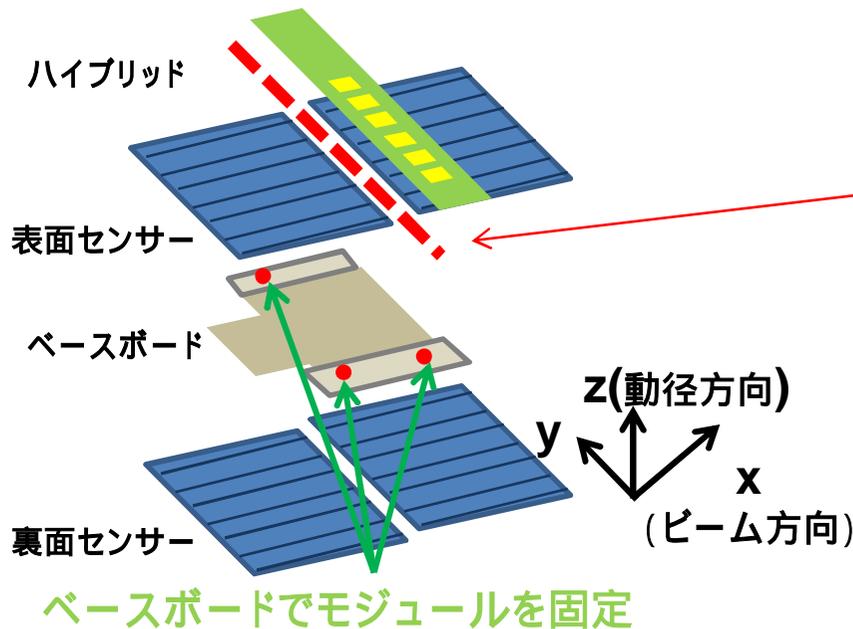
Semi-Conductor Tracker(SCT)

飛跡検出器と歪み

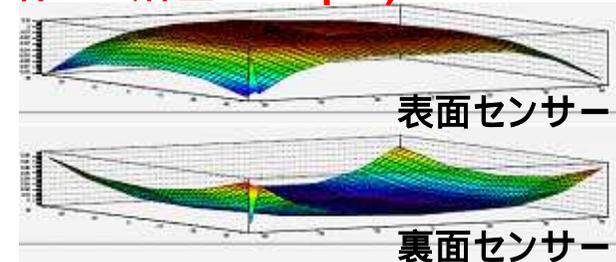
形状測定: 25

シリコンマイクロストリップ検出器

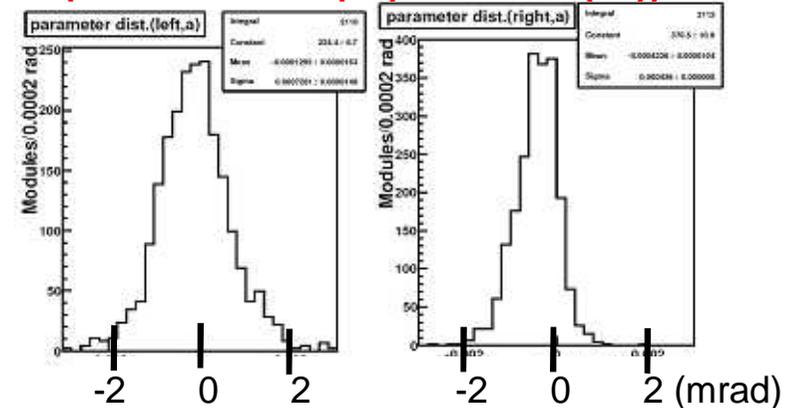
- ・表裏のセンサーにステレオ角(40mrad)
- ・ストリップ(80 μ m間隔)の交点から粒子の通過位置の2次元情報を得る
- ・位置分解能: 16 μ m(r- Φ 方向)、800 μ m(ビーム軸方向)



1, センサーの湾曲(センサー間のばらつき小)
(終端での落差: ~80 μ m)



2, ベースボードの湾曲による
中心軸での折れ曲がり角度
(rms:0.7mrad(左),0.4mrad(右))



飛跡再構成においてセンサーの歪みは考慮(補正)されていないため、歪みは飛跡再構成精度を悪化させ、物理結果に影響を与える可能性がある。

目的と方法

センサーの歪みは飛跡再構成の精度を悪化させ、物理結果に影響を与える可能性がある。

歪みによるトラッキングパラメータ分解能の悪化を評価する。
歪みの補正が必要かどうかを検討する。

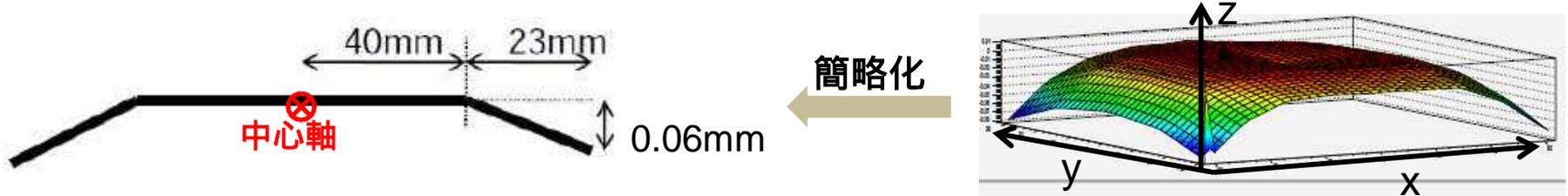
本研究においては

SCT検出器ジオメトリーを変更し、
平らなままのセンサーでシミュレーションしたデータセットと
歪みを持たせたセンサーでシミュレーションしたデータセットを作成。
両者を比較する。

1. ミュー粒子シングルトラック事象、
2. $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事象 について行った。

ジオメトリセットアップ

1, センサーの湾曲は簡略化し、以下の図のような形状にした(表面センサー、x-z平面図)。

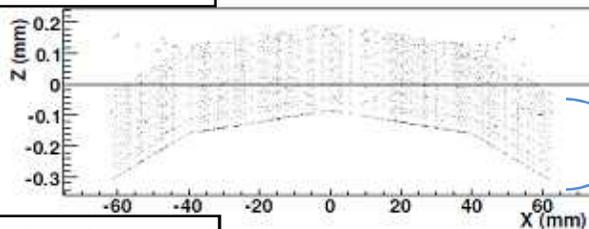


2, ベースボードの湾曲による中心軸での折れ曲がり角は測定結果の分布を用いた。

モジュール形状が正しく変更されていることの確認

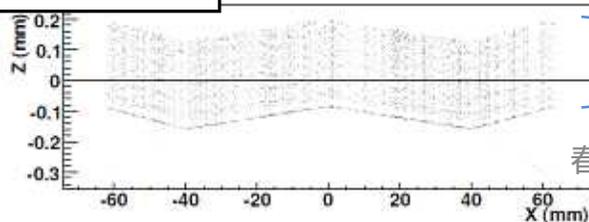
Fig. 検出器シミュレーションにおいて
有感領域でエネルギー損失があった点の
座標からセンサーの形を描画した(x-z平面図)

表面センサー



約300 μ m
センサー厚

裏面センサー



約300 μ m
センサー厚

2009/3.

春季物理学会@立教大学

比較に使用したトラック

検出器の性能を見るためには、多重散乱によるトラックパラメータ分解能の悪化(σ_{MS})が検出器の本質的な分解能(σ_{int})に比べ十分に小さくなる運動量で見ることが必要である。

$$P_T \times \sigma(1/P_T) = \sqrt{P_T^2 \times \sigma_{int}^2 + \sigma_{MS}^2}$$

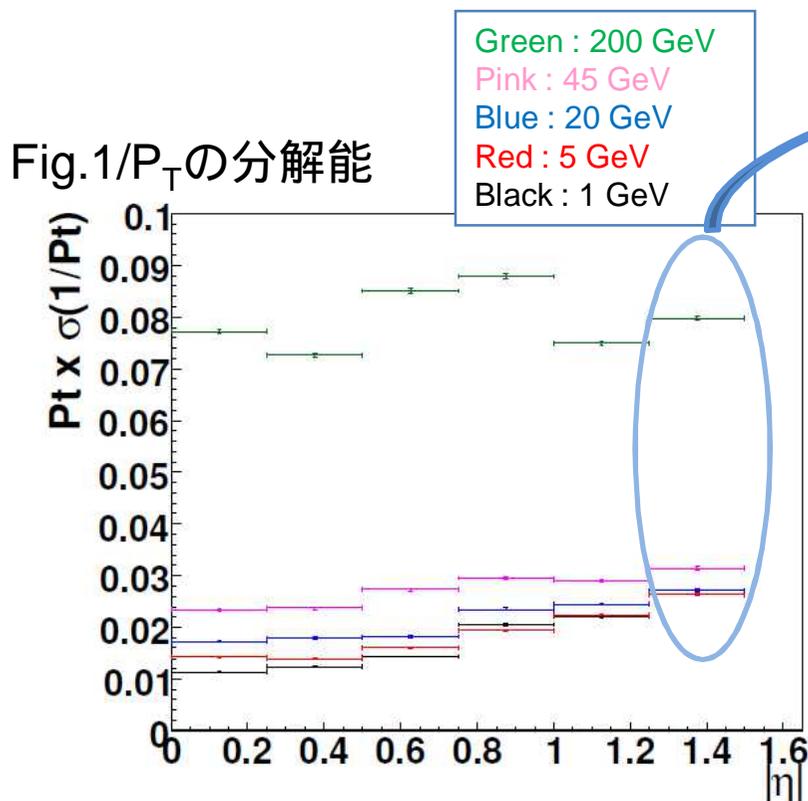
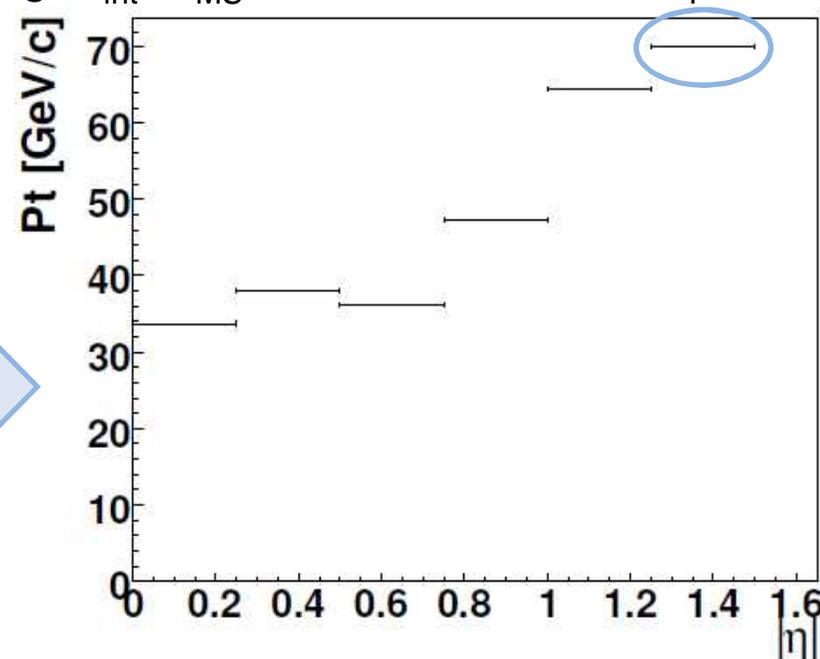


Fig. $\sigma_{int} = \sigma_{MS}$ となる横方向運動量 P_T

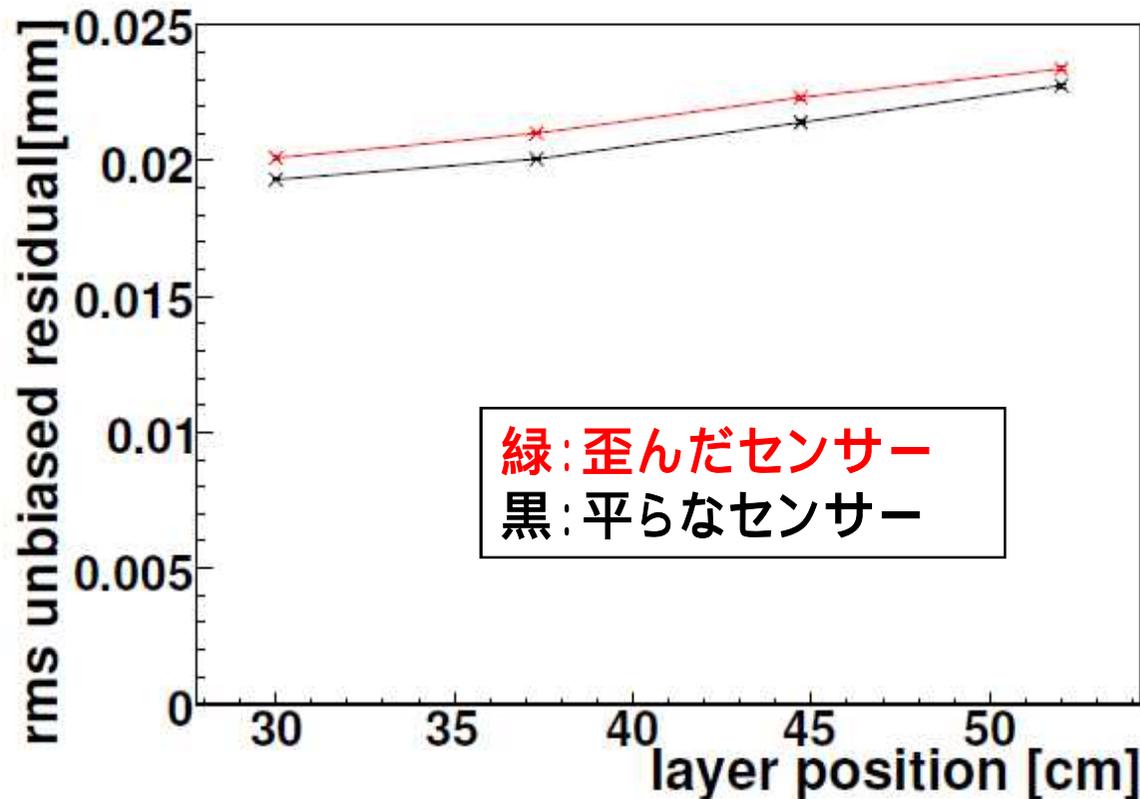


高運動量ミュオン粒子ならば多重散乱の影響は十分小さい($\sigma_{int} > 3 \sigma_{MS}$ @ 200 GeV/c)
200 GeV/cのミュオン粒子を用いて比較を行う。

残差分布への影響

モジュールの位置分解能の指標として、残差分布の幅(標準偏差)を見る。

残差: 対象とするレイヤーのヒットポイントを除いてトラックを再フィットし、得られたトラックの対象とするレイヤー上での位置と実際に信号が観測されたストリップとのずれ



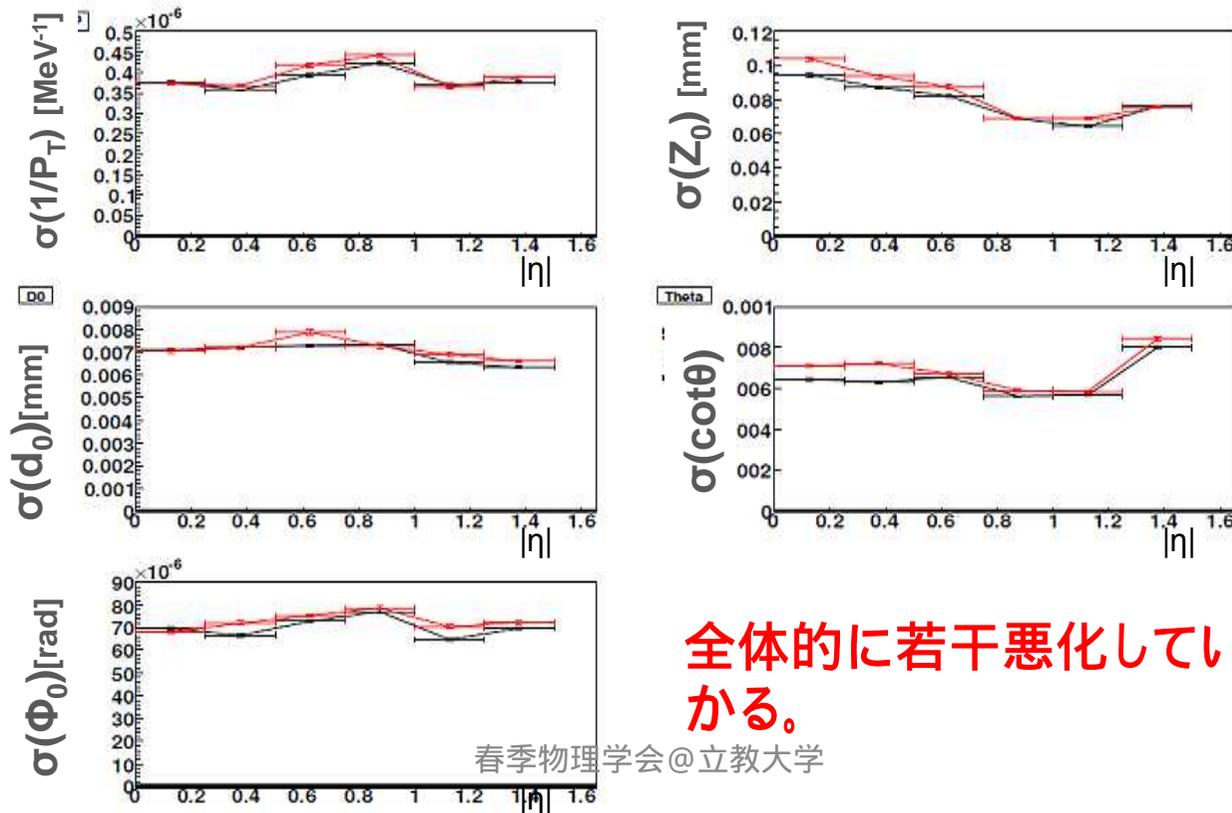
モジュールの歪みにより、すべてのLayerにおいて残差分布の幅に2.7%(Layer 3)から4.7%(Layer 1)の悪化が見られる。

トラッキングパラメータ分解能への影響 (@200GeV)

トラッキングパラメータ:再構成されたトラックの近地点(Perigee)における
 横方向運動量($1/P_T$),
 粒子運動方向(動径方向: Φ_0 ,ビーム軸方向: θ),
 インパクトパラメータ(動径方向: d_0 ,ビーム軸方向: z_0)

トラッキングパラメータ分解能の定義:

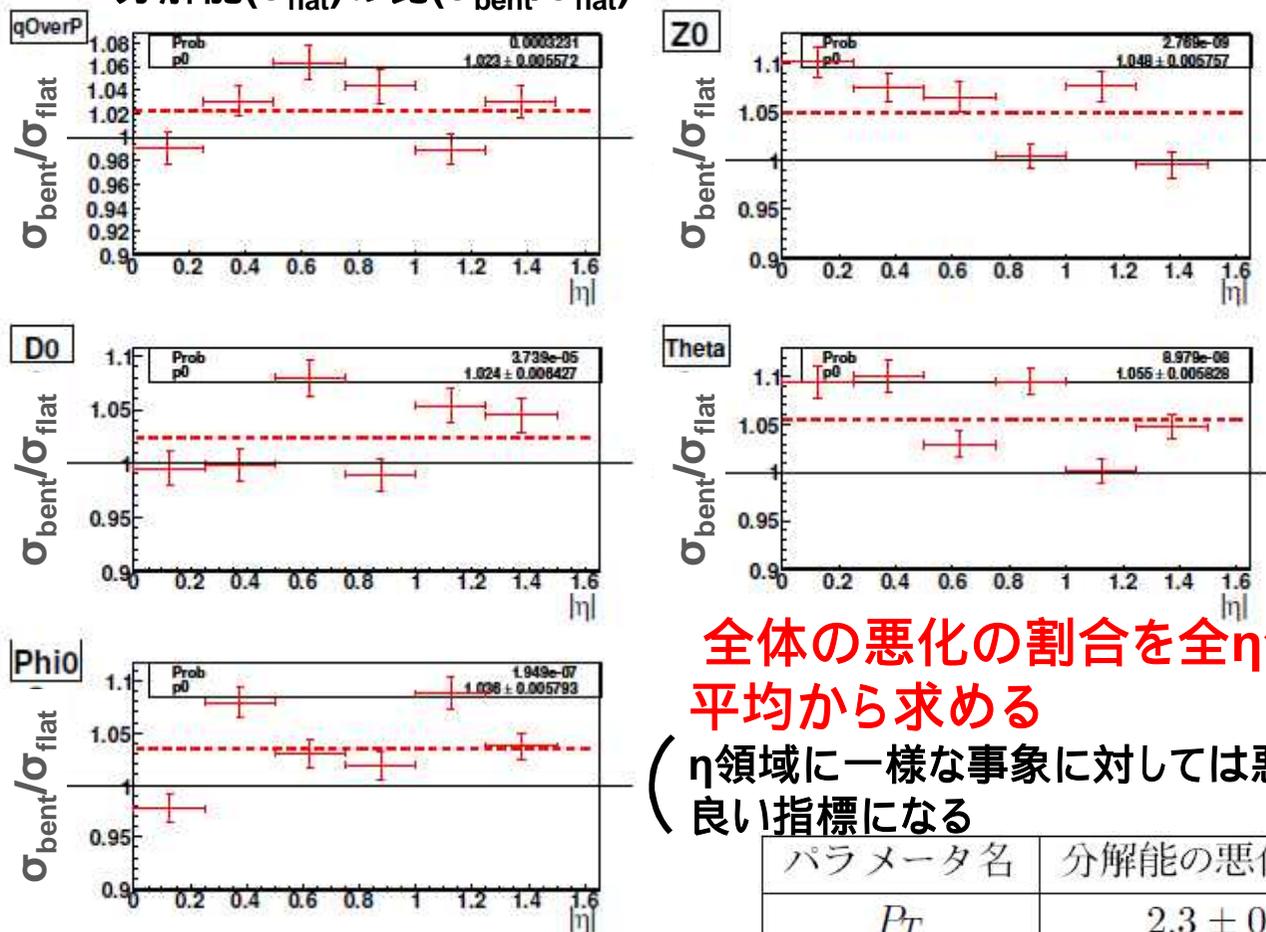
トラッキングパラメータの測定値(P_{meas})からシミュレーションで生成した真の値(P_{true})を引いた値($\Delta P = P_{meas} - P_{true}$)をガウス分布でフィットした際の幅(標準偏差)



全体的に若干悪化していることが分かる。

トラッキングパラメータ分解能の悪化の割合

Fig. 歪みを持たせたセンサーでの分解能(σ_{bent})と平らなセンサーでの分解能(σ_{flat})の比($\sigma_{bent}/\sigma_{flat}$)



全体の悪化の割合を全 η 領域の平均から求める

(η 領域に一樣な事象に対しては悪化の割合を示す) 良い指標になる

パラメータ名	分解能の悪化の割合 (%)
P_T	2.3 ± 0.6(stat)
z_0	4.8 ± 0.6(stat)
d_0	2.4 ± 0.6(stat)
θ	5.5 ± 0.6(stat)
ϕ_0	3.6 ± 0.6(stat)

Z⁰粒子の質量再構成

イベントジェネレータ(Pythia)でZ⁰→μ⁺μ⁻を生成
240,000事象(0.12fb⁻¹程度に相当)ずつ

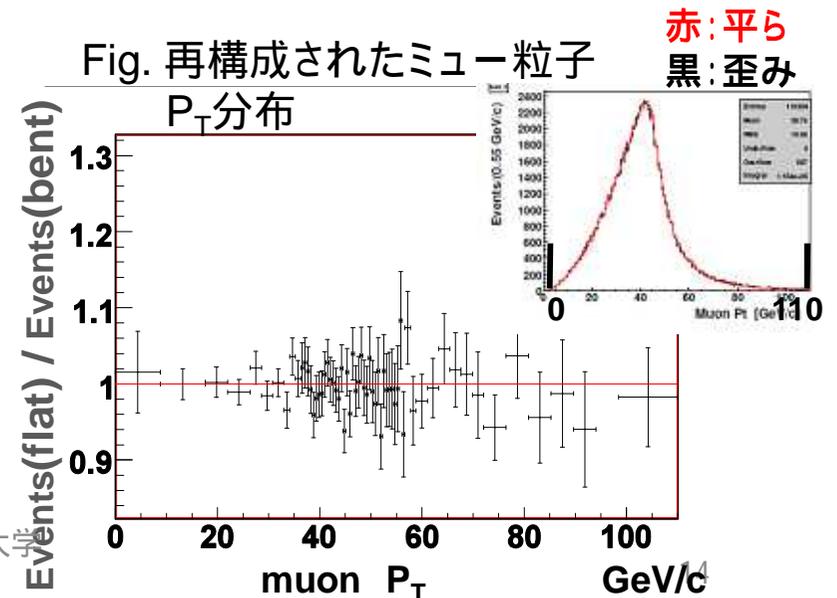
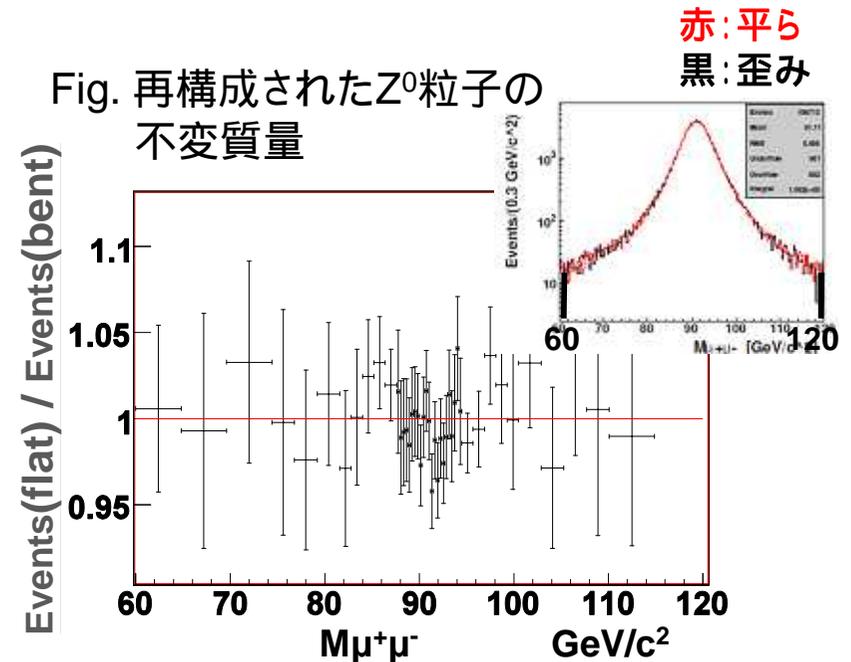
Breit-wignerとガウス分布の畳み込み関数で
フィット
(Breit-wigner幅を2.49GeVに固定,
Breit-wigner最頻値,規格化定数,gaus幅をフ
リーパラメータとした)

パラメータ名	平らなセンサー (GeV/c ²)	歪んだセンサー (GeV/c ²)
<i>Breit - Wigner Mean</i>	91.1472 ± 0.0110	91.1418 ± 0.0112
<i>Gaussian Sigma</i>	2.3115 ± 0.0132	2.3597 ± 0.0133

フィットの結果、再構成されたZ⁰粒子
の質量は統計の範囲内で一致。
違いは見られない。

2009/3/29

春季物理学会@立教大学



結論

- SCTセンサーに平均100 μm 、最大200 μm の歪みがある。
- 歪みはトラッキングパラメータ分解能を以下のように悪化させる。
 - $P_T : 2.3 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 1.3(\text{syst}) \quad [\%]$
 - $z_0 : 4.8 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 1.2(\text{syst}) \quad [\%]$
 - $d_0 : 2.4 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 1.2(\text{syst}) \quad [\%]$
 - $\theta : 5.5 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst}) \quad [\%]$
 - $\Phi_0 : 3.6 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 1.0(\text{syst}) \quad [\%]$
- $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 事象をシミュレーションにより生成し歪んだセンサーを用いたシミュレーションの結果と平らなセンサーを用いたシミュレーションの結果を比較し、 Z^0 粒子の不変質量再構成において、結果は統計の範囲内で一致した。
- MSの効果が無視でき、数パーセントのトラックパラメータの悪化が問題となる精密測定でなければ、モジュール歪みに起因する誤差は無視出来る。

backup

影響の見積り

ヒットポイント

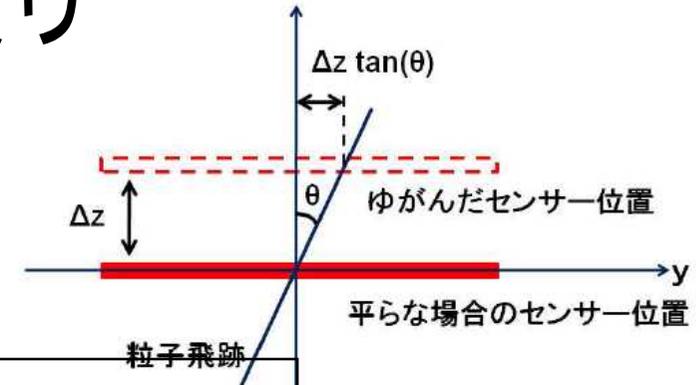
歪みに比例した大きさに**ヒットポイントがシフト**
 →飛跡再構成に影響

シフトの大きさは入射角度、歪みの大きさのみに依存

$$\Delta y = d(x) \tan(\theta_{zy}) \quad \leftarrow 11\text{度程度(Tilt角によるもの)}$$

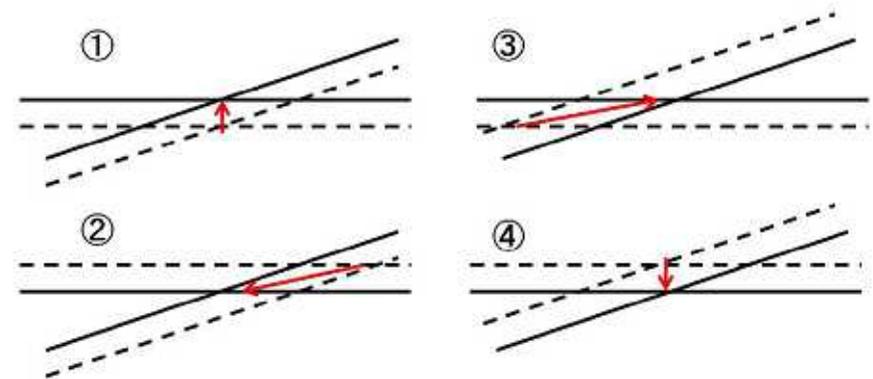
$$\Delta x = d(x) \tan(\theta_{zx}) \quad \leftarrow \text{モジュールの位置分解能}(800\mu\text{m})\text{に比べ小さい}$$

(具体的な大きさの例) $\Delta z=80\mu\text{m}$ では $\Delta y=16\mu\text{m}$



スペースポイント

ヒットポイントのシフトに伴い、ヒットのあった
 ストリップの交点から計算される**スペースポイントもシフトする**



表面裏面のセンサーが共に $\Delta z > 0$ の場合():

$$\Delta y = 16\mu\text{m}, \Delta x = 0\mu\text{m}$$

表面のセンサーが $\Delta z > 0$ 、裏面のセンサーが $\Delta z < 0$ の場合():

$$\Delta y = 16\mu\text{m}, \Delta x = 0\mu\text{m}$$

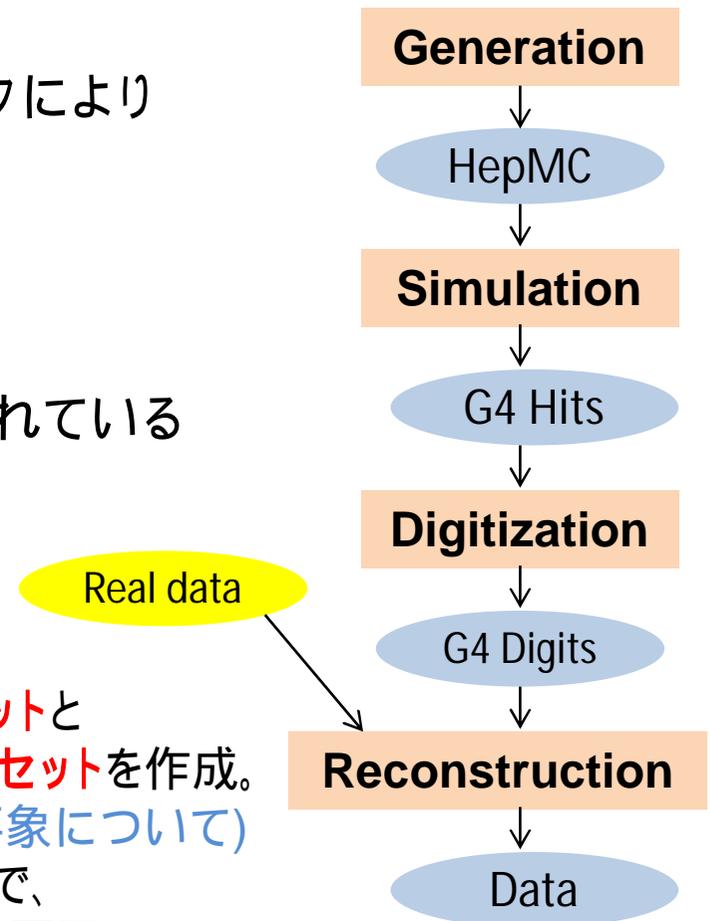
という影響が現れる

シミュレーション方法

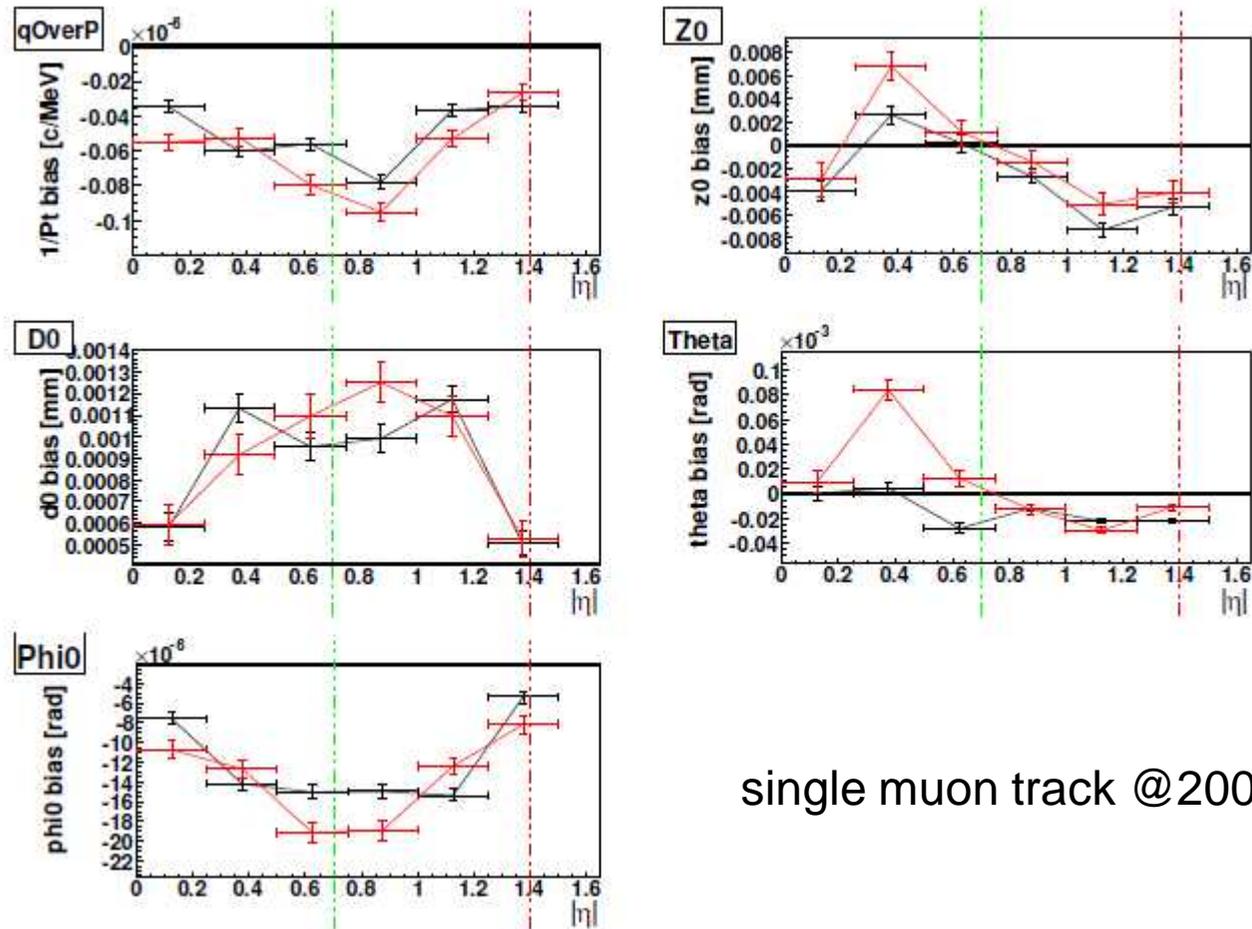
ATLAS実験ではATHENAと呼ばれるフレームワークにより
イベントシジェネレーション(Generation)
検出器シミュレーション(Simulation)
検出器応答シミュレーション(Digitization)
リコンストラクション(Reconstruction) 等
シミュレーションから解析までを行うツールが提供されている

本研究においては

SimulationにおけるSCT検出器ジオメトリーを変更し、
平らなままのセンサーでシミュレーションしたデータセットと
歪みを持たせたセンサーでシミュレーションしたデータセットを作成。
(1、ミュー粒子シングルトラック事象、2、 $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事象について)
Digitization、Reconstructionには変更を加えないことで、
ゆがみによるヒットポイントのシフトを補正しない状況を再現し、
両者を比較した。



トラッキングパラメータのbias



single muon track @200GeV/c

位置分解能の算出

図 2.10 の様な座標系を考え、粒子はセンサー上を一様の確率で通過するとする。図 2.10 の赤線で表されたストリップにヒット情報を残した時の、実際の粒子の通過位置のばらつきを考えることで位置分解能がわかる。ステレオ角の半分の角度を ξ とする、実際に通過した位置の y 座標を y_0 とし、 y_0 を通過する確率 $P(y_0)$ とおくと、

$$P(y_0) = \frac{y_0 \text{ における青色部の } x \text{ 方向の長さ}}{\text{青色部の面積}} = \frac{2 \frac{1}{\tan \xi} |a - y_0|}{2ab} \quad (2.1)$$

と表され、

$$b = \frac{a}{\tan \xi} \text{ の関係より } ab = \frac{a^2}{\tan \xi} \quad (2.2)$$

よって、

$$P(y_0) = \frac{1}{a^2} |a - y_0| \quad (2.3)$$

である。

ばらつきの計算から

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-a}^{+a} y_0^2 P(y_0) dy_0 = \int_{-a}^{+a} \frac{1}{a^2} |a - y_0| y_0^2 dy_0 \\ &= \frac{a^2}{6} \approx \frac{d^2}{24} \end{aligned} \quad (2.4) \quad (2.5)$$

ここで $a = \frac{d}{2 \cos \xi} \approx \frac{d}{2}$ とした。以上より、動径方向に対してはストリップ間隔の $\frac{1}{\sqrt{24}}$ の位置分解能となる。

ビーム軸方向に関しても、同様の計算により

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{b^2}{6} = \frac{1}{6} \left(\frac{d}{2 \sin \xi} \right)^2 \\ &\approx \frac{1}{6} \left(\frac{d}{0.04} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.6) \quad (2.7)$$

以上の計算により、 $r - \phi$ 方向には $16 \mu\text{m}$ 、 z 方向には $800 \mu\text{m}$ の位置分解能となる。

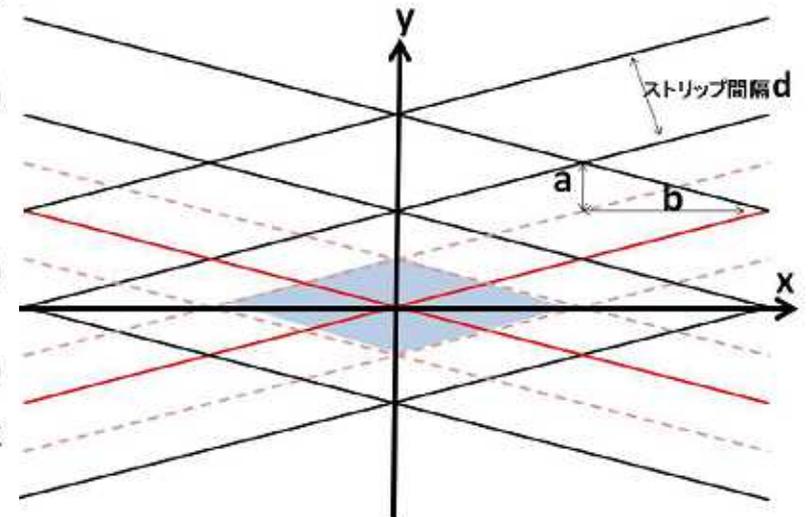


図2-10

トラッキング Extrapolate Uncertainty

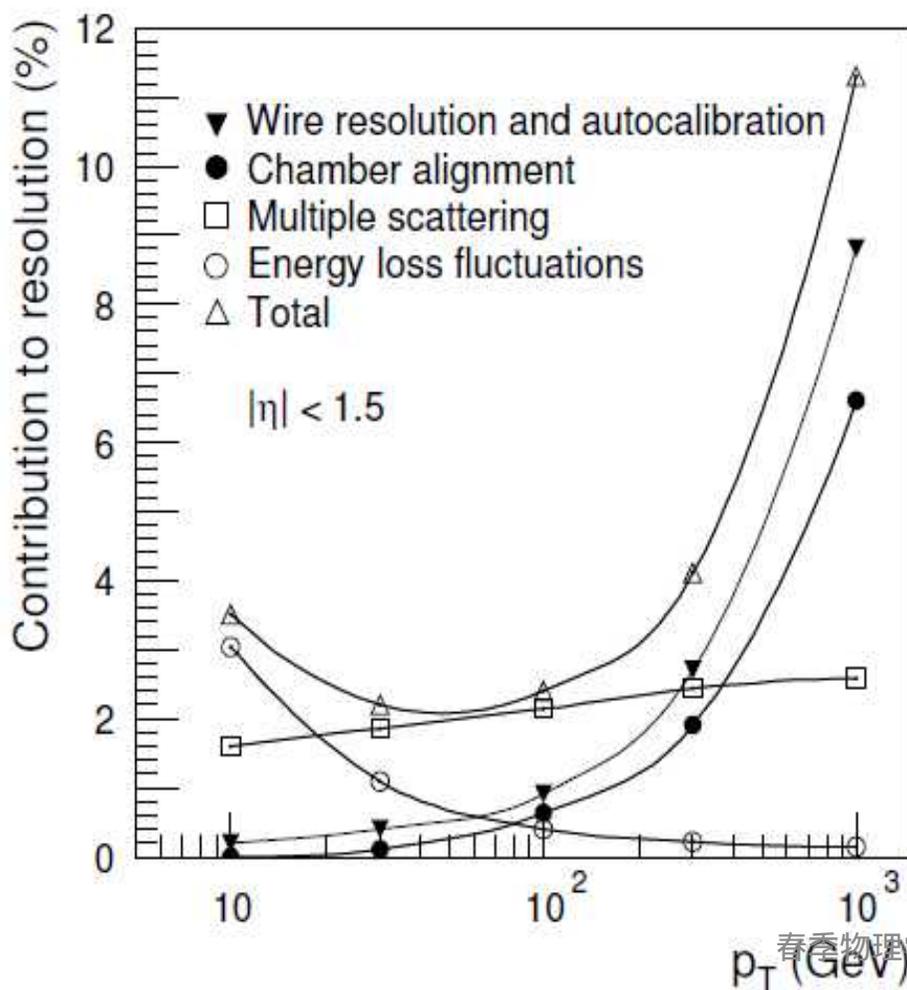
$$\sigma(r) = \sqrt{\left(\frac{1}{\sigma_1^2} \sum \frac{\sigma_i^2}{1} + \frac{rr_1}{\sigma_1^2} \sum \frac{\sigma_i^2}{r_i^2}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{1}{\sigma_2^2} \sum \frac{\sigma_i^2}{1} + \frac{rr_1}{\sigma_2^2} \sum \frac{\sigma_i^2}{r_i^2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots}$$

(r の原点を $\sum \frac{r_i}{\sigma_i^2} = 0$ となるように決めた時)

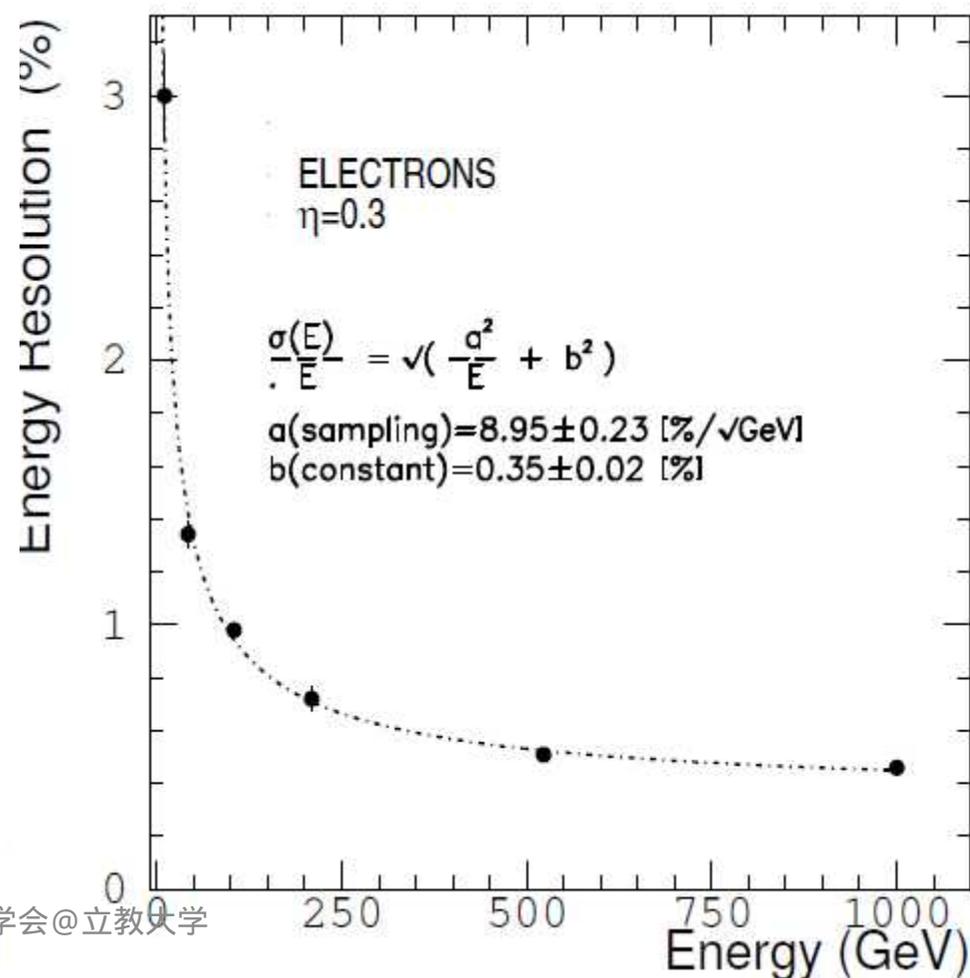
Pixel3 層 ($r=5, 9, 12$ cm, $\sigma=14.3$ μm) と SCT4 層 ($r=29.9, 37.1, 44.3, 51.4$ cm, $\sigma = 16$ μm), TRT ($56 < r < 107$ cm, 36 層, $\sigma=170$ μm) を用いた場合, 上式 (4.8) における r の原点は SCT の 1 層目よりも内側になる ($r \approx 20$ cm).

レプトン運動量、エネルギー分解能

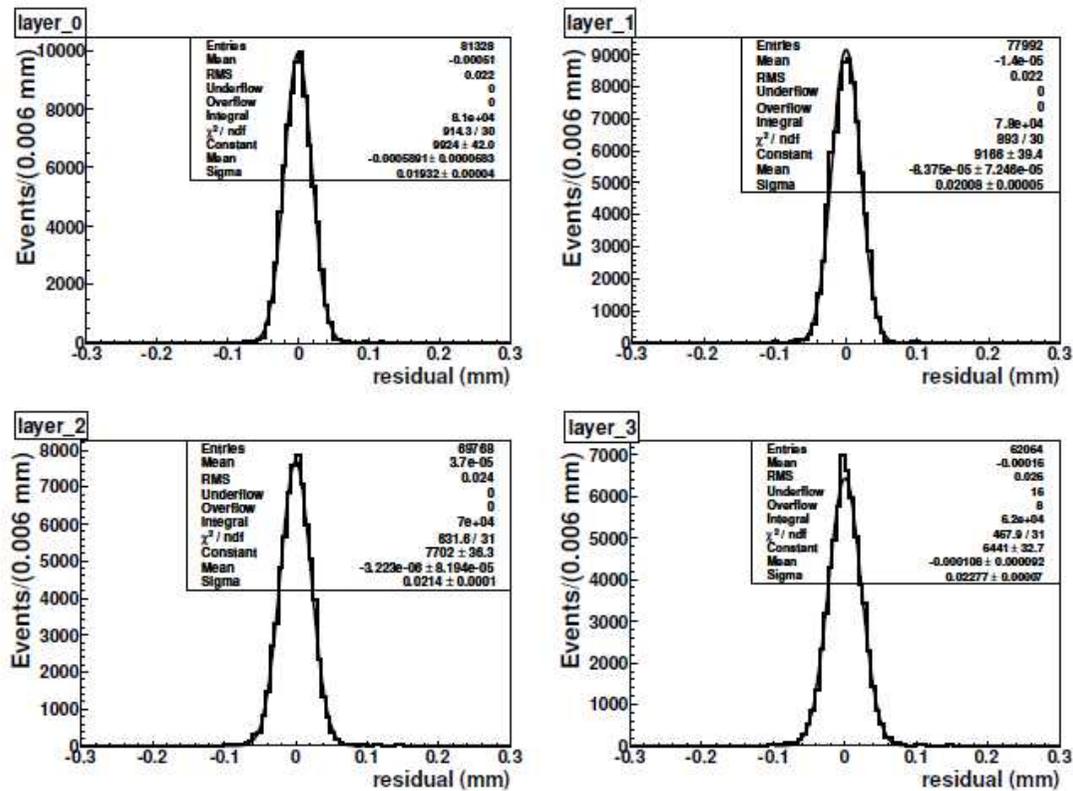
ミュー粒子検出器の運動量分解能



カロリメータの電子エネルギー分解能

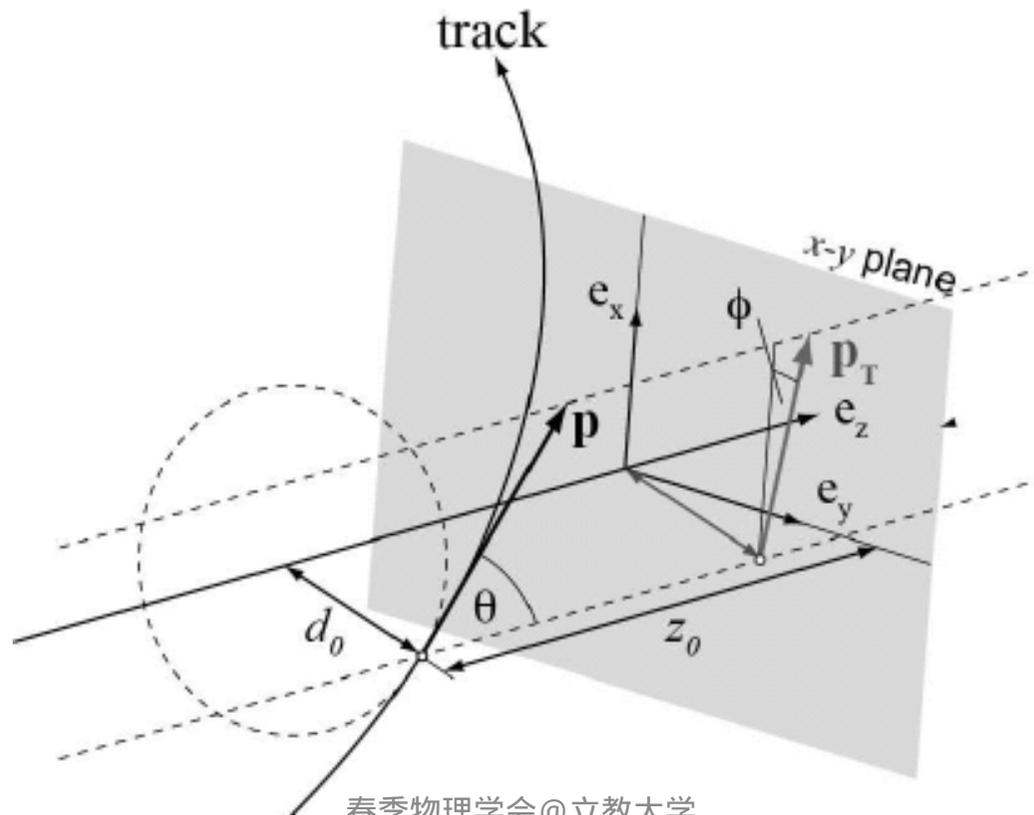


各Layerの残差分布

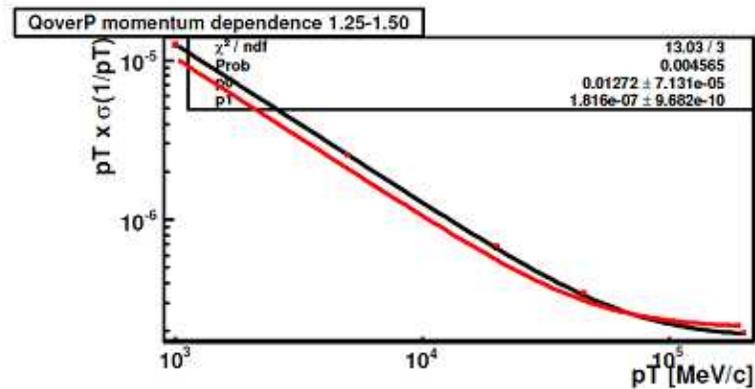
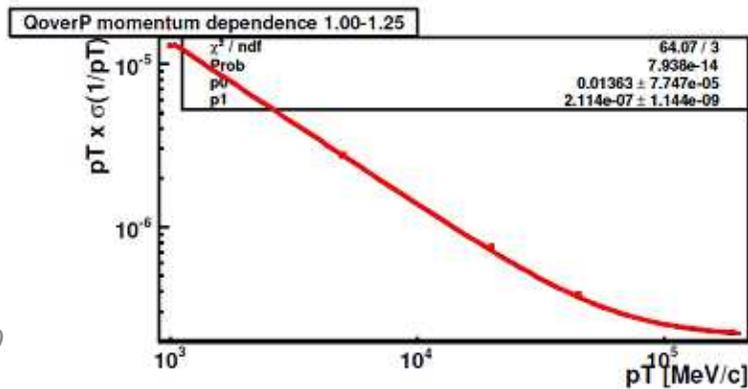
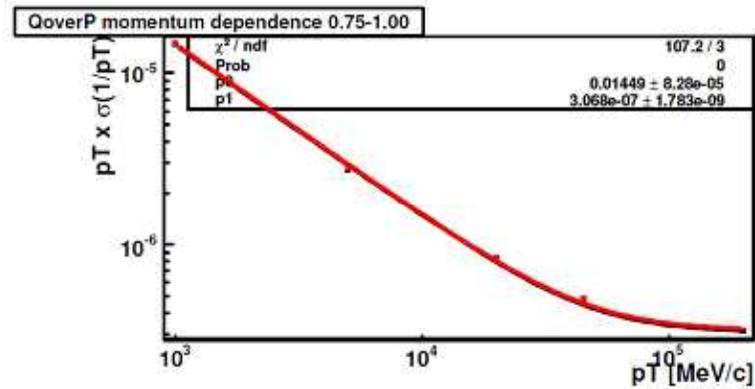
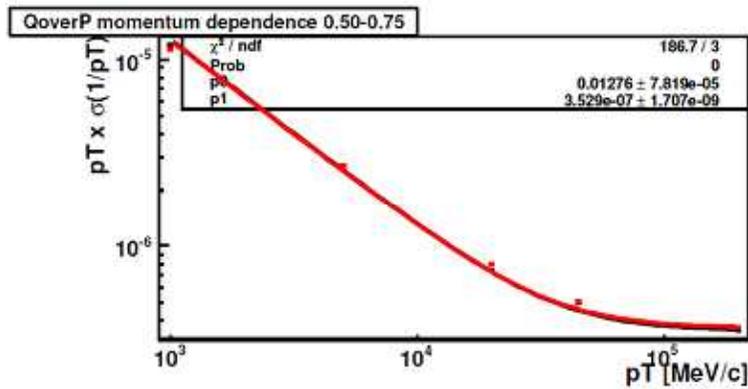
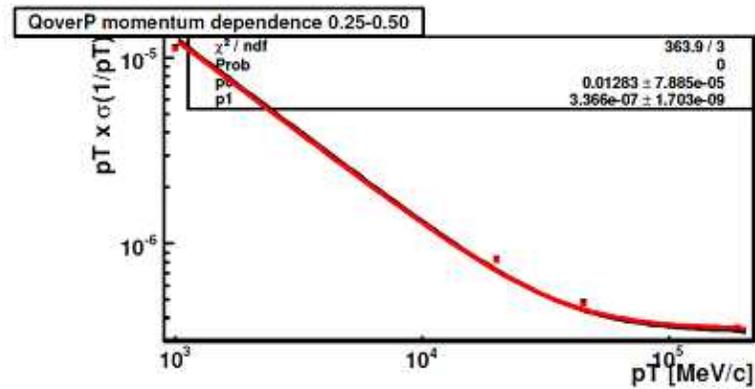
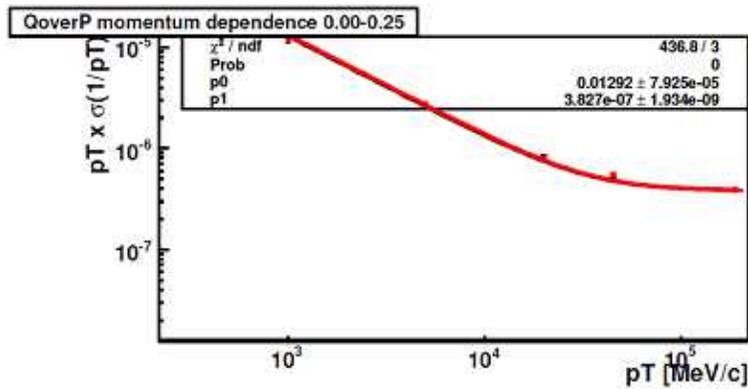


トラッキングパラメータ定義

トラッキングパラメータ:再構成されたトラックの近地点(Perigee)における
横方向運動量($1/P_T$),
粒子運動方向(動径方向: Φ_0 ,ビーム軸方向: θ),
インパクトパラメータ(動径方向: d_0 ,ビーム軸方向: z_0)



Fit results



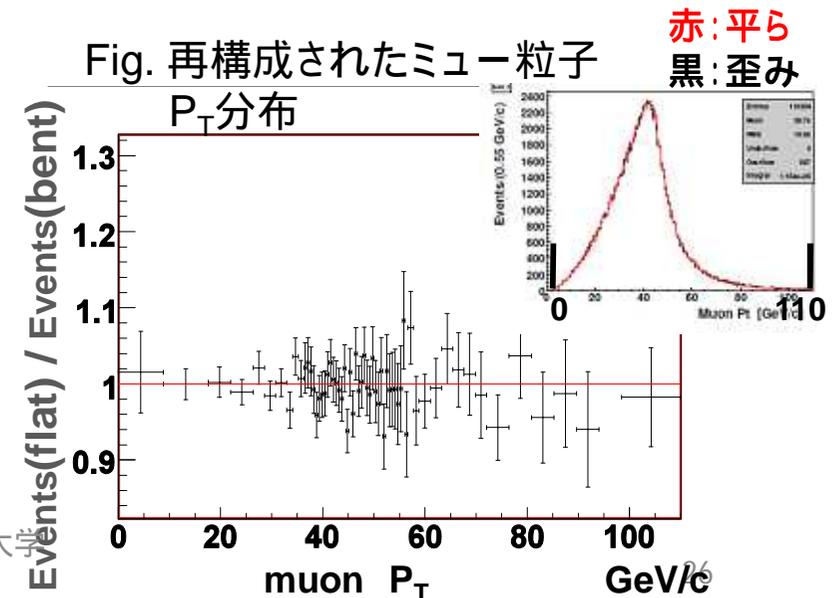
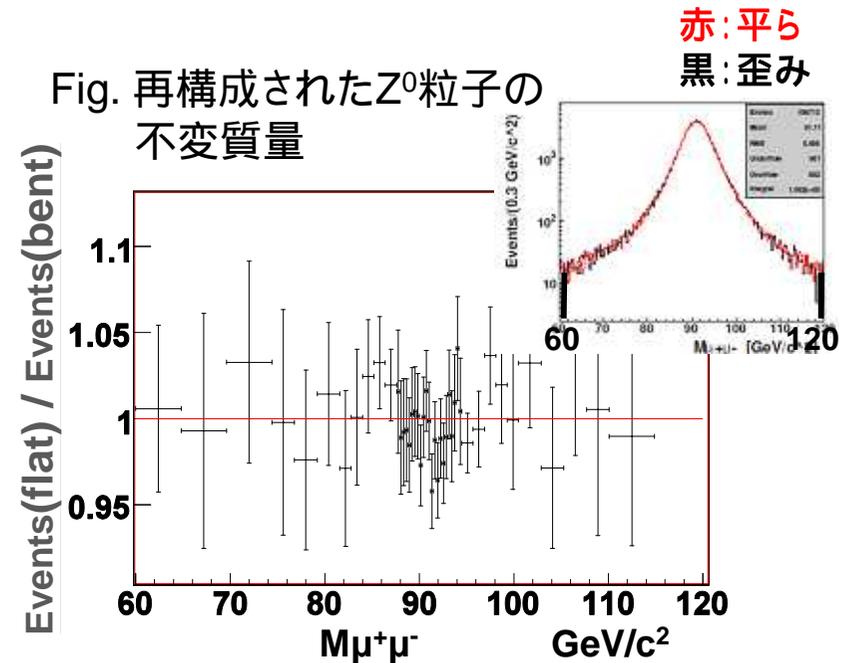
Z⁰粒子の質量再構成

イベントジェネレータ(Pythia)でZ⁰→μ⁺μ⁻を生成
240,000事象(0.12fb⁻¹程度に相当)ずつ

Breit-wignerとガウス分布の畳み込み関数で
フィット
(Breit-wigner最頻値,Breit-wigner幅,規格化
定数,gaus幅をフリーパラメータとした)

パラメータ名	平らなセンサー (GeV/c ²)	歪んだセンサー (GeV/c ²)
<i>Breit - WignerWidth</i>	2.929 ± 0.031	2.981 ± 0.032
<i>Breit - WignerMean</i>	91.14 ± 0.01	91.14 ± 0.01
<i>GaussianSigma</i>	2.095 ± 0.021	2.116 ± 0.021

フィットの結果は統計の範囲内で一致。
違いは見られない。



系統誤差の見積り(温度変化依存性)

前頁までは25 における形状測定試験の結果を用いて歪みの影響を見たが、
 運転時の温度はモジュール内に-6 ~ 9 程度のばらつきがある。

(温度シミュレーションより)

センサー形状は、
 低温環境下ほど歪みが大きくなる。
 (センサー端で1.33 μ m/ の変化、測定試験結果)
 中心の折れ曲がり角には大きな影響は無い。

そこで、25 、 0 、 -17 における
センサー形状をモデル化し、
 センサーの歪みの大きさを変えた時の
 トラックパラメータ分解能の悪化の大きさを調べ、
 センサー内の温度の差からくる影響を
 系統誤差として見積もる。

TDR-1,PG700,4.5W,120 μ W/mm², -10°C

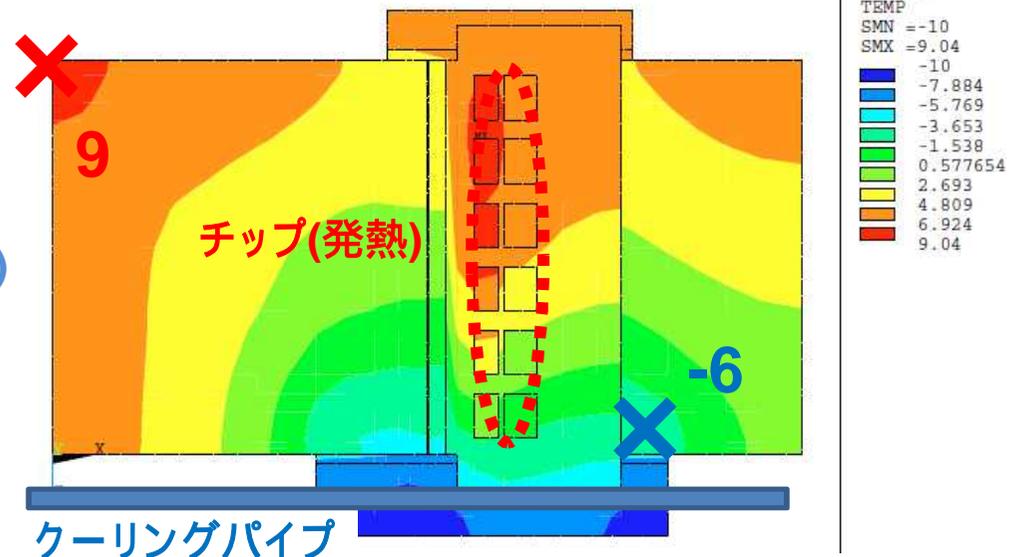


Fig. モジュール内の温度分布

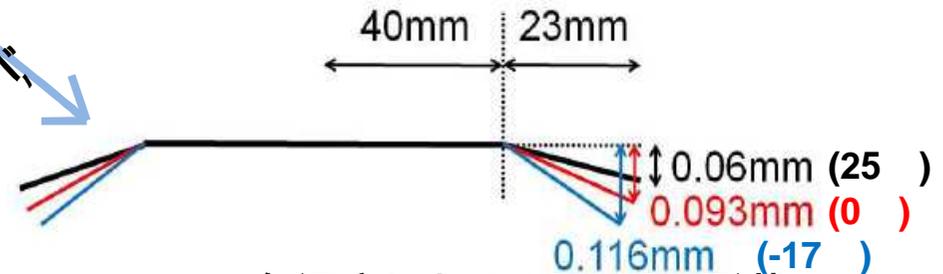
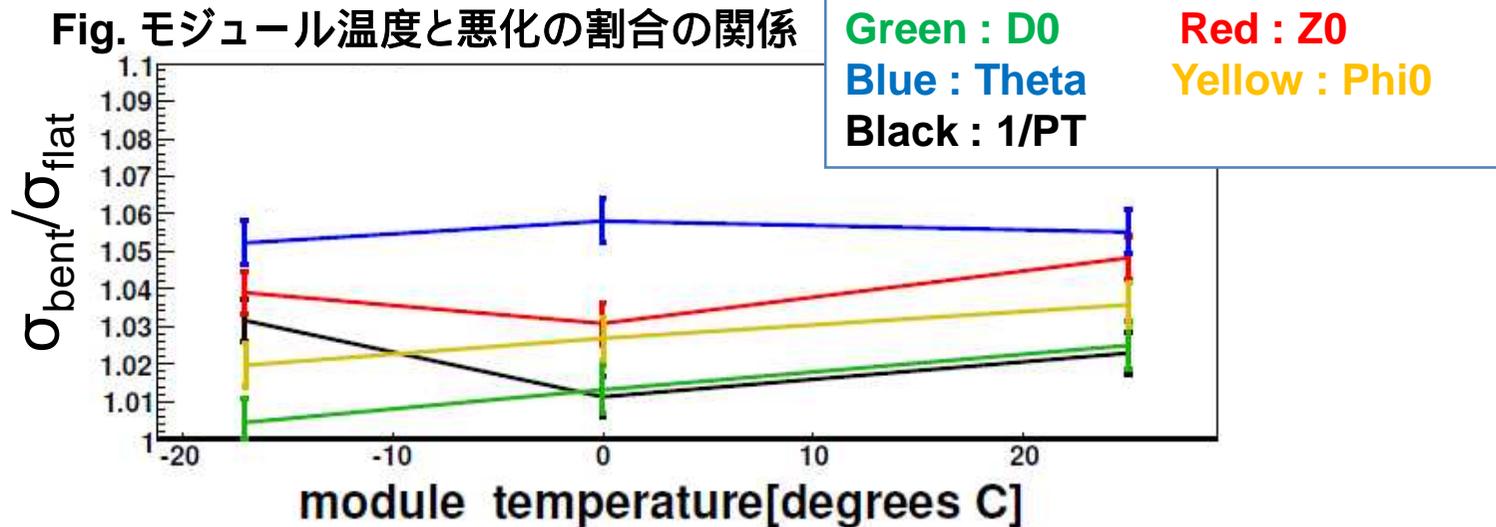


Fig. 各温度におけるセンサー形状

系統誤差の見積り(温度変化依存性)

各温度(センサーの形状)における歪みによるトラックパラメータ分解能の悪化の割合を求め比較した。



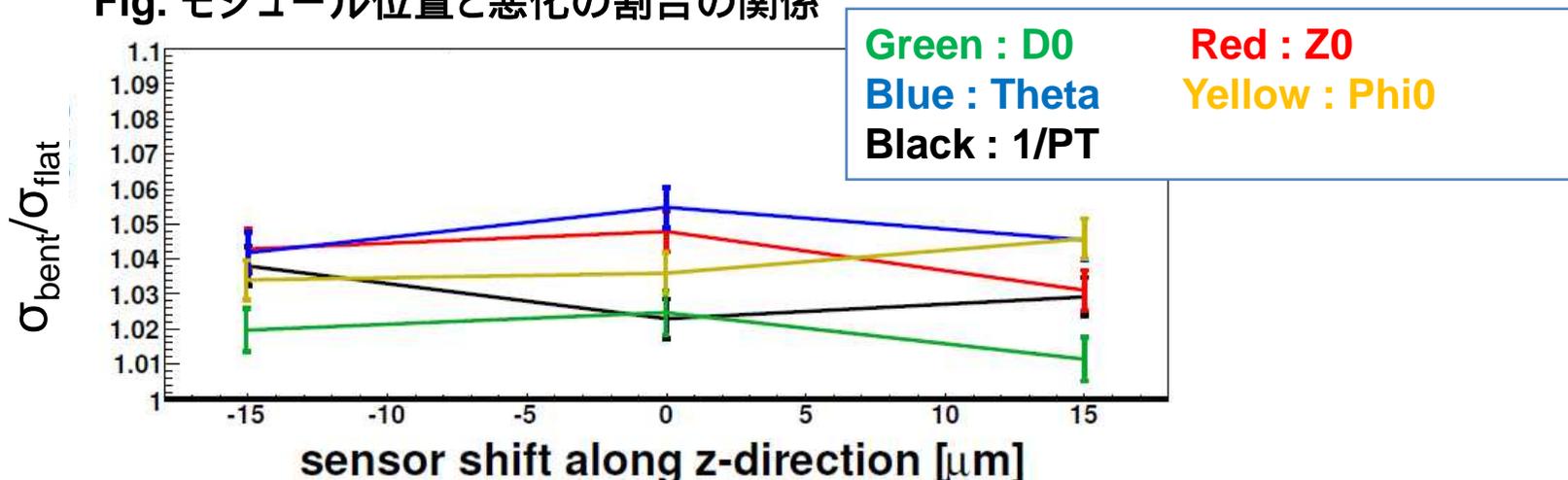
系統的な変化は見られない。
→(最大値 - 最小値)/2 で系統誤差を評価。

パラメータ名	分解能悪化の割合に対する系統誤差 (%)
P_T	1.03
z_0	0.87
d_0	1.01
θ	0.28
ϕ_0	0.81

系統誤差の見積り(モジュール位置依存性)

モジュールの位置がz(動径)方向に±15μmずれた場合に出る影響を調べ、その結果を系統誤差として算出する。

Fig. モジュール位置と悪化の割合の関係



系統的な変化は見られない。
(最大値 - 最小値)/2 で系統誤差を評価。

パラメータ名	分解能悪化の割合に対する系統誤差 (%)
P_T	0.76
z_0	0.84
d_0	0.66
θ	0.64
ϕ_0	0.59