

気球を用いた MeVガンマ線観測実験 その2

京都大学 宇宙線研究室
M2 古村 翔太郎

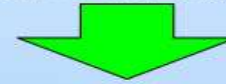
- ◆ 電子飛跡検出型コンプトンカメラ
- ◆ 飛跡取得アルゴリズムの改良
- ◆ 従来との性能比較
- ◆ まとめ

我々は天体MeVガンマ線観測を目指して、MeVガンマ線カメラETCCの開発を行っており、次期気球観測実験SMILE-IIに向けて、ETCCの改良を進めている。中村講演に引き続き、ETCCの改良について講演を行う。

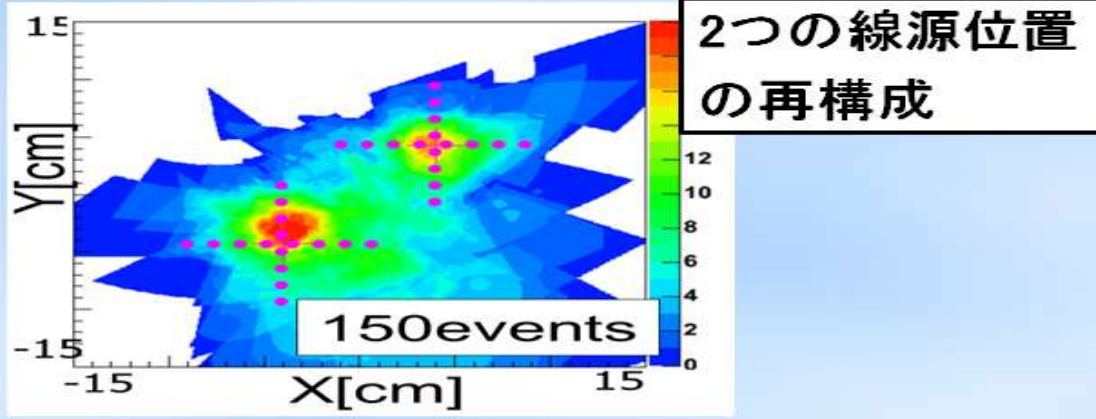
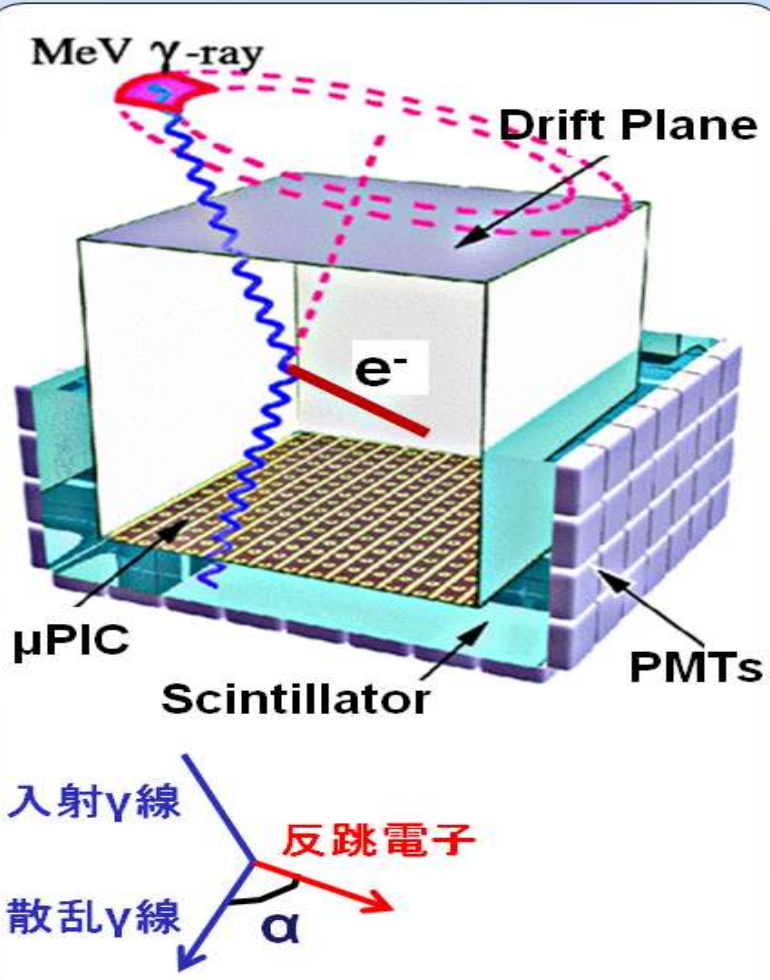
電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)

Electron-Tracking Compton Camera

- ガス飛跡検出器 μ -TPC
反跳電子の3次元飛跡とエネルギー
- シンチレーションカメラ
散乱ガンマ線の吸収点とエネルギー



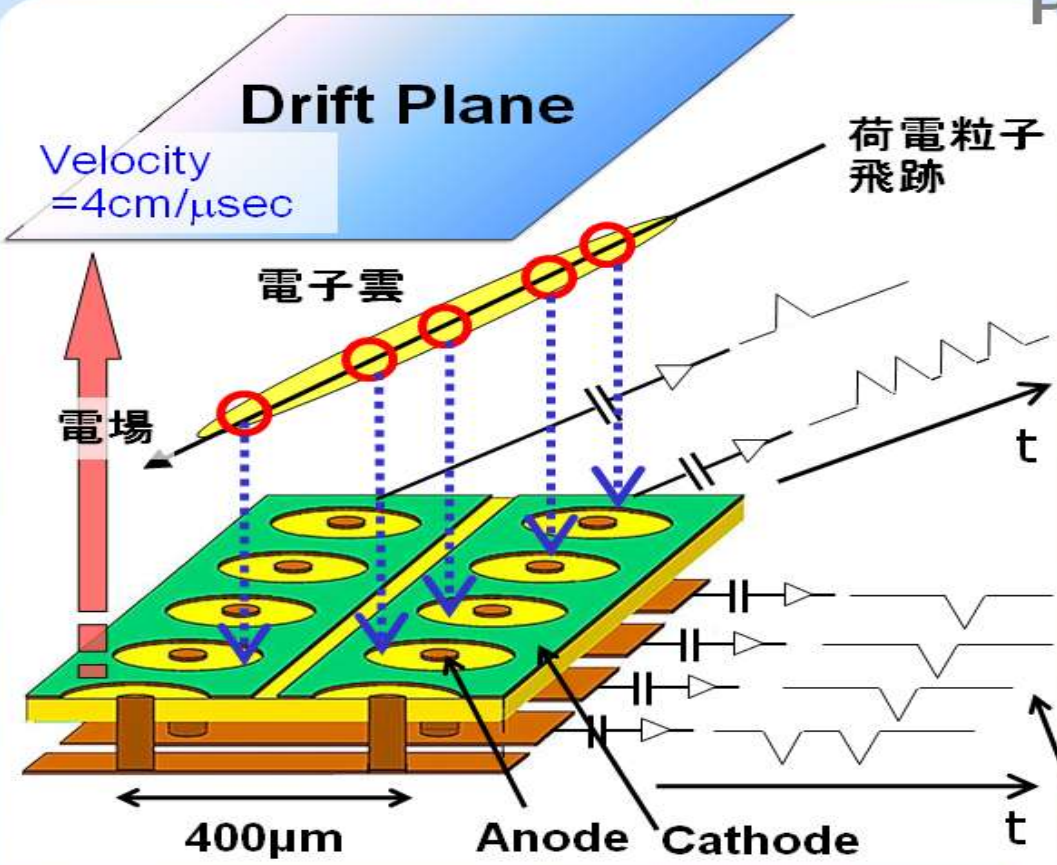
イベントごとに散乱過程を再構成し、
到来方向を決定できる



MeVガンマ線カメラETCCは、ガス飛跡検出器とシンチレーションカメラから構成されている。入射MeVガンマ線がコンプトン散乱をして生じる、反跳電子の情報をガス飛跡検出器で、散乱ガンマ線の情報をシンチレーションカメラで取得する。本公演では、ガス飛跡検出器の改良について話す。

ガス飛跡検出器 μ -TPC

Micro Time Projection Chamber



2次元位置検出器： μ PIC (Micro Pixel Chamber)

- Pixel Pitch : 400 μ m
- 検出面サイズ : 10cm \times 10cm
- 256 + 256本のストリップ構造
(\sim 65,000 Pixel)
- 補助増幅器としてGEMを使用
(Gas Electron Multiplier)
- 典型的ガスゲイン
 \sim 3,000 (μ PIC) \times \sim 10 (GEM)
 $= \sim$ 30,000

◆ 2次元位置情報 + 時間情報
ストリップ番号 (X, Y) Drift時間 (Z)

データ処理のアルゴリズムを改良
→ 感度向上を目指す

ガス飛跡検出器 μ -TPC中に荷電粒子が入射すると、その道筋に沿ってガス原子が電離され電子雲が生じる。電子雲の位置情報を検出することで、元の荷電粒子の3次元飛跡を再構成することができる。今回改良を行ったのは、 μ -TPCが検出した電子雲の位置情報を、PCに記録する前にデータ整形処理を行うFPGAのアルゴリズムである。

飛跡データ処理 アルゴリズムの改良

◆ 従来のアルゴリズム

もともと、大強度X線の測定を想定（高速処理に特化）

→ 信号の立ち上がりで、100MHzのXYコインシデンスとれた事象
データを間引いて読み出す

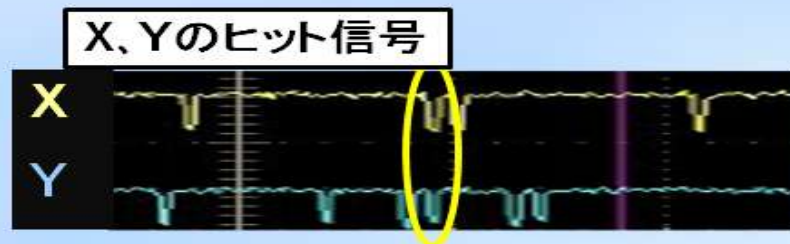
◆ 問題点

- uPIC面に平行・垂直成分の損失
- アルゴリズム由来のヒットの取りこぼし

→ ETCCの性能を劣化させている

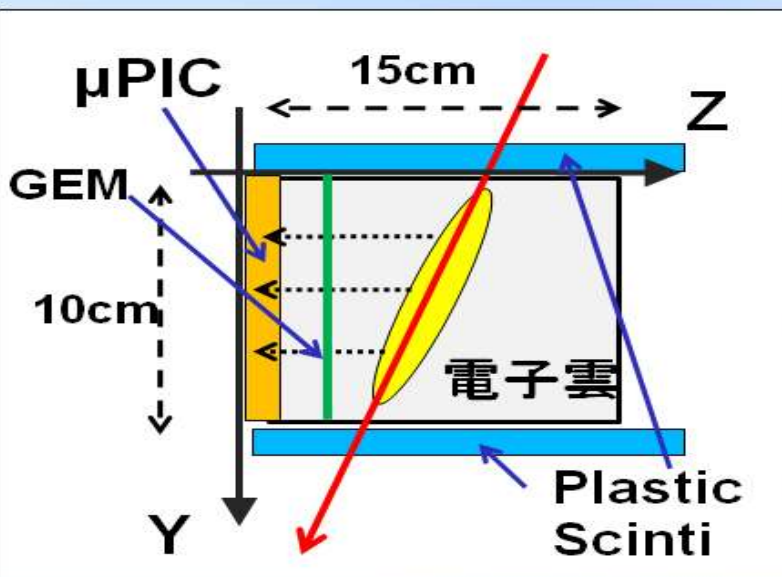
◆ 行った改良

- ① データをすべて読み出す
- ② XYコインシデンスを解除
- ③ 信号の立ち上がり以降も記録
= 持続時間 (Time Over Threshold)



従来のアルゴリズムは大強度X線の測定のため、データを間引くなど高速処理に特化したものである。この性質により飛跡情報の一部が失われ、ETCCとしての性能を劣化させていた。今回、その原因となる箇所を修正を施した。これにより、検出できた飛跡情報すべてを記録することができる。

セットアップ：宇宙線ミュオンをみる



サイズ：

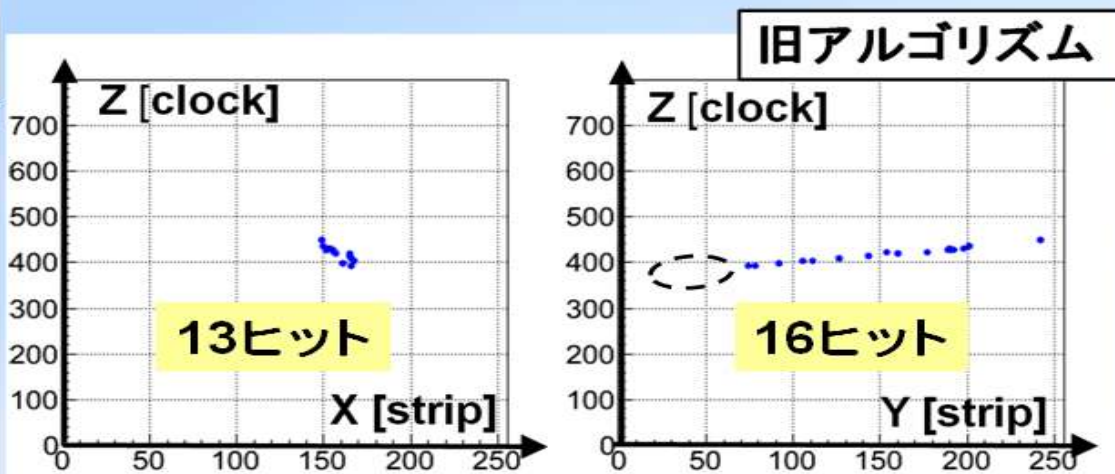
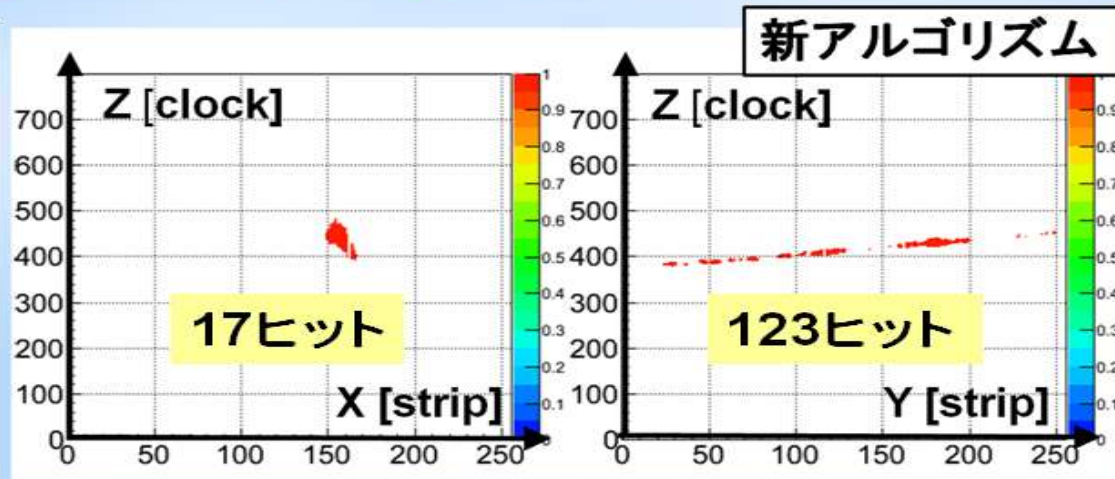
10cm × 10cm × 15cm

使用ガス：

Ar 90% C₂H₆ 10% 1atm

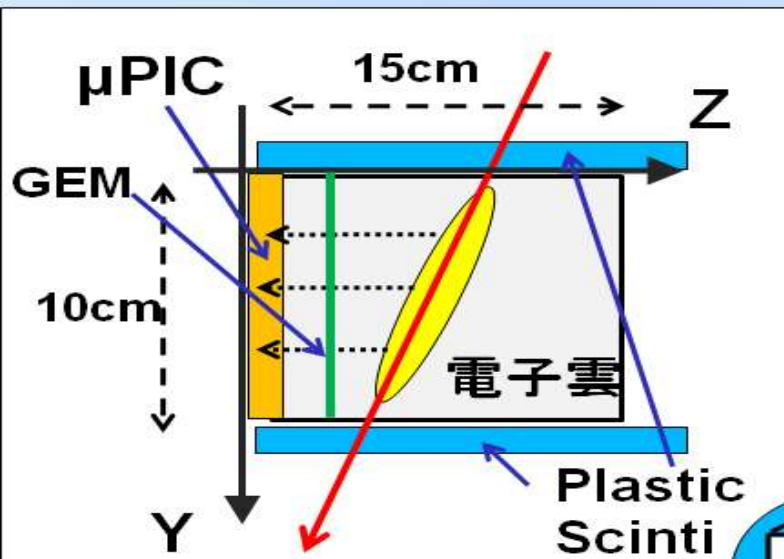
Gain：

~ 20,000

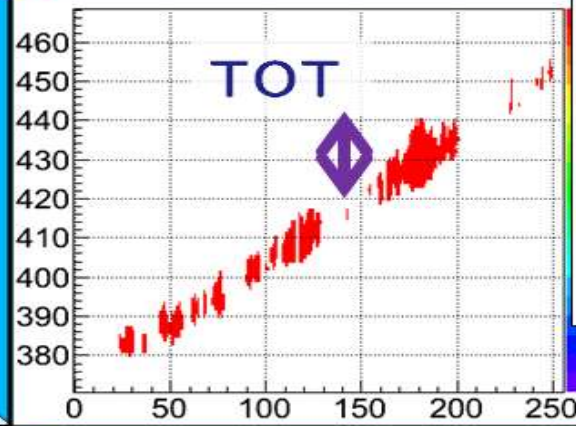
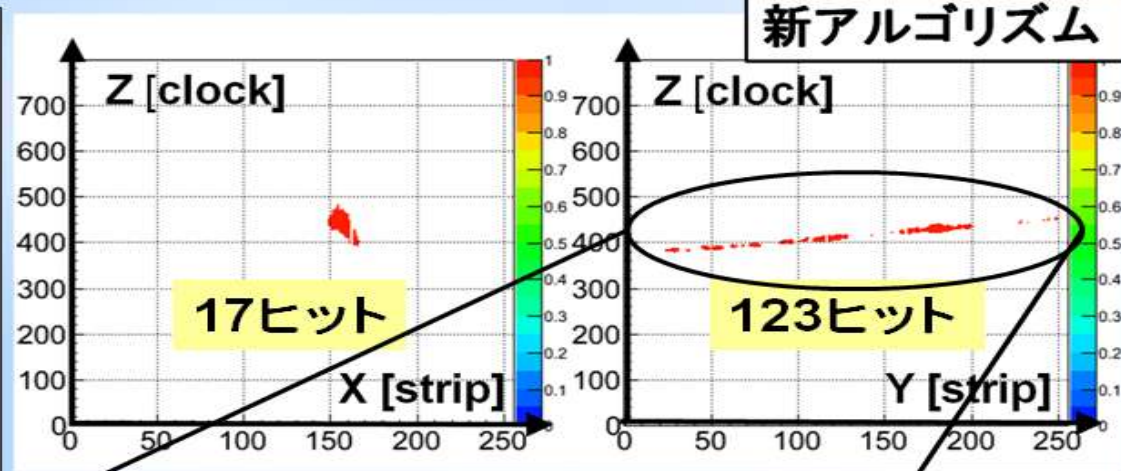


改良した新アルゴリズムの動作確認のため、新アルゴリズムを適用した μ -TPCで宇宙線ミュオンを観測した。XZ、YZの2次元面上での飛跡例を示す。新アルゴリズムでは旧アルゴリズムより、記録されているヒット点(赤点・青点)が大幅に増加していることがわかる。また旧アルゴリズムでは、明らかに飛跡情報が失われている箇所がある。(黒点線)

セットアップ：宇宙線ミュオンをみる

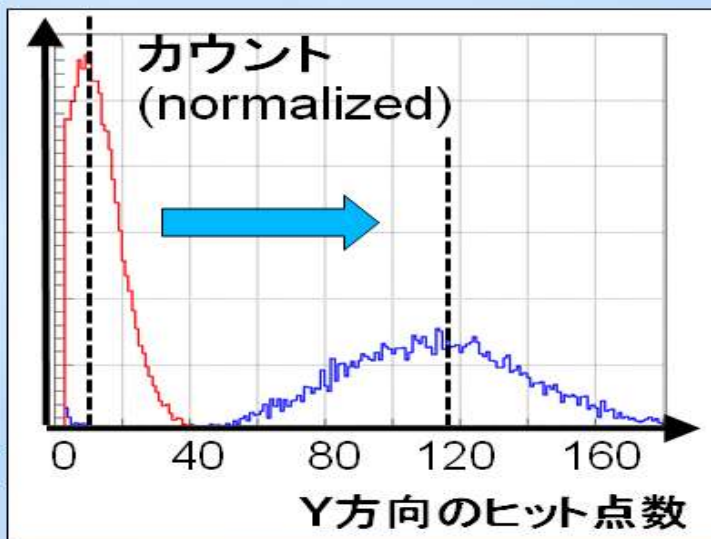
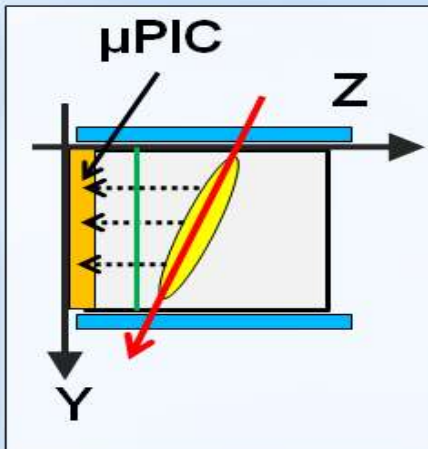


サイズ：
10cm × 10cm × 15cm
使用ガス：
Ar 90% C₂H₆ 10% 1atm
Gain：
~ 20,000



Z軸 (時間) 方向
の幅
= TOT を記録
(信号の持続時間)

新アルゴリズムで取得した飛跡を拡大してみると、各ストリップごとに、ヒット点がZ軸方向の幅をもっていることがわかる。これは、各ストリップに流れた信号の持続時間(Time Over Threshold)に対応する。



ヒット点数分布

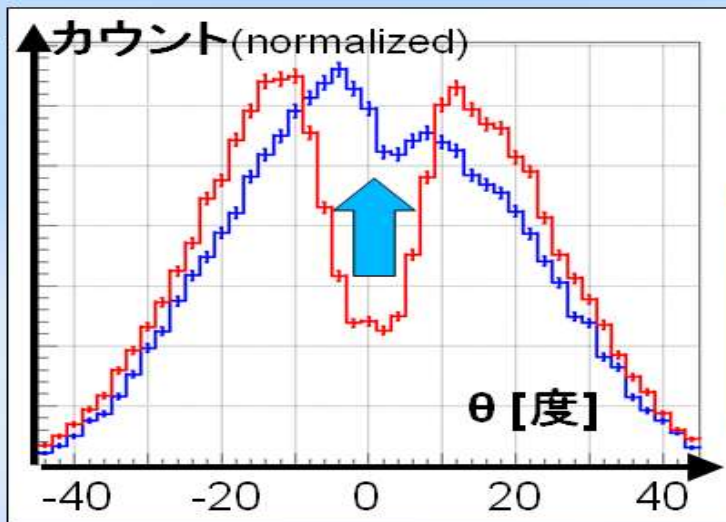
旧アルゴリズム～10 ヒット

新アルゴリズム～120 ヒット

ヒット点数大幅増加

赤：旧アルゴリズム

青：新アルゴリズム



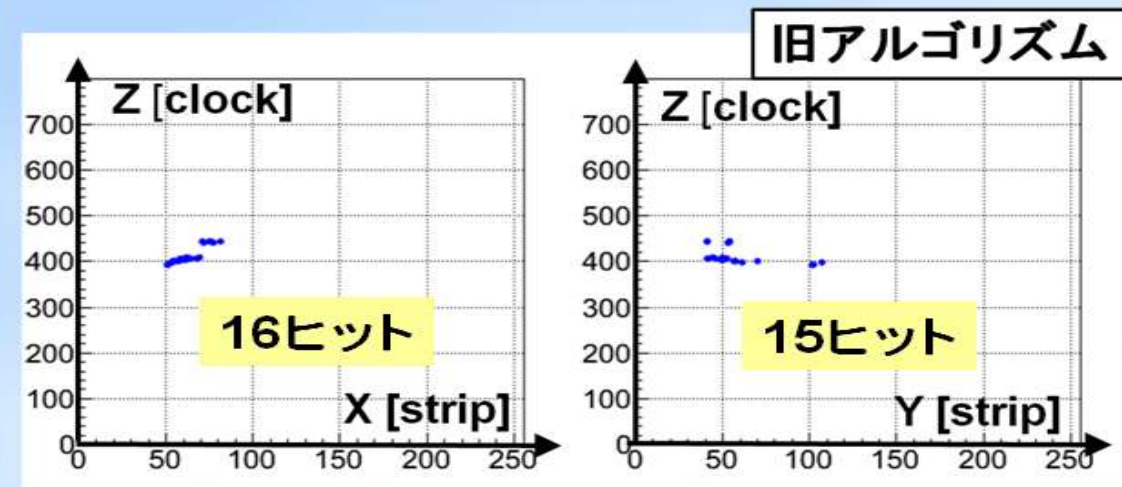
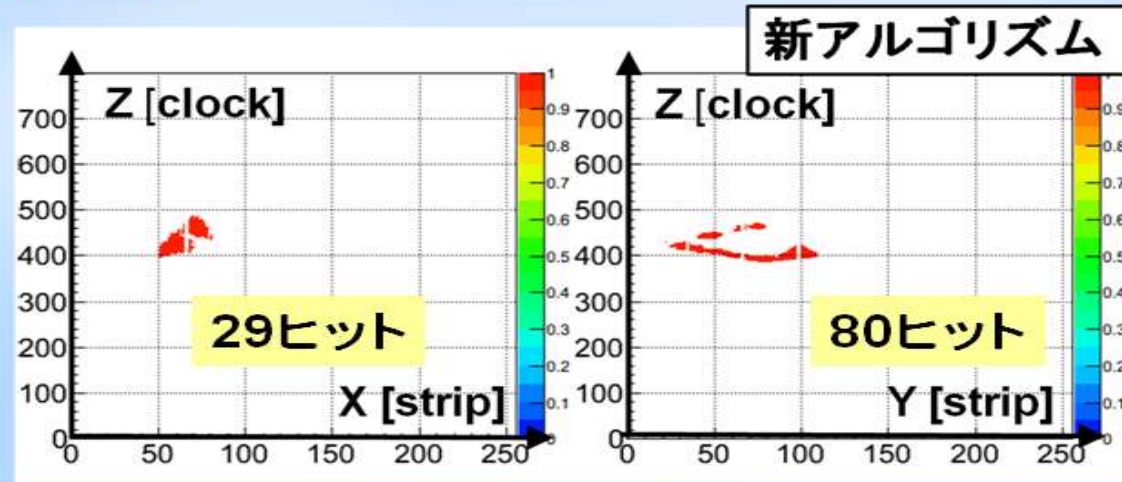
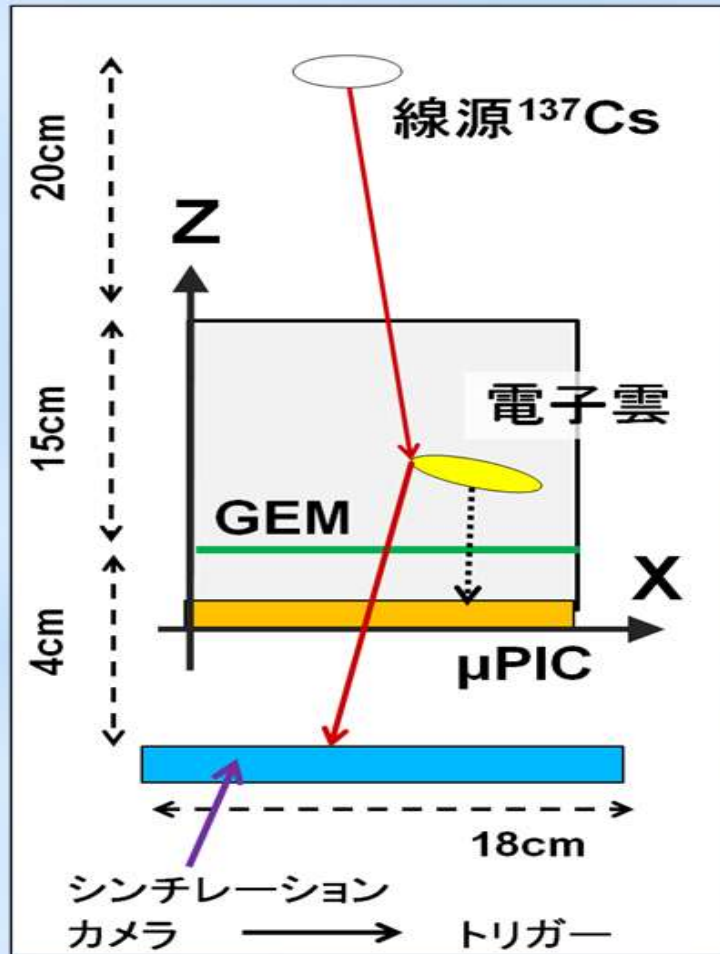
宇宙線μの天頂角分布

$\theta \sim 0^\circ$ 付近

μPICに平行な飛跡の
取得性能の改善

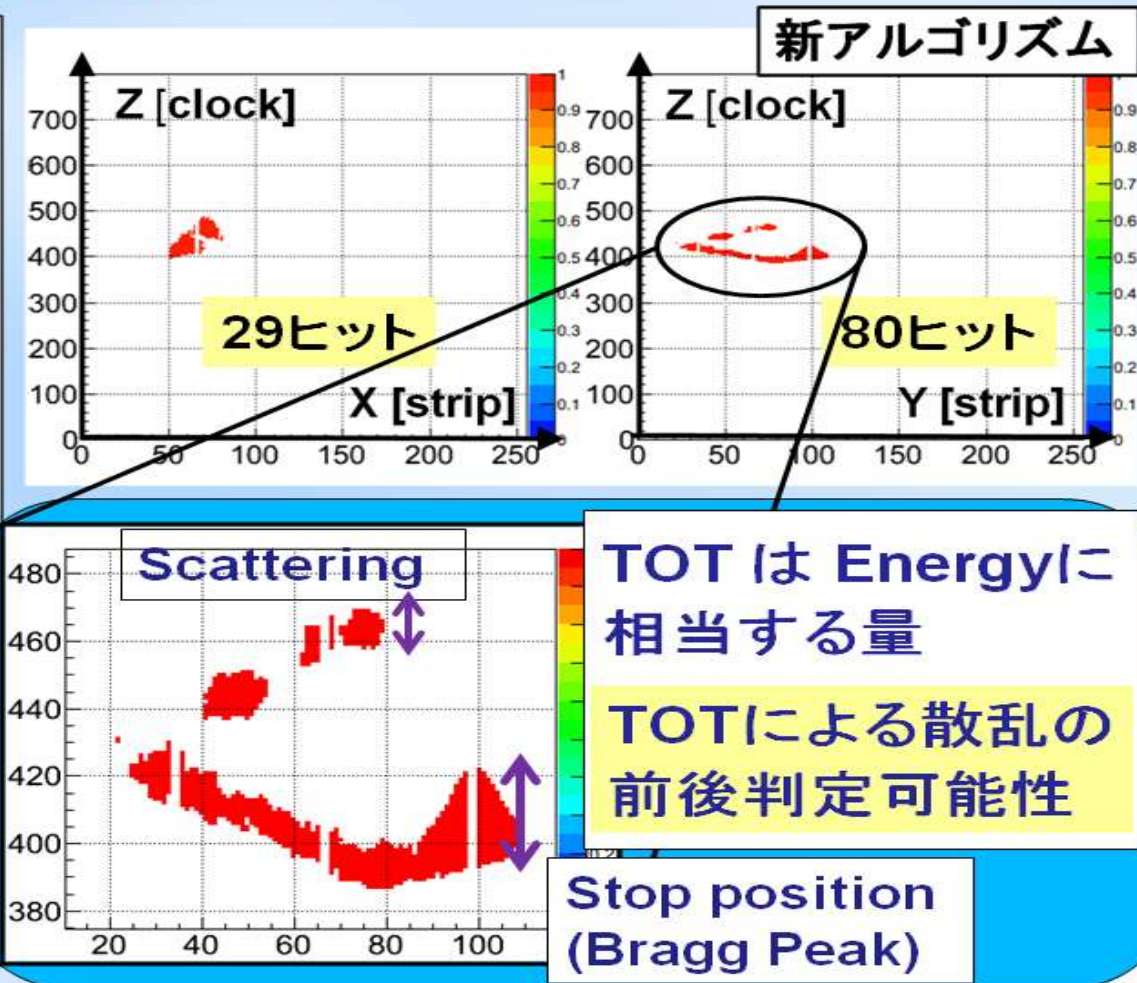
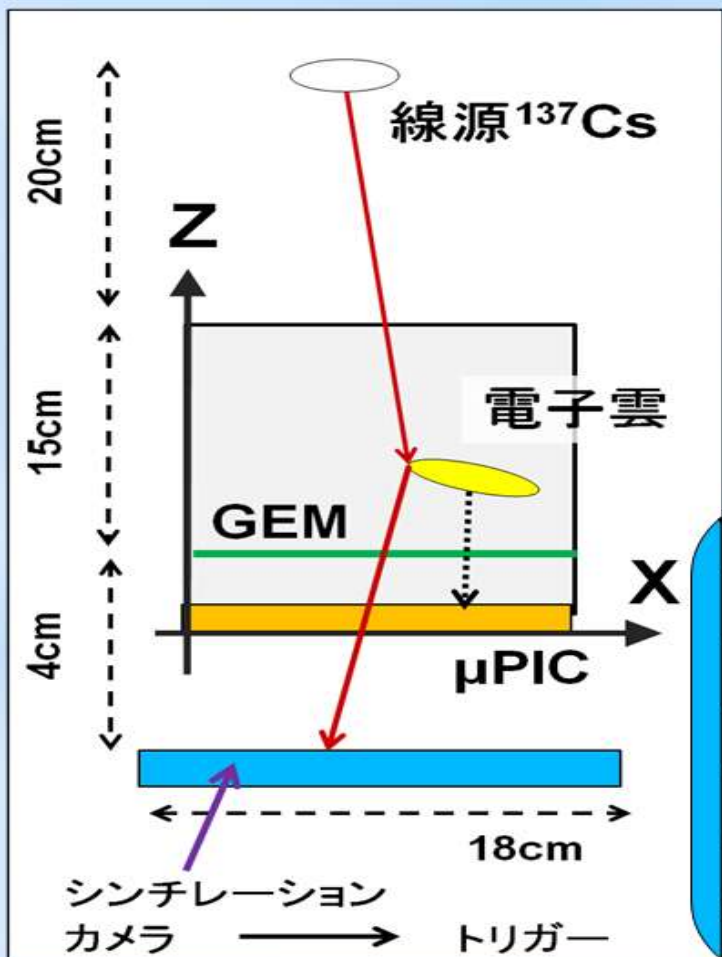
新旧アルゴリズムの違いを、定量的にみる。取得した宇宙線ミュオンの飛跡を解析してヒット点数を比較すると、新アルゴリズムでは従来の10倍以上に増加していることがわかる。また天頂角分布を求めると、旧アルゴリズムでは取得できなかったμPICに平行な飛跡(θ が0度付近)の取得性能が大きく向上していることがわかる。

セットアップ：反跳電子をみる

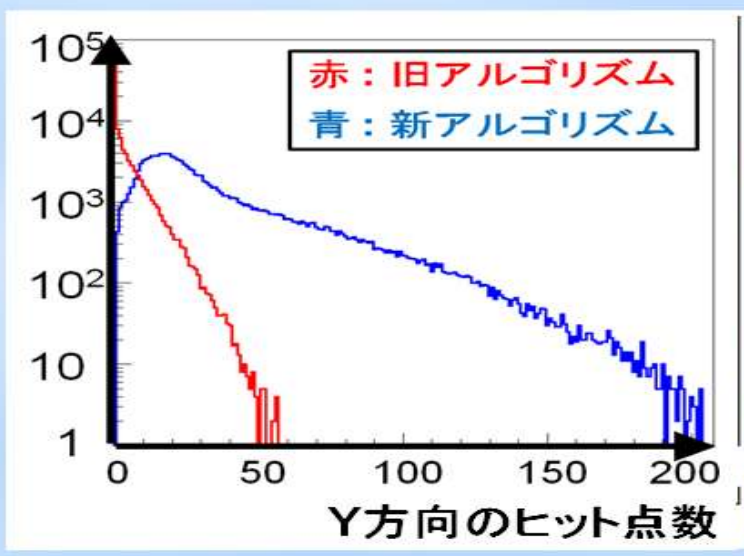
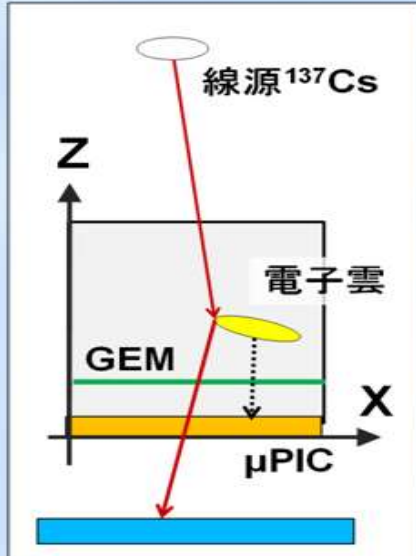


次に、本来の観測対象である反跳電子を取得した。新アルゴリズムでは、記録されているヒット点が増幅していることがわかる。また、旧アルゴリズムでは飛跡情報が失われ、飛跡の始点・終点はどこか、どのように点を繋げばよいのか、わからない。

セットアップ：反跳電子をみる



一方で新アルゴリズムでは、飛跡点の繋がりははっきりとわかる。またTOTを利用することで、始点・終点の判別も可能である。TOT (信号の持続時間)はエネルギーに相当する量であるから、TOTが最も長い、すなわちenergy depositが最も大きい”端”が飛跡の終点だと考えられる。(Bragg Peak)



ヒット点数分布

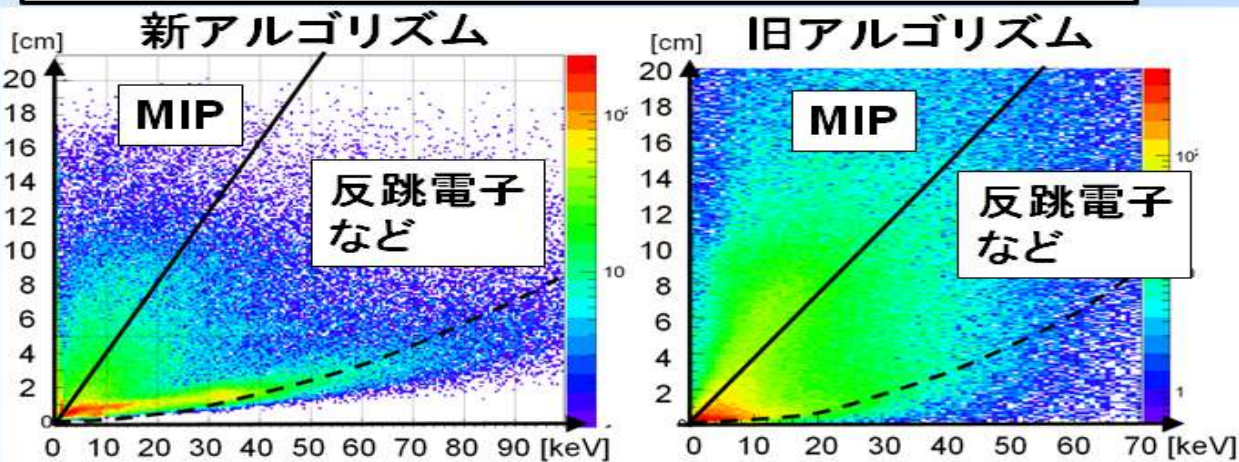
3ヒット以上の
割合大幅増加

旧アルゴリズム 24.7%

新アルゴリズム 99.0%

大幅な検出効率の改善

Energy Deposit vs. Track Length



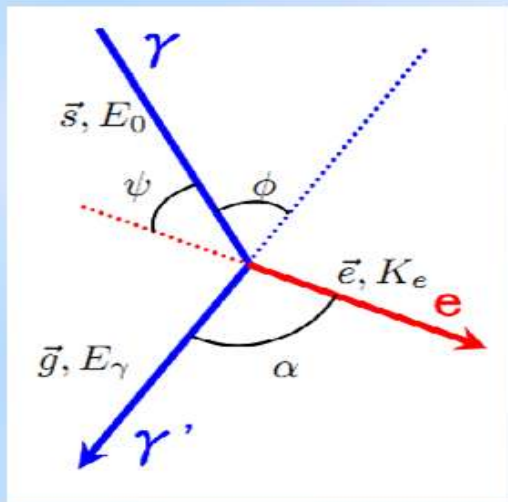
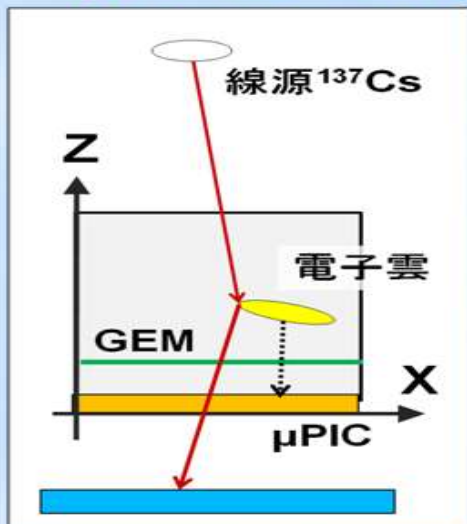
実線... 宇宙線μなどの
高エネルギー荷電粒子
(MIP)

破線... 反跳電子などの低
エネルギー電子

- 粒子識別性能の向上
- バックグラウンド除去性能の改善

反跳電子の飛跡を解析して、新旧のアルゴリズムの違いを定量的にみる。反跳方向の決定に必要な、3点以上のヒット点をもつイベント割合が増えたため、大幅な検出効率の改善が期待できる。また、energy depositと飛跡長を用いた粒子識別・バックグラウンド除去法を、従来より精度よく行えるようになった。

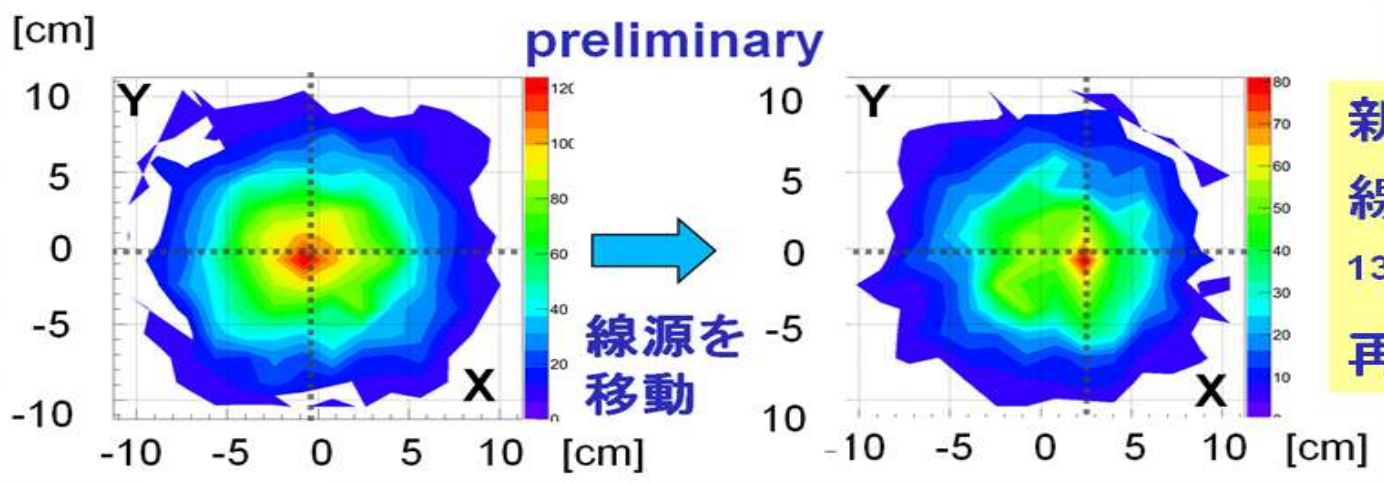
新アルゴリズムでのイベント再構成



$$\vec{s}_{\text{rcs}} = \left(\cos \phi - \frac{\sin \phi}{\tan \alpha} \right) \vec{g} + \frac{\sin \phi}{\sin \alpha} \vec{e}$$

$$\cos \phi = 1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \frac{K_e}{E_\gamma}$$

$$\cos \alpha_{\text{kin}} = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$



新アルゴリズムで、
線源からのガンマ線
137Cs 662keV の
再構成に成功

新アルゴリズムを用いて、ガンマ線の到来方向を再構成できるかの確認を行った。
137Cs線源をETCCから約20cm離して照射した。下側の図において、黒点線の交点が線源の位置である。線源を中央に置いた場合と、少しずつずらして置いた場合、ともに線源位置を再現することができた。新アルゴリズムでも再構成は問題なく行えることが確認できた。

まとめと今後の予定

- ◆ 従来の飛跡取得アルゴリズムの問題点を解決するため、新アルゴリズムを作成し性能評価中
- ◆ 宇宙線 μ の飛跡
 - ヒット点の大幅な増加
 - uPICに平行な飛跡取得性能の向上
- ◆ 反跳電子の飛跡
 - TOTを用いた散乱点・終点の決定可能性
 - 3ヒット以上の割合が大幅に増加 (旧:24.7%、新:99.0%)
 - 検出効率の大幅改善
 - バックグラウンド除去性能の改善
- ◆ イベント再構成
 - 新アルゴリズムでも線源からのガンマ再構成に成功
- ◆ 今後
 - 新アルゴリズムにおける再構成解析方法の確立
 - 旧アルゴリズムとのコンプトンカメラとしての性能比較