

CR micro-TPCを用いたガンマ線イメージング検出器の開発

京都大学 理学研究科 物理第2教室 宇宙線研究室

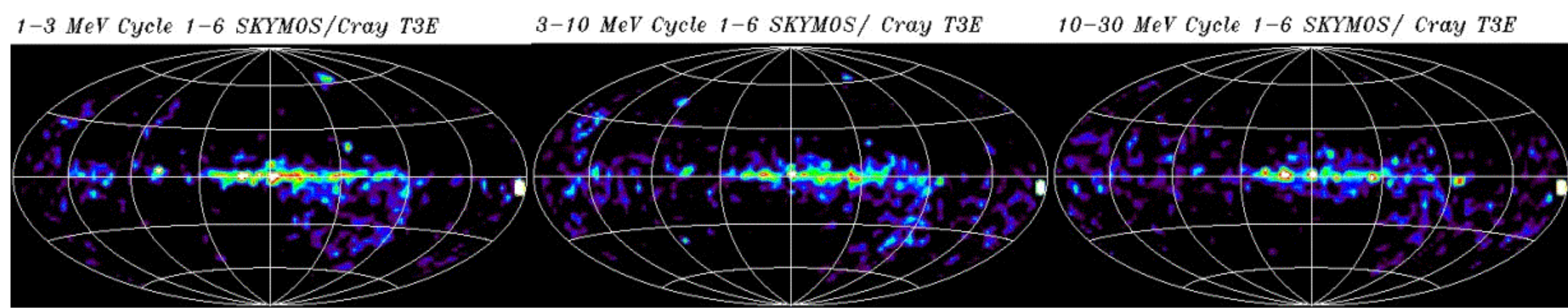
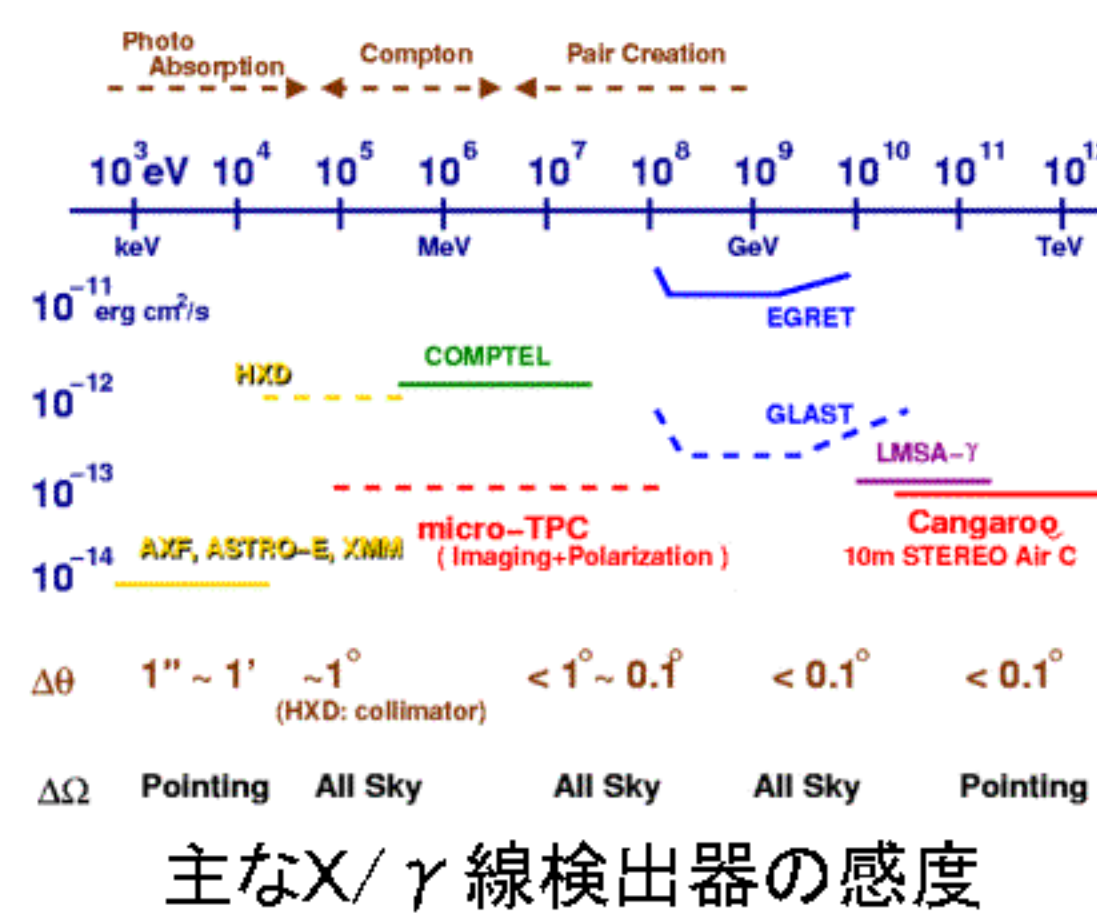
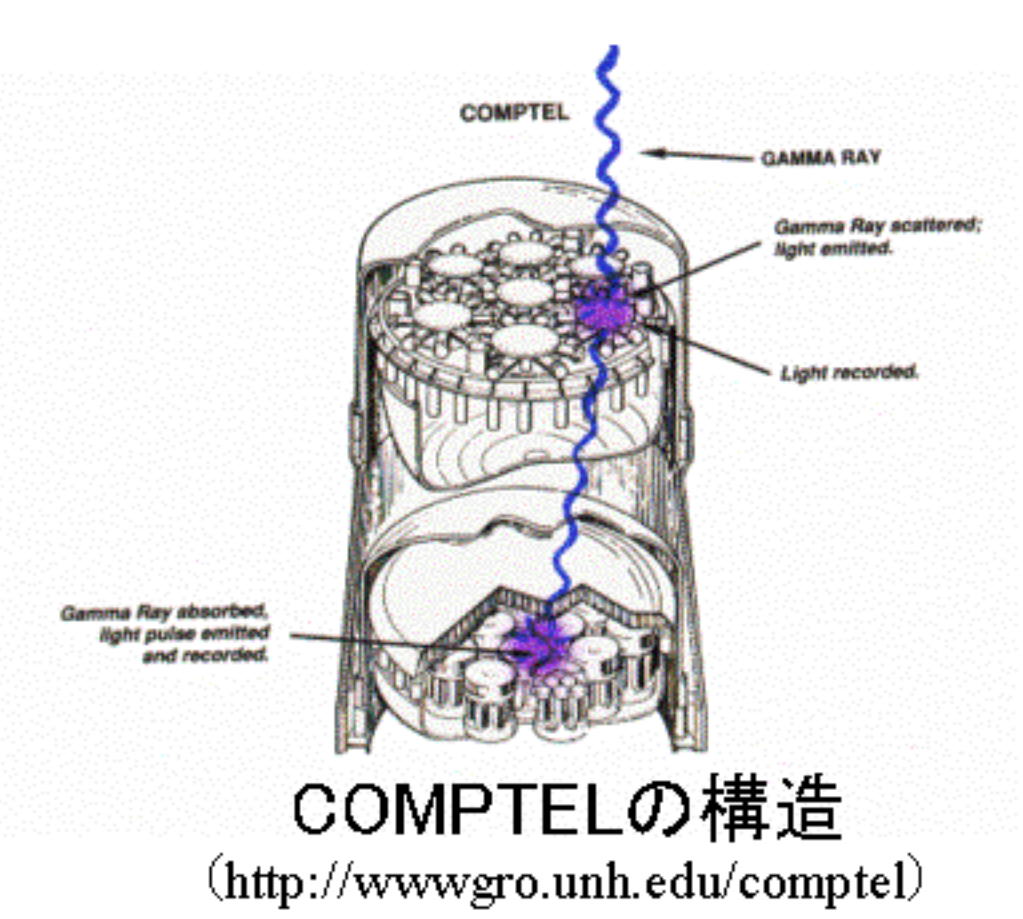
高田淳史, 谷森達, 窪秀利, 身内賢太郎, 竹田敦, 永吉勉, 折戸玲子, 植野優

1. Introduction

数百keV~数十MeVにおける天文学は、元素合成・ブラックホール・活動銀河核・宇宙線起源など、現在最も興味もたれている問題を解決する為の重要な手段であると認識されながらも、ほとんど手付かずの状態になっている。

これは、コンプトン散乱が優位で、かつbackgroundも多いこの領域でのイメージングが非常に難しいためである。現在のところ最も成果を挙げているのはCGRO衛星のCOMPTELであるが、明らかな優位性があった天体はCyg X-1やCrabなど十数個に過ぎない。

従って、MeV γ 線天文学を進めるには新しい検出器が必要である。我々の研究室ではこの未開拓の領域を観測するための新しいdeviceとして、コンプトン散乱を利用した γ 線カメラを開発中である。高い位置分解能をもつmicro-TPCを散乱体とし、周囲に吸収体となるシンチレータを置くことで、MeVガンマ線のevent毎の到来方向決定が可能になる。最終的にはCOMPTELの10倍の感度・数度以下の空間分解能を目指し、気球実験で実際に宇宙から到来する γ 線を観測することを目的とする。



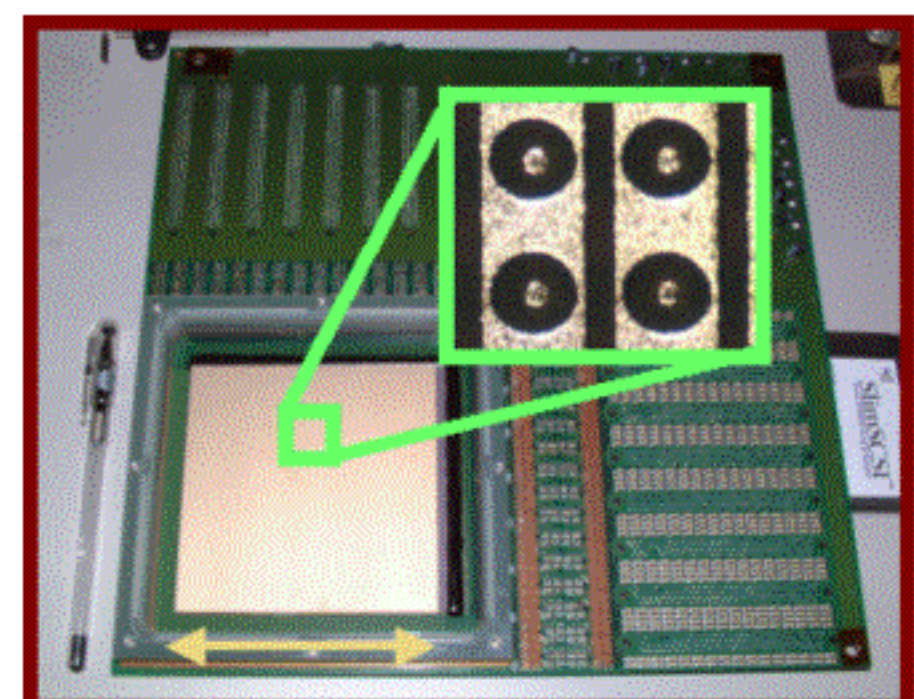
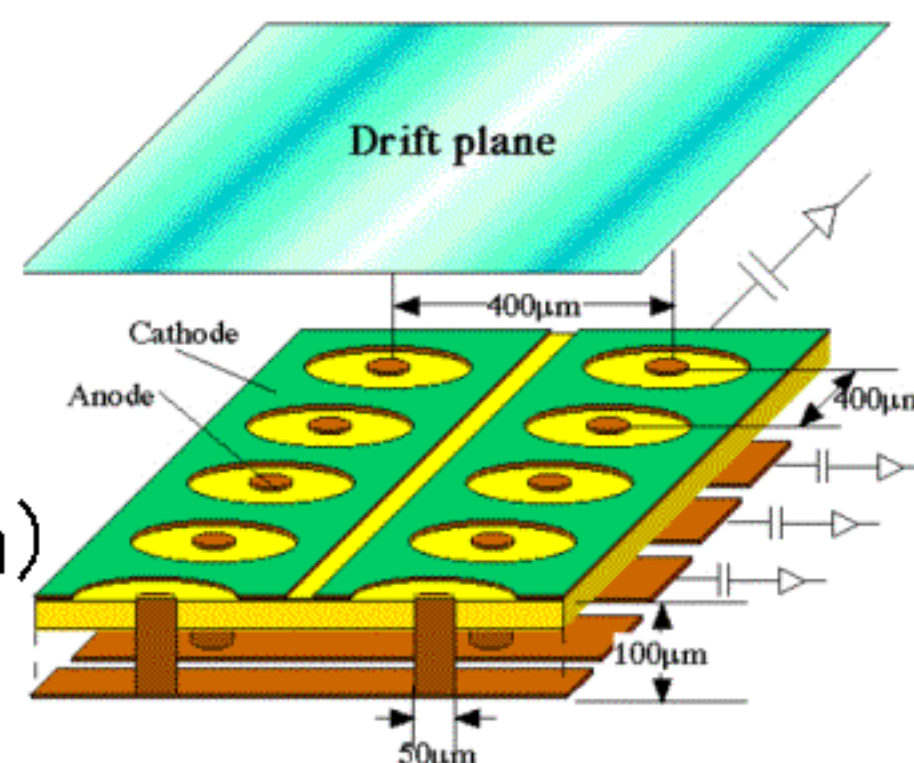
COMPTELによる全天map (http://www.gro.unh.edu/compTEL)

2. μ -PIC & micro-TPC

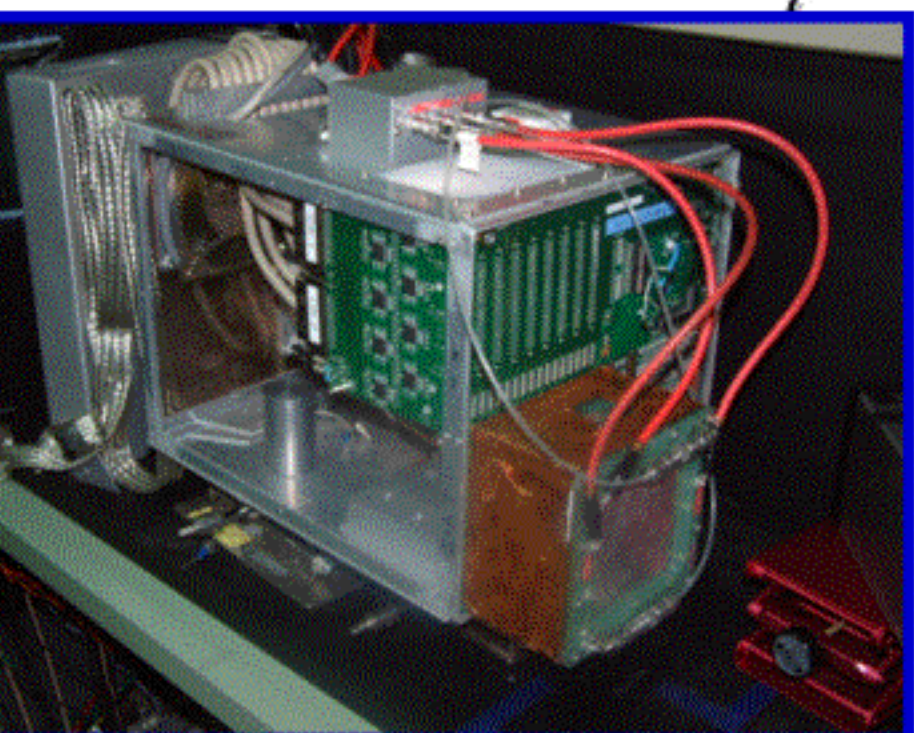
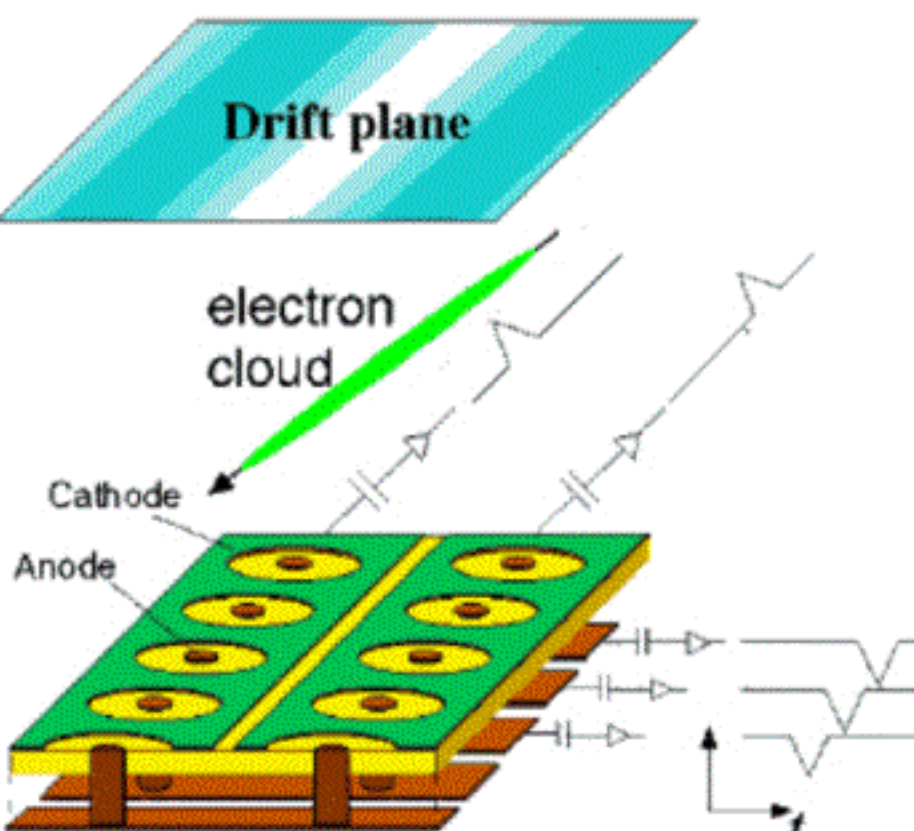
μ -PIC (Micro Pixel Chamber)

μ -PICとは右図のような構造をもつガス検出器であり、以下のような特徴をもつ。

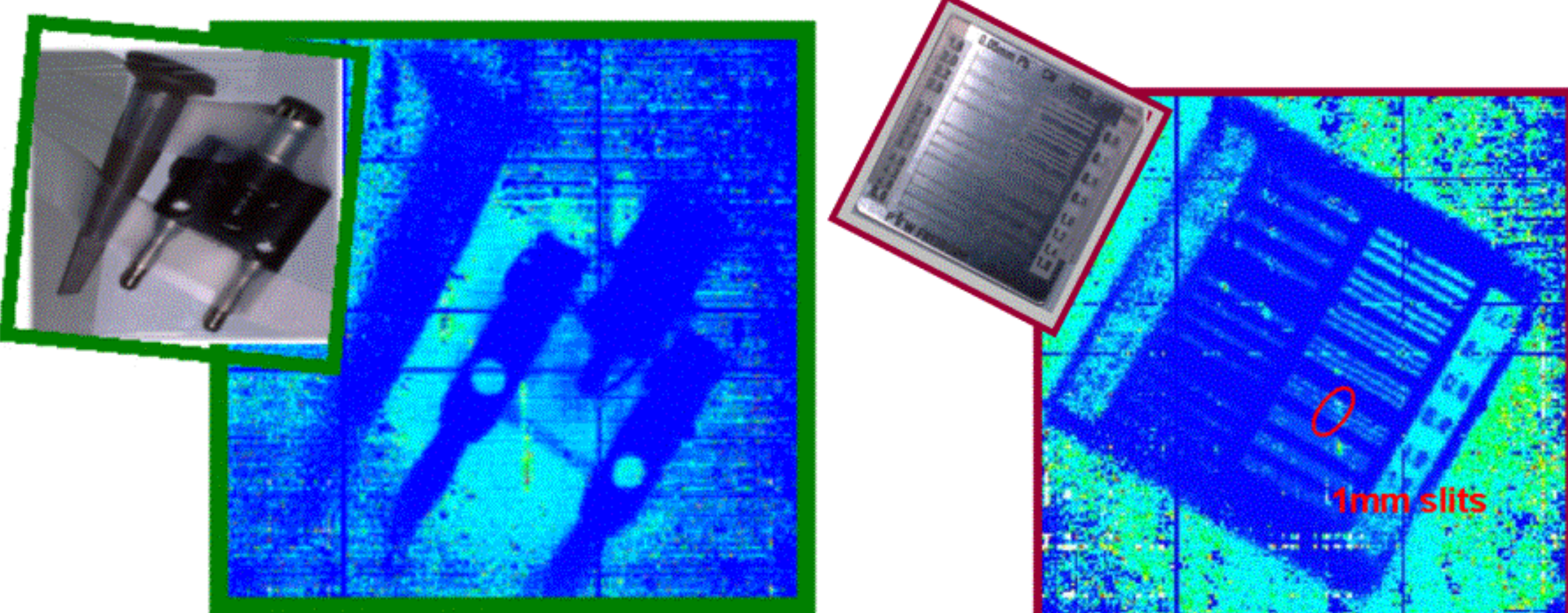
- 微細な電極構造による高い位置分解能 (~150 μ m)
 - 2次元読出しによるイメージング能力
 - 10cm x 10cmの大きな検出面
 - 高い増幅率を保ったまま長時間安定動作が可能
- この μ -PICに2mmのガスパッケージを取り付けることで下図のようなX線イメージを得ることができる。



μ -PICの構造(上)と実際の検出部(下)



micro-TPCの概念図(上)と実際のsetup(下)

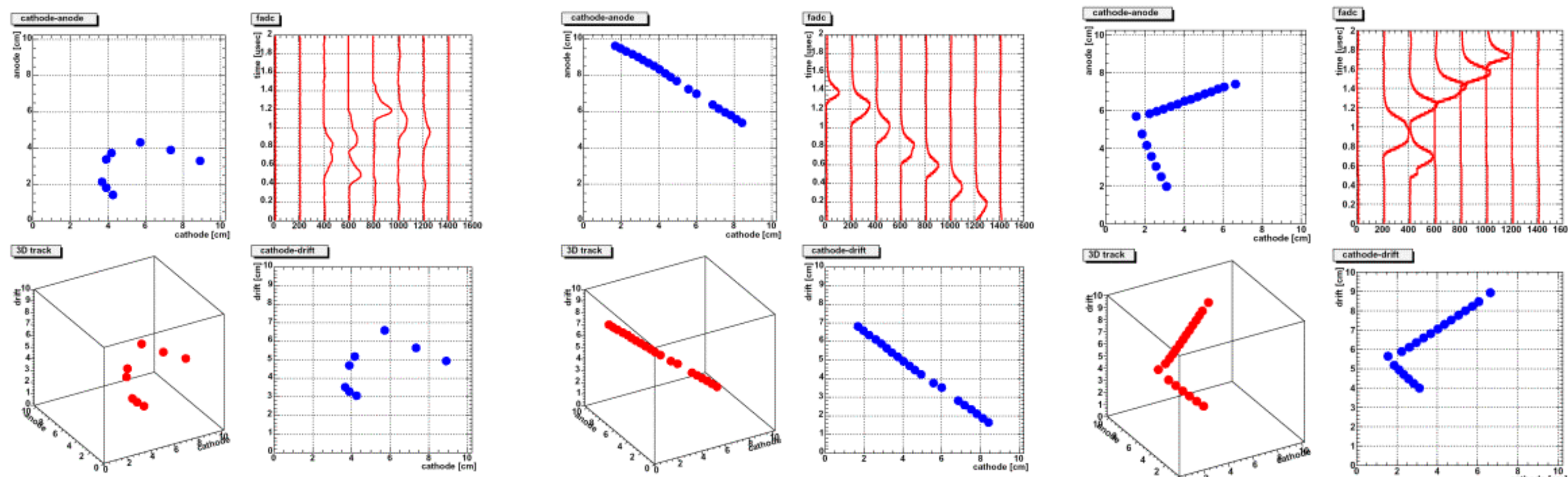


μ -PICにより得られたX線イメージ

micro-TPC

μ -PICに厚さ8cmのガスパッケージを取り付け、荷電粒子が入射してから信号が検出面に届くまでの時間も測定することで、荷電粒子の飛跡を数百 μ mの精度で3次元的に追うことができる。このようなTPC (Time Projection Chamber)としての μ -PICをmicro-TPCと呼んでいる。

このmicro-TPCにより下図のような様々な荷電粒子の飛跡が得られている。



β 線のtrack (^{90}Sr : Q=2.2MeV)

陽子のtrack (0.8GeV/c)

粒子の崩壊

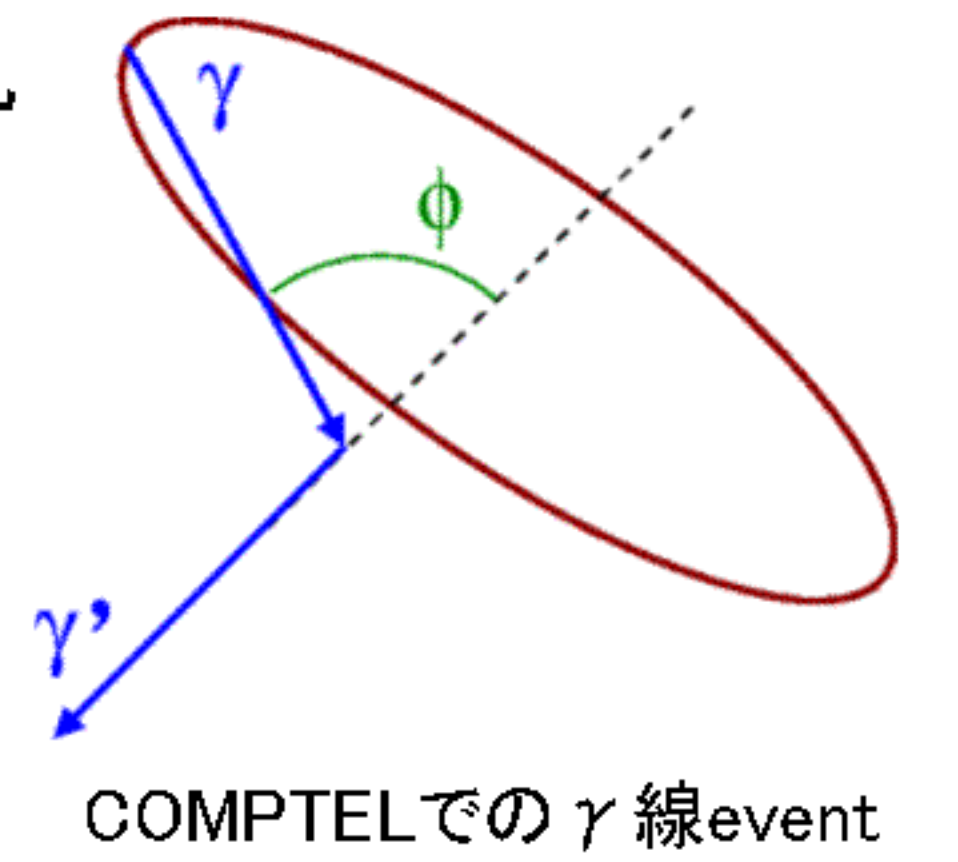
3. MeV γ 線カメラ

Compton Imaging

COMPTELでは上方の液体シンチレータでコンプトン散乱による反跳電子のエネルギーを、下方のNaIシンチレータで散乱 γ 線のエネルギーを捕らえ、それぞれの位置情報から γ 線の散乱方向を得ていた。これらから γ 線の散乱角 ϕ を知ることができる。

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

E_γ : 散乱 γ 線のエネルギー
 K_e : 反跳電子のエネルギー



COMPTELでの γ 線event

しかし、反跳電子の飛ぶ方向は知りえないので、元の γ 線の到来方向は右図のように円でしか知ることができない。この為、1方向を決定するには少なくとも3 events必要であり、backgroundの除去能力も低かった。

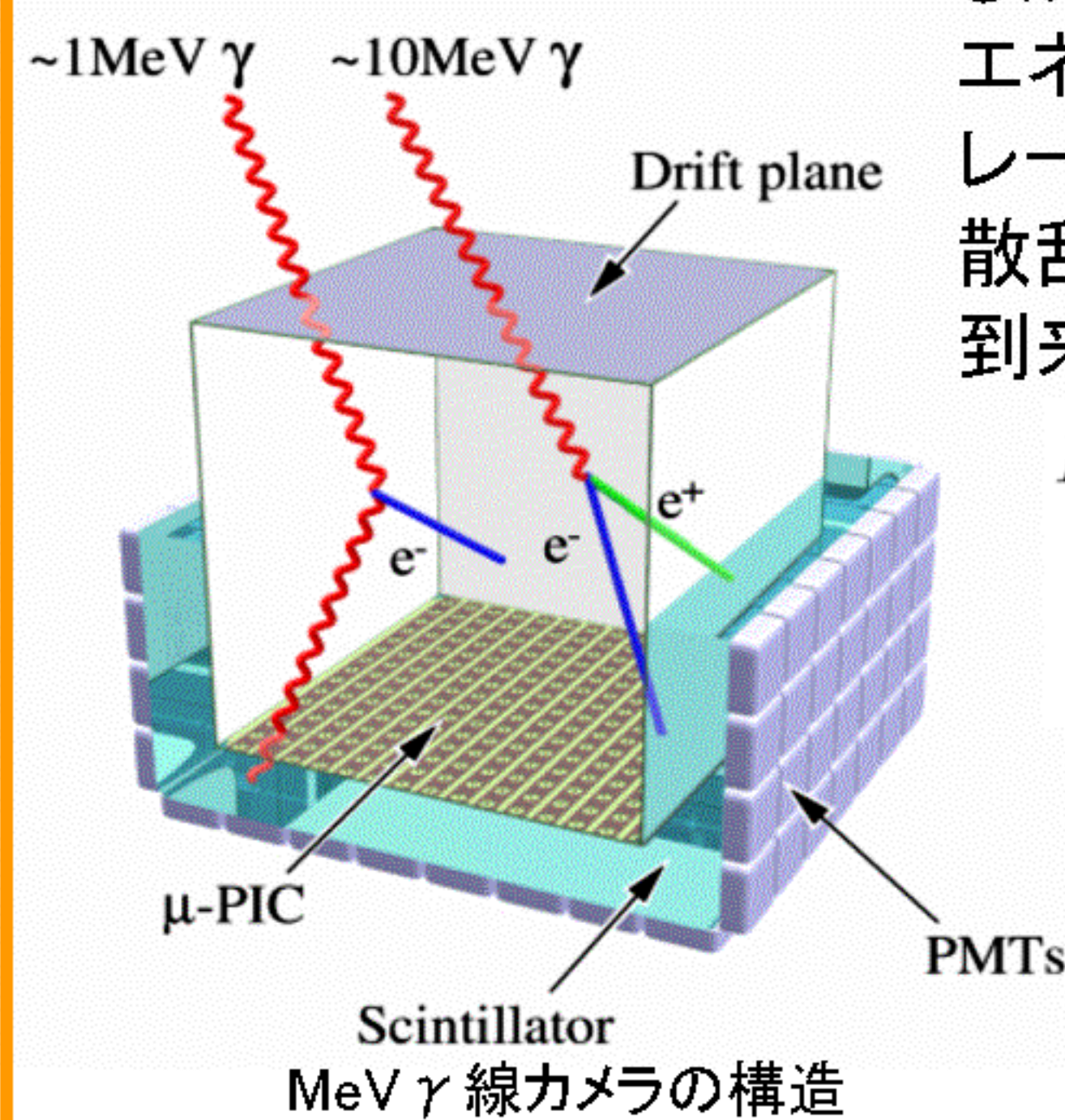
Advanced Compton Imaging

しかし散乱体としてmicro-TPCを用いると、反跳電子のエネルギーと共に飛跡を得ることができ、周囲のシンチレータの情報と合わせることで、eventごとにコンプトン散乱を再現することができ、元の γ 線のエネルギーと到来方向とを知ることができる。

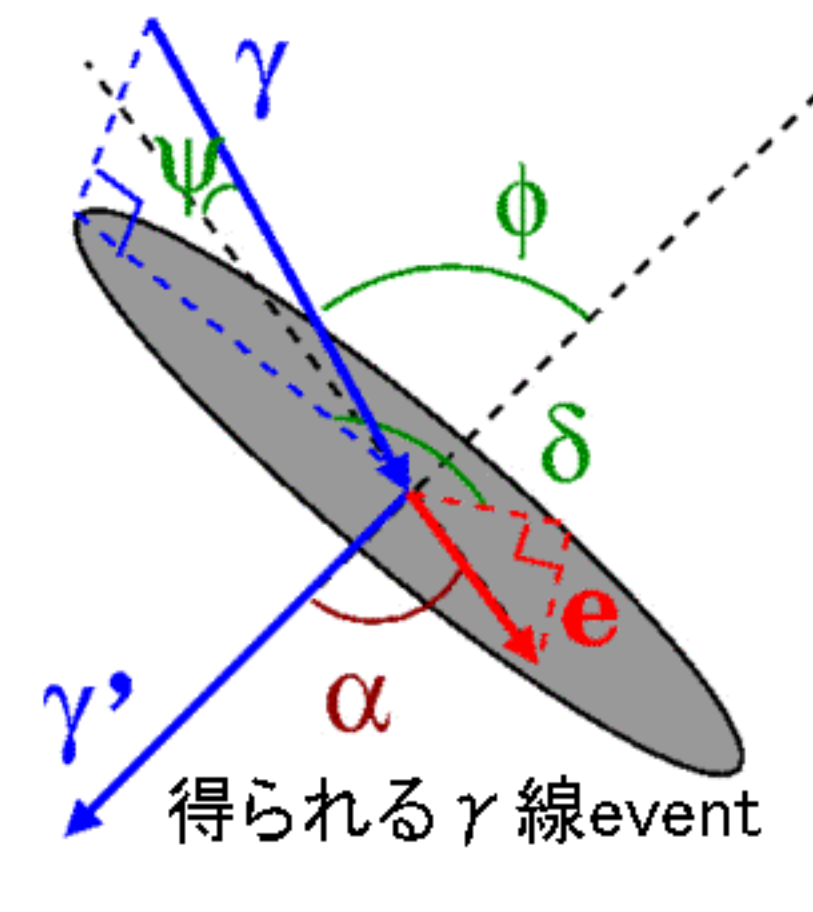
$$E_0 = E_\gamma + K_e$$

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

E_0 : 元の γ 線のエネルギー
 \vec{s} : γ 線の到来方向
 \vec{g} : 散乱 γ 線方向ベクトル
 \vec{e} : 反跳電子方向ベクトル
 ϕ : γ 線の散乱角
 α : \vec{g} と \vec{e} の離角



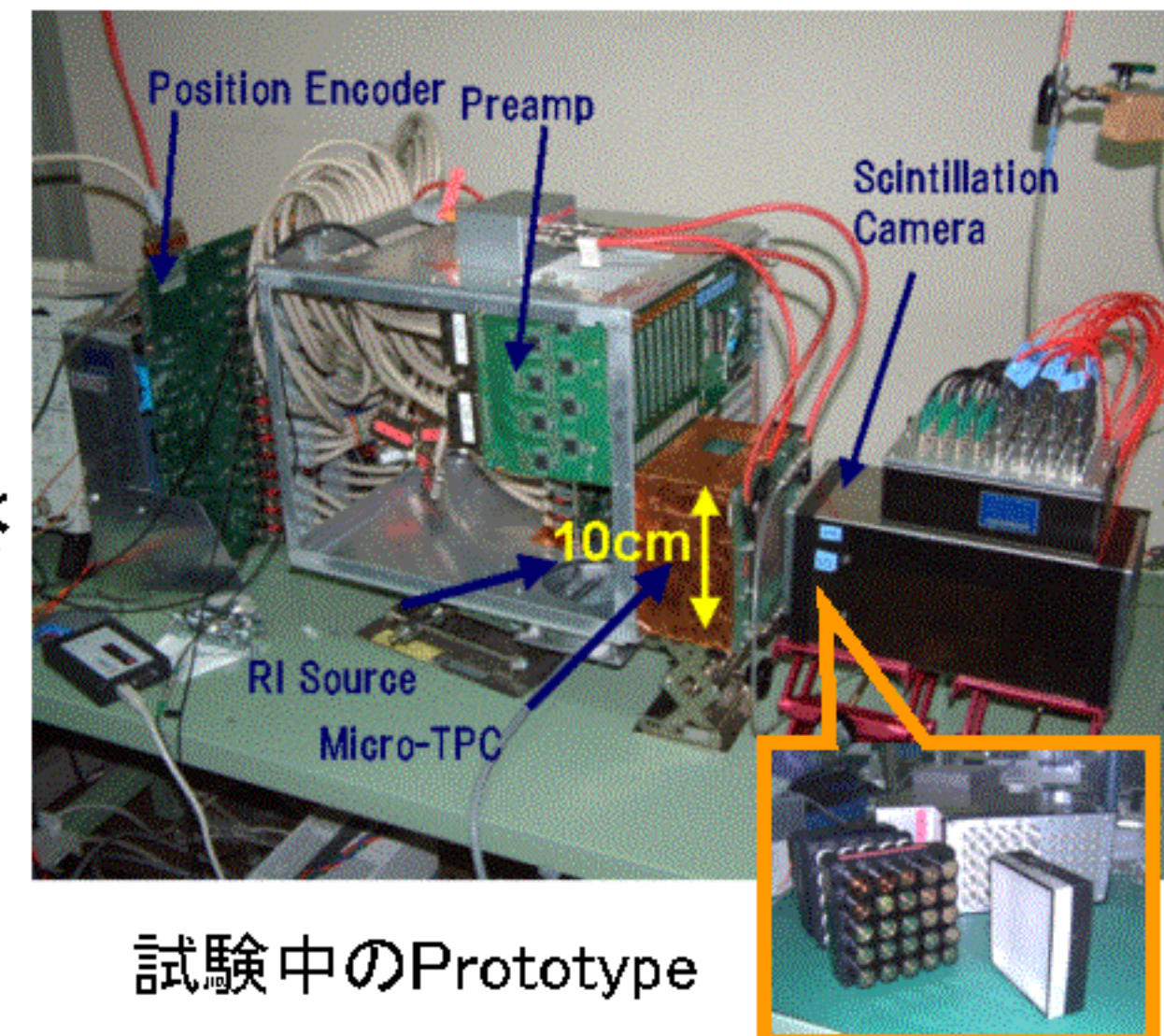
MeV γ 線カメラの構造



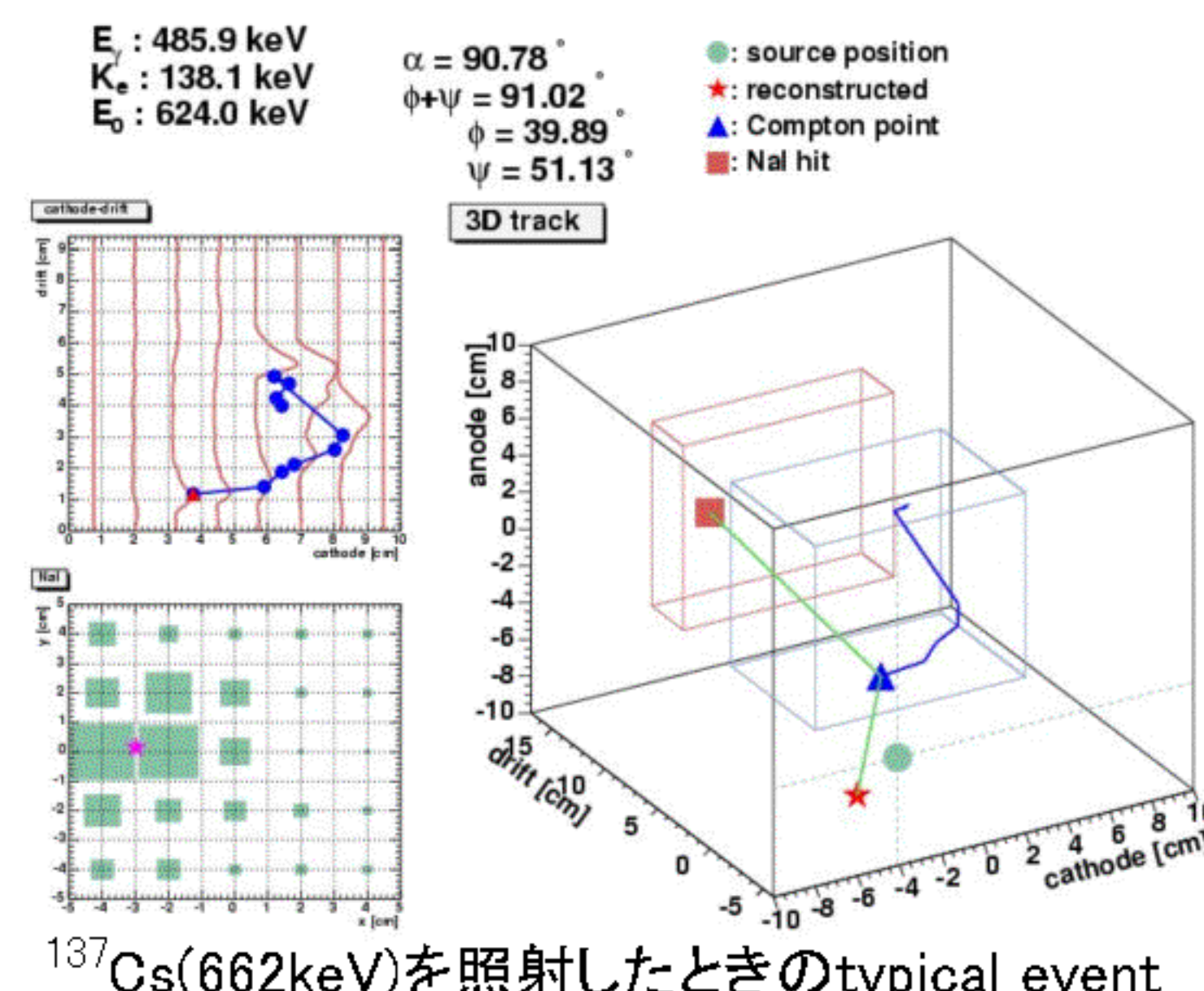
得られる γ 線event

MeV γ 線カメラ Prototype

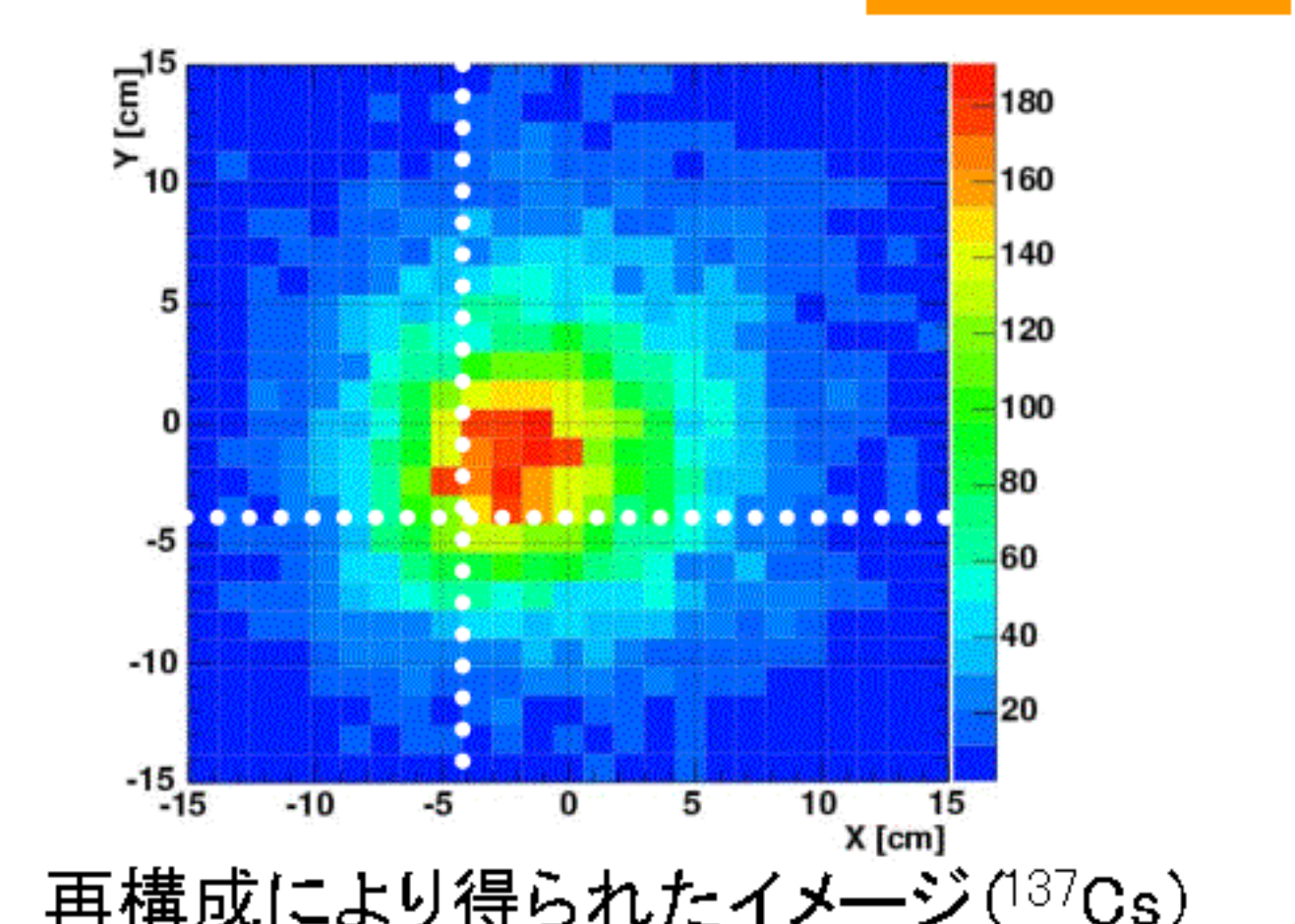
現在、10cm x 10cm x 8cmのmicro-TPCと10cm x 10cmのNaIシンチレータとを組み合わせ、prototypeとして動作試験を行っている(右写真)。このprototypeにより、下図のようなeventが検出され、再構成によるイメージも得られている。



試験中のPrototype



137Cs(662keV)を照射したときのtypical event



再構成により得られたイメージ(137Cs)

4. Summary & Future work

このMeV γ 線カメラの角度分解能を定義するものとして

- ARM($\Delta \phi$): γ 線の散乱角 ϕ の決定精度
 - SPD($\Delta \delta$): 運動平面の決定精度
- の2つがある。

現在のprototypeでは以下のような値になっている。

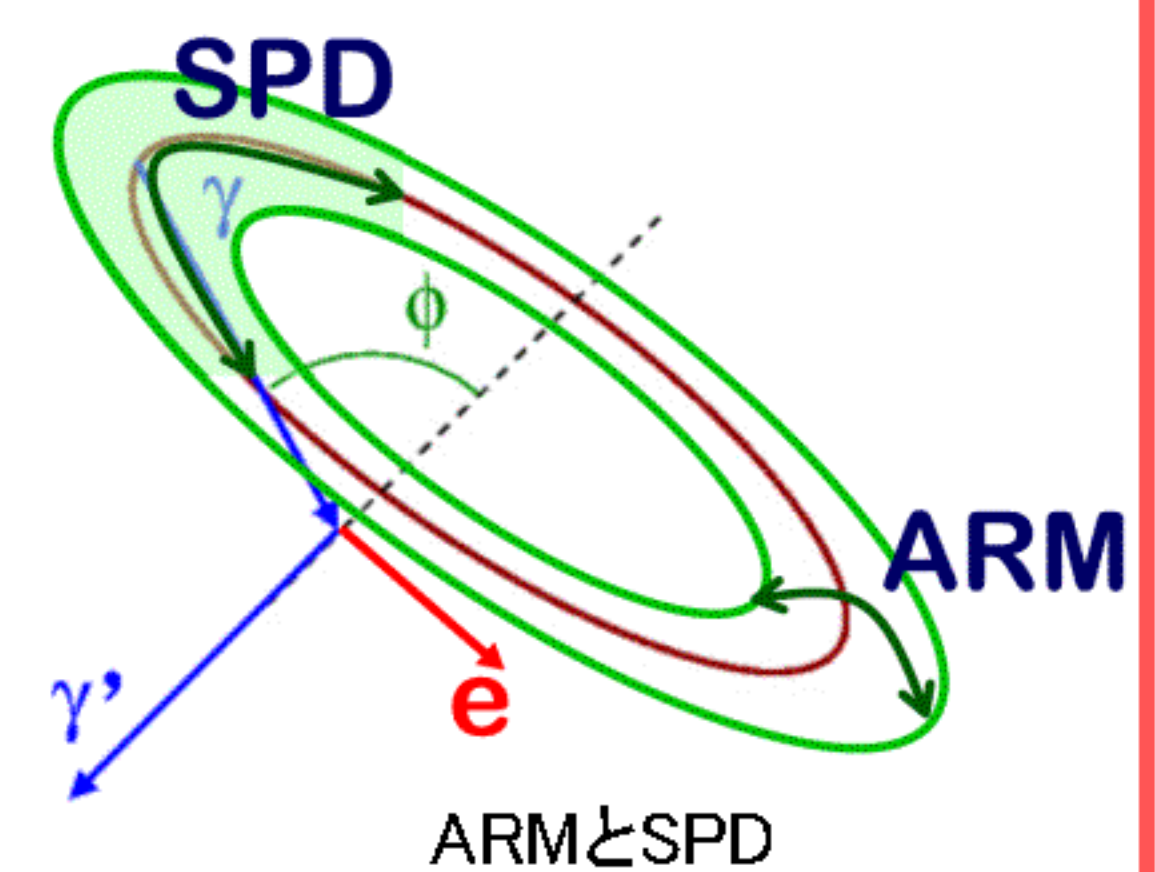
- $\Delta \phi \sim 15^\circ$
- $\Delta \delta \sim 25^\circ$

また、

- 30cm x 30cmの大面積 μ -PICの開発
- flat panel PMTやPIN photo diodeを用いることによるシンチレータの位置分解能の向上
- 解析方法の改善
- μ -PICの電極構造の最適化
- ガスの圧力・種類の選定

等の改善を行っていき、最終的には1eventにつき $\Delta \phi \sim 5^\circ$ 、 $\Delta \delta \sim 10^\circ$ の分解能を目指す。

また最終的には、特定研究「ブラックホール天文学の新展開」の一環として、2006年に気球実験を行う予定である。



ARMとSPD

<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/mu-PIC/index.html>



MPGC TECHNIQUE