

# **P6 課題研究**

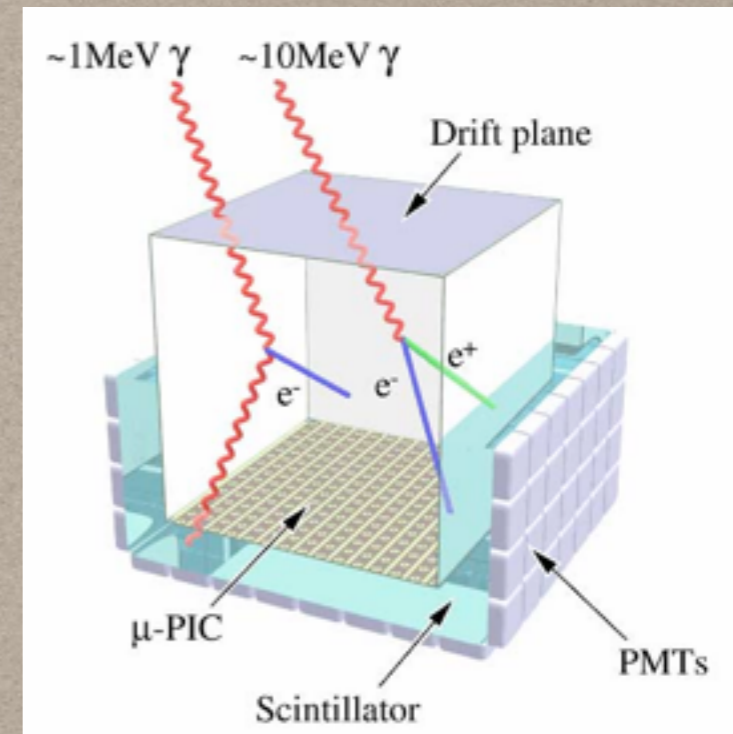
**Geant4を用いたETCCの  
配置による偏光感度の違い**

**Date:2015/02/23 池田智英**

# ETCCとは

- コンプトン散乱を利用したMeVガンマ線研究室の偏光検出器(Electron Tracking Compton Camera)
- 散乱ガンマ線と反跳電子のベクトルから、コンプトン散乱を再構成

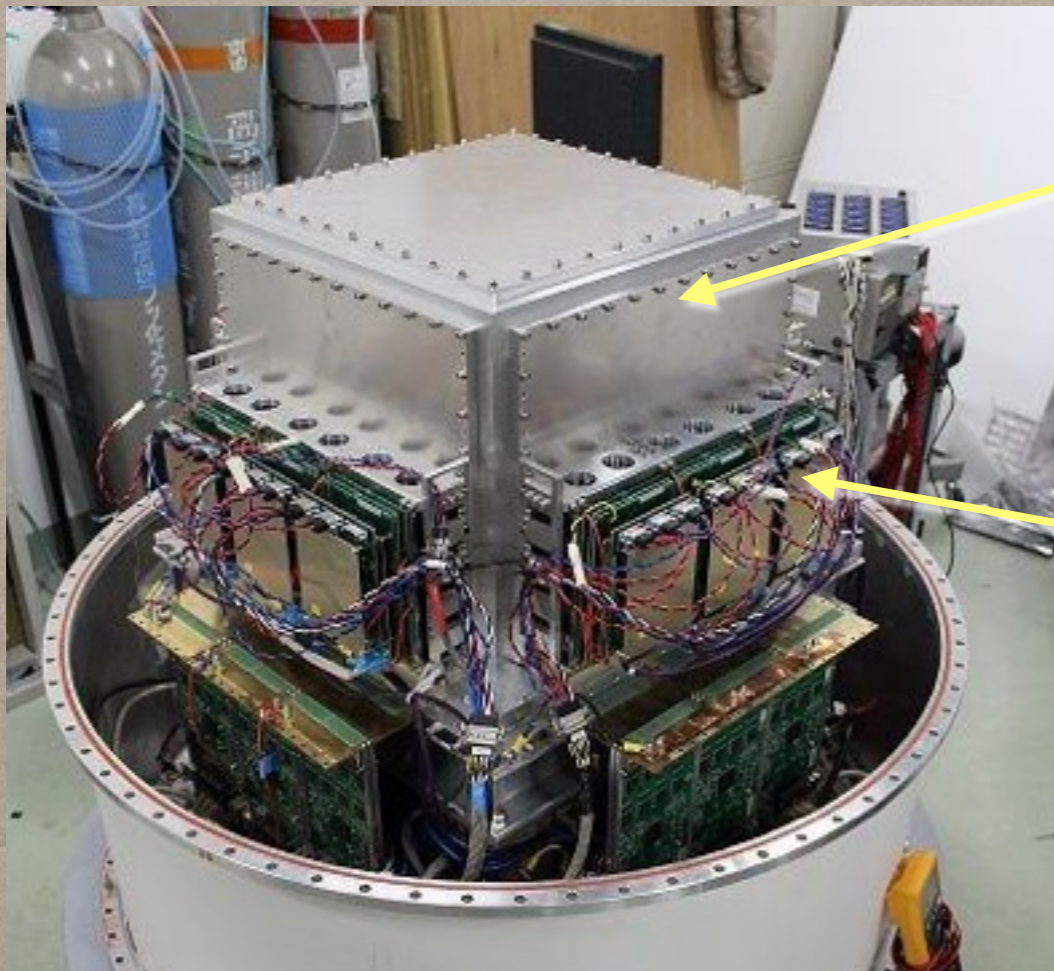
## ETCCの概念図



※ガンマ線研修室から引用

30cm立方でAr95% C4H10 2%  
CF4 3%

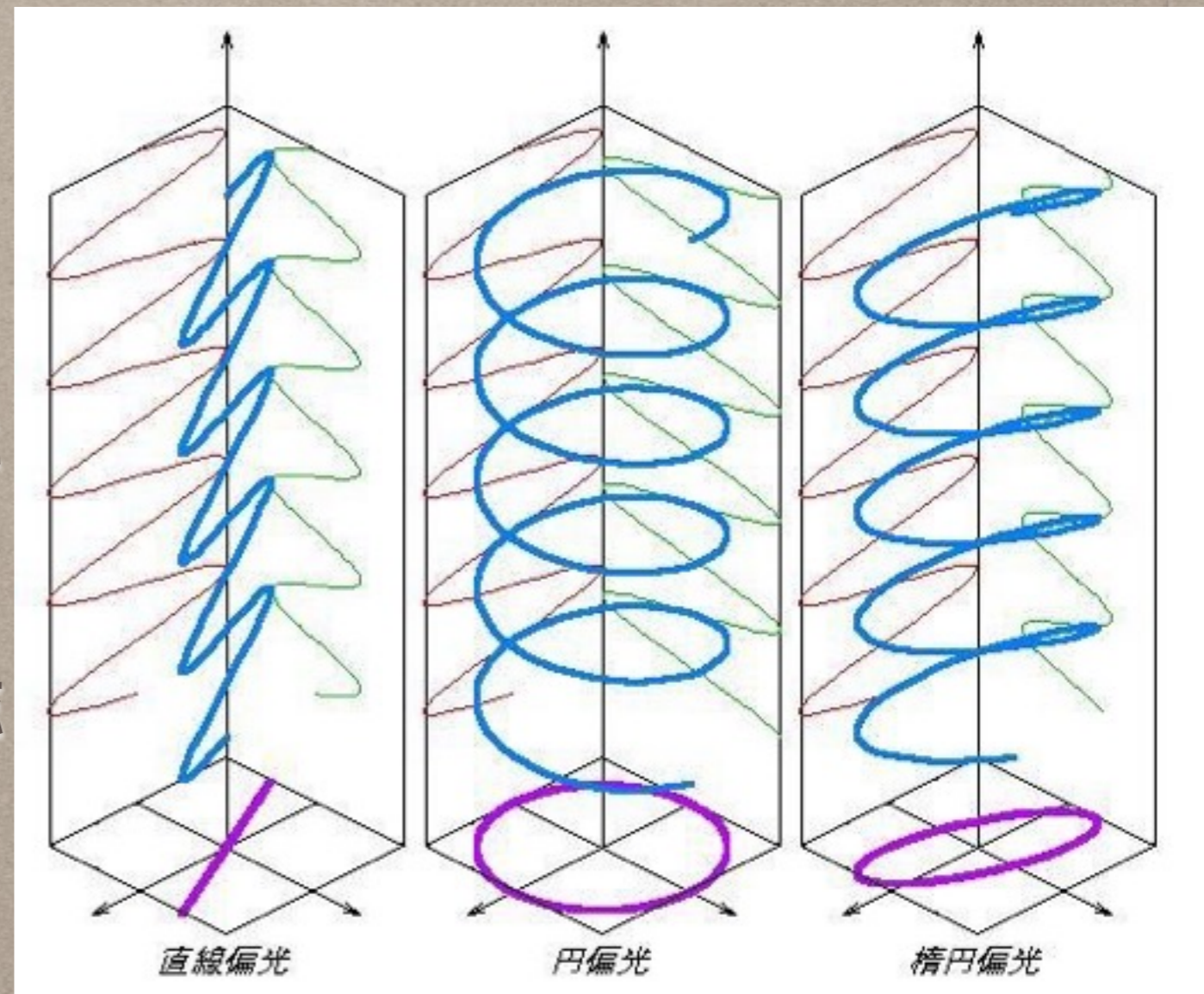
4.8cm × 4.8cmの大きさのシンチレーターが全ての側面に三つずつ、ガンマ線の入射面と逆の面に六つ配置



# 偏光について

- 観測されるガンマ線は、様々な天体から様々な要因(散乱、磁場、強重力場)により「偏光」という状態を伴っている。
- 偏光とは、電場が特定の方向にそろって振動していること
- 偏光を測ることで、その星の磁場構造、放射機構を解明することにつながる。

## 偏光の図



※wikipedia 「偏光」より引用

# 偏光におけるコンプトン散乱 1

## 偏光状態における散乱断面積の式

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \frac{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \phi}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)^2} \left( 1 + \frac{\gamma^2(1 - \cos \theta)^2}{2(1 - \sin^2 \theta \cos^2 \phi)\{1 + \gamma(1 - \cos \theta)\}} \right)$$

$r_0$ : 電子の古典半径  $\theta$ : 散乱角  $\phi$ : 方位角  $\gamma$ :  $E/m_e c^2$

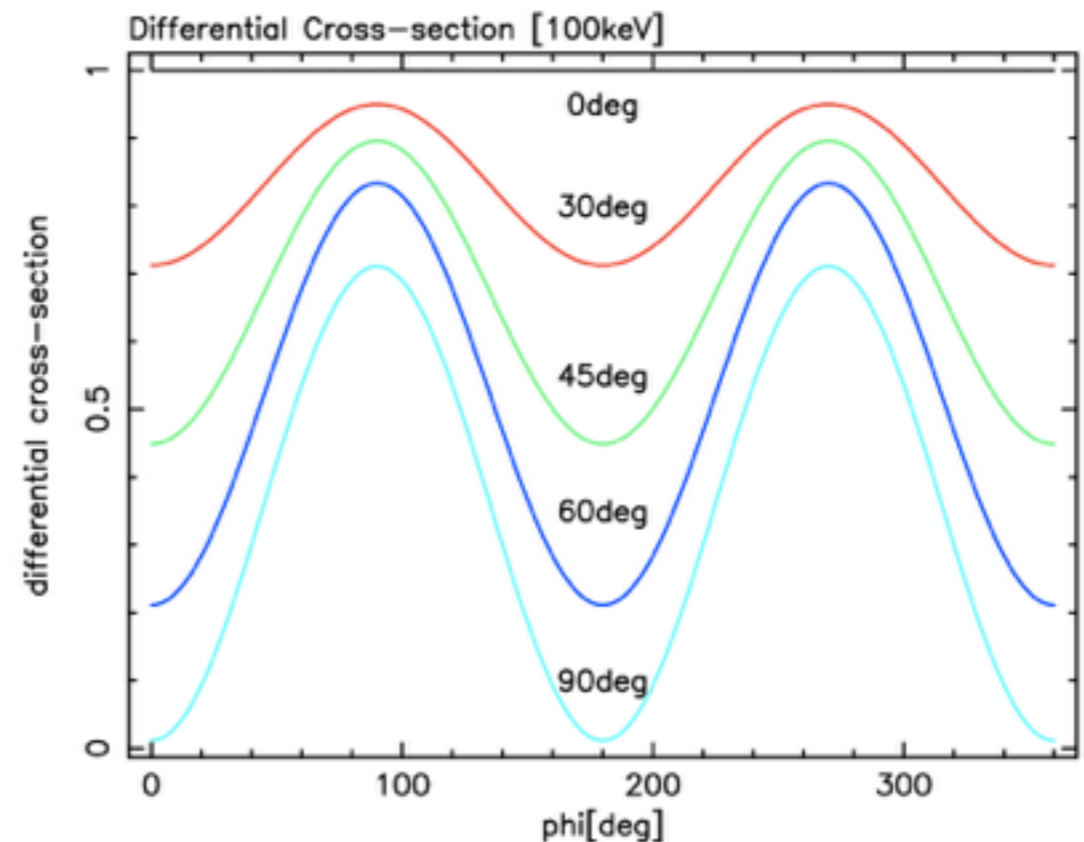
に例として  $\theta = 90^\circ$  とすると、

$$\frac{d\sigma}{d\theta d\phi} = r_0^2 \frac{\sin^2 \phi}{1 + \gamma} \left( 1 + \frac{\gamma^2}{2 \sin^2 \phi (1 + \gamma)} \right)$$

となり、 $\phi$  方向の散乱角度分布は  $\sin \phi$  カーブを描く。

方位角に対して  $\theta = 90^\circ$  で振幅が最大となる。

## 散乱角度分布の図



# 偏光におけるコンプトン散乱2

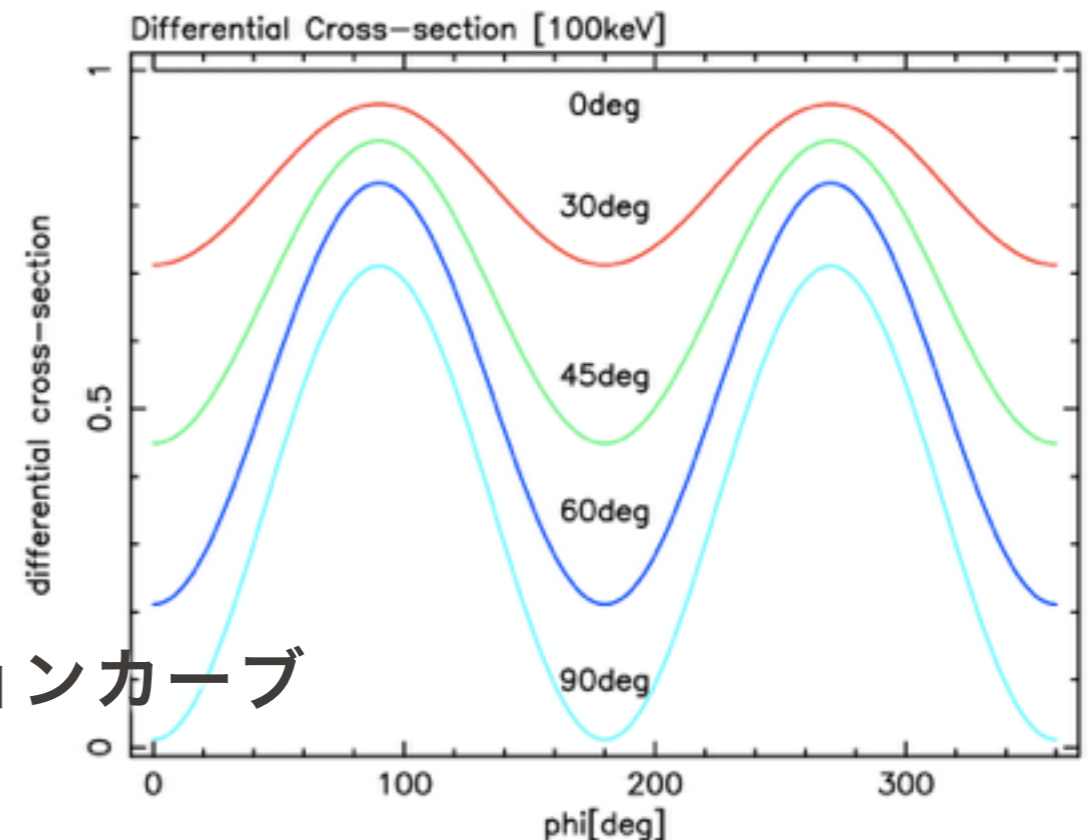
偏光検出器の性能を表すパラメータとしてモジュレーションファクタ  $M$  と検出効率  $\eta$  がある。

散乱強度分布は方位角について  $\sin$  カーブを描き、 $M$  はそのカーブの最大値を  $\max$ 、最小値を  $\min$  として、

$M = \frac{\max - \min}{\max + \min} = \sin$  の振幅/強度平均

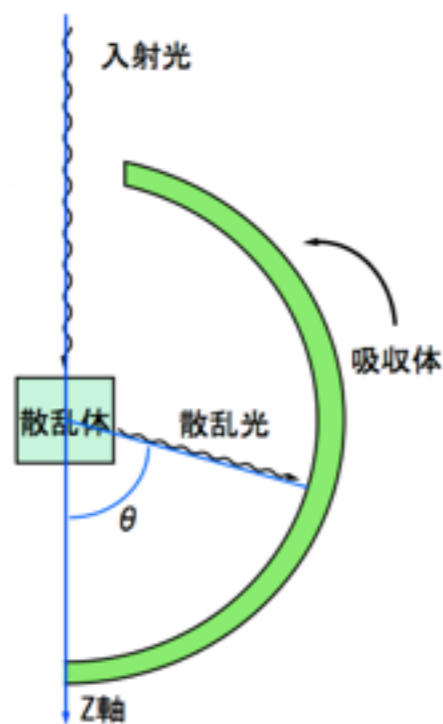
となる。 $M$  が大きいほどその検出器での偏光の感度が高いことになる。

モジュレーションカーブ



# 偏光におけるコンプトン散乱3

検出効率 $\eta = \text{検出光子数} / \text{入射光子数}$  であり、 $\eta$ が大きいほど統計誤差が小さくなり正確なデータを得ることができる。しかし、散乱型検出器では構造的に $M$ を大きくしようとすると $\eta$ が小さくなってしまふ。



(a)  $\eta$  を最大にした検出器の断面図



(b)  $M$  を最大にした検出器の断面図

※増井 博樹氏 H18 修士論文より引用

# 偏光におけるコンプトン散乱4

そこで、 $M$ 、 $\eta$ を総合的に扱う指標として**MDP**(**Minimum Detectable Polarization**)がある。**MDP**とはある条件下で偏光観測を行った時の検出可能な最小の偏光度。 $3\sigma$ の優位度での

**MDP**は

$$MDP = \frac{3\sqrt{2}}{\eta S F M} \sqrt{\frac{\eta F S + B}{T}}$$

**S**:有効面積[ $\text{cm}^2$ ]    **F**:観測対象のフラックス[ $1/\text{sec} / \text{cm}^2$ ]

**M**:モジュレーションファクタ    **T**:観測時間[s]

$\eta$ :検出効率    **B**:バックグラウンドのフラックス[ $1/\text{sec} / \text{cm}^2$ ]

と表される。ここで、**B**を十分小さいとすれば

$$MDP = \frac{3\sqrt{2}}{M\sqrt{\eta S}} \sqrt{\frac{1}{FT}} \propto \frac{1}{M\sqrt{\eta}}$$

となり、 $M\sqrt{\eta}$ が大きくなるような配置を**Geant4**を使ったシミュレーションにより考えていく。

# GEANT4とは？

- Geant4とは、粒子の軌道を様々な条件下(通過する物質の種類や位置、粒子の種類やエネルギーなどの情報)でシミュレートすることのできるツールキット
- Geant4のプログラムコードはC++の言語で記述
- PhysicsModel :G4LivermorePolarizedComptonModel  
を使用

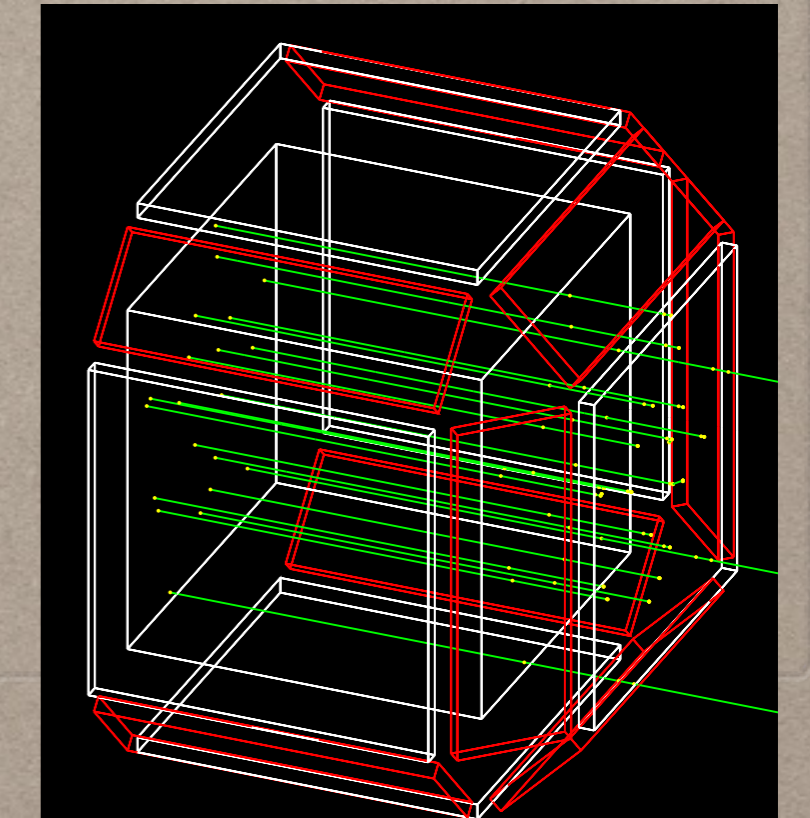
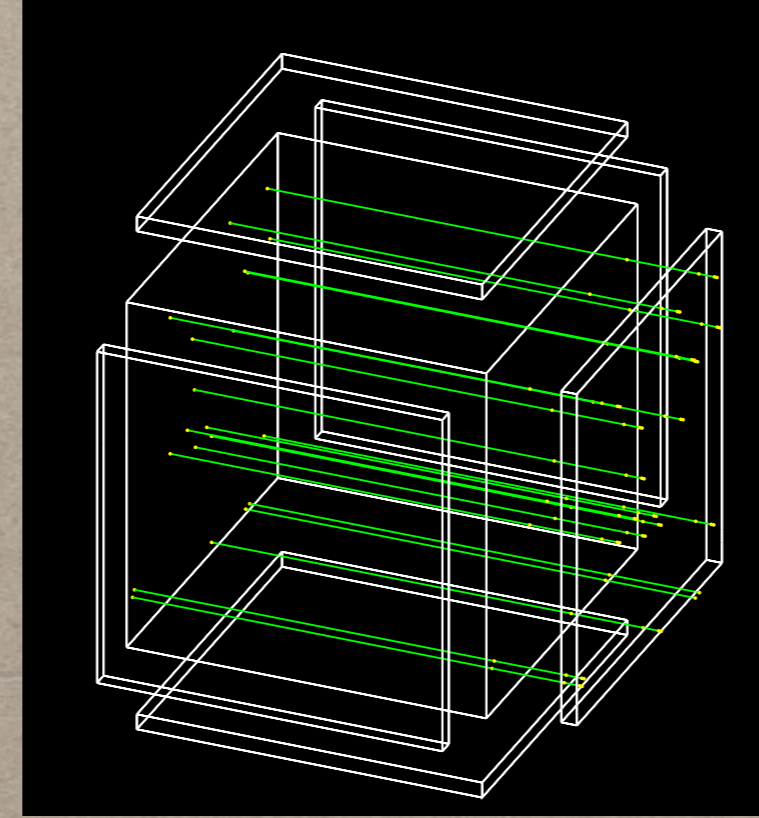
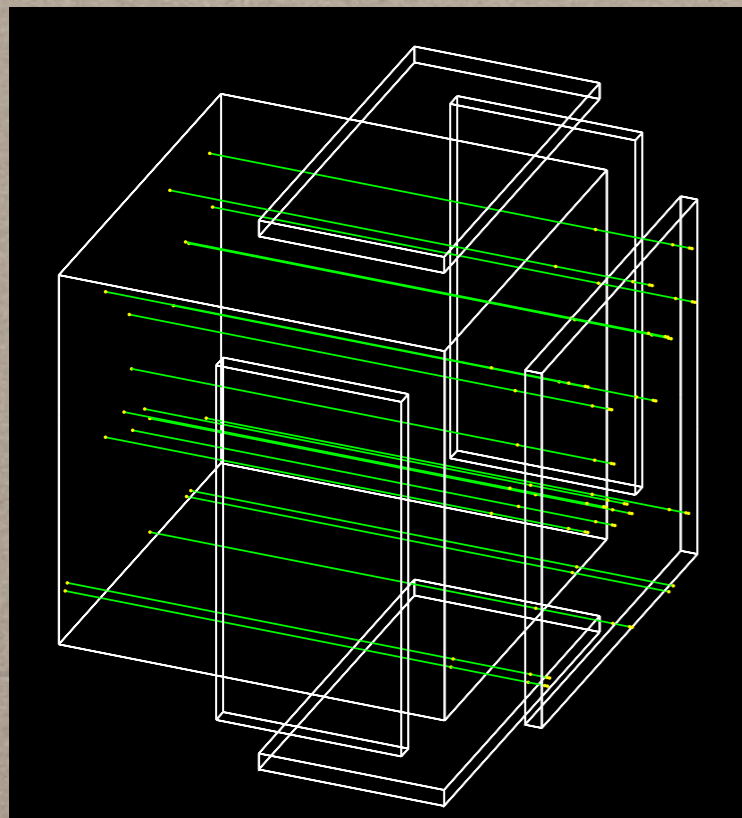
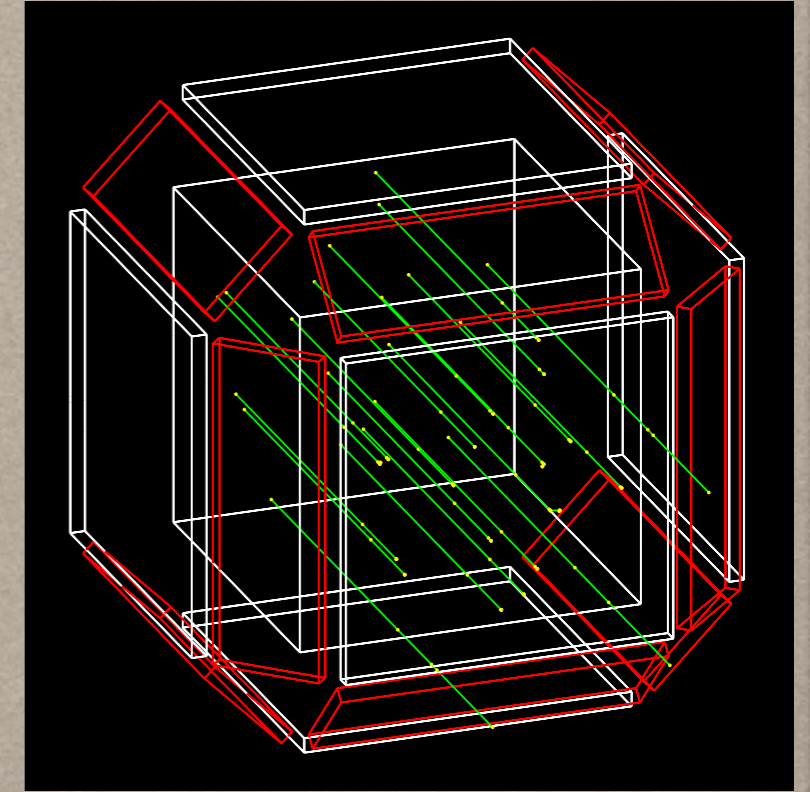
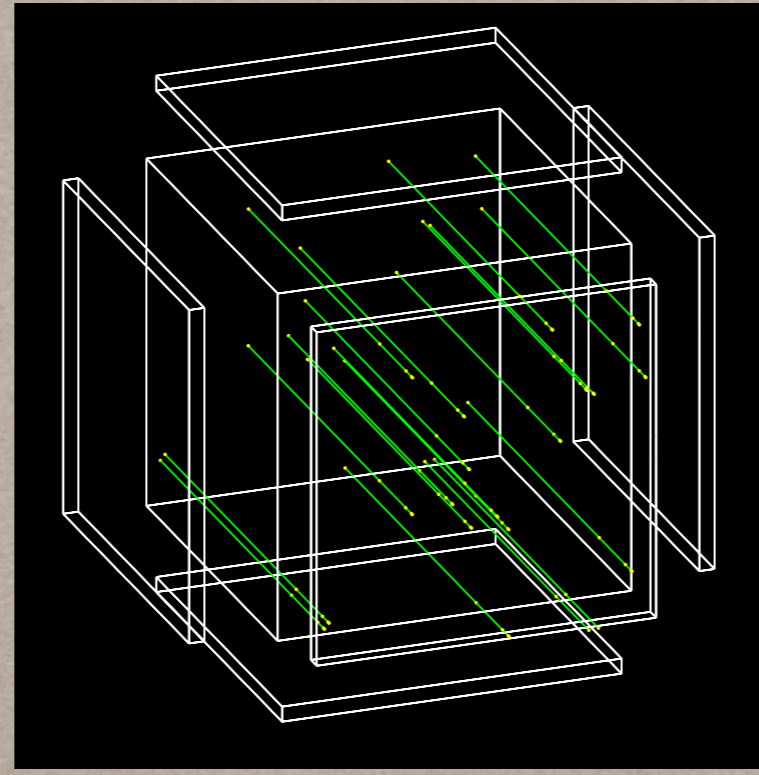
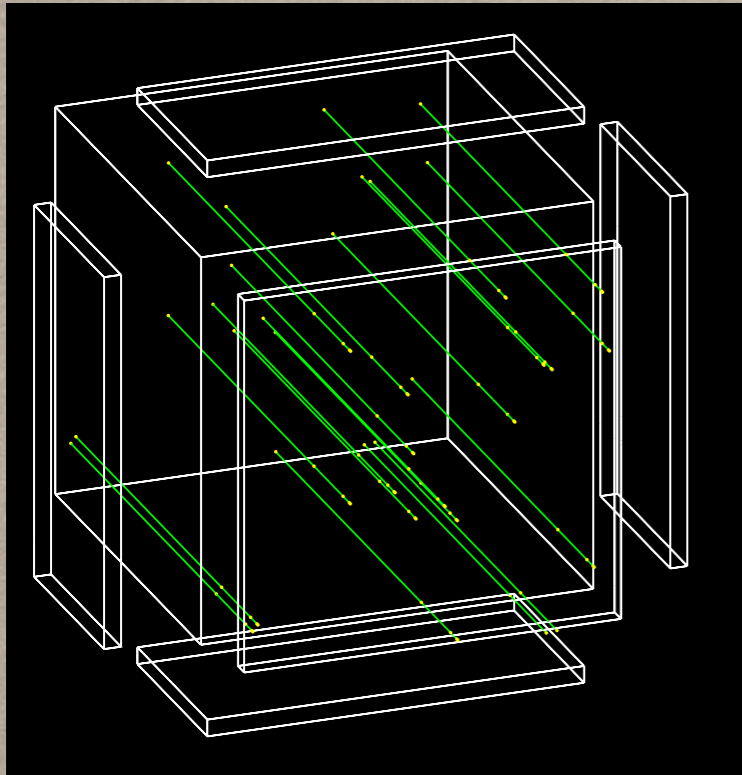


# 平行光5000万発を入射させた場合の三つの配置

(Ar95%, C4H10 2%, CF4 3%, 1気圧)

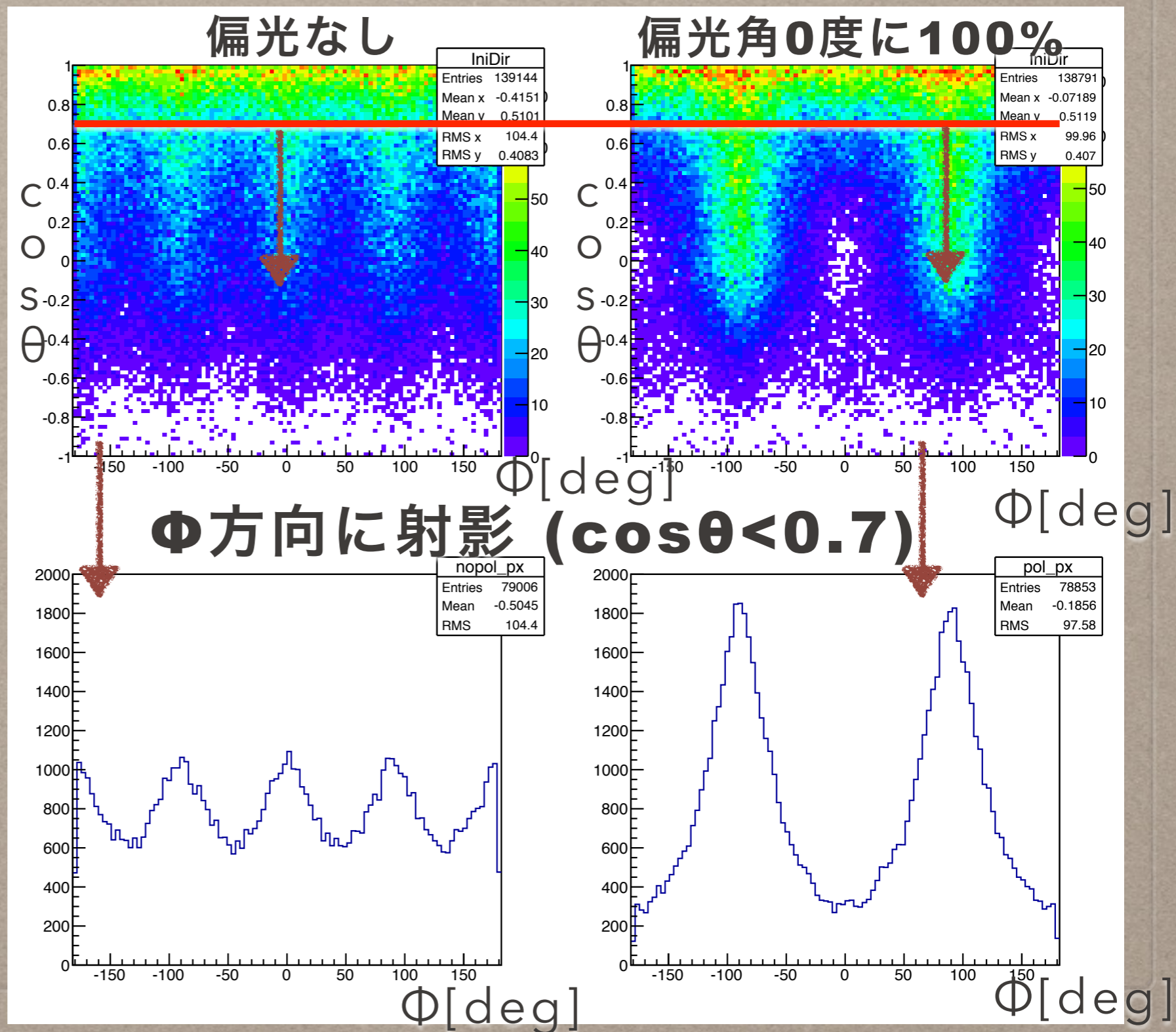
G1(通常)

G2(側面のシンチ二倍) G3(更に隙間を埋める)

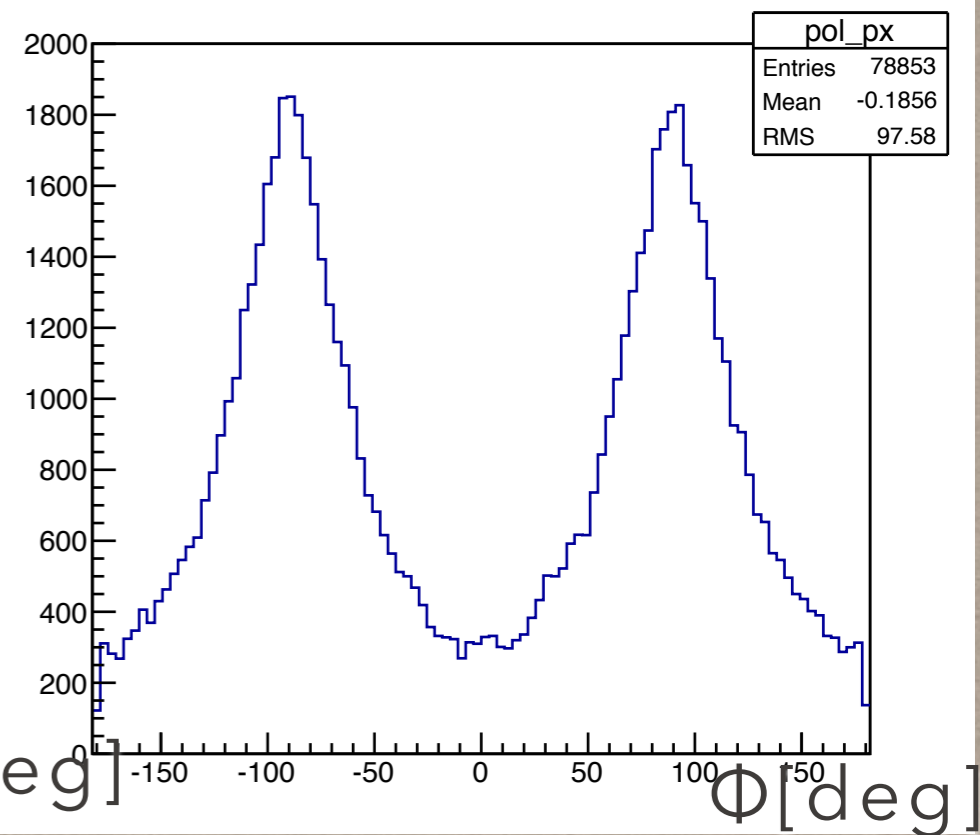
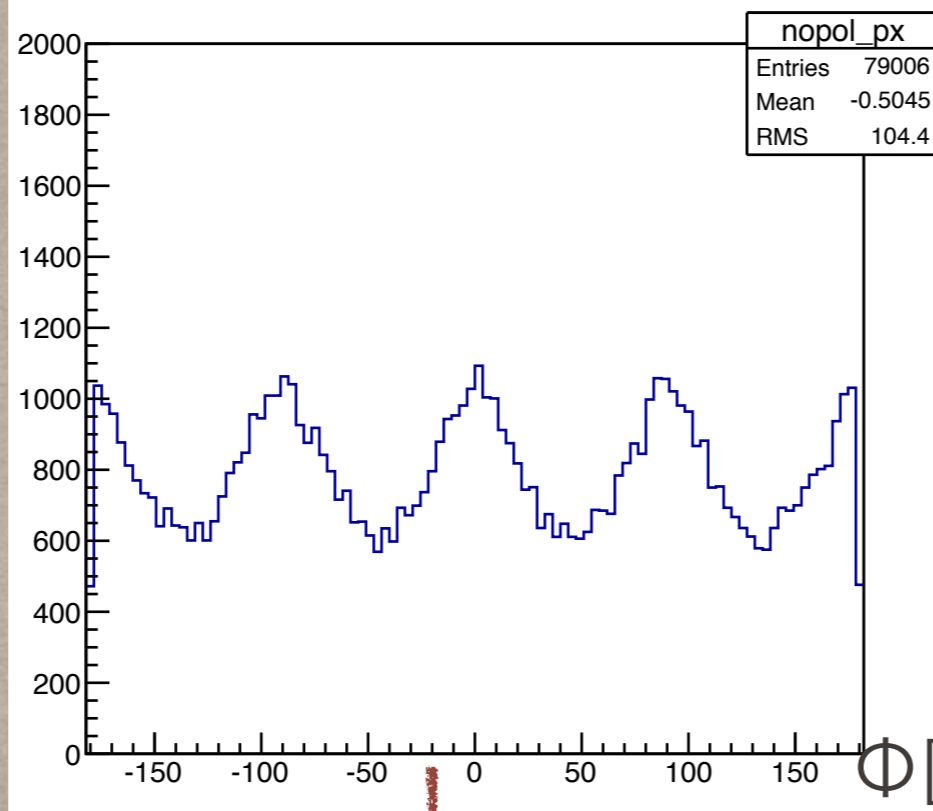


# 散乱二次元ベクトルマップ

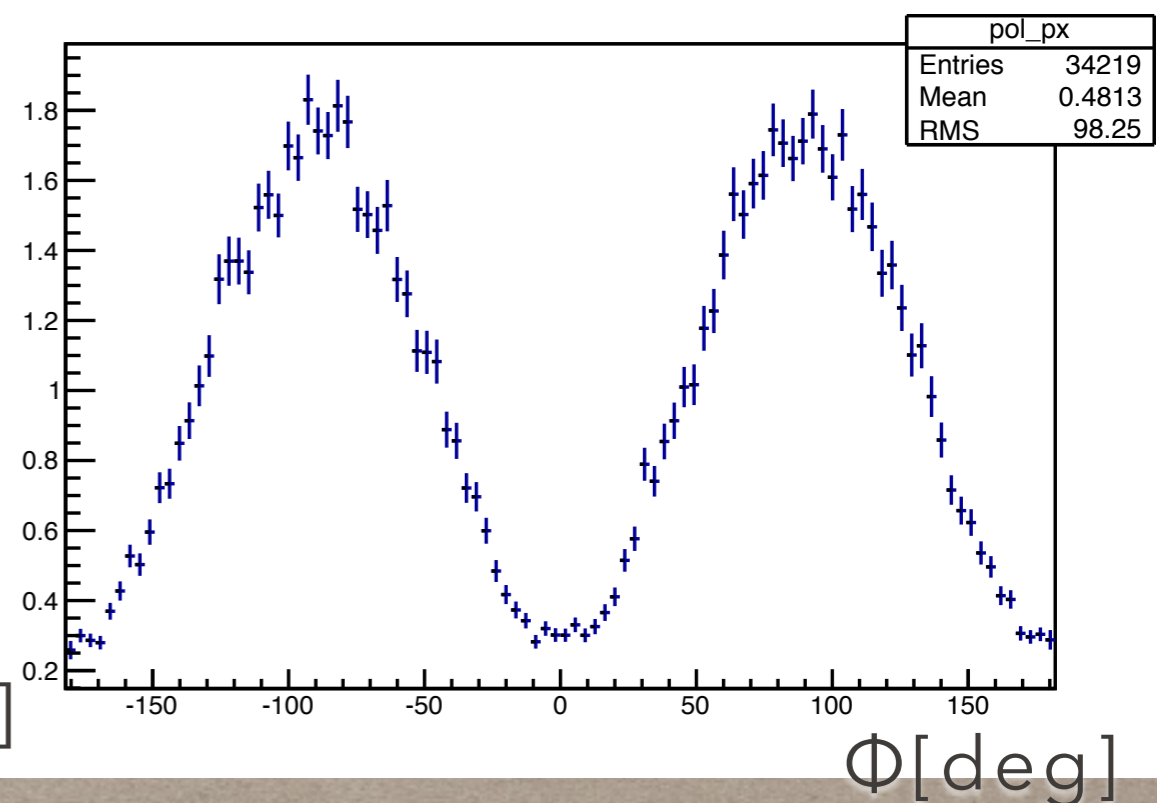
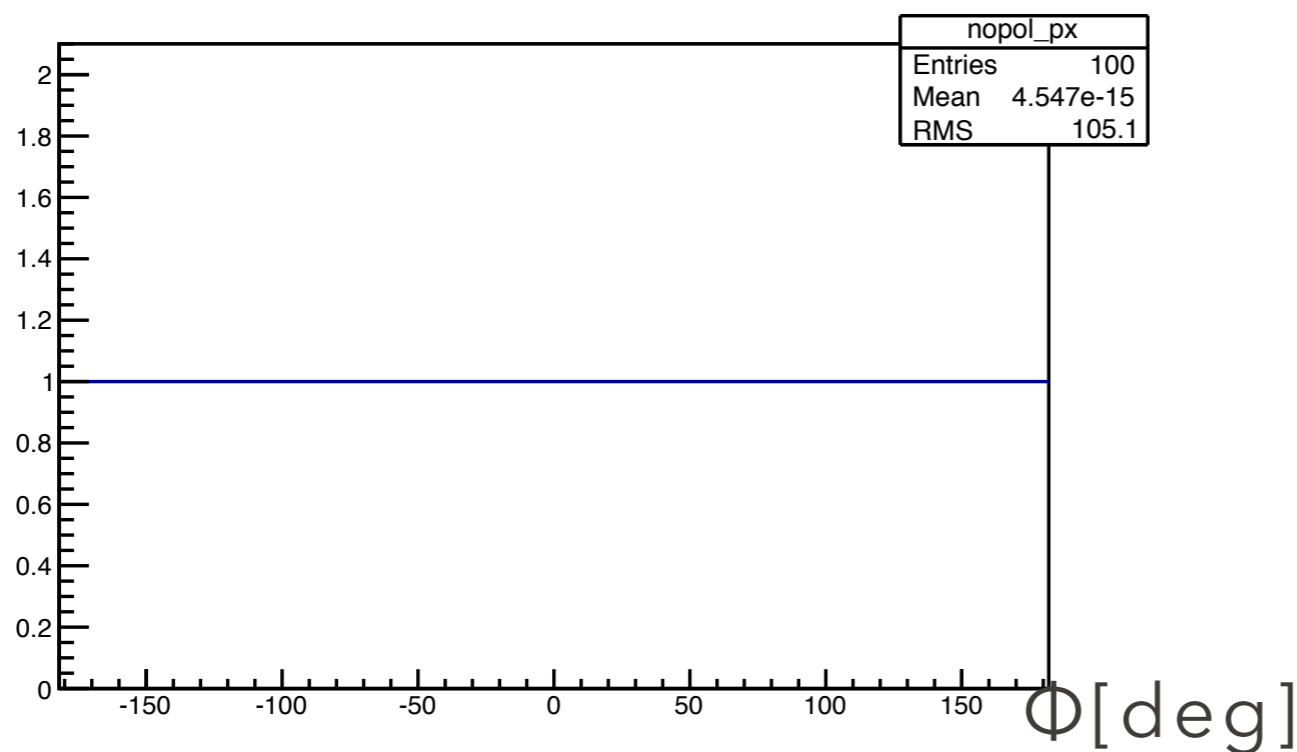
$\theta$ を散乱角、 $\Phi$ を方位角として右図はG1二次元散乱図を射影してやることで得られるモジュレーション。配置上、偏光無しでも偽のモジュレーションが見えてしまう。



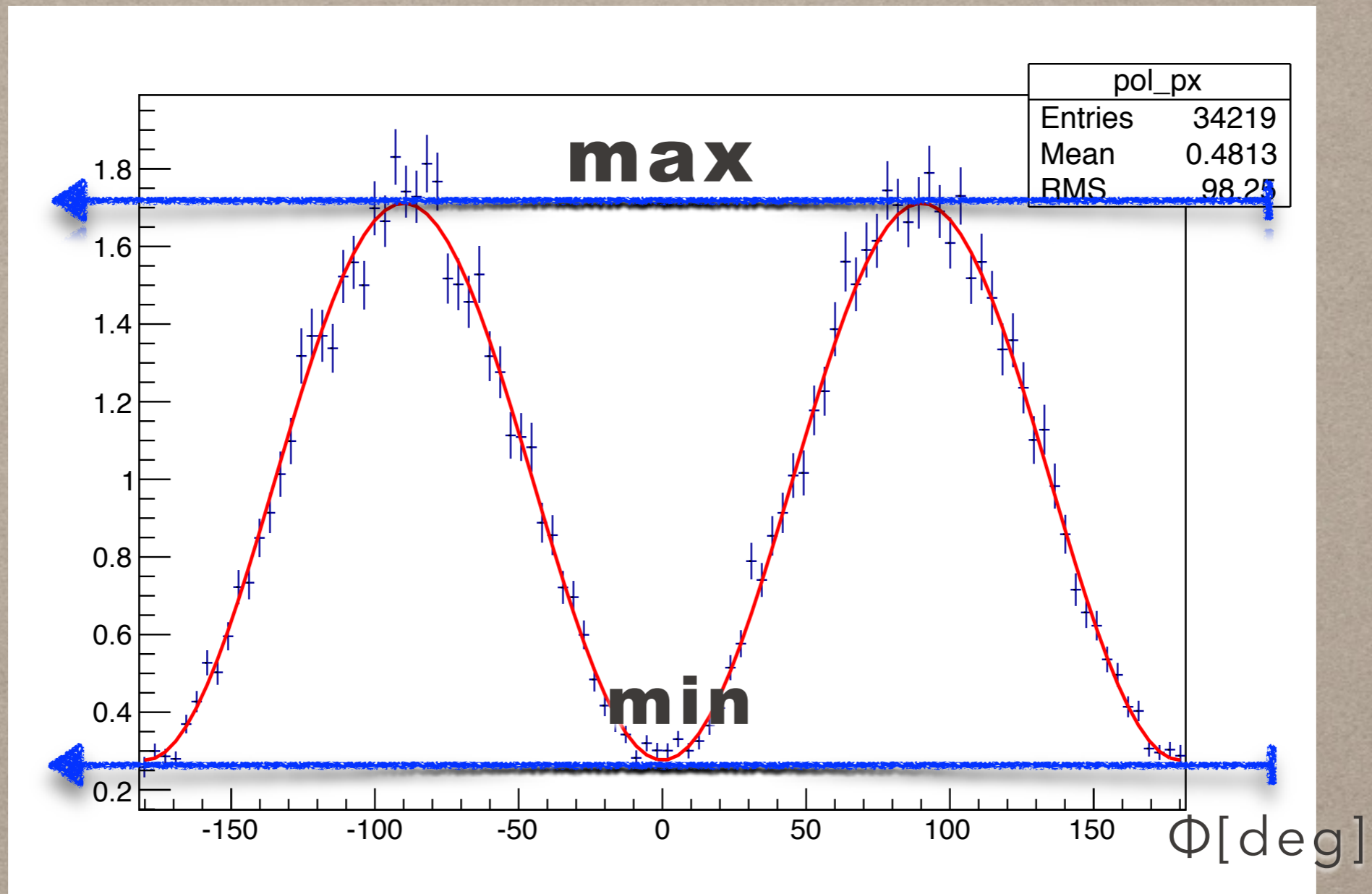
そこで、右の  
様にbinごと  
に無偏光で割  
ってやること  
でレスポンス  
の補正をする。



binごとに割り算



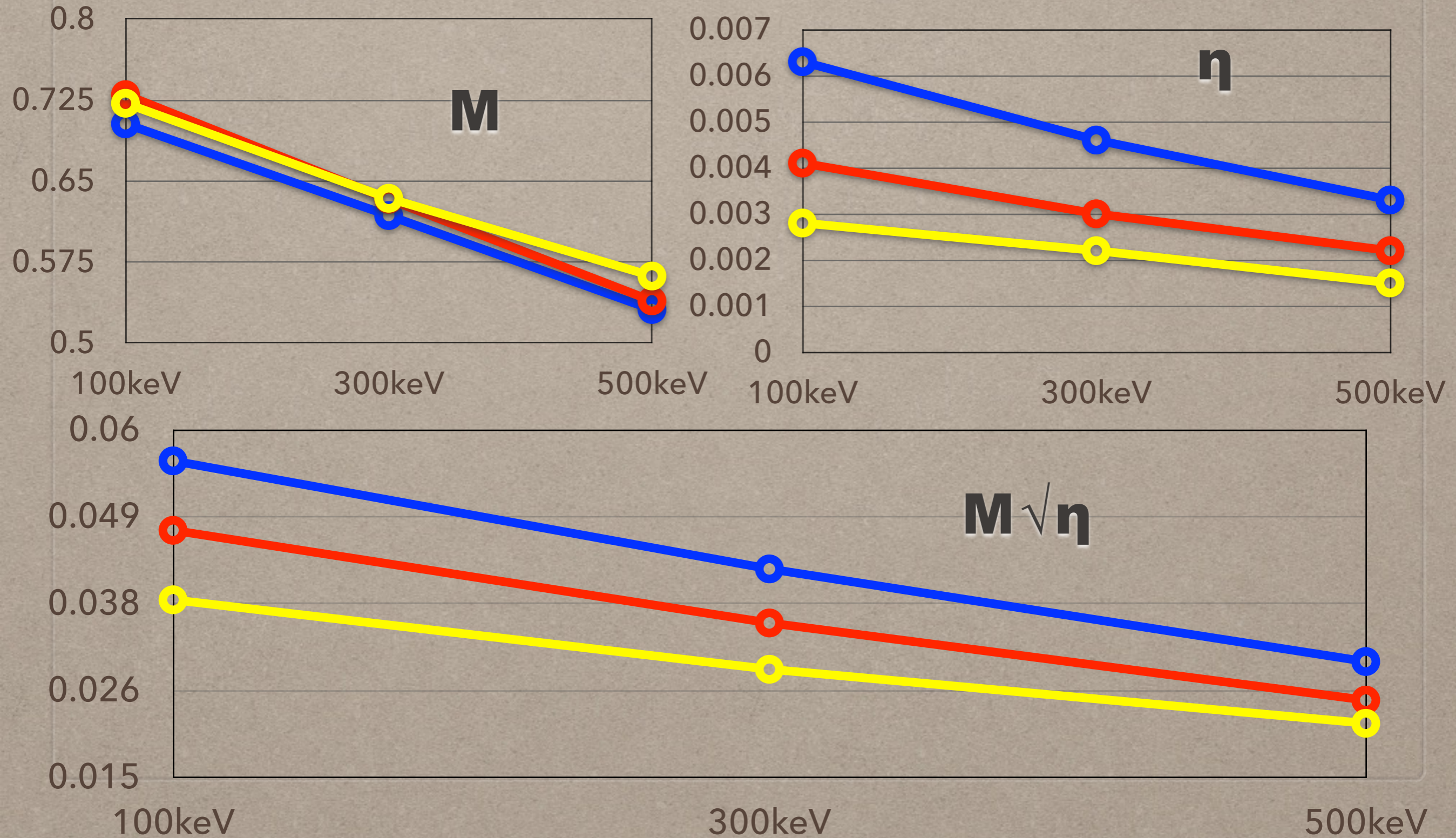
得られたモジュレーションカーブにsin関数で  
**fitting**してやることで、**max**と**min**を得る



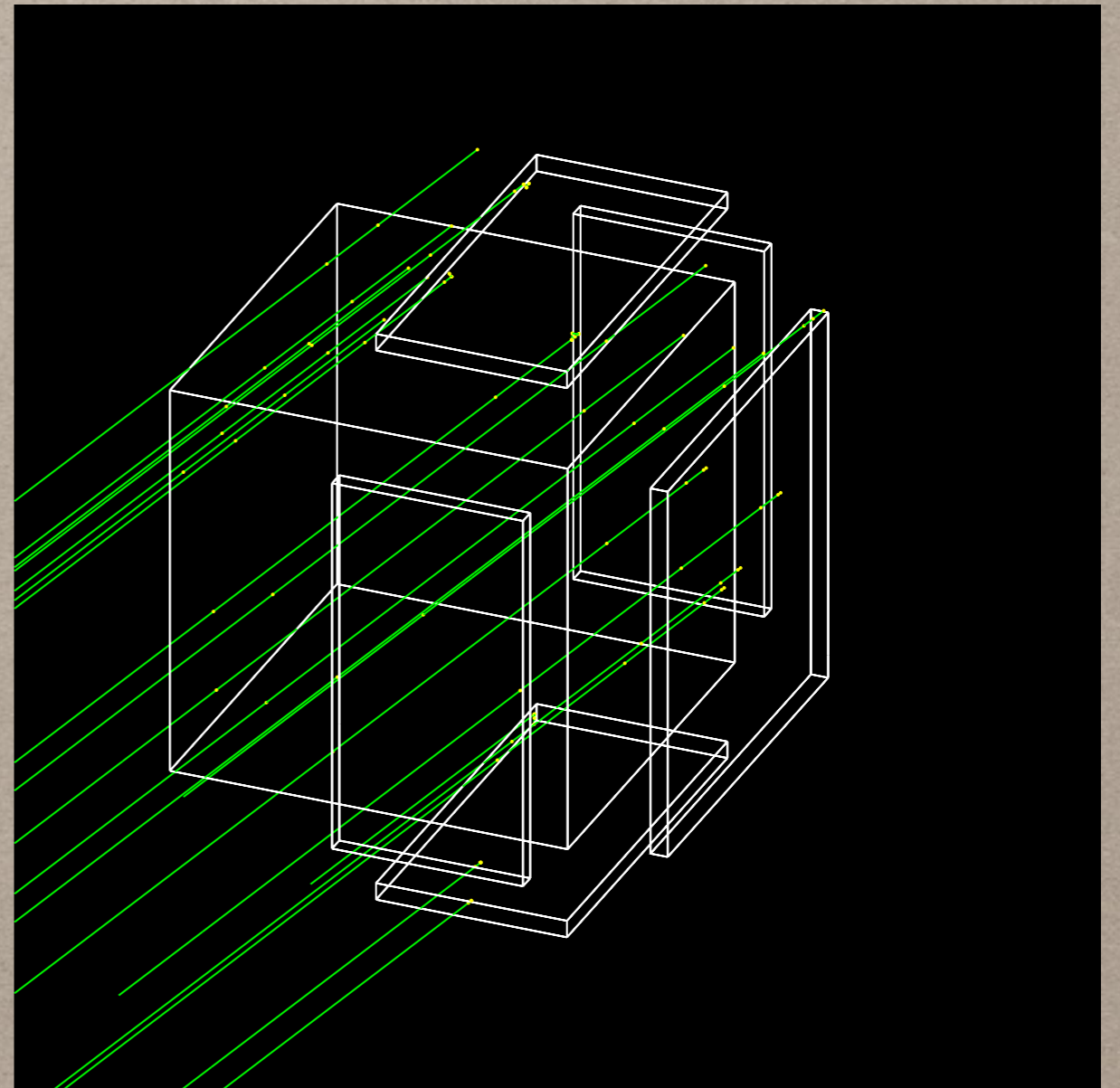
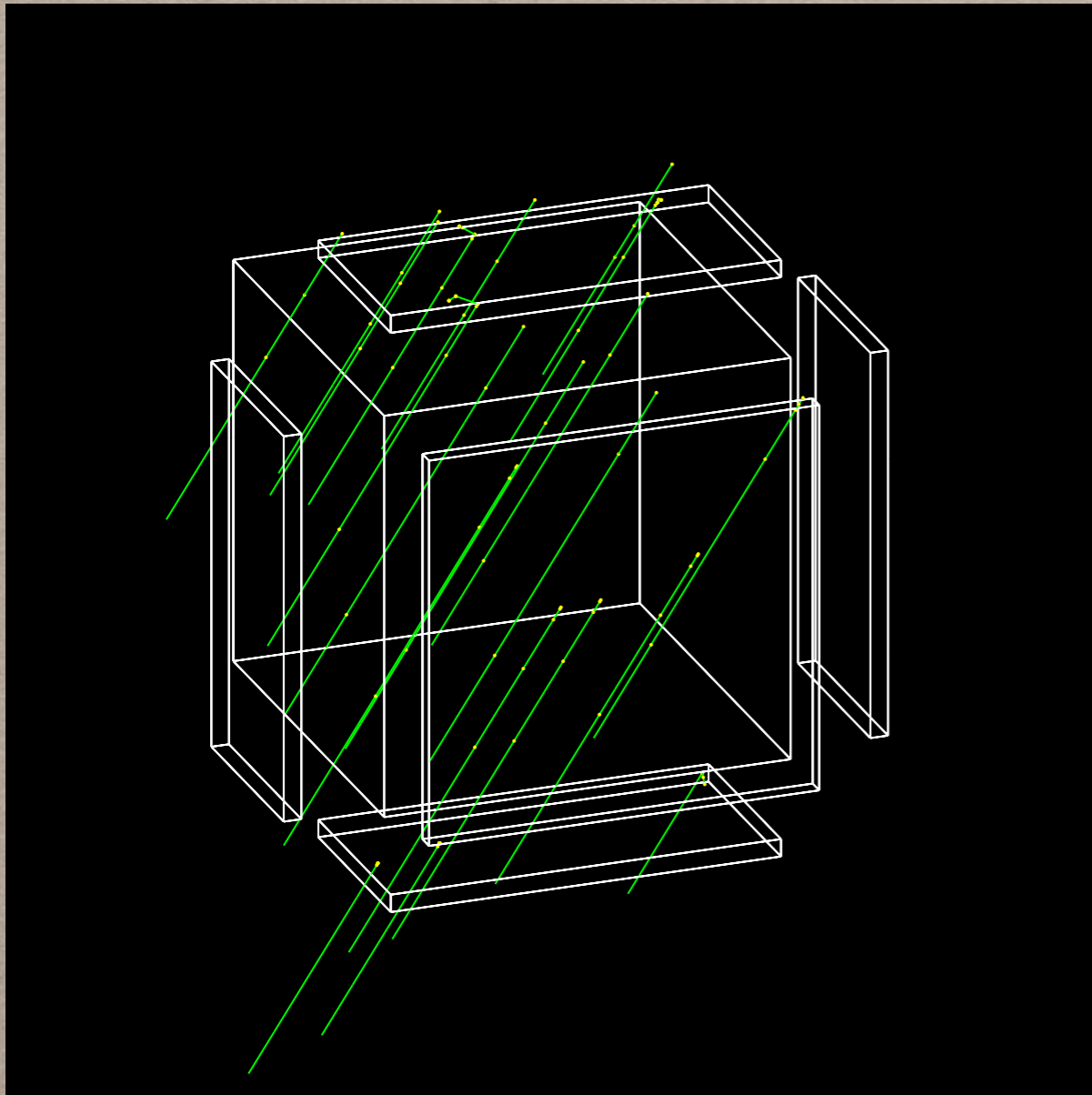
$M = \frac{\text{max} - \text{min}}{\text{max} + \text{min}}$      $\eta = \text{検出光子数} / \text{入射光子数}$   
により、 $M\sqrt{\eta}$ を計算していく

# M、 $\eta$ 、 $M\sqrt{\eta}$ のエネルギー依存性

**G1** **G2** **G3**

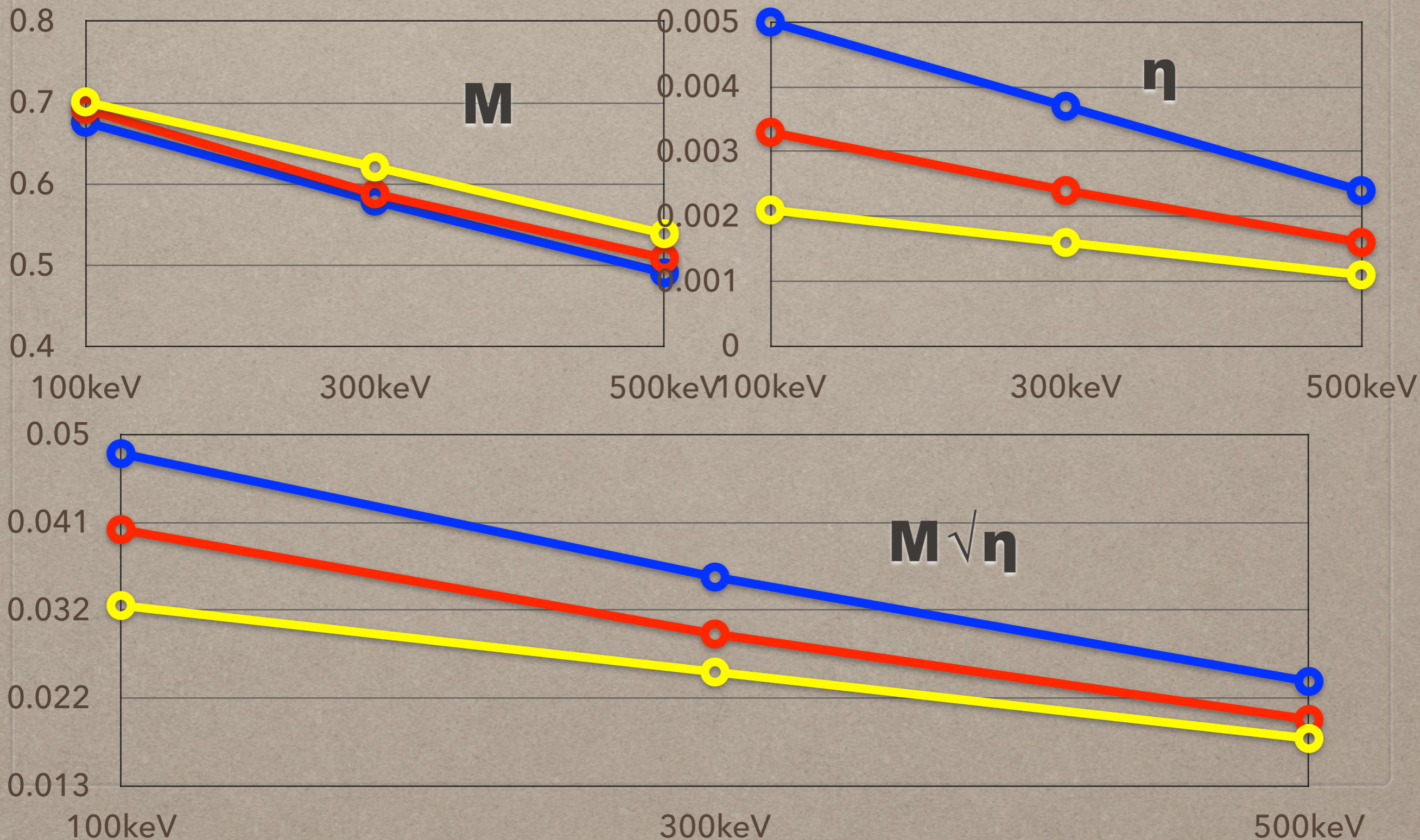


次に、光を $45^\circ$ 傾けた場合  
**G1 (G2, G3の図は割愛)**



# M、 $\eta$ 、 $M\sqrt{\eta}$ のエネルギー依存性

**G1** **G2** **G3**



実際のパルサーで試してみると(かに星雲)

$$MDP = \frac{3\sqrt{2}}{\eta SFM} \sqrt{\frac{\eta FS + B}{T}} \quad (\mathbf{B} \text{が無視できない!!})$$

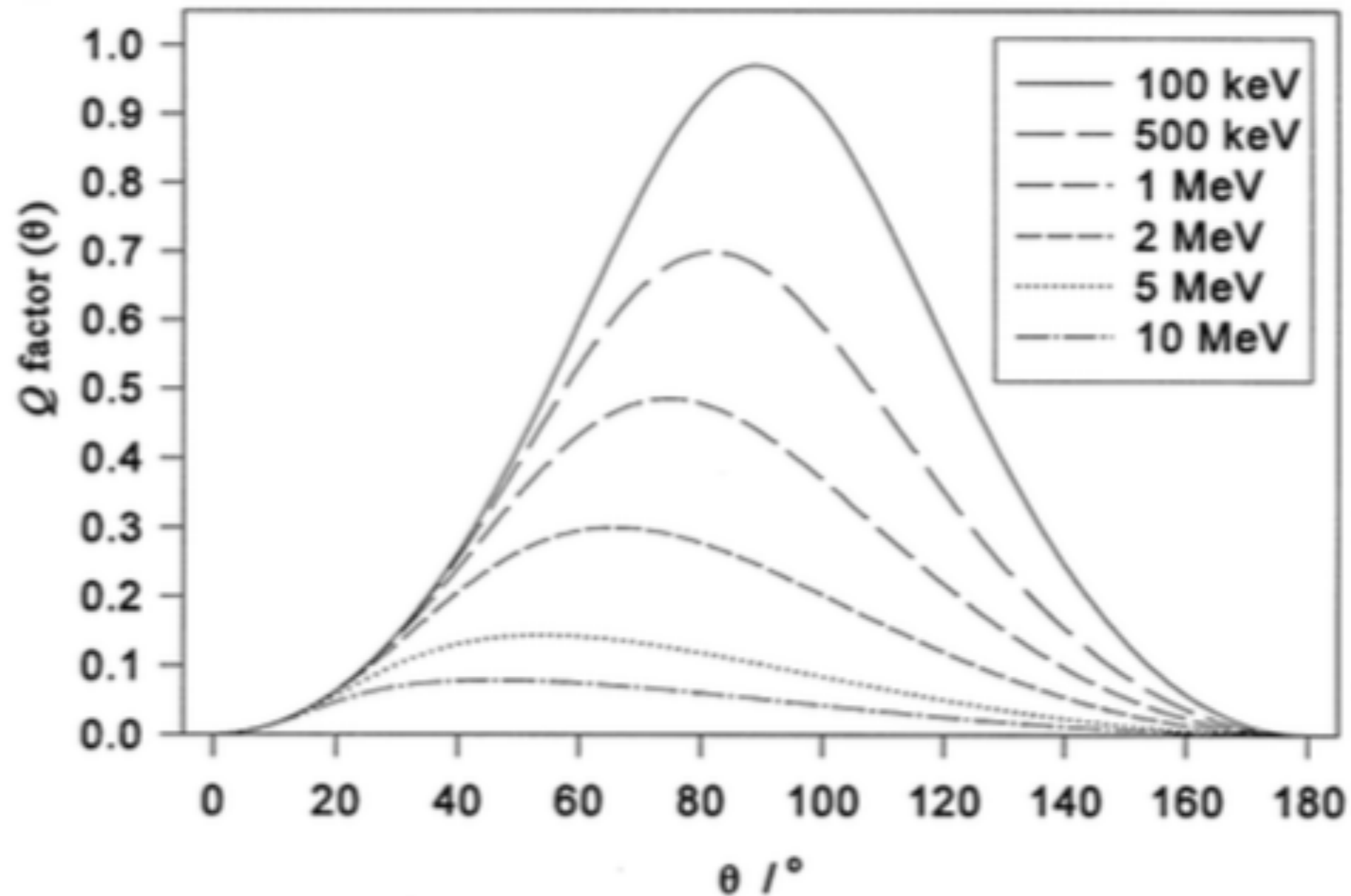




# 考察

- 三つの配置でMの違いはあまり見られなかった。またエネルギーが高いほどMも $\eta$ も小さくなる。
- また $M\sqrt{\eta}$ に関して、どのエネルギー帯でも $G1 < G2 < G3$ となったので現在よりもシンチレーターをより覆うような配置がよいと予想される。
- 初めてシミュレーションに挑んだが覚えることが多く、もっと多くのセットアップで検証してみたかった。

## COMPTON POLARIMETRY IN GAMMA-RAY ASTRONOMY



F. LEI, A. J. DEAN and G. L. HILLS "COMPTON POLARIMETRY IN GAMMA-RAY ASTRONOMY", 1997 より引用