

# APDによるカロリメーターの エネルギー分解能向上

福井大工

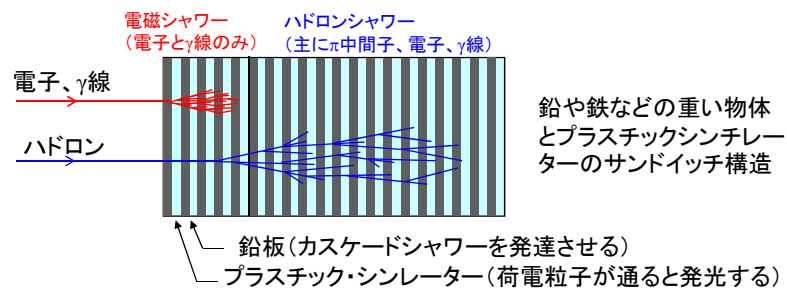
井上博貴、吉田拓生、小森亮太、  
川口達紀、北村真吾、本田喜徳

## カロリメーター

カロリメーター: 粒子のエネルギー測定、粒子の種類の識別  
素粒子実験に用いられる

サンプリングカロリメーター:

鉛や鉄などの重い物体中で発生するカスケードシャワーを利用する

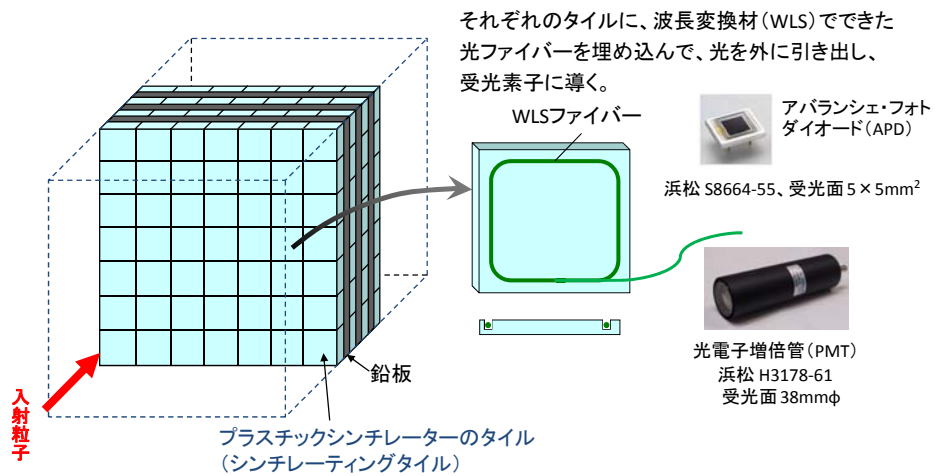


入射粒子のエネルギーが高いと、シャワー中の粒子数が増え、  
シンチレーターの発光量が増える。

↓

シンチレーターの発光量が入射粒子のエネルギーに比例

### シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーター

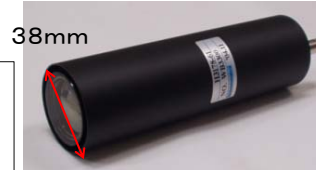


エネルギー測定精度を向上させるためには  
 タイル、ファイバー : 発光量が多いこと  
 受光素子 : その光を効率よく検出し、光量を精度よく測定すること  
 (高い量子効率、大きなS/N比、…)

### 受光素子

#### ・光電子増倍管 (PMT)

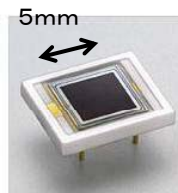
- ・ノイズが小さい
- ・量子効率が低い  $\sim 25\%$   
(量子効率とは光電効果で光子が電子をたたき出す確率)
- ・管のサイズが大きい  $\sim$  数cm
- ・磁場の影響を受けやすい



光電子増倍管 (PMT)

#### ・アバランシェフォトダイオード (APD)

- ・量子効率が大きい  $\sim 90\%$
- ・素子のサイズが小さい  $\sim 1 \text{mm}$
- ・磁場の影響を受けない
- ・ノイズが大きい

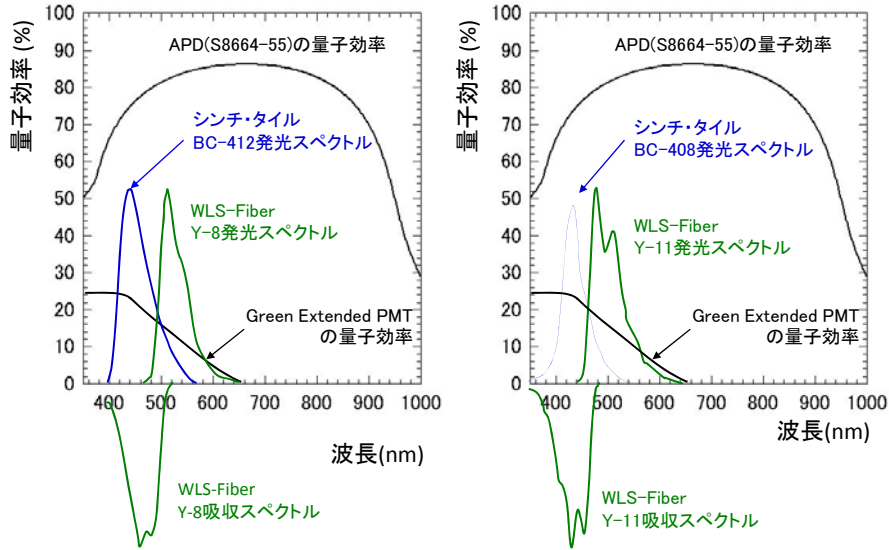


アバランシェ・フォトダイオード (APD)

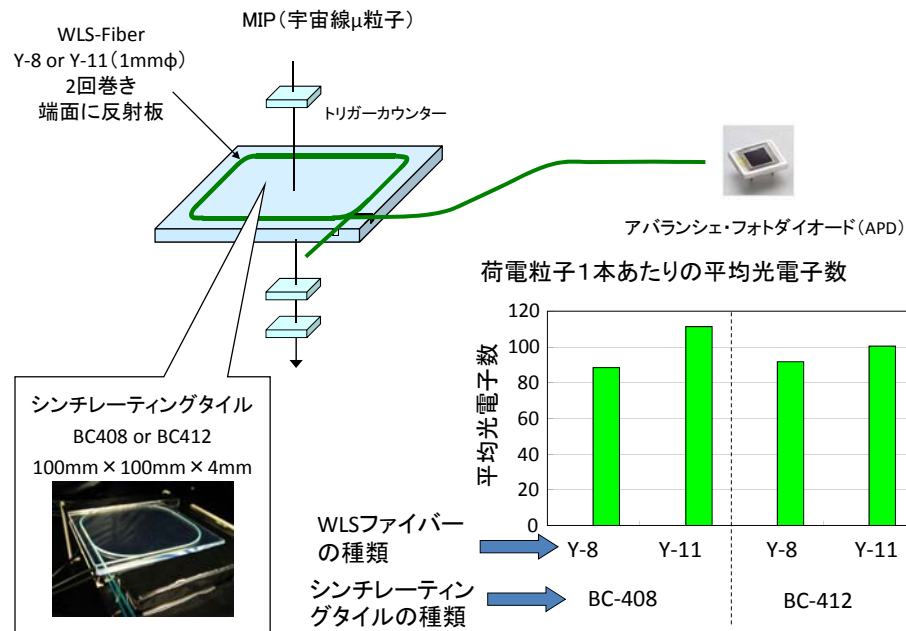
➡ アバランシェフォトダイオードを使用することでカロリメーターの分解能向上が見込める

シンチレーティングタイル、WLSファイバーの吸収/発光スペクトル

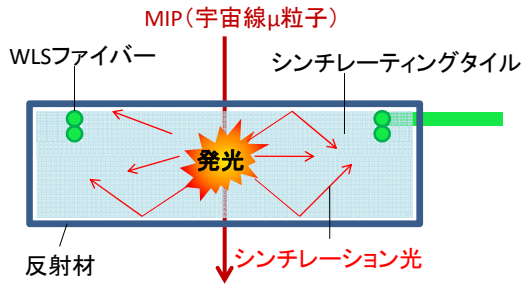
使用したシンチレーティングタイル: BICRON社のBC-408とBC-412  
 WLSファイバー: KURARAY社のY-8とY-11



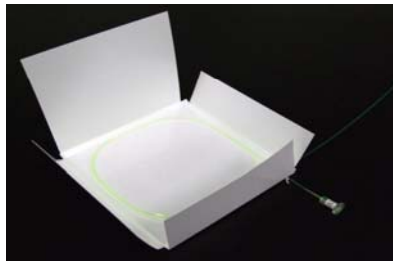
シンチレーティングタイルとWLSファイバーの選定



シンチレーションタイル用反射材の選定

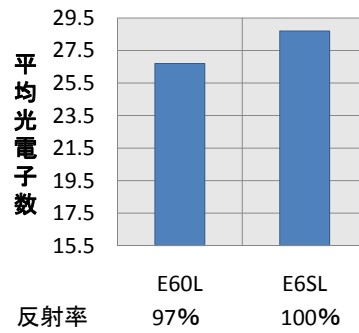


今回使用した反射材は東レ社の白色ポリエステルフィルム、ルミラーE60LとE6SLである。これらは高い反射率を持つ。E6SLはE60Lを改良し反射率を高めたものである。



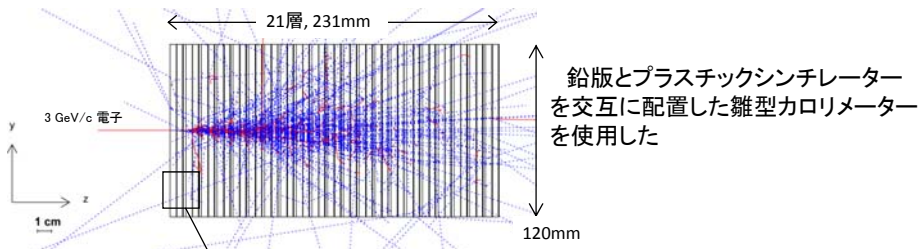
反射材とタイル

タイル用反射材と平均光電子数  
PMTによる計測

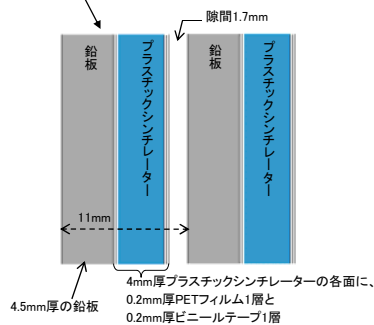


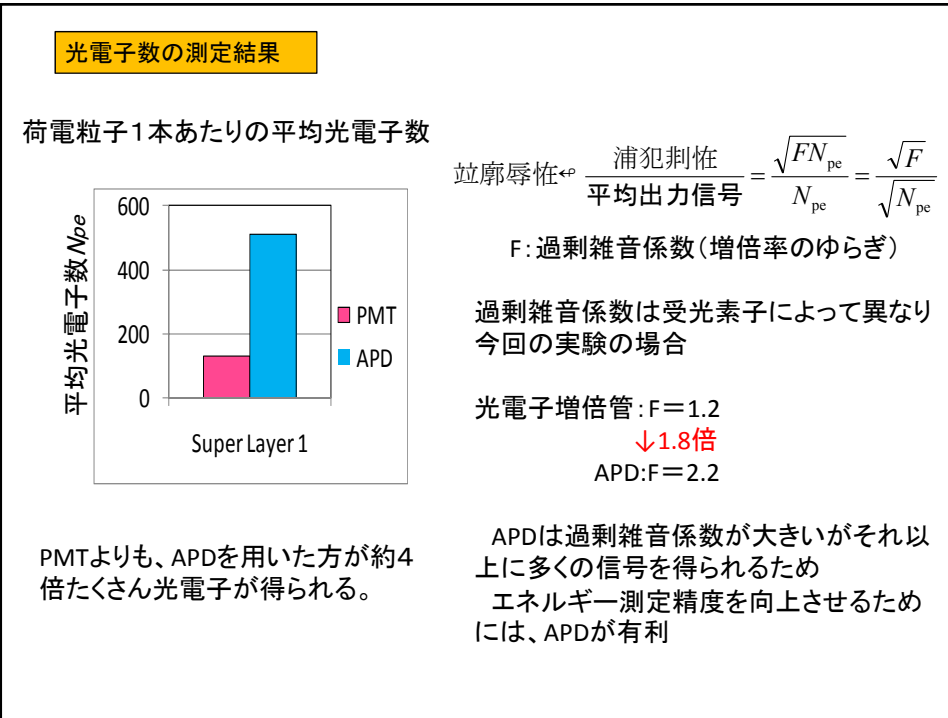
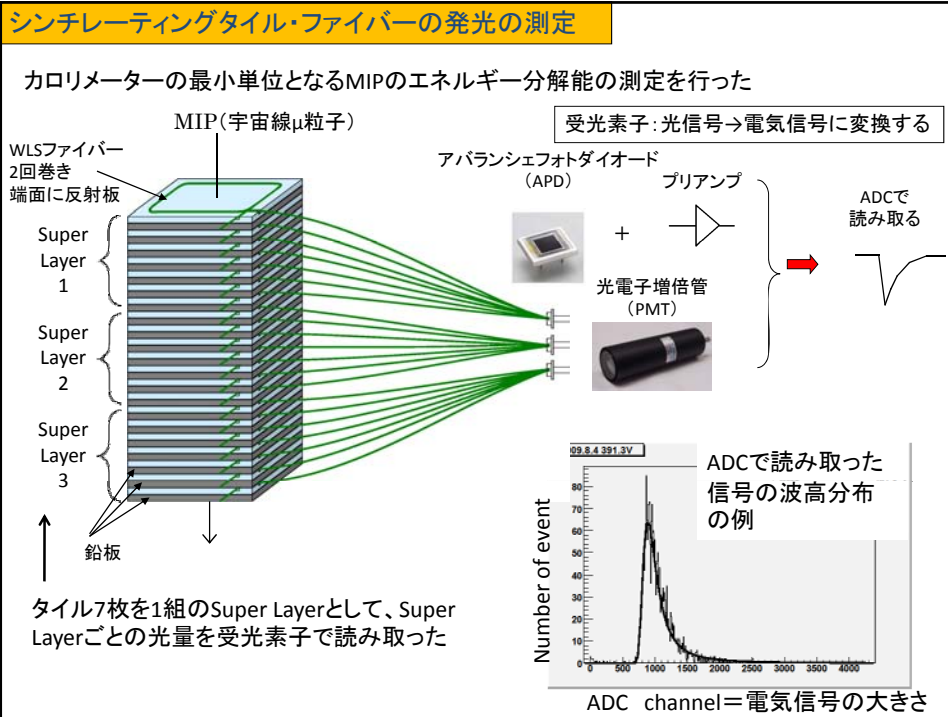
電磁カロリメーター(雛型)

シミュレーションによる構造設計: 電磁シャワーの90%以上を吸収できるように設計



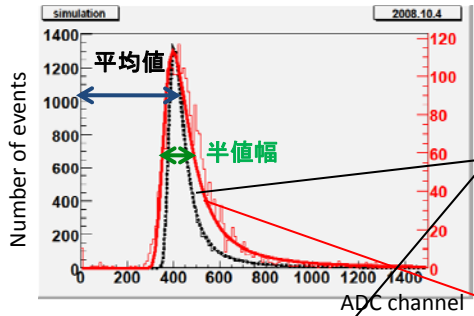
カロリメーター





測定結果(エネルギー分解能の比較)

今回はSuper Layer1のヒストグラムを比較した



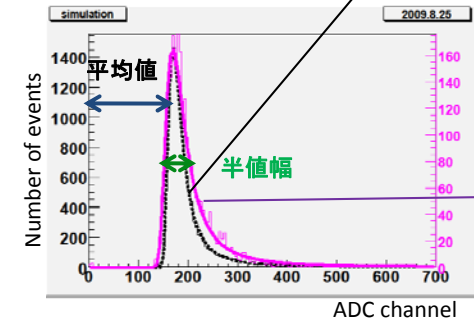
$$\text{エネルギー分解能} = \frac{\text{半値幅}(FWHM)}{\text{平均値}} \times 100$$

黒線はシミュレーション(μ粒子がシンチレーティングタイルに落とすエネルギー量をシミュレートした)による理想的波高分布

分解能=20.1%

シンチレーションタイル: BC-412  
タイル用反射材: E60L  
受光素子: 光電子増倍管(PMT)

分解能=31.0%



シンチレーションタイル: BC-408  
タイル用反射材: E6SL  
受光素子: アバランシュフォトダイオード(APD)

分解能=24.5%

測定結果(受光素子、タイル、反射材と光電子数、分解能)

受光素子	シンチレーティングタイルと反射材	光電子数	分解能(%)
光電子増倍管(PMT)	BC412 E60L	128	31.0
	BC408 E6SL	183	30.1
アバランシュフォトダイオード(APD)	BC412 E60L	511.6	28.2
	BC408 E6SL	729.0	24.5

シミュレーションによる理想的な波高分布の分解能: 20.1%

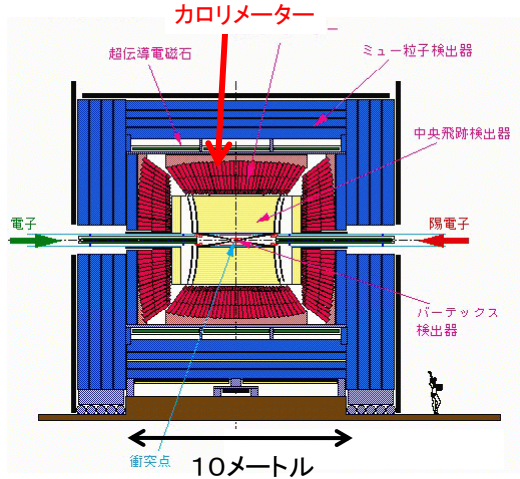
**結論**

・シンチレーションタイルをより発光量の多いものに換え、反射材をより反射率の高いものを使い、PMTをAPDに換えることでエネルギー分解能を向上できた

**今後の課題**

・APDは冷却することでノイズが減る、これにより分解能の向上が期待できるので、APDを冷却した場合の信号の測定を行う

## 素粒子実験におけるカロリメーター



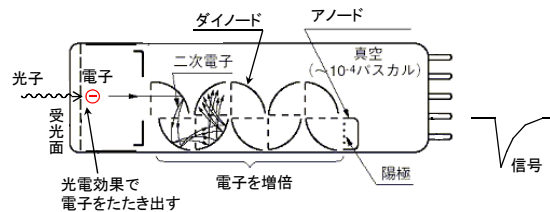
素粒子実験ではカロリメーターは大量に必要な。左の図の赤い部分がカロリメーターである。この装置では一辺が約10mある。

一般的な電磁カロリメーターを想定するとシンチレーティングタイルは約14万枚必要になる。

## 微弱光検出用受光素子1 — 光電子増倍管 —



光電子増倍管 (PMT)  
浜松 H3178-61  
受光面 38mmφ

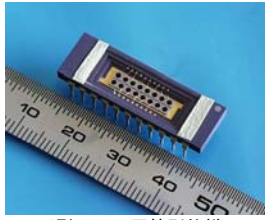


- 長所:
- > 二次電子の増倍率が高い ~100万倍
  - > ノイズが小さい

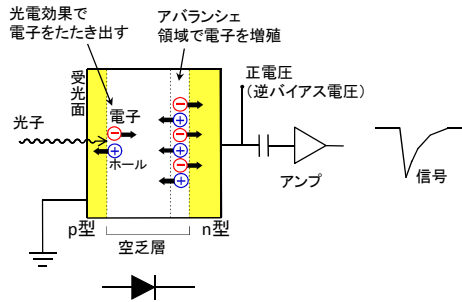
- 短所:
- > 量子効率(光電効果で光子が電子をたたき出す確率)が低い ~25%
  - > 管のサイズが大きい ~数cm
  - > 磁場中で着しく性能が低下



微弱光検出用受光素子2 — アバランシェ・フォトダイオード(APD) —



アレイ型、Sci-Fi 用特別仕様



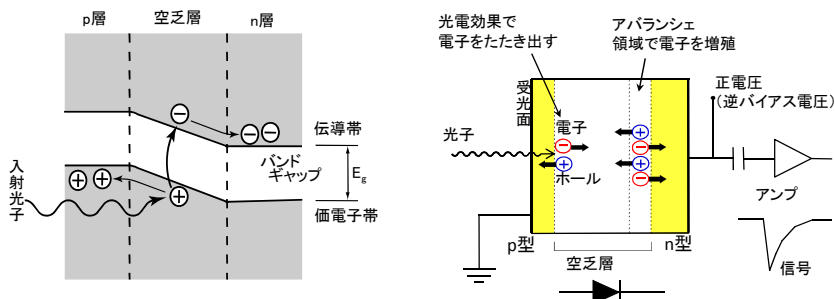
長所:

- 量子効率(光電効果で光子が電子をたたき出す確率)が大きい ~90%
- 素子のサイズが小さい ~1 mm
- 磁場中でもOK

短所:

- 二次電子の増倍率が低い ~100倍@室温(低温では大きくなる)
- ノイズが大きい

APDの動作原理と特徴



空乏層に可視光が入射すると相互作用により電子-ホール対が発生します。

電子-ホール対が発生

電子が高電界で加速され格子原子に衝突

電子-ホール対が新たに発生

## MIP(minimum ionizing particle)=最小電離粒子

荷電粒子が物質中を通過するとき、エネルギー損失が最小になるエネルギーが存在する。このようなエネルギー状態の粒子を、その粒子によらず最小電離粒子と呼ぶ。

今回の実験では、高い貫通力を持ち約4GeVのエネルギーを持つ宇宙線 $\mu$ 粒子を、このMIPとみなして、 $\mu$ 粒子がカロリメーターを貫通した際のシンチレーションタイルの発光を受光素子によって測定した。

## APDのカロリメーターへの応用

### カロリメーターのエネルギー分解能

T. Suzuki et al., NIM A432 (1999) 48より

8mm厚鉛+2mm厚シンチレーティング・タイルで

電磁シャワーに対して:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma_{\text{stochastic}}}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \sigma_{\text{const}} = \frac{23\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 1\%$$

$(A \oplus B \equiv \sqrt{A^2 + B^2})$

$$\sigma_{\text{stochastic}} = \sigma_{\text{int}} \oplus \sigma_{\text{sample}} \oplus \sigma_{\text{photostat}}$$

測定精度  $\rightarrow$   $\frac{\sigma}{E}$

入射粒子のエネルギー  $\rightarrow$   $E$

シャワー自体のゆらぎ、EMの場合  $\sim 0\%$

サンプリングのゆらぎ  $\sim 21\%$

受光素子の光電子数のゆらぎ  $\sim 11\%$

### 受光素子による影響

$\left( \frac{\sigma_{\text{photostat}}}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \right)$  の項

平均光電子数  $N_{pe}$  ± 揺らぎ = 平均入射光子数  $N_p \times Q \pm \sqrt{N_p Q}$

$Q$ : 量子効率

↓ Gain  $M$  の受光素子で増幅

平均出力信号 ± 揺らぎ =  $M N_p Q \pm M \sqrt{N_p Q F}$

$F$ : 过剩雑音係数  
(Excess Noise Factor)  
Gain  $M$  自体の揺らぎ

↓

$\frac{\sigma_{\text{photostat}}}{\sqrt{E(\text{GeV})}} = \frac{\text{揺らぎ}}{\text{平均出力信号}} = \sqrt{\frac{F}{N_p Q}}$

光電子増倍管:  $Q=0.2$ 、 $F=1.2$

↓ 4.0倍

↓ 1.8倍

APD:  $Q=0.8$ 、 $F=M^{0.2}=2.2 @ M=50$