

APD を用いたカロリメーター のエネルギー分解能の研究

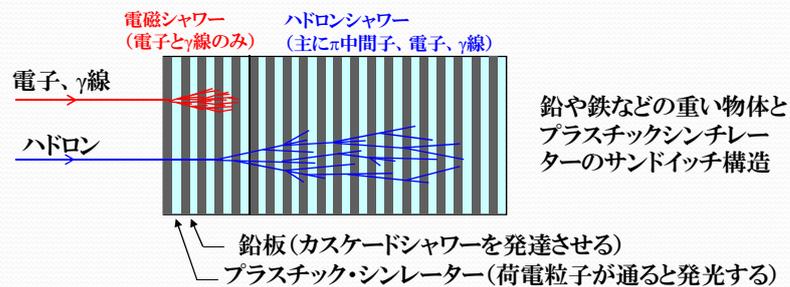
福井大学工学部
井上博貴、清水佑亮、谷政悟、吉田拓生

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

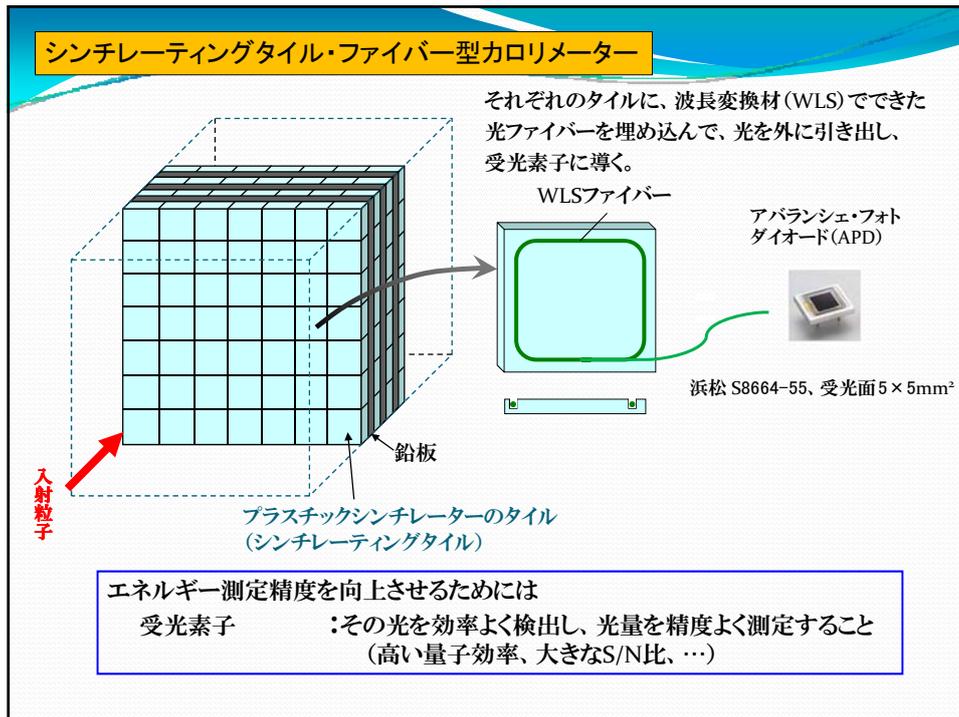
サンプリングカロリメーター:

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くと、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



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
 - 磁場の影響を受けやすい
- 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
 - 磁場の影響を受けない
 - ノイズが大きい

38mm

光電子増倍管 (PMT)

5mm

アバランシェ・フォトダイオード (APD)

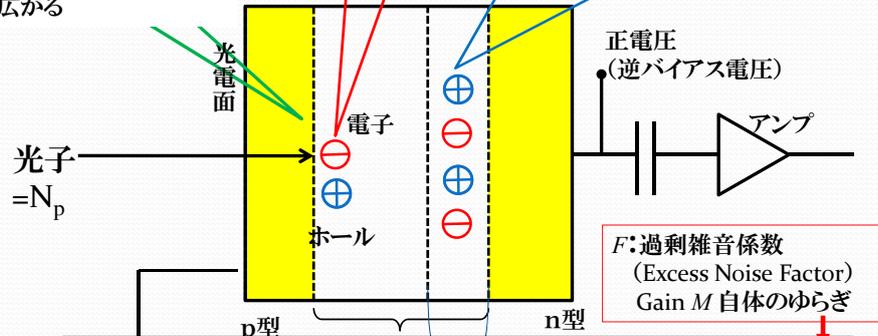
➡ アバランシェフォトダイオードを使用することでカロリメーターの分解能向上が見込める

APDの構造と動作原理

APDに逆バイアス電圧をかけると、p型半導体とn型半導体の間に空乏層が広がる

電場にひかれて移動

アバランシェ領域で電子を増殖
(受光素子での電子の増倍率=ゲインM)



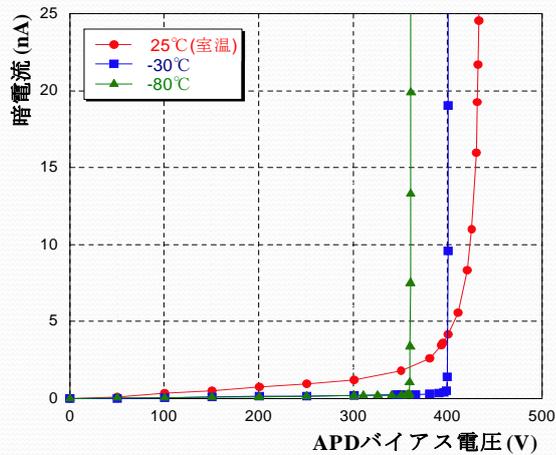
F : 過剰雑音係数
(Excess Noise Factor)
Gain M 自体のゆらぎ

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

本実験で用いたAPDの過剰雑音係数 F はゲイン M に対して $F = M^{0.2}$

APDの温度特性

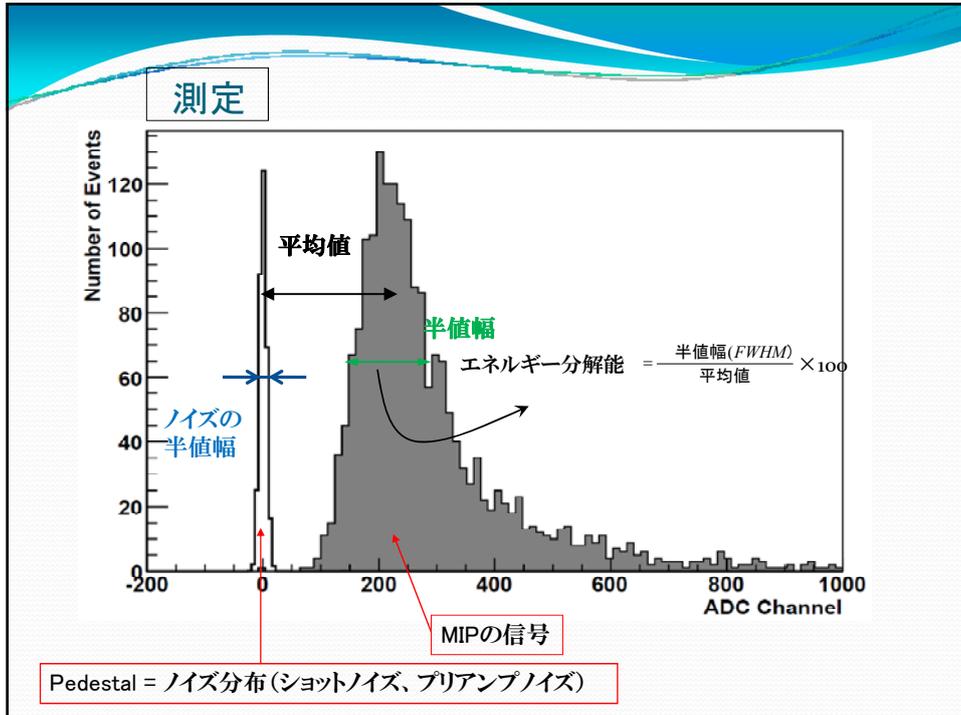
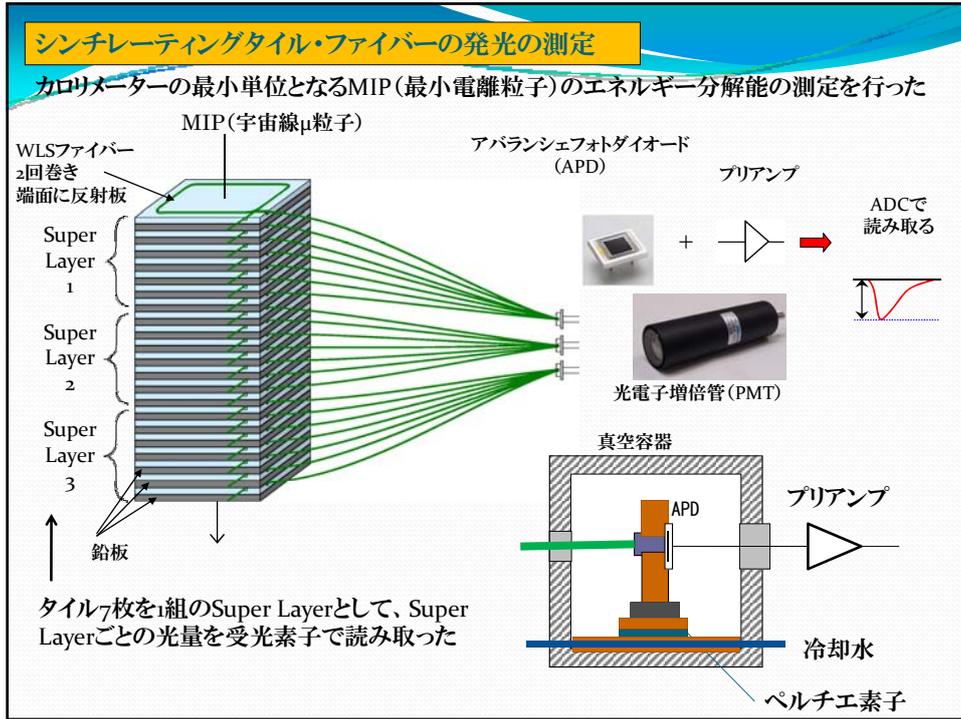
APD S8664-55 暗電流

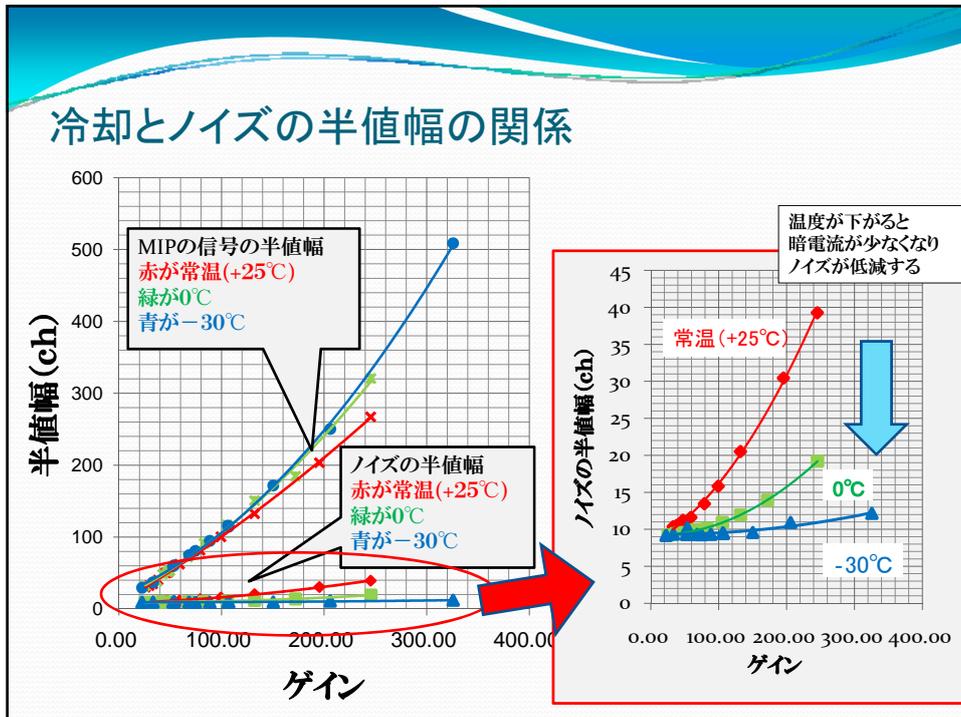
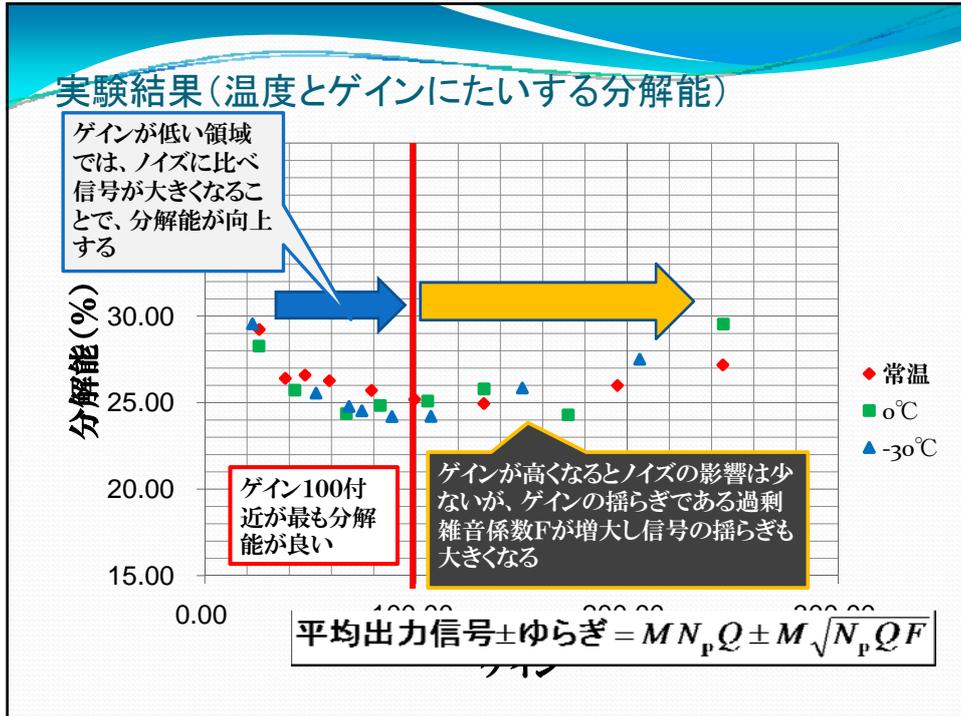


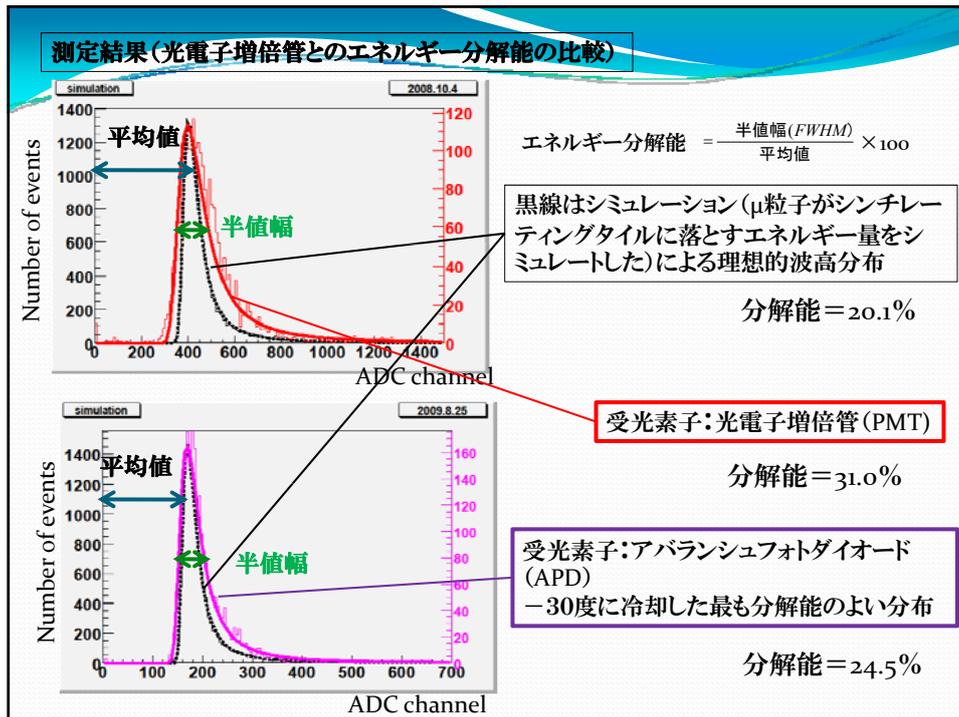
暗電流とは、APDに逆バイアスがかかるだけで入射光の有無に関係なく流れる電流である。

APDは冷却することで暗電流が少なくなり、ショットノイズが減る。

冷却することでAPDを用いたカロリメーターの分解能の向上が期待できる。







結論

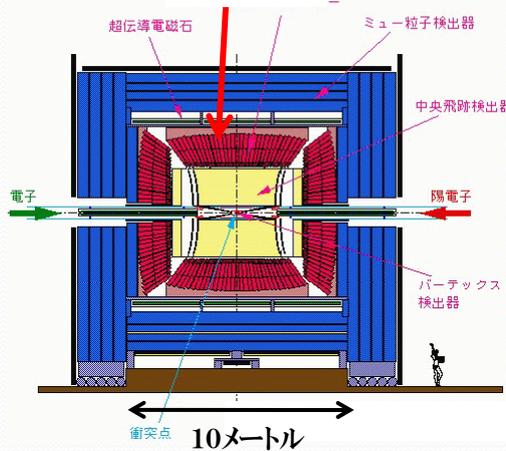
- APDを受光素子として使用した場合、PMTよりもすぐれた分解能が得られる
- APDを使用する際、ゲイン100程度にすることでより優れた分解能を得られる
- APDを冷却しなくても十分よい分解能が得られる。

今後の課題

- 実際に高エネルギーの電子線を照射した場合のエネルギー分解能を測定する。
- APDの代わりにMPPCを使用して、エネルギー分解能を調べる。

以下、予備スライド

素粒子実験に用いるカロリメーター



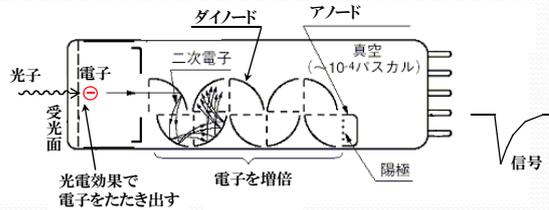
素粒子実験ではカロリメーターは大量に必要な。左の図の赤い部分がカロリメーターである。この装置では一辺が約10mある。

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



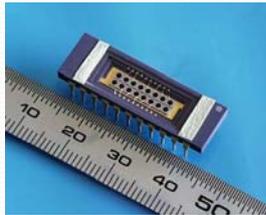
長所:

- ▶ 二次電子の増倍率が高い ~100万倍
- ▶ ノイズが小さい

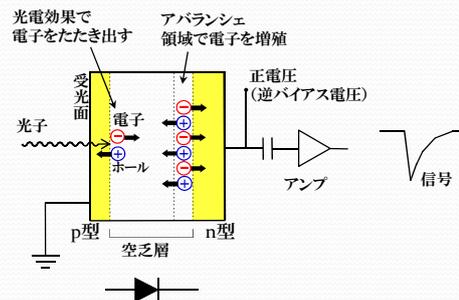
短所:

- ▶ 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
- ▶ 磁場中で著しく性能が低下

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 ~1mm
- ▶ 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

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 μ 粒子を、このMIPとみなして、 μ 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
ハドロンシャワーに対して:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma_{\text{stochastic}}}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \sigma_{\text{const}} = \frac{40\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 1\%$$

測定精度 $\rightarrow \frac{\sigma}{E}$

入射粒子のエネルギー $\rightarrow E$

カロリメーターの統計誤差による定数項 $\rightarrow \sigma_{\text{const}}$

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

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

シャワー自体のゆらぎ $\sim 24\%$ $\rightarrow \sigma_{\text{int}}$

サンプリングのゆらぎ $\sim 30\%$ $\rightarrow \sigma_{\text{sample}}$

受光素子の光電子数のゆらぎ $\sim 11\%$ $\rightarrow \sigma_{\text{photostat}}$

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 $N_{pe} \pm \text{ゆらぎ} = \text{平均入射光子数 } N_p \times Q \pm \sqrt{N_p Q}$

Q : 量子効率

↓ Gain M の受光素子で増幅

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

F : 過剰雑音係数
(Excess Noise Factor)
Gain M 自体のゆらぎ

↓

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

光電子増倍管: $Q=0.2, F=1.2$

↓ 4.0倍

↓ 2倍

↓ 3倍

APD: $Q=0.8, F=M^{0.2} = 2.4 @ M=80, 3.6 @ M=600$

ハドロン、電磁シャワー形成の原理

ハドロンが物質中に入ると、その物質中の核子との弾性散乱はもとより非弾性相互作用も起こる。このような衝突反応において π および K 中間子、陽子または中性子などからなる数個の2次粒子が放出される。2次粒子群も粒子の生成を続けるため、粒子数は増加していく。ハドロンシャワー中で π^0 中間子が生成された場合、2つの光子(γ 線)に崩壊し電磁シャワーを発達させる。

