

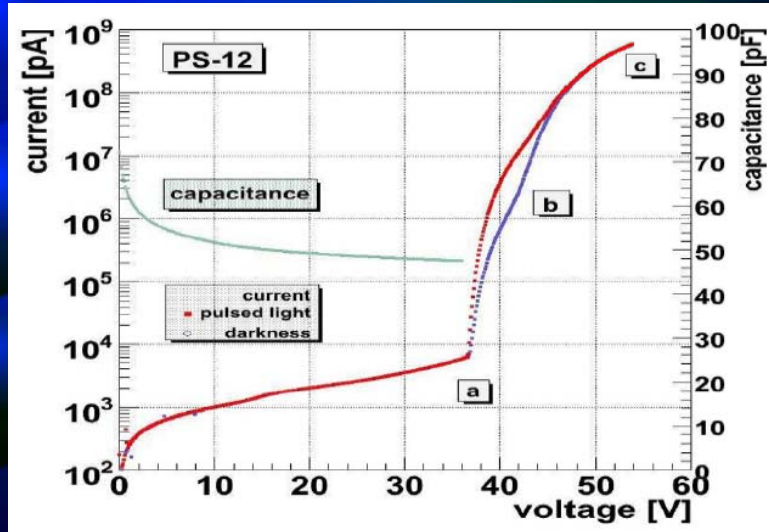
# SiPMの動作原理と 開発の進捗状況

平成17年11月28日  
於IEEE NSS/MIC 2005報告会  
澁谷憲悟

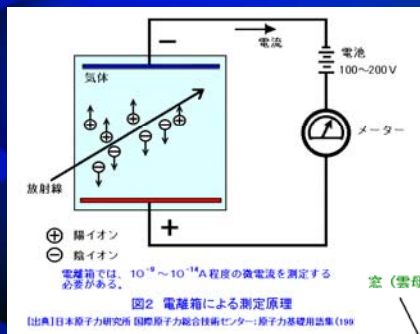
## 2005 IEEE NSS/MICにおける SiPMの報告

1. N9-1: Silicon Photomultiplier (SiPM), Recent Development and Study (未提出)
  2. N9-2: The Silicon Photomultiplier: Status of the Front-Illuminated and Back-Illuminated Developments of a Novel Photon Detector (未提出)
  3. N9-3: A Study of Silicon Photomultipliers
  4. N14-153, A GHz Sampling Readout System for the Characterization of Fast Photon Detectors (未提出)
  5. N14-167: Study of Scintillator Strip with Wavelength Shifting Fiber and Silicon Photomultiplier (Withdrawn)
  6. N37-8: Dedicated Front-End Electronics for an ILC Prototype Hadronic Calorimeter with SiPM Readout
- ※ N9 Photodetectors and Radiation Imaging I

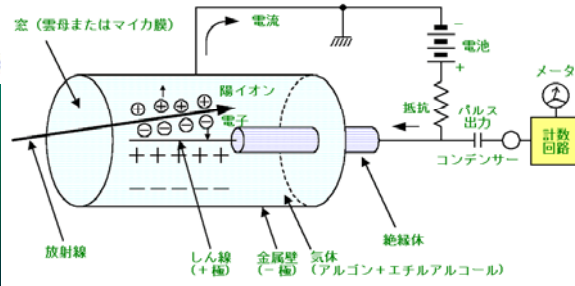
# SiPM - GeigerモードのAPD



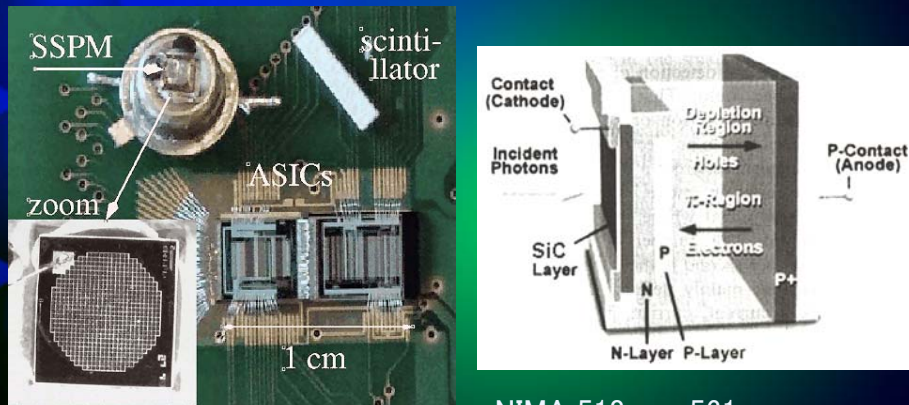
# 基礎知識 - 電離箱、比例計数管、GM管



原子力百科事典 ATOMICA より



## SiPMの構造 - ピクセル化された並列APDs



NIMA 518, pp. 561

Fig. 1

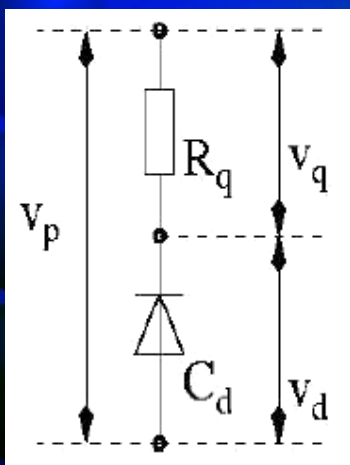
## Electrical Model

### 電圧の式

$$\begin{cases} v_q(t) = -R_q C_d \frac{dv_q}{dt} \\ v_q(0) = V = v_p - v_{\text{break}} \end{cases}$$

### 解(電流、電荷)

$$\begin{cases} i(t) = \frac{v_p - v_{\text{break}}}{R_q} \exp\left(\frac{-t}{R_q C_d}\right) \\ q(t) = (v_p - v_{\text{break}}) C_d \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{R_q C_d}\right)\right] \end{cases}$$



## SiPMの特性 - ゲイン

$$q(\infty) = (v_p - v_{\text{break}}) C_d$$

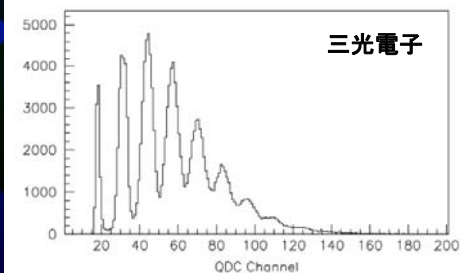
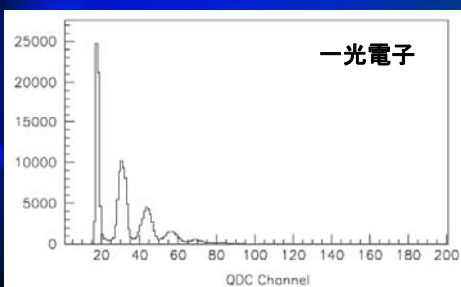
であるから、ゲインは

$$G = \frac{(v_p - v_{\text{break}}) C_d}{e} \geq 10^5$$

GeigerモードのAPDでは、光電子増倍管に匹敵するゲインが得られる。

1. プリアンプが不要である。
2. 高いエネルギー分解能が期待される。
3. PMTの回路が転用できる。

## SiPMの特性 - 波高出力



・ピクセルではデジタル的な出力。  
(検出器全体ではアナログ的)

・シングルフォトンカウンティングが可能。

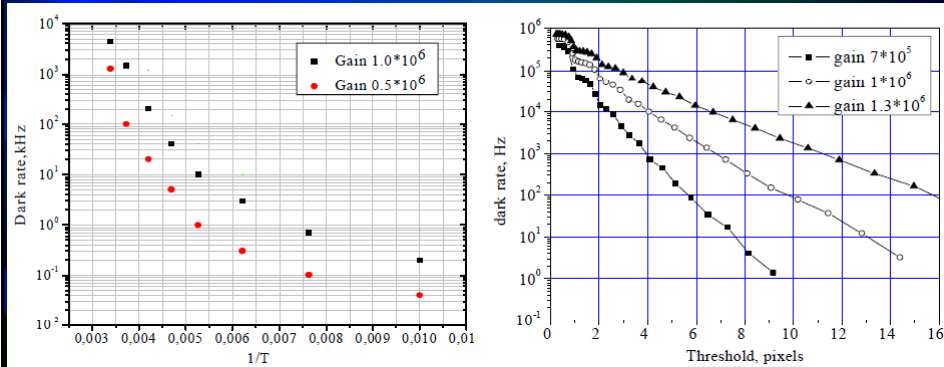
・ピクセル間のクロストークあり。  
(ガイガー、光)

・電圧、熱によるダークノイズの発生。

※シングルフォトンカウンティングの際には、検出器の冷却や、検出器の表面積の縮小が必要。

NIMA 535, pp. 531.

## SiPMの特性 - ノイズ



冷却により劇的にノイズは減少するが、シンチレータを用いた放射線計測では、LLDを上げれば問題とならない。

NSS 2004 1N6-4

## SiPMの特性 - 印加電圧

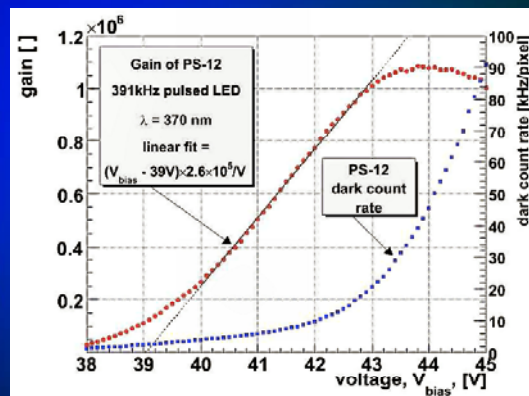
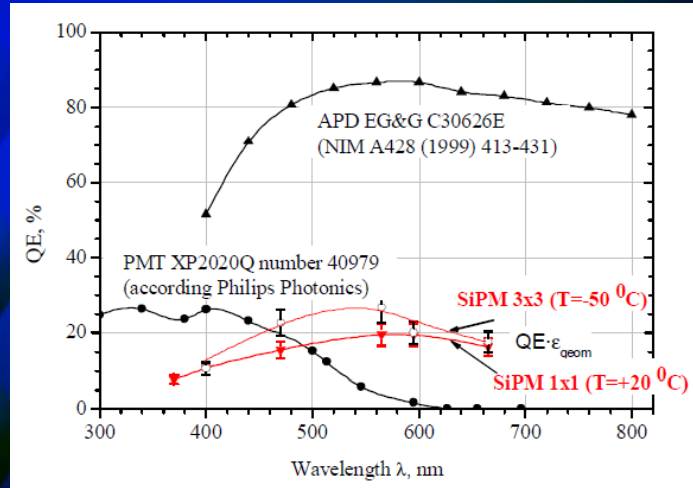


Fig. 6

- ・ 印加電圧はAPDより数ボルト高い(~50V)だけであるが、電界は $10^5\text{V/cm}$ にもなる。消費電力は小さい。
- ・ ただし、電圧の変動には敏感(5%/100mV)。ちなみに、温度の変動にも敏感(5%/ $^{\circ}\text{C}$ )。

## SiPMの特性 - 感度



既存のSiPMはAPDと同様に緑色の光 ( $\lambda \sim 550\text{nm}$ ) に対して、感度が最大になる。

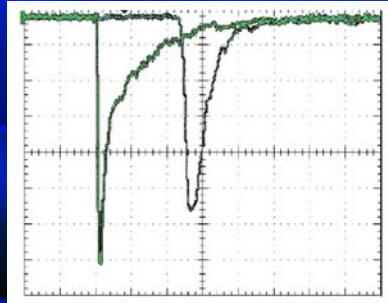
NSS 2004, 1N6-4

## SiPMの特性 - シンチレータとの相性

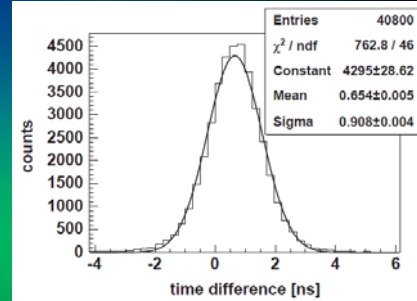
Scintillator	Peak / nm	QE / %	$N_{pe}$
LSO(Ce)	420	2.5	55
BGO	480	9.0	60
CsI(Tl)	550	14	595

青色の蛍光を発するLSOやLYSOの場合、最終的な光電子数ではBGO程度になってしまう。(LGSOに期待)

## SiPMの特性 - 時間



NIMA 538, pp. 411



1.51ns, leading edge

NIMA 545, pp. 712.

PMTよりも時間特性がよくなる可能性が十分にあるが、実験データとして1ns以下の値は示されていない。プエルトリコのポスターであったかも。(あやしい?)

## その他の情報

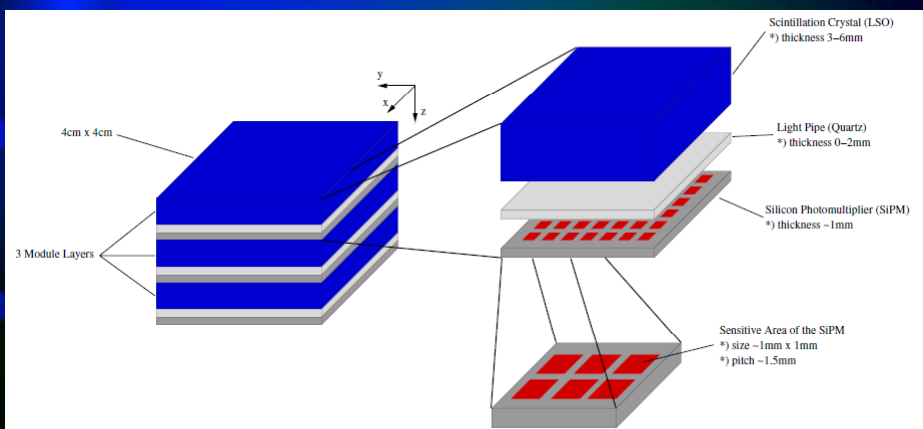
- ・ 検出器の重量が小さい。
- ・ 検出器が薄くできる(1mm以下)。
- ・ APDよりも安価に作製できるらしい。
- ・ 出力が非線形的(サチる)。ダイナミックレンジはピクセル数で決まる。
- ・ 高磁場中でも使用できるらしい。

## 論文のまとめの表

TABLE III  
SUMMARY OF PARAMETERS MEASURED IN THE SSPM.

<b>physical parameters:</b>	
die size	1.1 mm × 1.1 mm
die thickness	300 μm
sensitive area	≈ 0.79 mm <sup>2</sup> (1 mmφ)
number of pixels	516
<b>electrical parameters:</b>	
breakdown voltage	36.5 V
operational voltage, $V_{op}$	41.5 V
dark current	1.7 μA
total detector capacitance	47 pF
pixel capacitance	90 fF
<b>performance parameters:</b>	
gain, (pulsed current gain)	$6.5 \times 10^5$
gain change with voltage at $V_{op}$	4 %/100 mV
jitter (limited by our LED pulser)	< 300 ps rms
maximum charge	≈ 150 pC
dark count rate at $V_{op}$	8 kHz/pixel

## これからの動き - DOI-PET



2004 MIC 2M9-147