

# インジウムを用いた太陽ニュートリノ 半導体検出器の開発

---

日本物理学会 第60回年次大会

2005年3月27日

宮城教育大学 福田善之、佐藤哲也

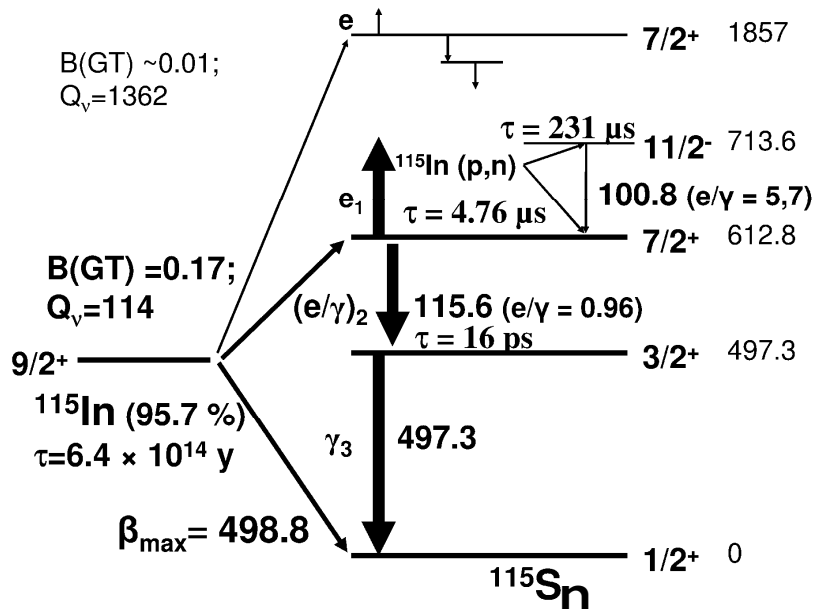
東大宇宙線研 森山茂栄、塩澤真人、小汐由介、  
竹内康雄、難波俊雄\*

浜松ホトニクス(株) 固体事業部

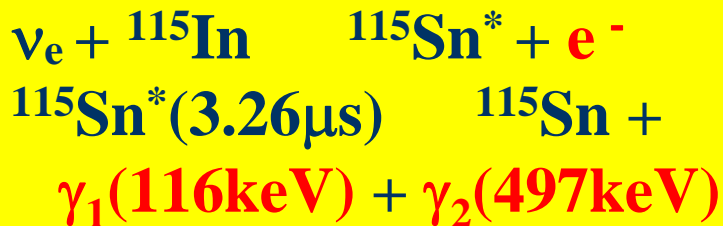
犬塚智也、井澤利之

# インジウムによる太陽ニュートリノ検出

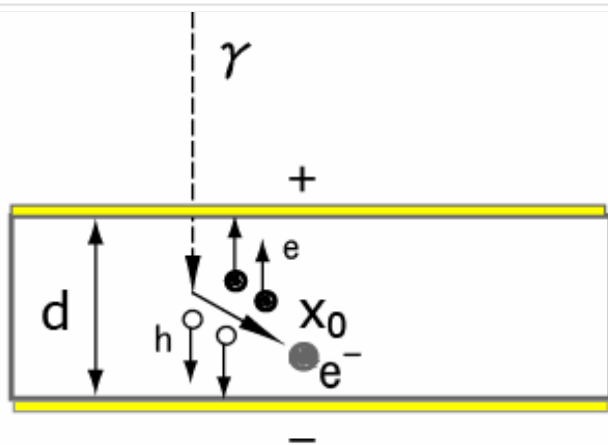
R.S.Raghavan Phs.Rev.Lett37(1976)259



- Real-time measurement
- $\nu$  energy measurable  
( $E_e = E_\nu - 125 \text{ keV}$ )
- 3 fold coincidence to extract neutrino signal
- $\beta$ -decay from  $^{115}\text{In}$   
( $\tau_{1/2} = 6 \times 10^{14} \text{ yr}$ )
- Correlated chance coincidence-Bremsstrahlung
- Correlated chance coincidence impurities



# Semi-insulating InP半導体を用いた検出器



$V_0$ [volts]

$\mu$  : mobility [ $\text{m}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$ ]  
 $v$  : carrier velocity [ $\text{ms}^{-1}$ ]  
 $E$  : electric field [ $\text{vm}^{-1}$ ]  
 $d$  : thickness of SI InP  
 $x_0$  : range of electron

$$E = V_0/d \quad v = \mu E = \mu V_0/d$$

drift length :  $L_d = \tau v = \mu \tau V_0/d$        $\tau$  : carrier lifetime [s]

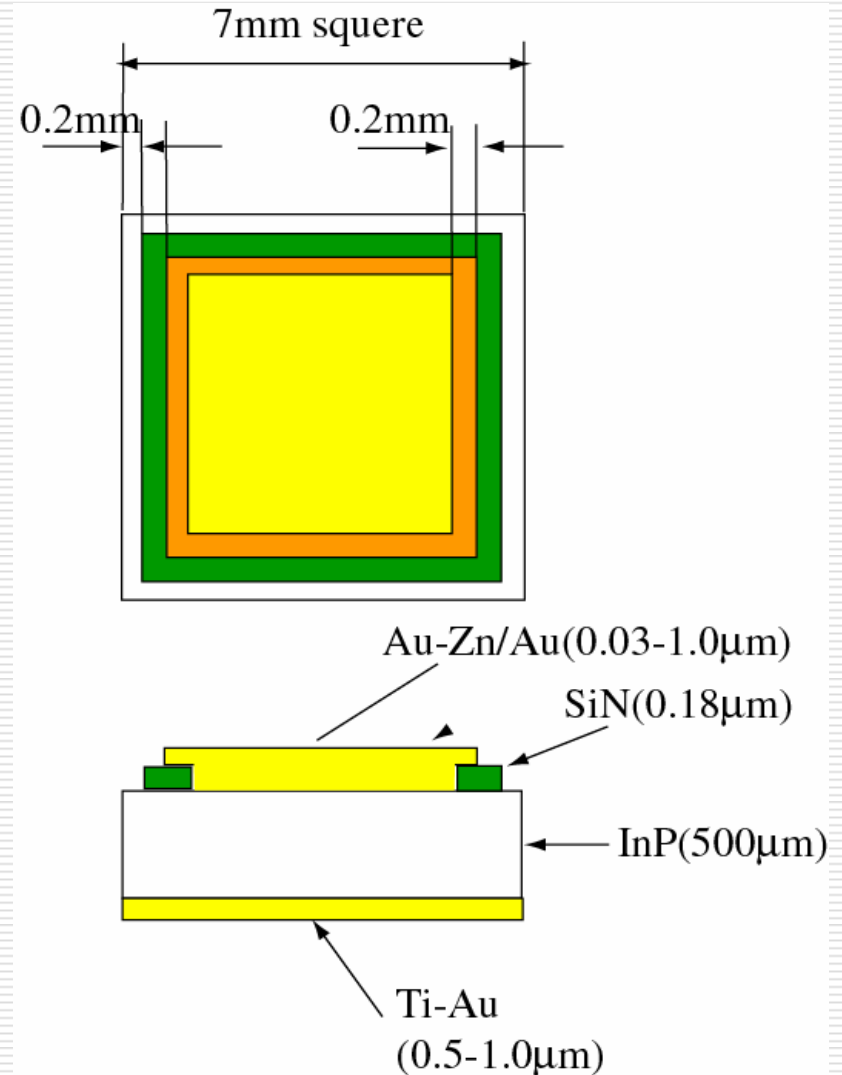
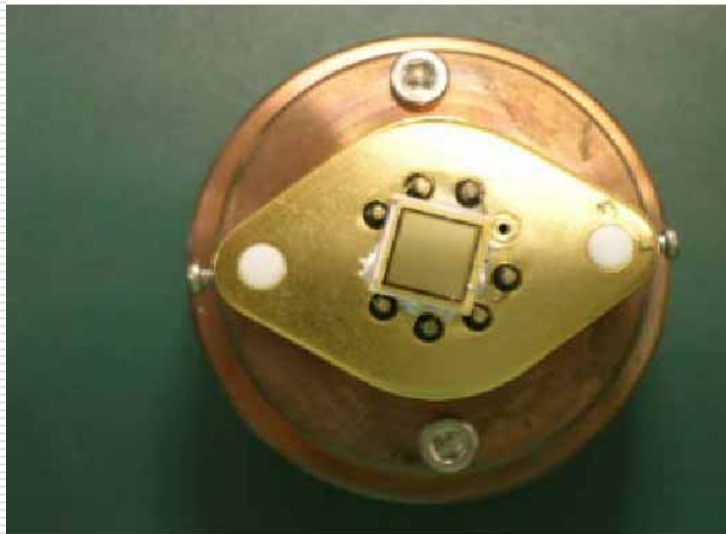
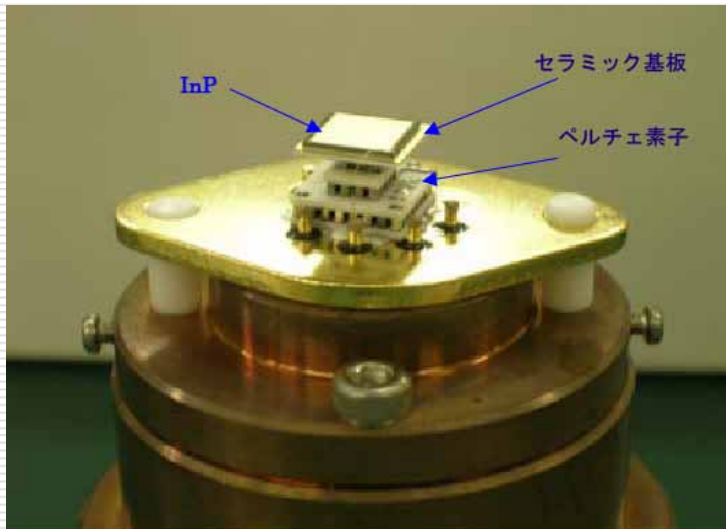
e/h creation energy :  $\epsilon_{eh}$

charge  $Q_{\text{total}}[\text{C}] = (\text{electron energy}) / \epsilon_{eh} \times e$

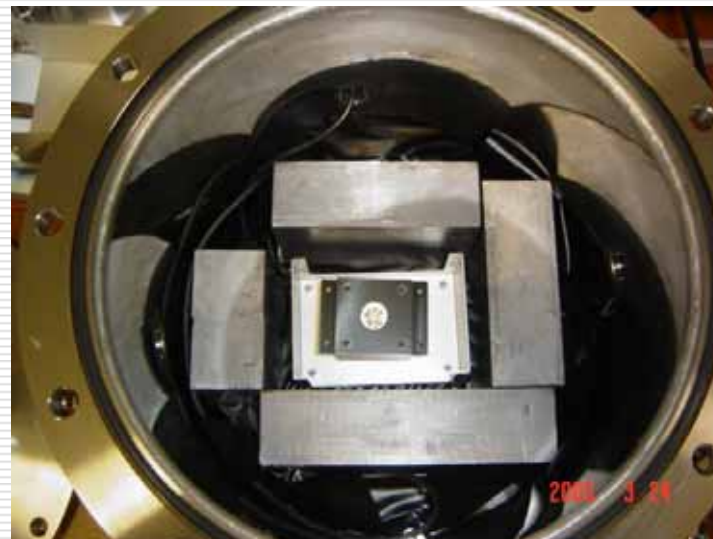
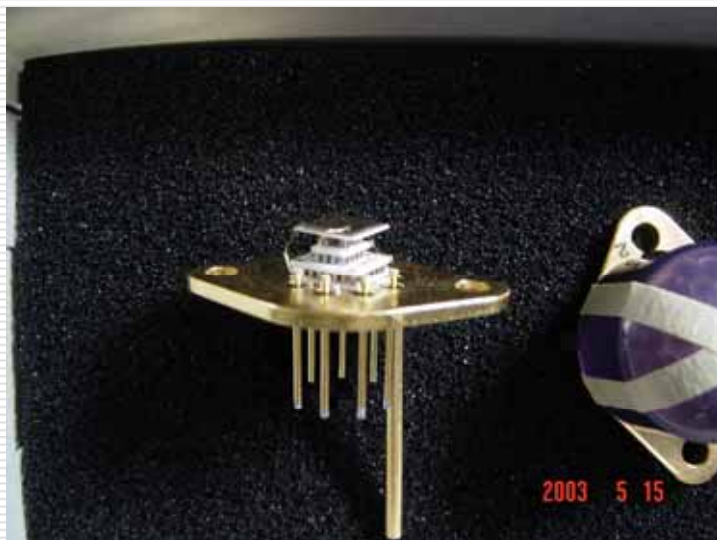
$$L_d \neq \infty \quad Q_{\text{obs}}[\text{C}] = \int_0^R (dE/dx) / \epsilon_{eh} e^{-r(x)/L_d} dx \times e$$

- ドリフト長を伸ばす (電荷収集効率を上げる)
- 移動度を上げる 素子を冷やす (低温)

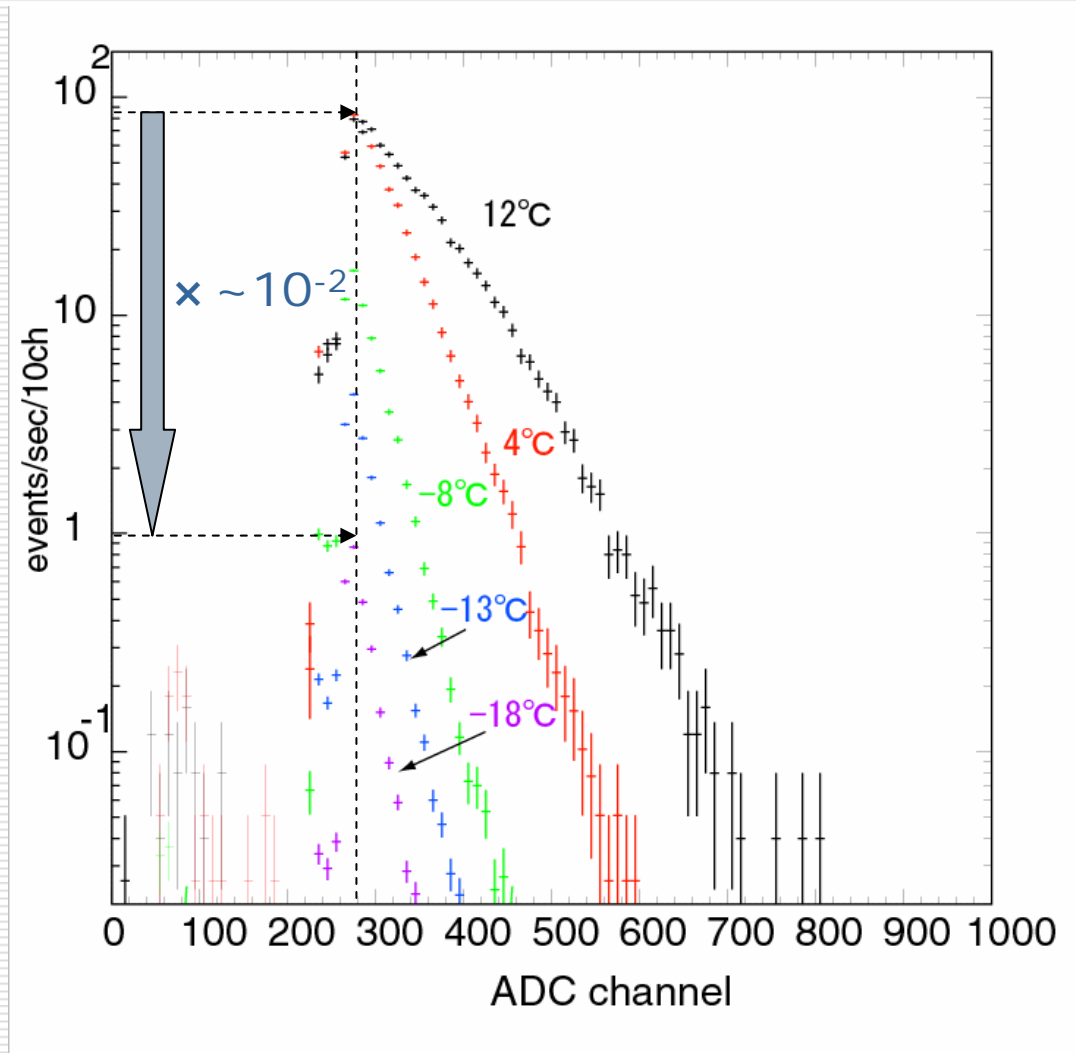
# ペルチェ素子を用いたSI InP半導体検出器



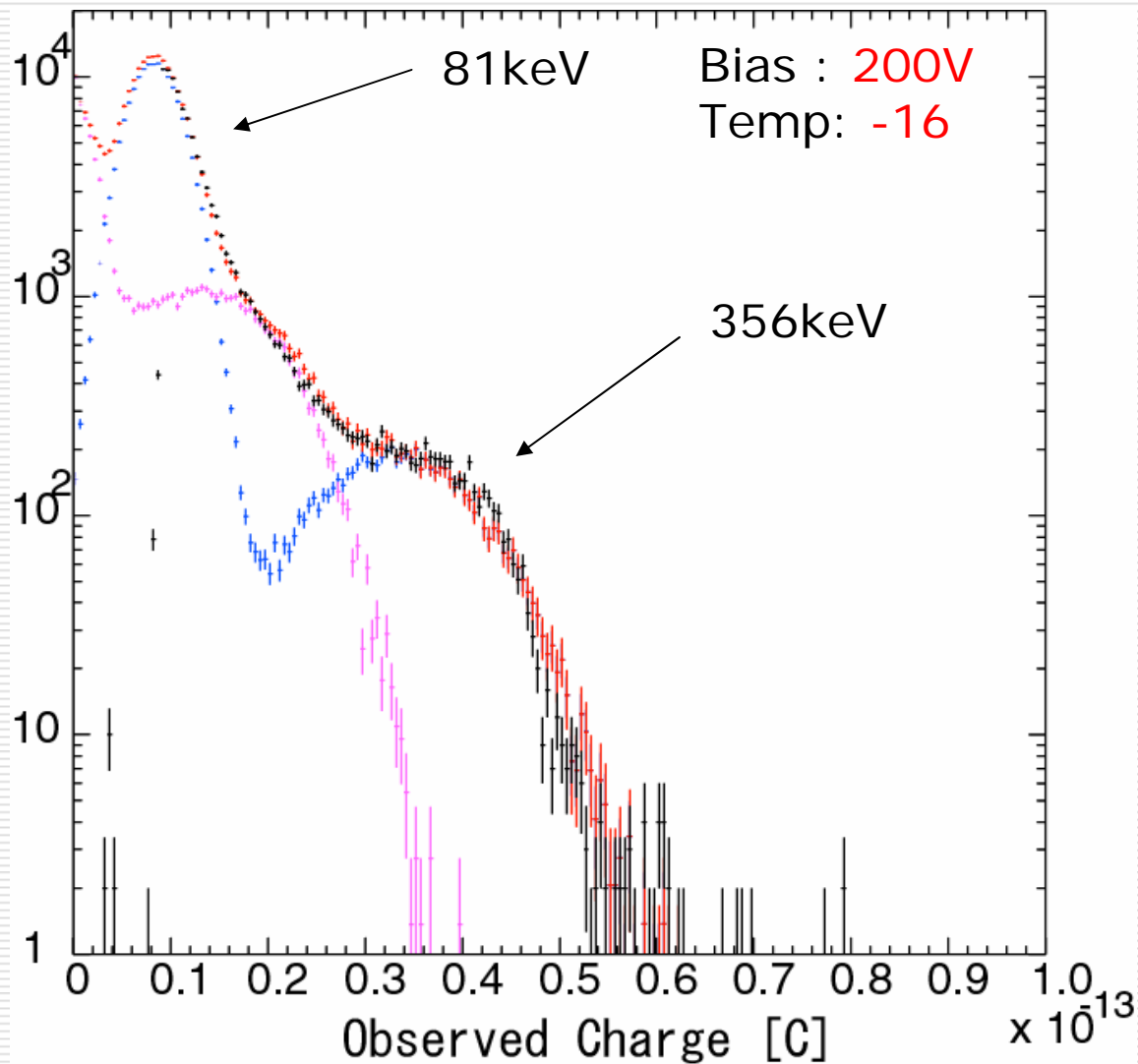
# 測定の設定アップ



# ノイズレベルの温度依存性

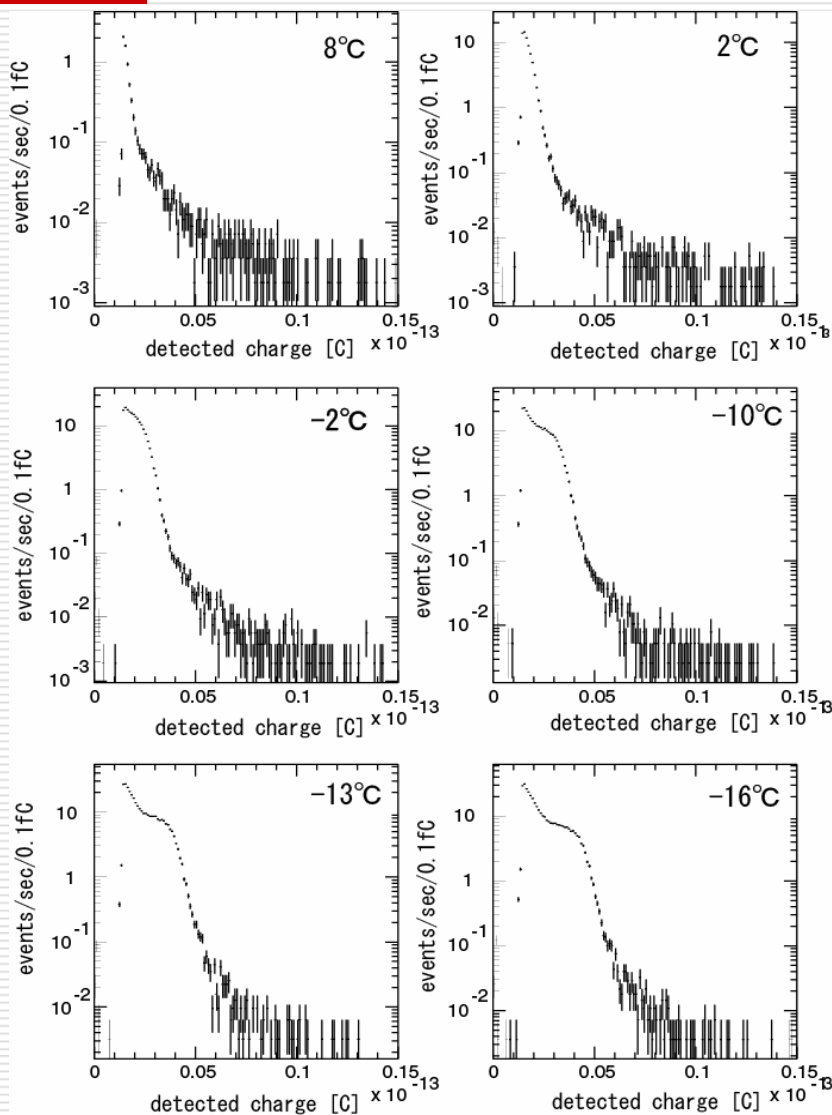


# $^{133}\text{Ba}$ 線源による応答



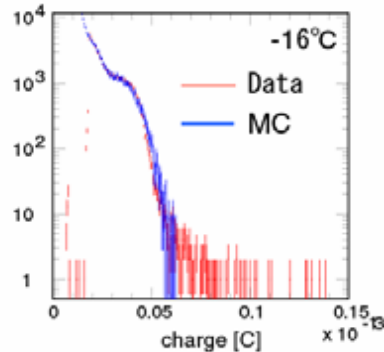
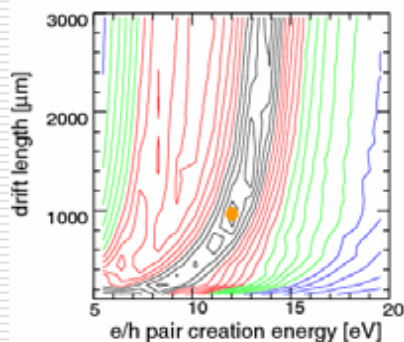
# 線スペクトルの温度依存性 1

- -10 以下で光電ピークを観測可能になった
- 低温とともに電荷量が増大している。つまり、**電荷収集効率 (CCE) が増大している**
- ドリフト長が延びていると考えられる

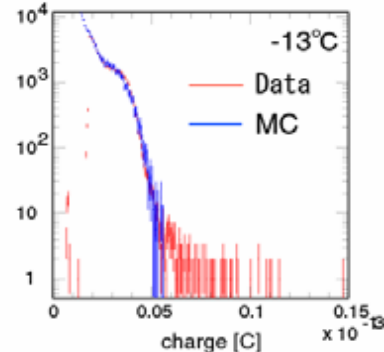
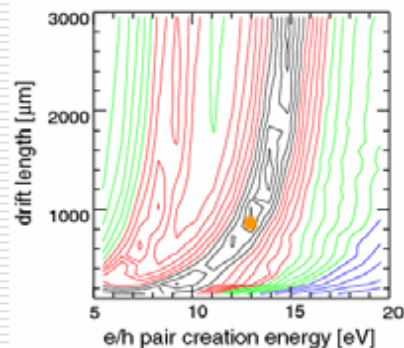




# シミュレーションによる $L_d$ と $\varepsilon_{eh}$ の評価1

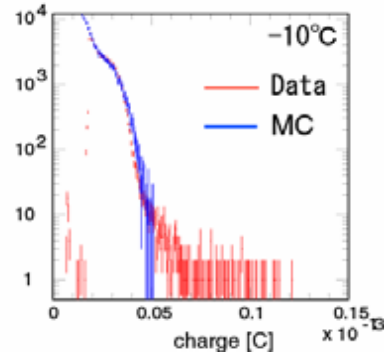
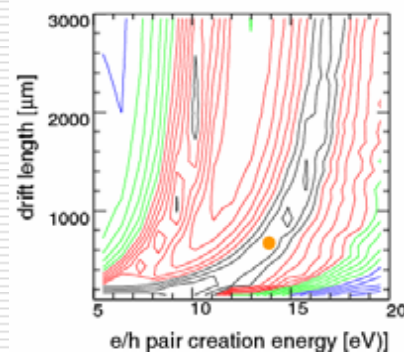


$$L_d = 1000 \mu\text{m}$$



$$L_d = 800 \mu\text{m}$$

低温とともに  
ドリフト長が  
伸びている

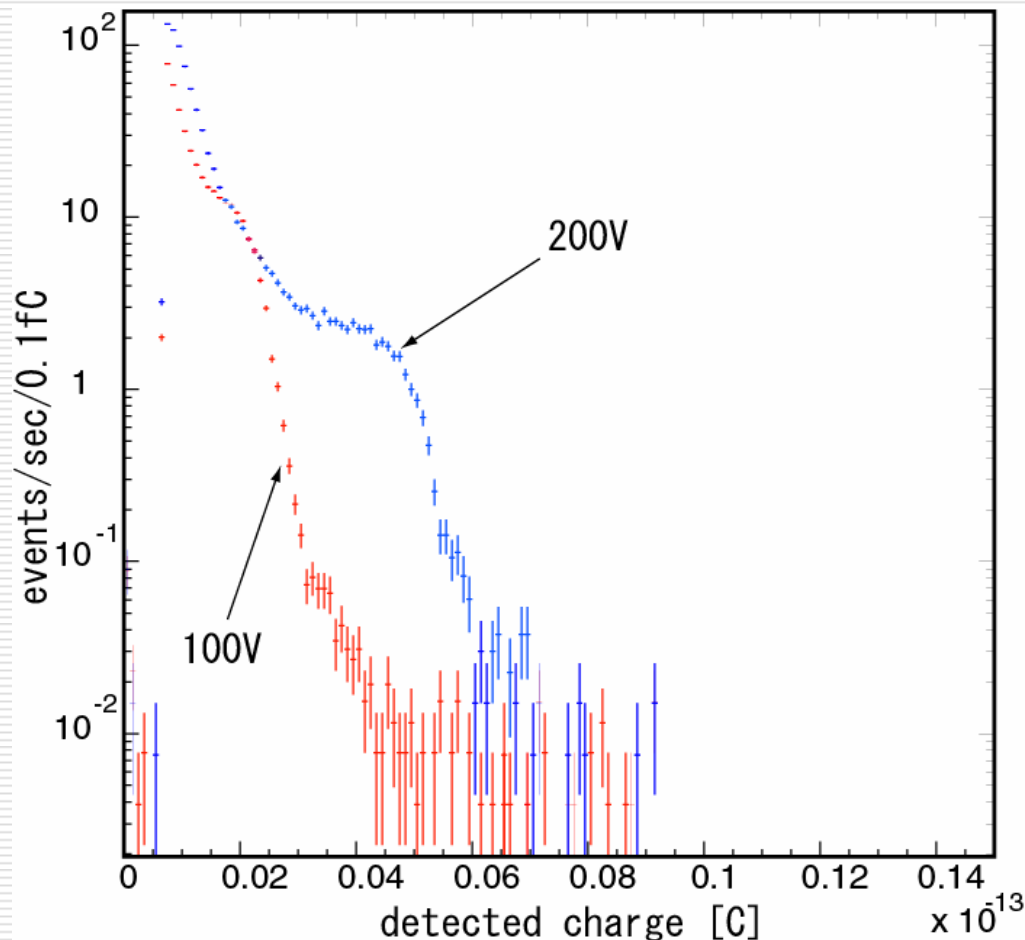


$$L_d = 600 \mu\text{m}$$

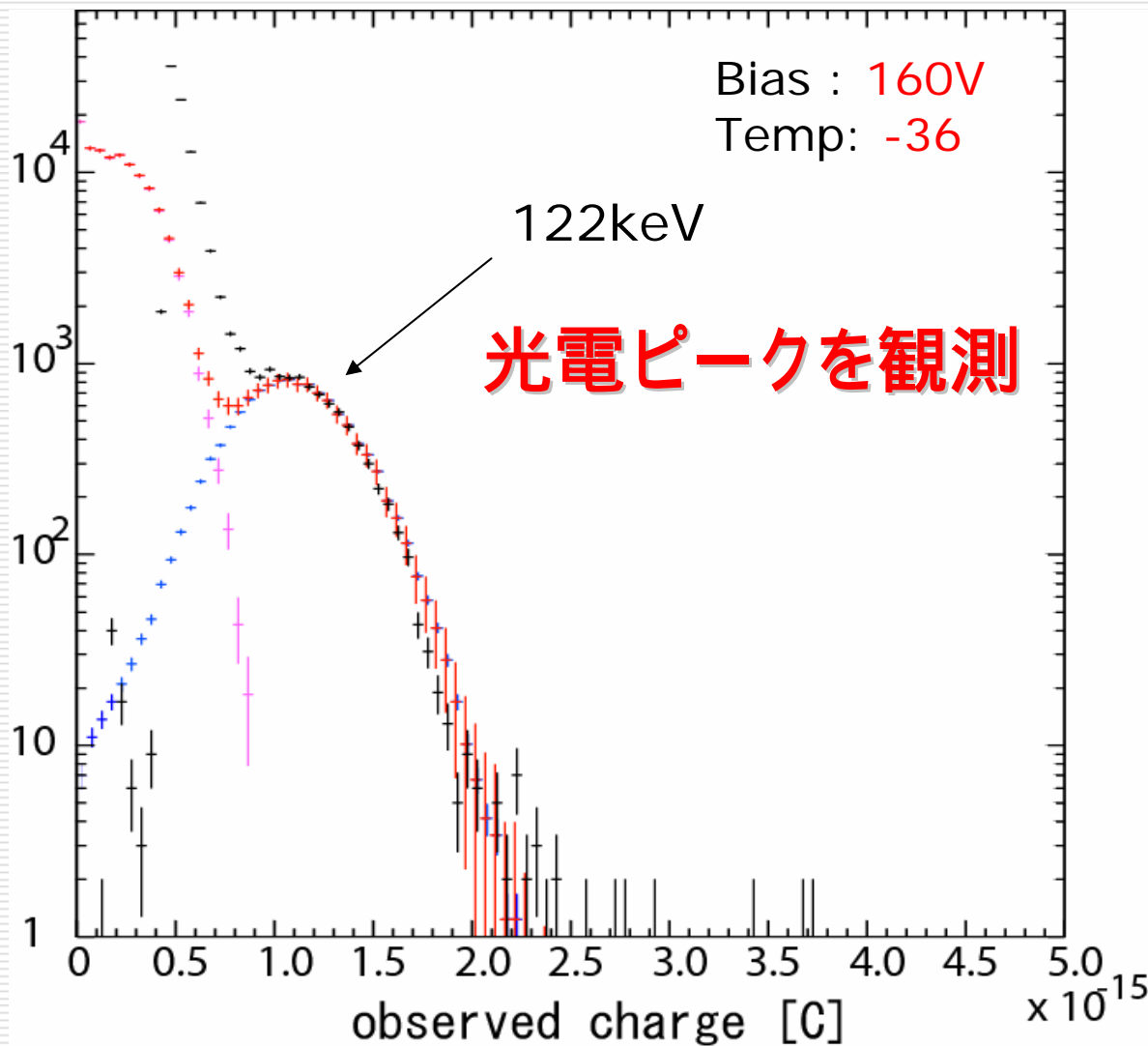
$\varepsilon_{eh}$  は 12 ~ 14 eV

# 線スペクトルのバイアス電圧依存性

- バイアス電圧の増加により電荷収集効率(CCE)が劇的に変化する
- ドリフト長が電圧に比例するためと考えられる  
(cf  $L_d = \mu\tau V_0/d$ )

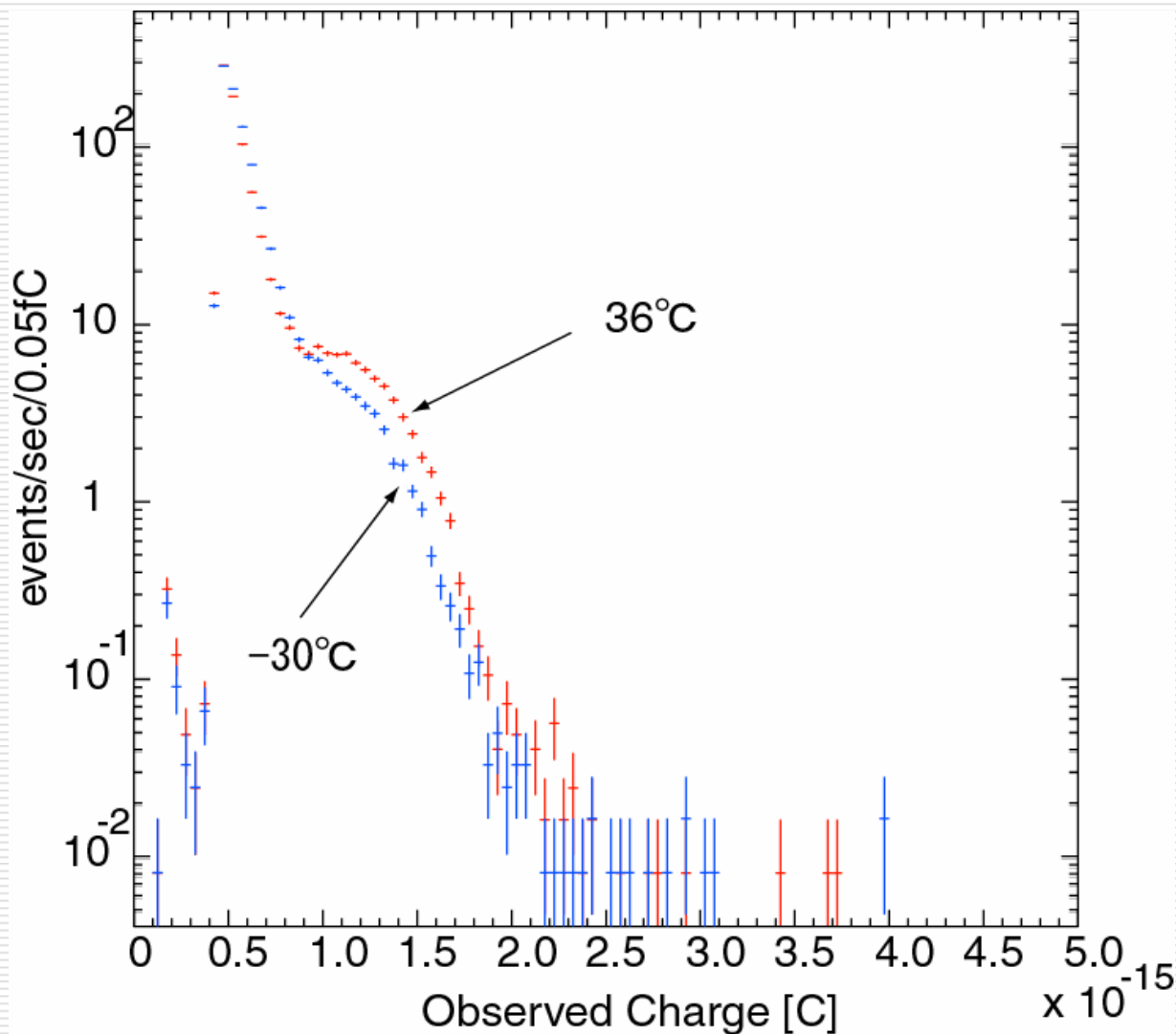


# $^{57}\text{Co}$ 線源によるスペクトル



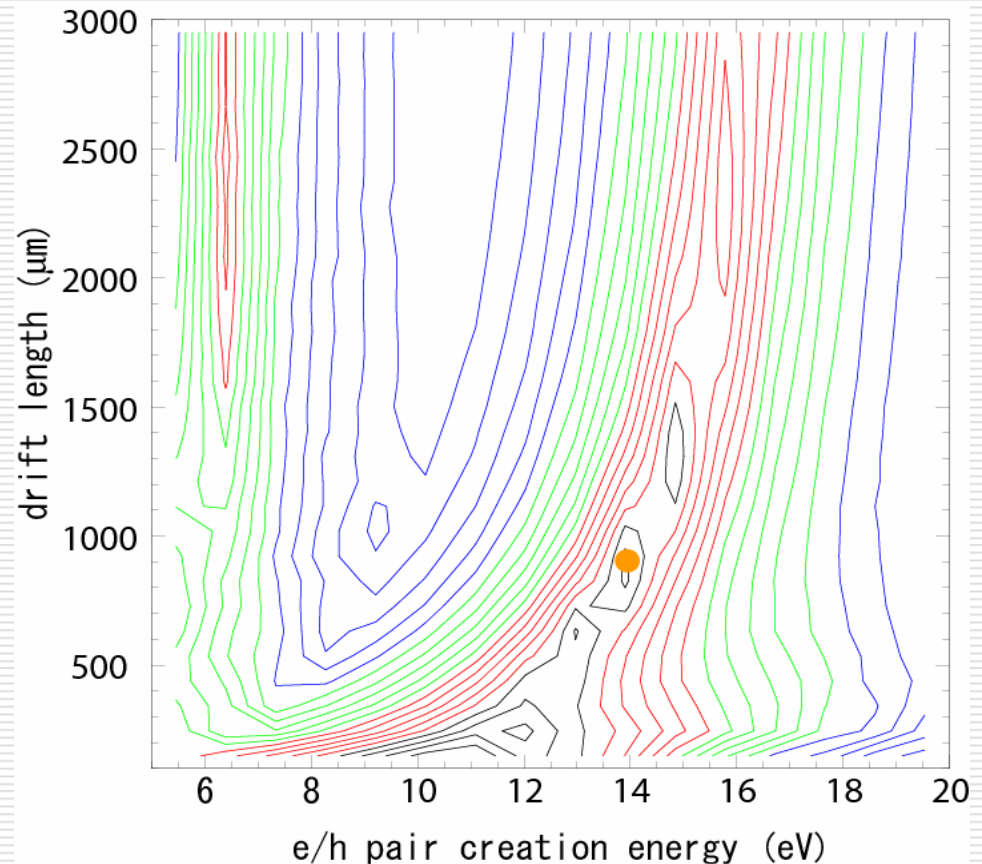
# 線スペクトルの温度依存性 2

- -30 以下で  
光電ピークが  
観測可能
- 低温化で多少  
のCCCEの改善  
が認められる  
が、あまり変  
化していない

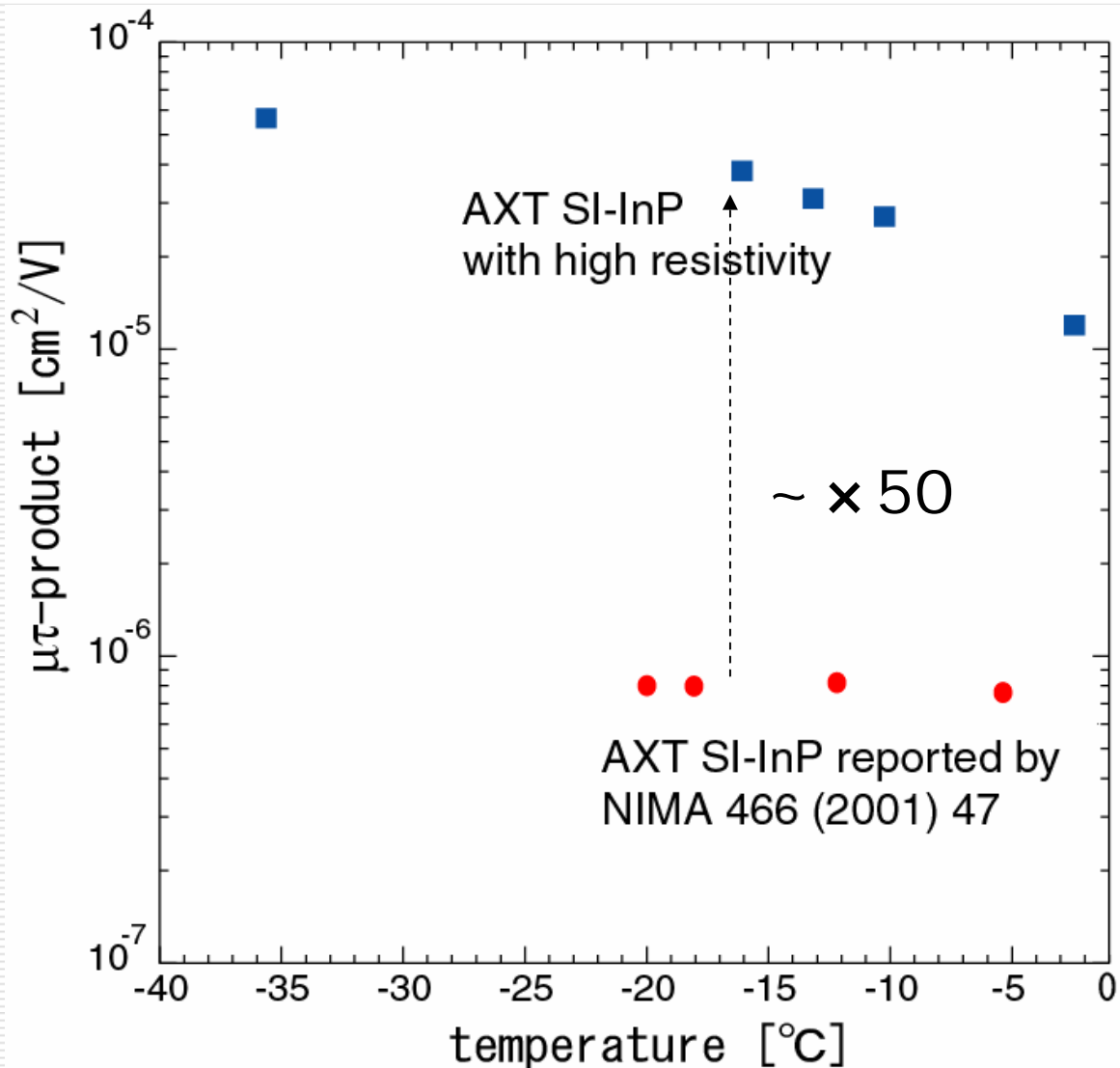


# シミュレーションによる $L_d$ と $\varepsilon_{eh}$ の評価2

- シミュレーションによる $\chi^2_{\min}$ は  
 $\varepsilon_{eh} = 14\text{eV}$ 、  
 $L_d = 1000\mu\text{m}$
- 短ドリフト長はバイアス電圧が160Vであったためと考えられる
- $^{133}\text{Ba}$ の100V/200Vによる予想と合致

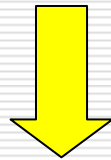


# $\mu\tau$ -productの温度依存性

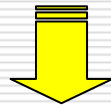


# 問題点

エネルギー分解能:  $30\% @ 122\text{keV}$   
(目標:  $10\% @ 100\text{keV}$  (FWHM))



- 低温化  $-60$   $L_d \times 3$  (CCEが40%up)
- 高バイアス化  $1000\text{V}$ を印可  $L_d \times 5$

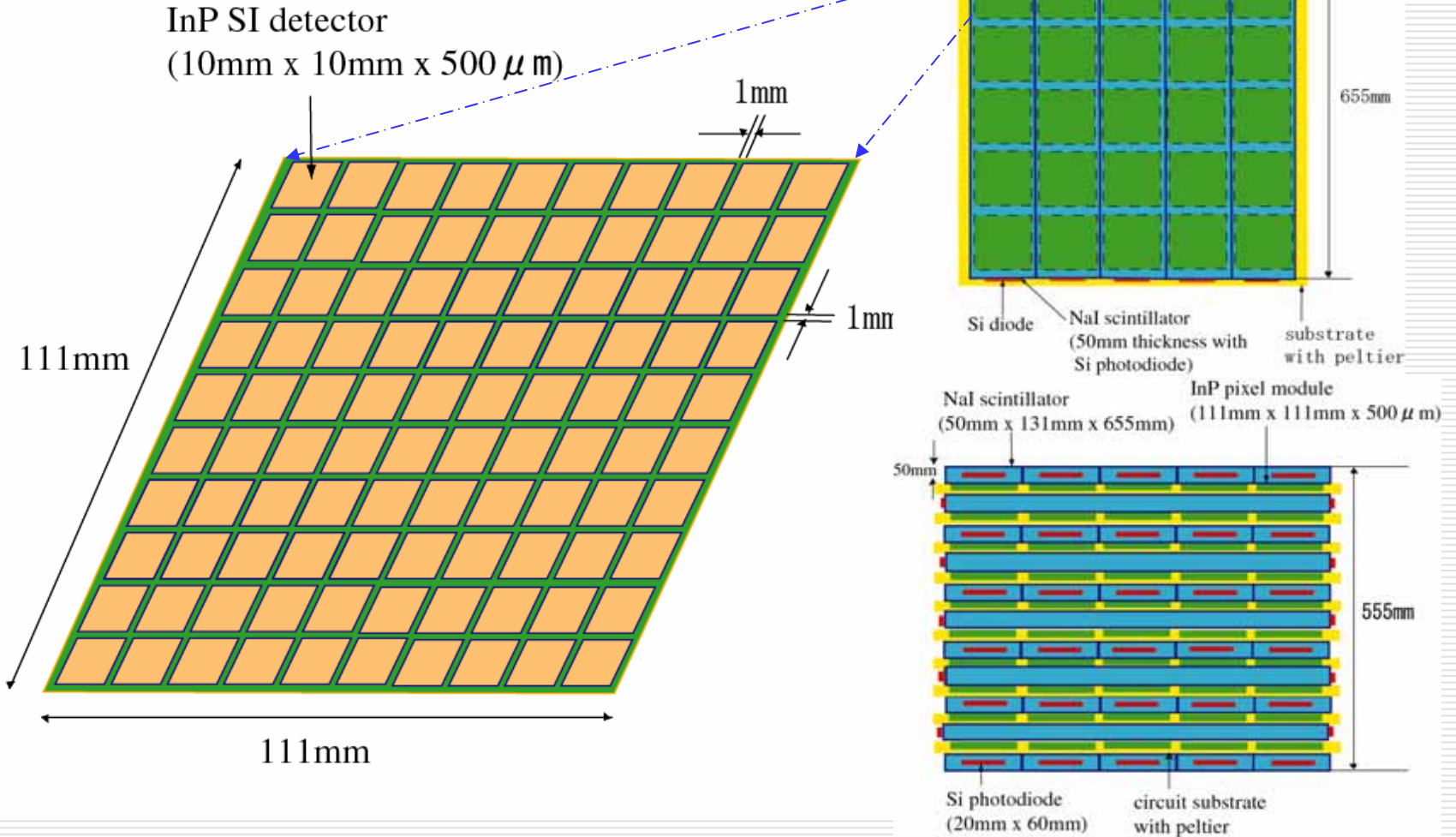


$\sim 11\% @ 122\text{keV}$  が期待される

cf.  $3\text{mm}^2$ 検出器により $-60$ 、 $500\text{V}$ のバイアスにて  
 $9\%$ (FWHM)を得ている NIMA 458(2001) 400

# 太陽ニュートリノ観測用プロトタイプ検出器案

## InP SI pixel module

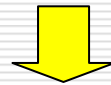




# 結果

---

- ❑ 冷却により 線の検出効率が飛躍的に上昇
- ❑ 100keV領域を観測可能
- ❑  $\mu\tau$ が標準品の50倍以上を達成



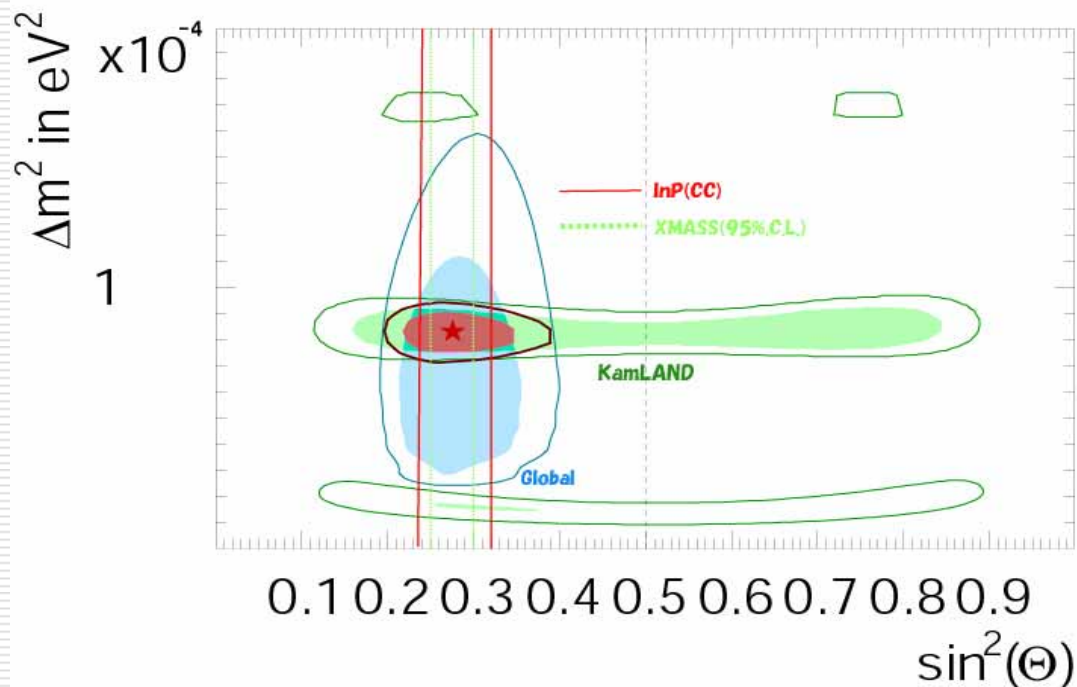
初期の基礎開発段階はほぼ終了

- エネルギー分解能が30% (目標値10%FWHM@100keV)
- 電荷収集効率が60%に留まる

## 今後の課題および計画

- 4段型ペルチェまたは液体窒素により冷却し、分解能の改善を図る
- Pixel moduleの設計
- $^{115}\text{In}$  崩壊からの制動放射X線の測定

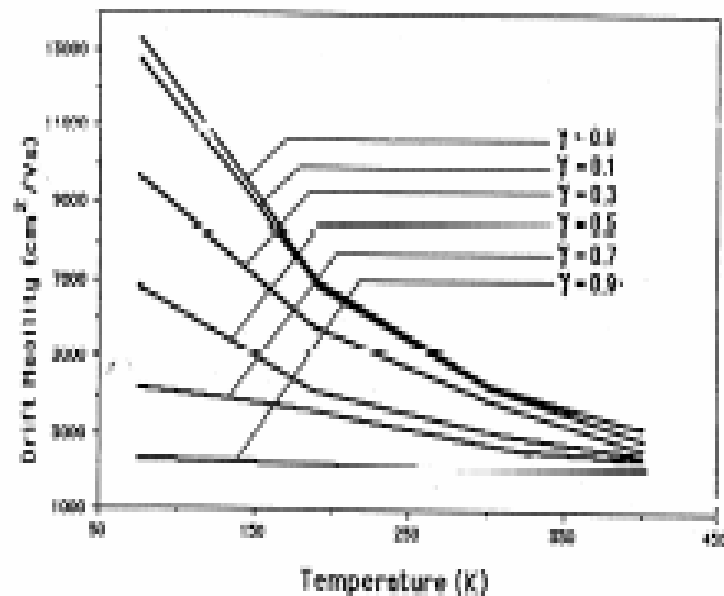
# ニュートリノ振動解の特定感度



図：InP太陽ニュートリノ実験を5年間測定した場合のニュートリノ振動の混合角 $\Theta$ の判別感度の図。global fitで求めた95% C. L. の許容解とKamLANDの結果による許容解も示している。赤線はpp/ Beニュートリノを独立測定できた場合。緑線はXMASS実験の場合である。

# 移動度の温度依存性

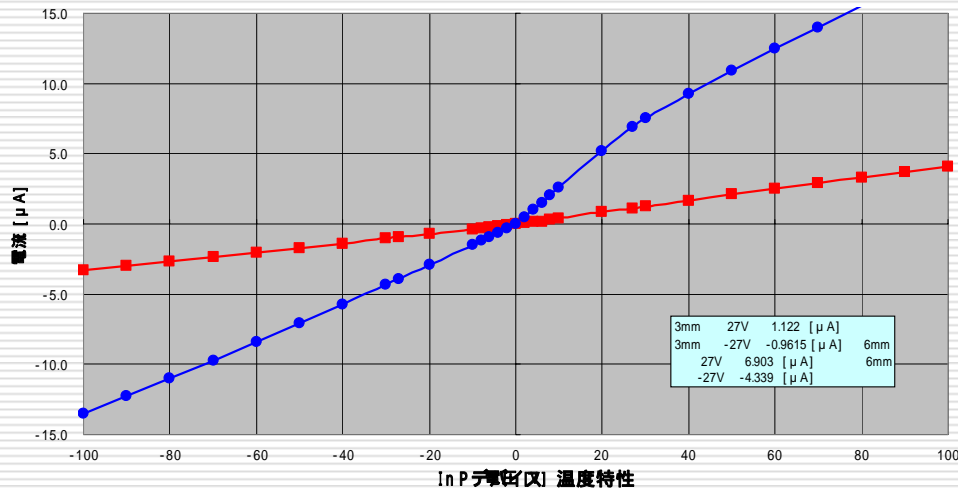
## Extrapolated Low-Field Electron Drift Mobility for InP



Ref: J. Costa and A. Peczalski, *J. Appl. Phys.* 66(2), (1989) p674-679

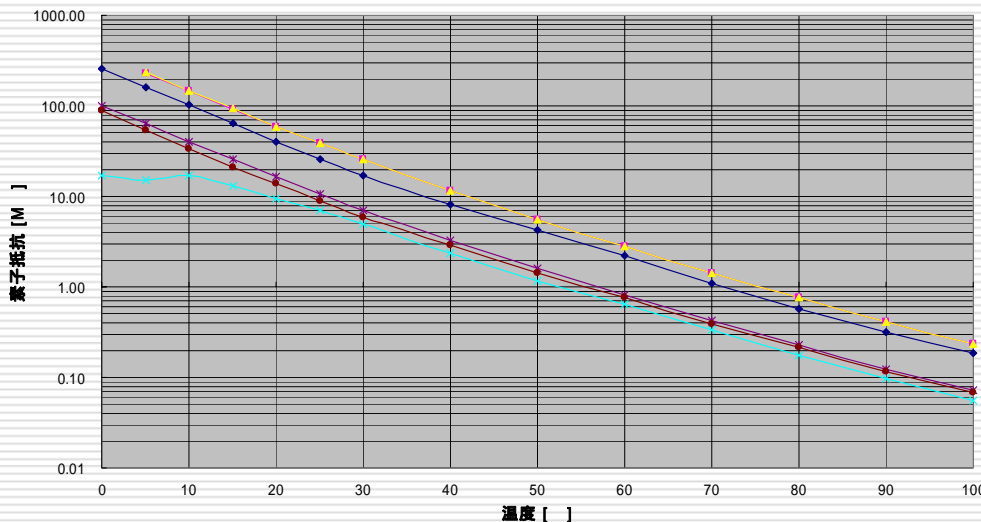
# 半導体特性の評価

InPデバイス V-I特性 25



Dark current can be reduced by lowering the temperature.

$$I[A] \propto T^{2/3} \exp(-E_g/2k_B T)$$



cf  $I@12 / I@-20 = 0.03$

$I@-60$  では0.0001

(presented by Hamamatsu Photonics)

# 測定機器の構成

