

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

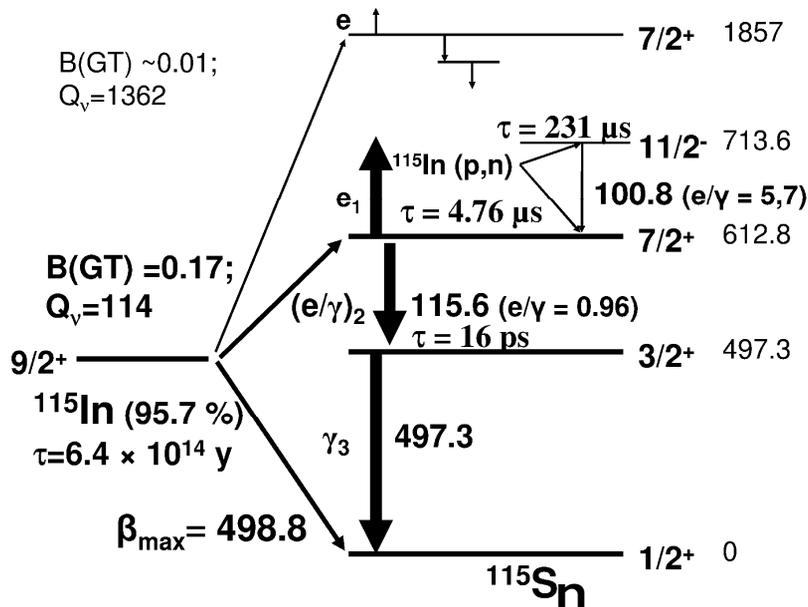
東大宇宙線研 森山茂栄、塩澤真人、小汐由介、
竹内康雄、難波俊雄*

浜松ホトニクス(株) 固体事業部

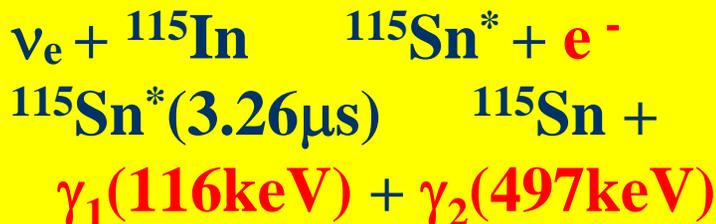
犬塚智也、井澤利之

インジウムによる太陽ニュートリノ検出

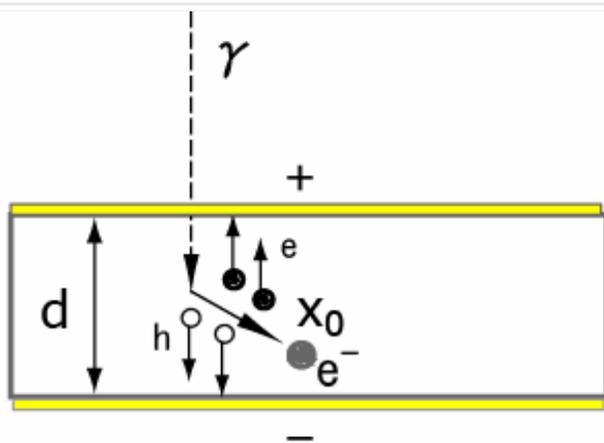
R.S.Raghavan Phs.Rev.Lett37(1976)259



- Real-time measurement
- ν energy measurable ($E_e = E_\nu - 125\text{keV}$)
- 3 fold coincidence to extract neutrino signal
- β -decay from ^{115}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]

μ : mobility [$\text{m}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$]
 v : carrier velocity [ms^{-1}]
 E : electric field [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 : $L_d = \tau v = \mu \tau V_0/d$ τ : carrier lifetime [s]

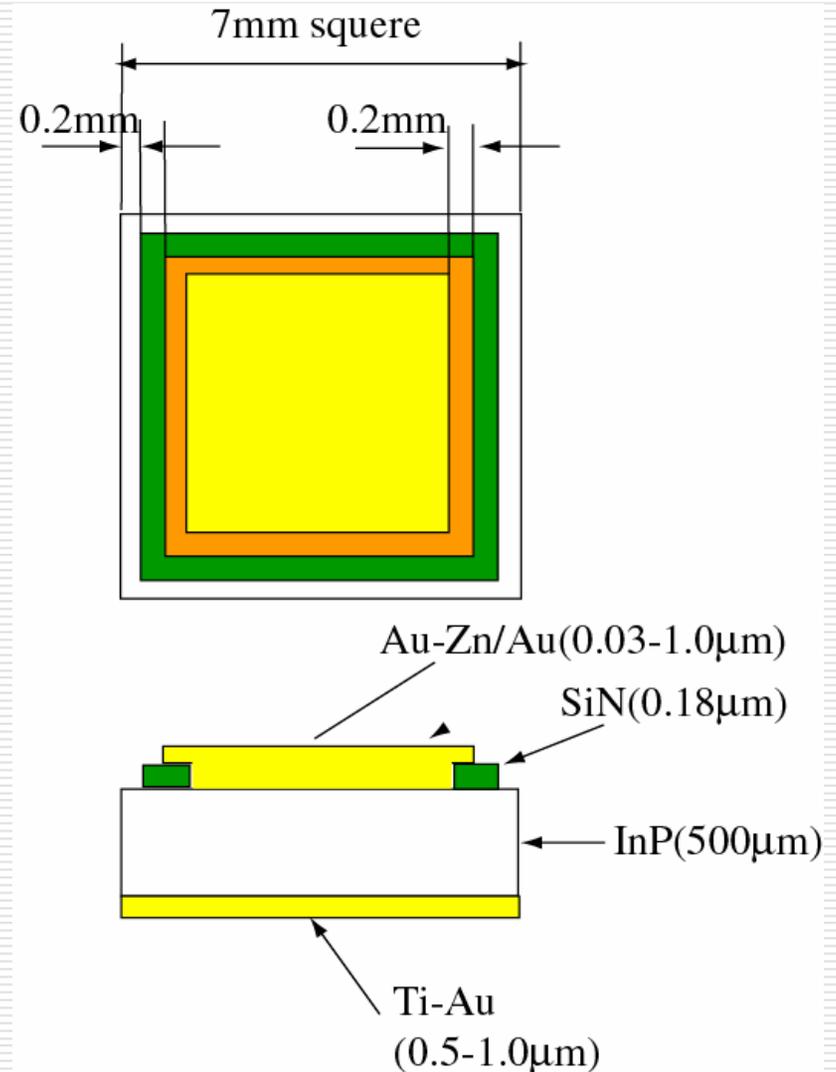
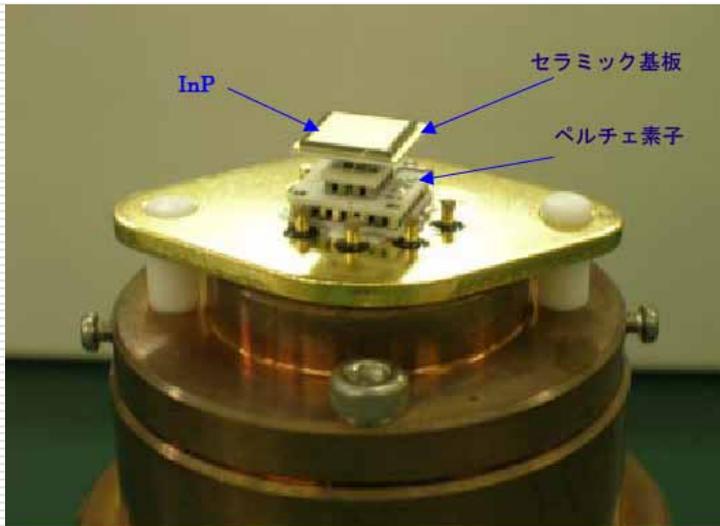
e/h creation energy : ϵ_{eh}

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

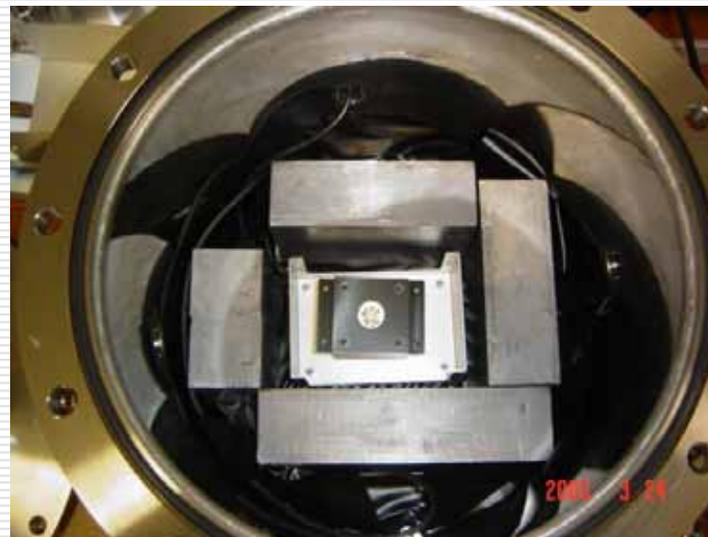
$$L_d \neq \infty \quad Q_{\text{obs}}[\text{C}] = \int_0^R (dE/dx) / \epsilon_{eh} e^{-r(x)/L_d} dx \times e$$

- 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)

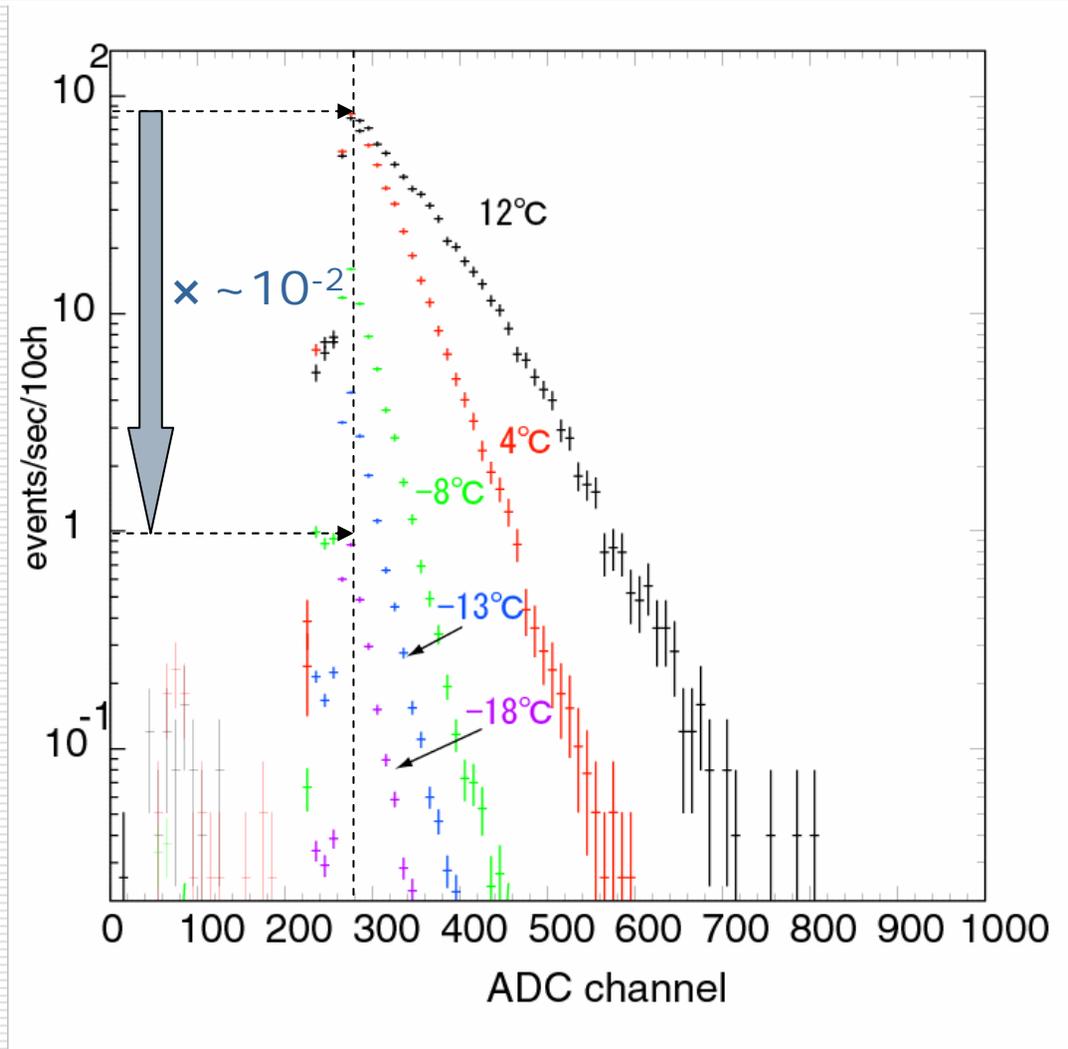
ペルチェ素子を用いたSI InP半導体検出器



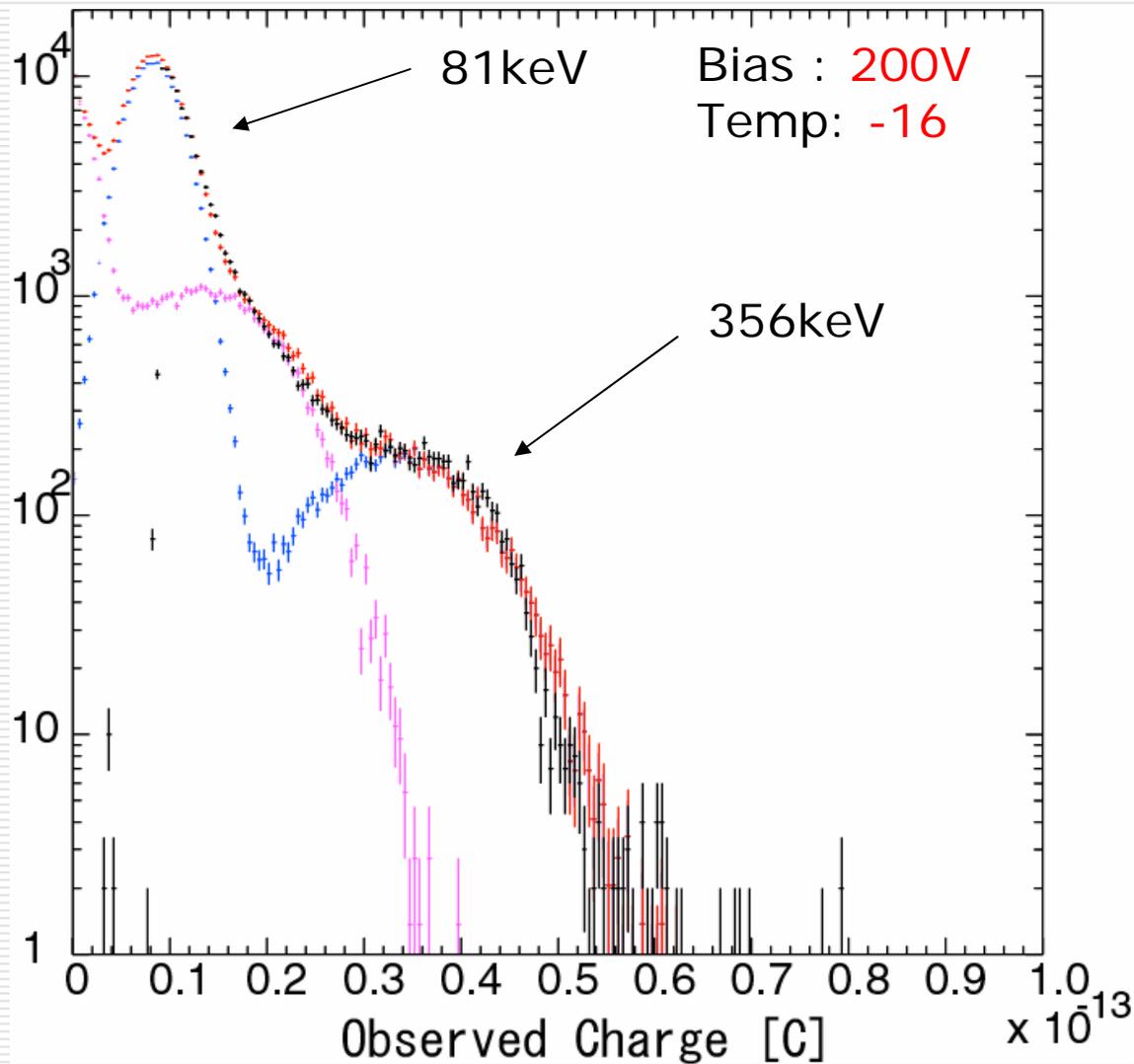
測定の設定アップ



ノイズレベルの温度依存性

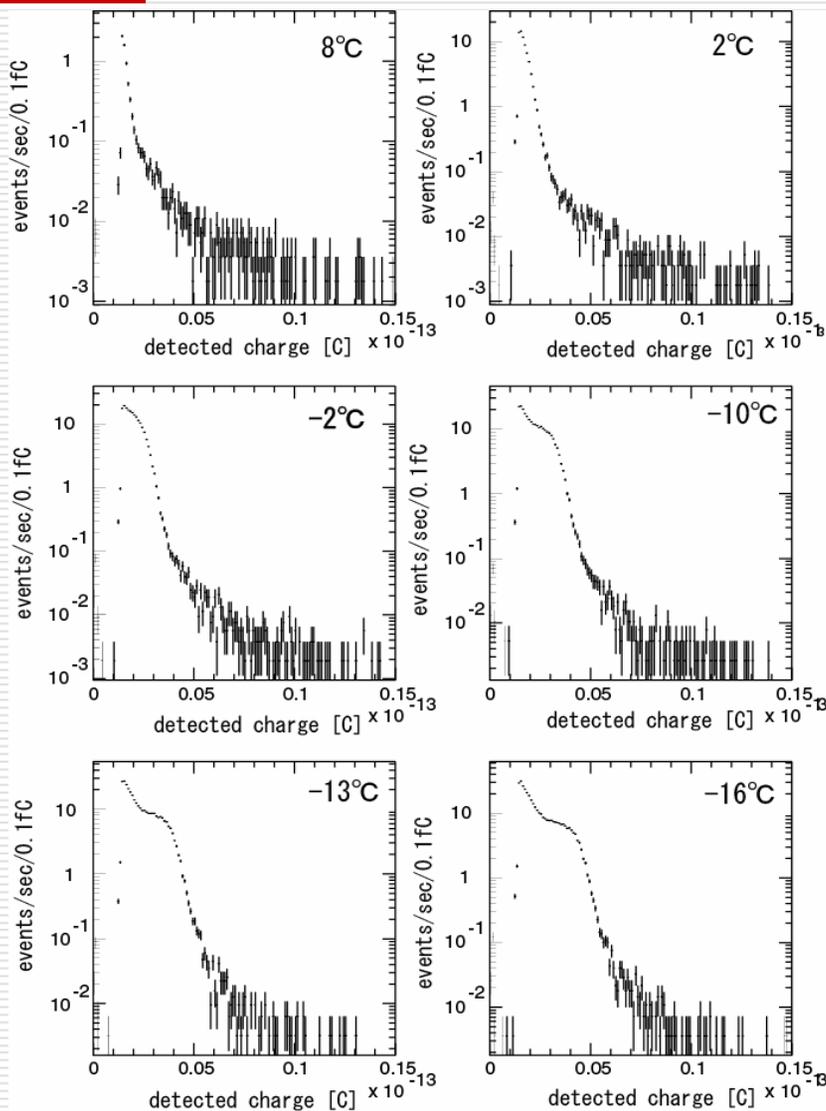


^{133}Ba 線源による応答

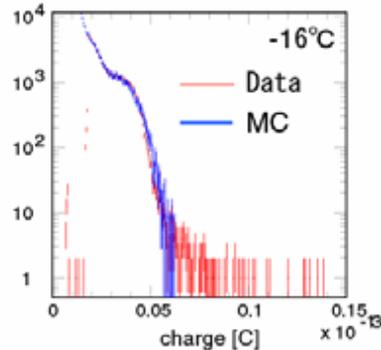
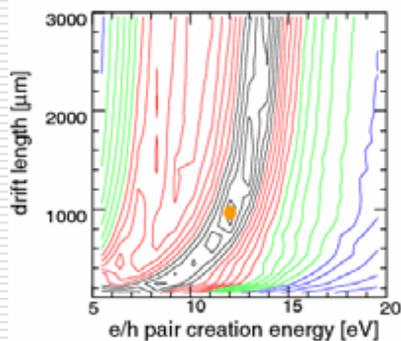


線スペクトルの温度依存性 1

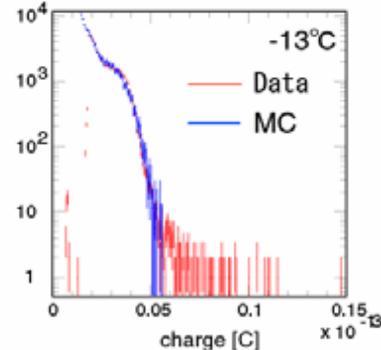
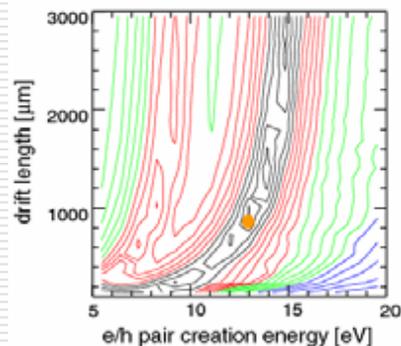
- -10 以下で光電ピークを観測可能になった
- 低温とともに電荷量が増大している。つまり、**電荷収集効率 (CCE) が増大している**
- ドリフト長が延びていると考えられる



シミュレーションによる L_d と ε_{eh} の評価1

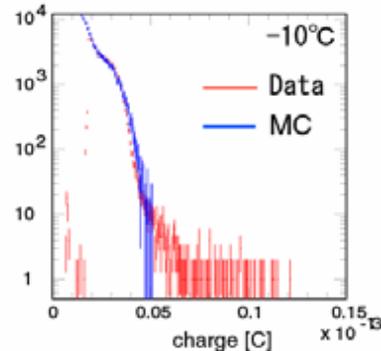
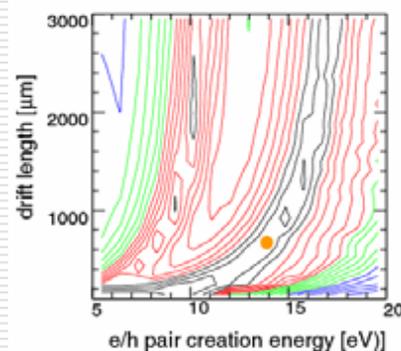


$$L_d = 1000 \mu\text{m}$$



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

低温とともに
ドリフト長が
伸びている

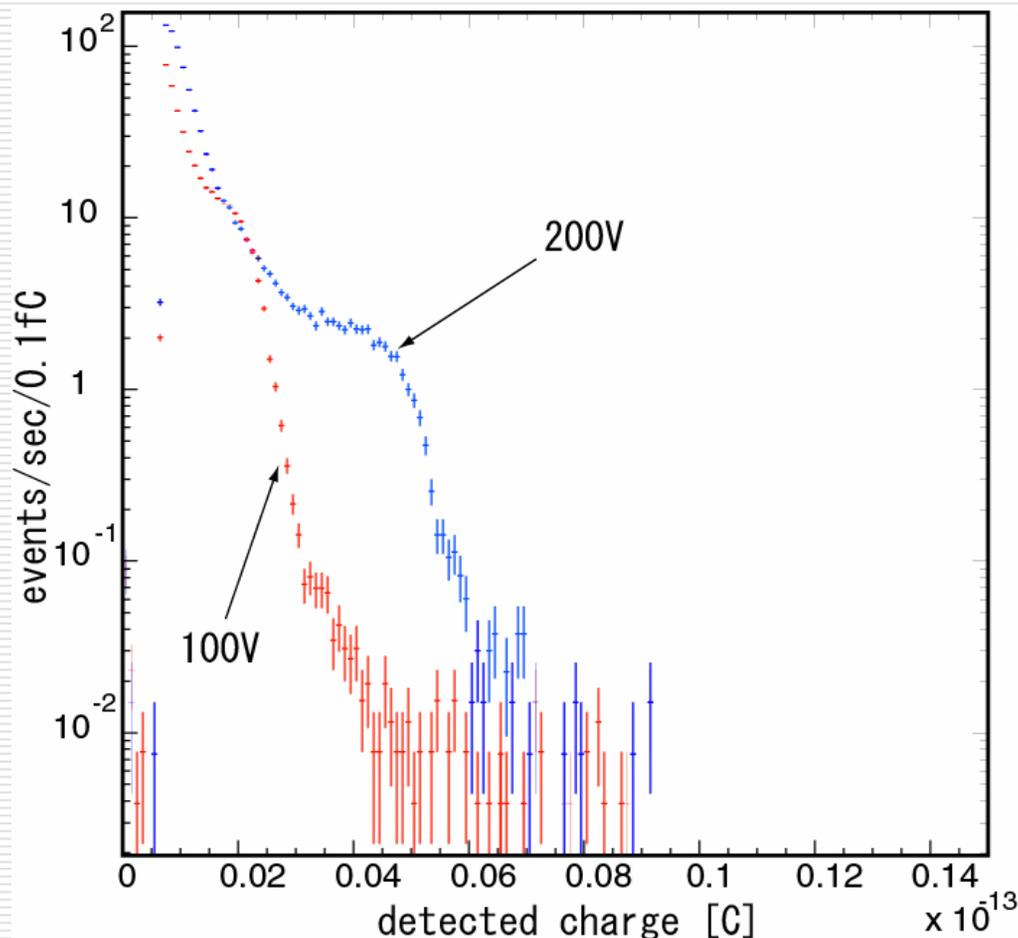


$$L_d = 600 \mu\text{m}$$

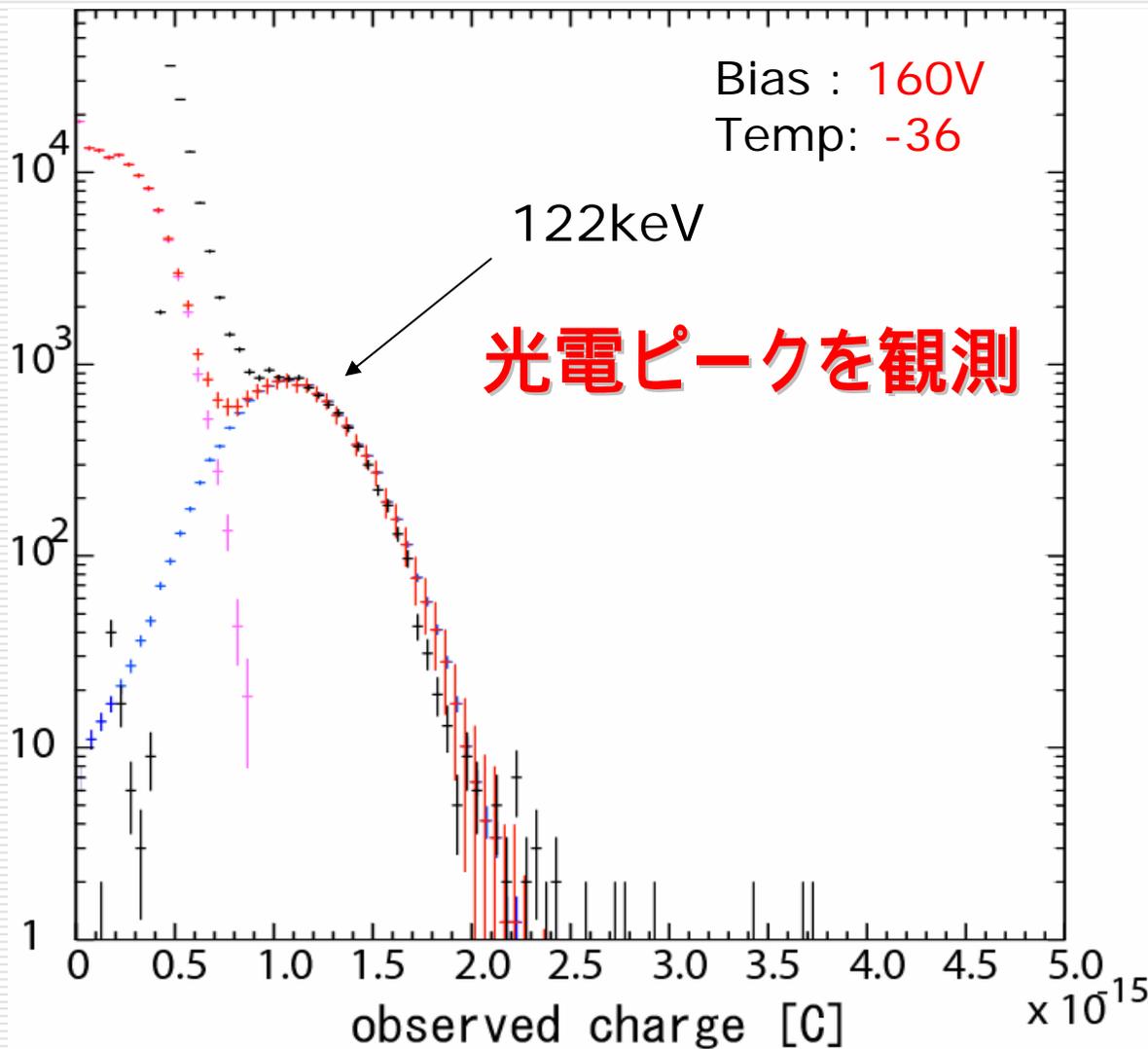
ε_{eh} は $12 \sim 14 \text{ eV}$

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 $L_d = \mu\tau V_0/d$)

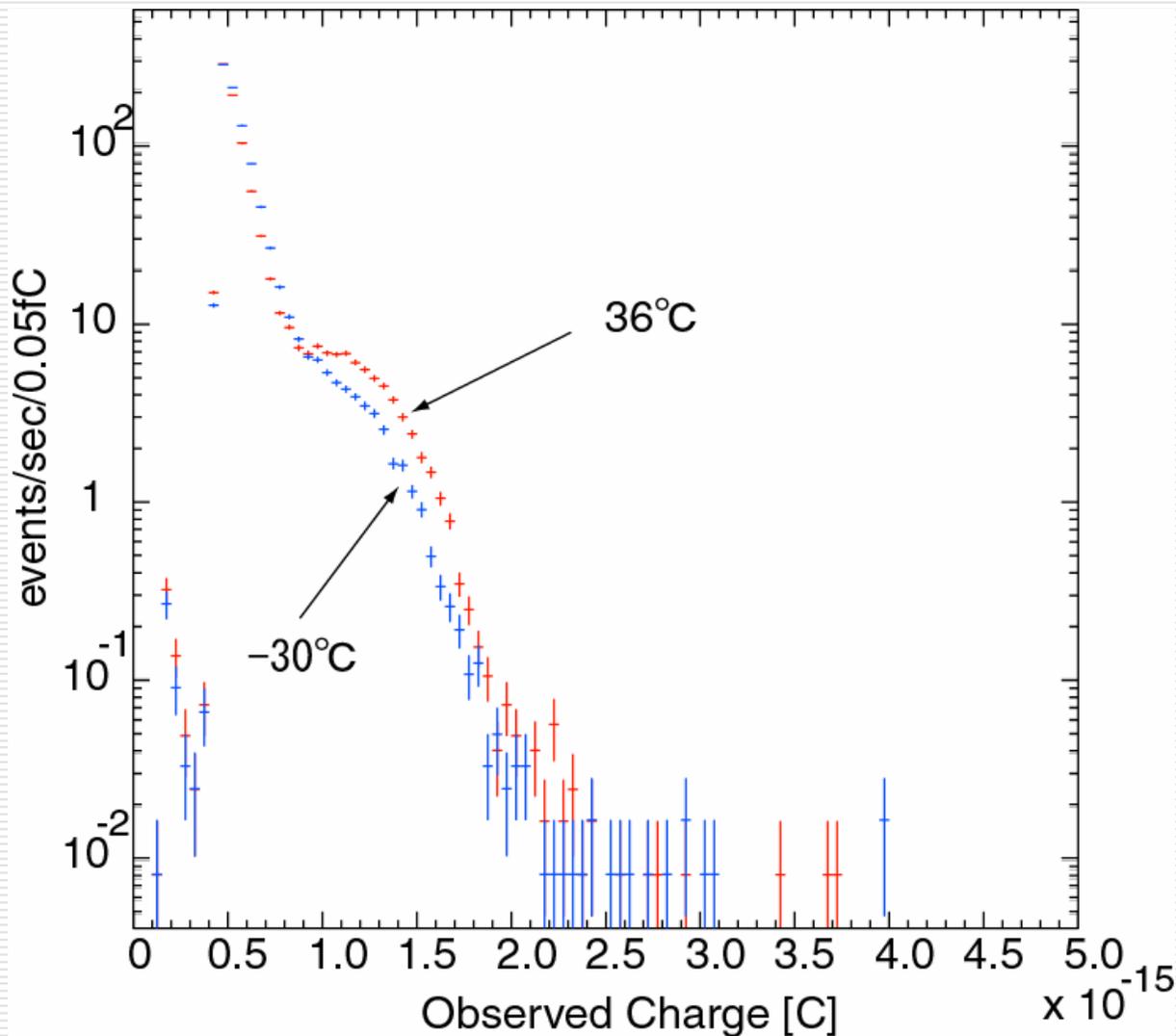


^{57}Co 線源によるスペクトル



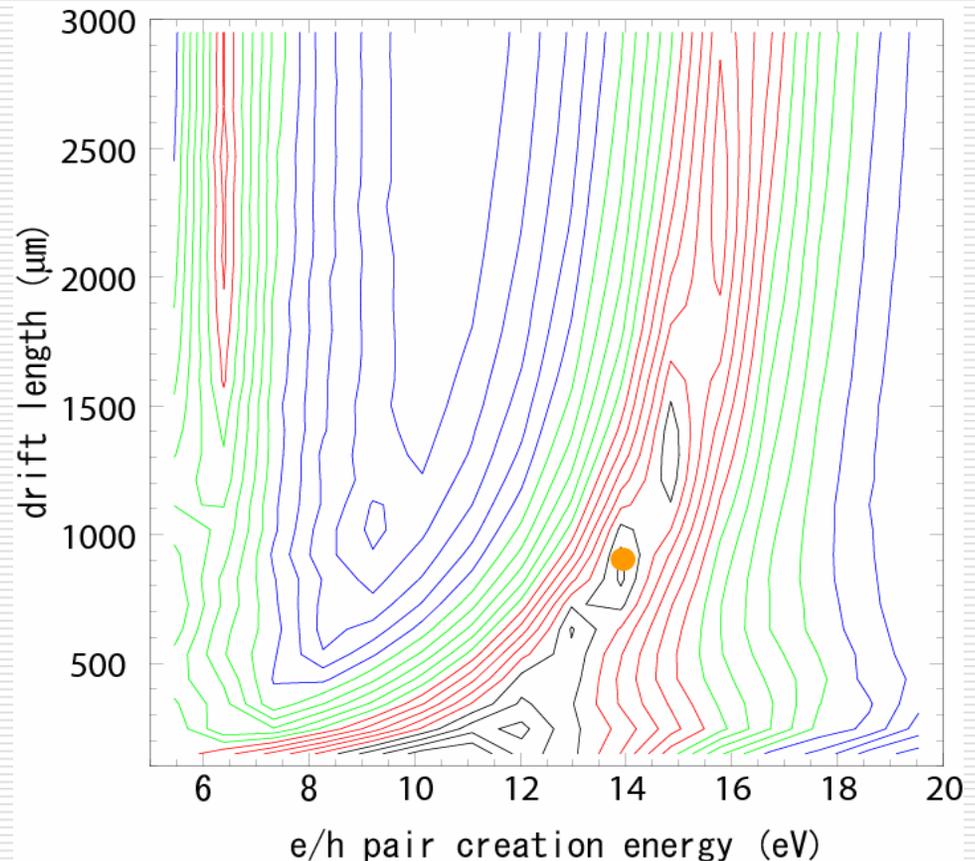
線スペクトルの温度依存性 2

- -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

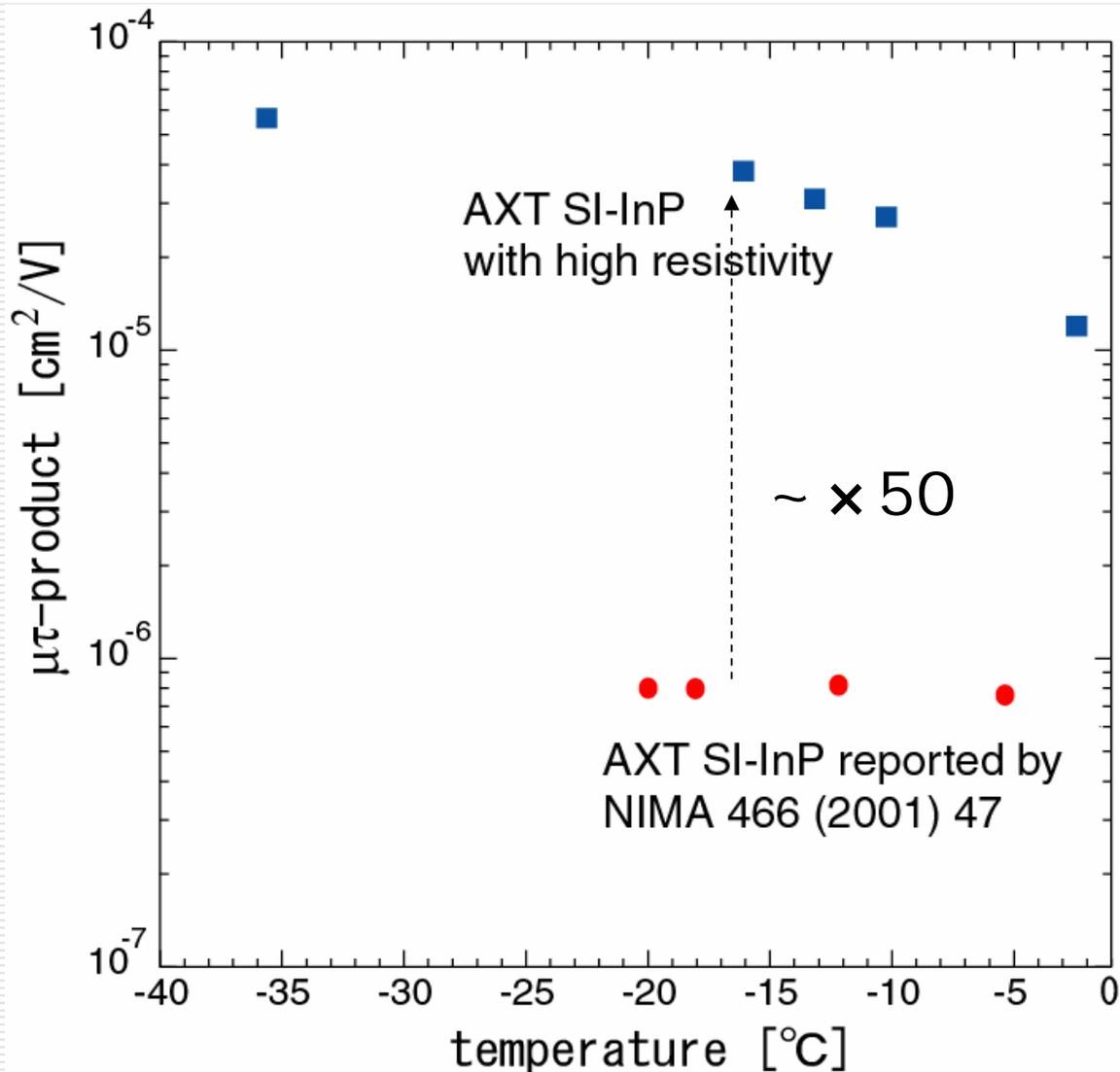


シミュレーションによる L_d と ε_{eh} の評価2

- シミュレーションによる χ^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}Ba の100V/200Vによる予想と合致

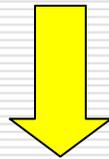


$\mu\tau$ -productの温度依存性

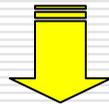


問題点

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 1000V を印可 $L_d \times 5$

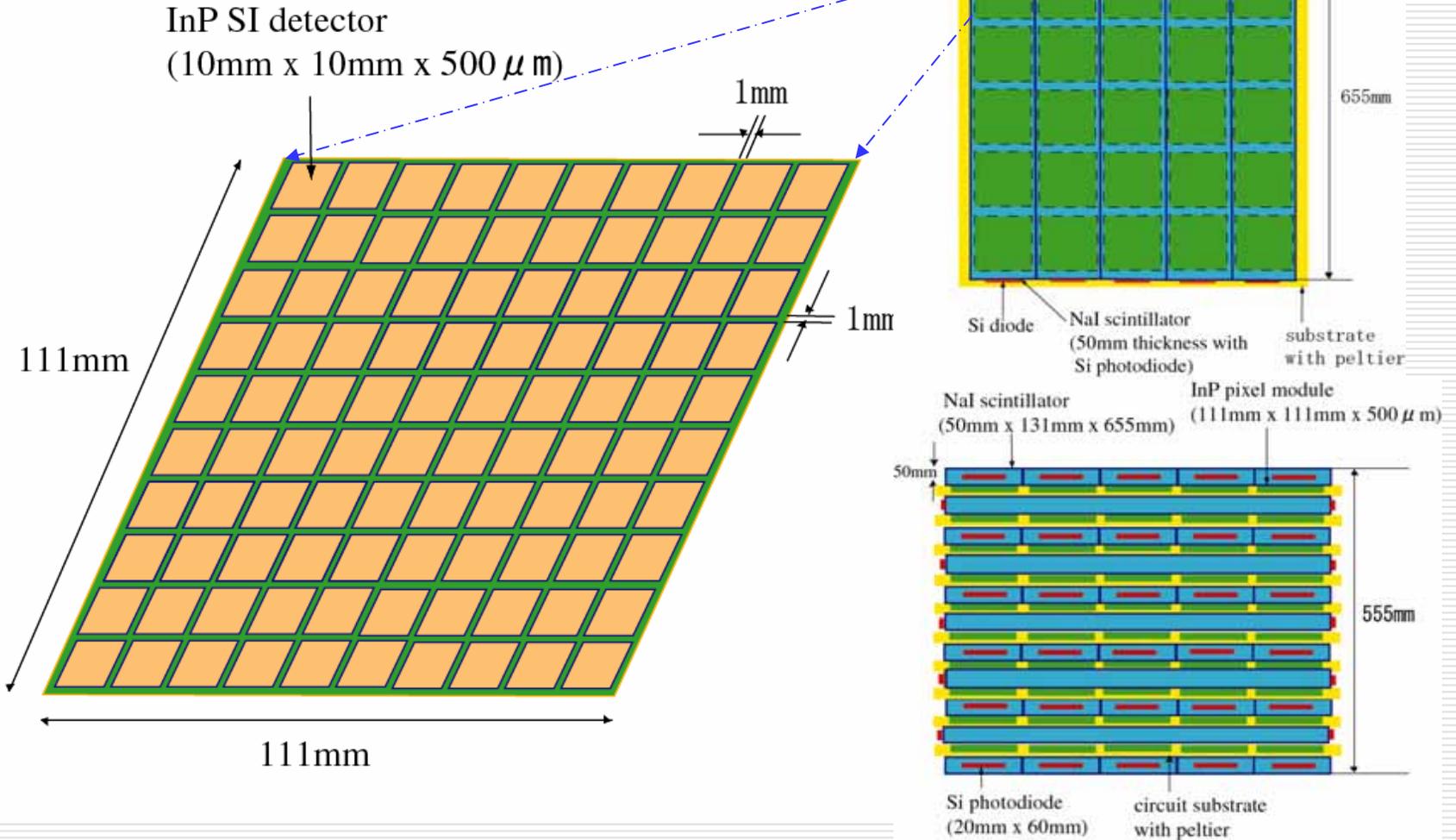


$\sim 11\% @ 122\text{keV}$ が期待される

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

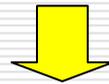
太陽ニュートリノ観測用プロトタイプ検出器案

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



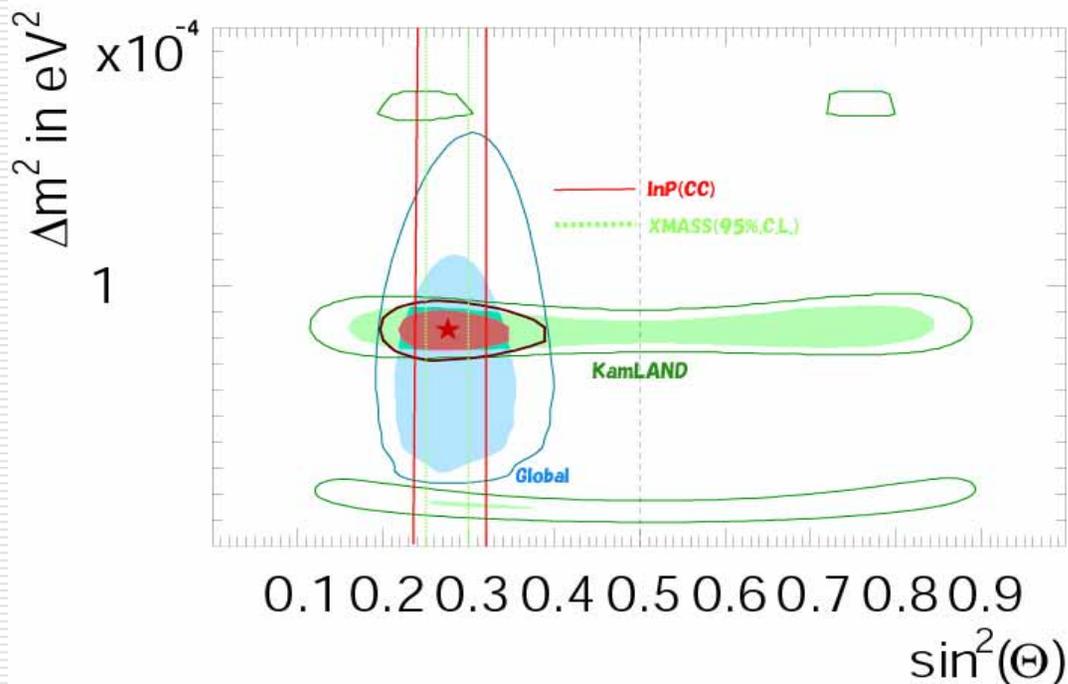
初期の基礎開発段階はほぼ終了

- 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}In 崩壊からの制動放射X線の測定

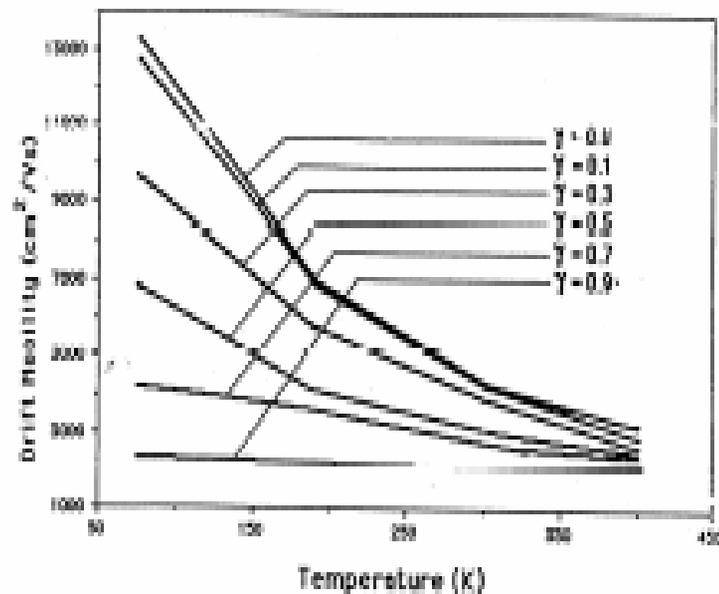
ニュートリノ振動解の特定感度



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 Θ 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

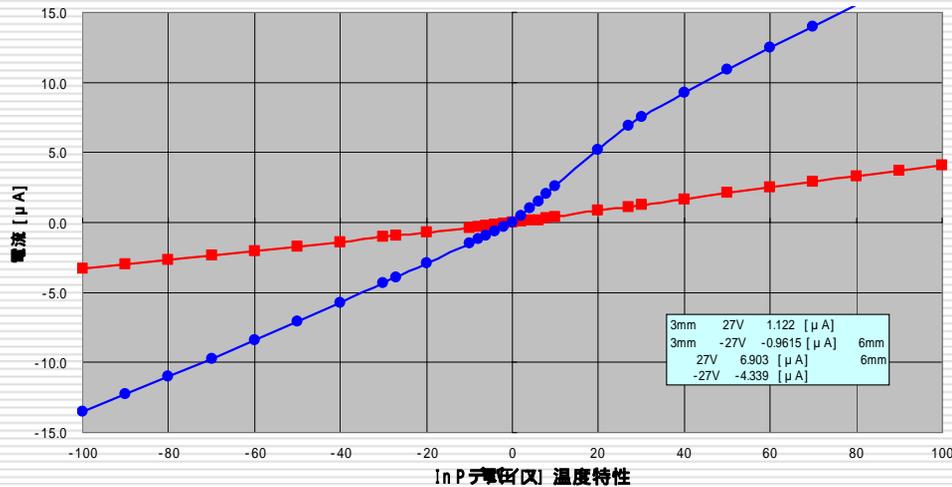
Extrapolated Low-Field Electron Drift Mobility for InP



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

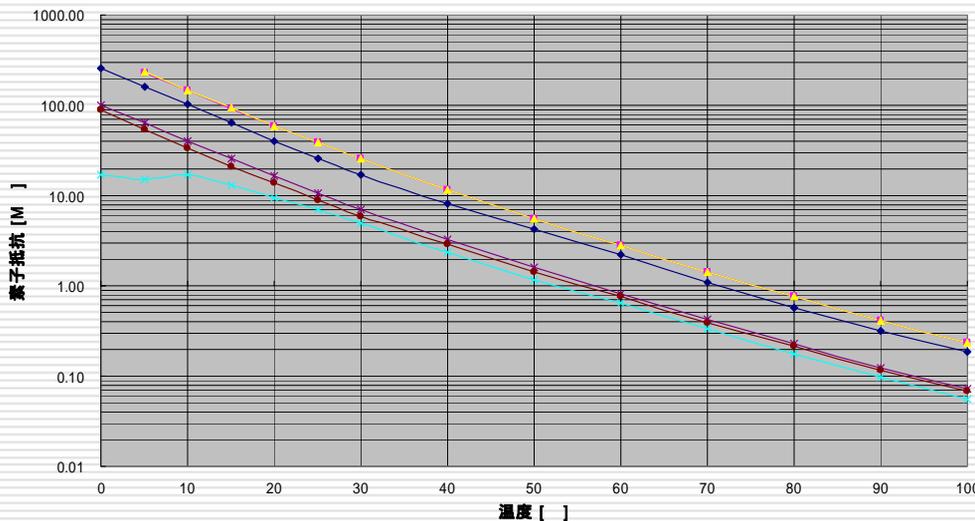
半導体特性の評価

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

