

低エネルギー太陽ニュートリノ観測を目的としたインジウム・リン半導体検出器の開発研究

平成19年度共同利用研究成果発表研究会

2007年12月14日

宮城教育大学 福田善之

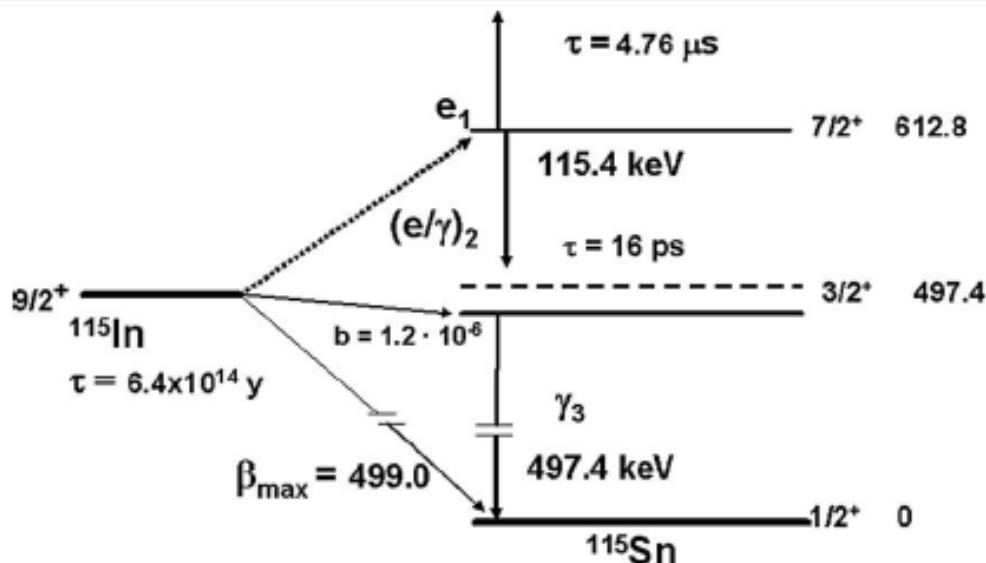
東大宇宙線研 森山茂栄、塩澤真人、小汐由介

東大素粒子センター 難波俊雄

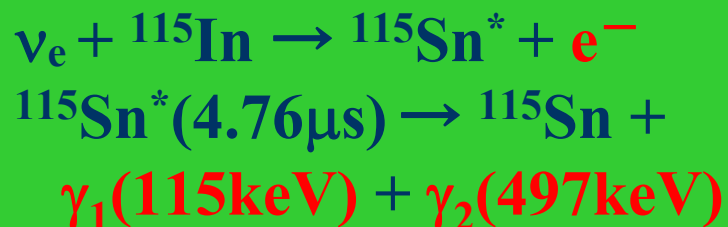
2007年度 申請額10万円 採択額:3万円

^{115}In による太陽ニュートリノ検出

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



Nuclear Physics A 748 (2005) 333-347



- リアルタイム観測
- ν エネルギーを観測

($E_e = E_\nu - 128\text{keV}$)

→pp ν を直接観測可能

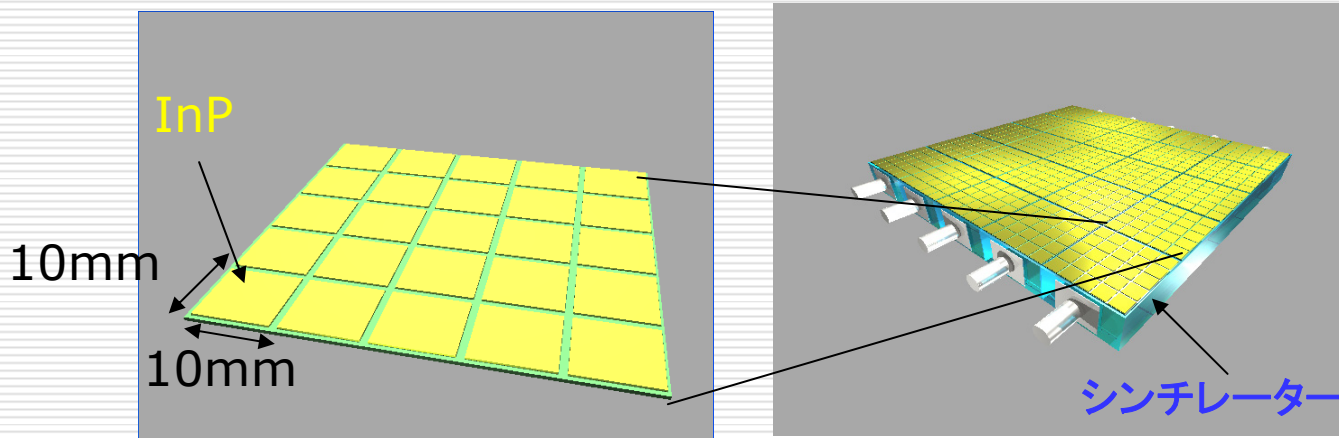
■3重同時観測により
ニュートリノ信号を識別

■ ^{115}In 自身のベータ崩壊
($\tau_{1/2} = 4.1 \times 10^{14}$ 年)
が大量に存在

■ベータ事象とその制動
輻射による偶発的同時
事象が最大のノイズ

空間的に細分化されたエネルギー
分解能の良い検出器が必要

InP太陽ニュートリノ実験装置

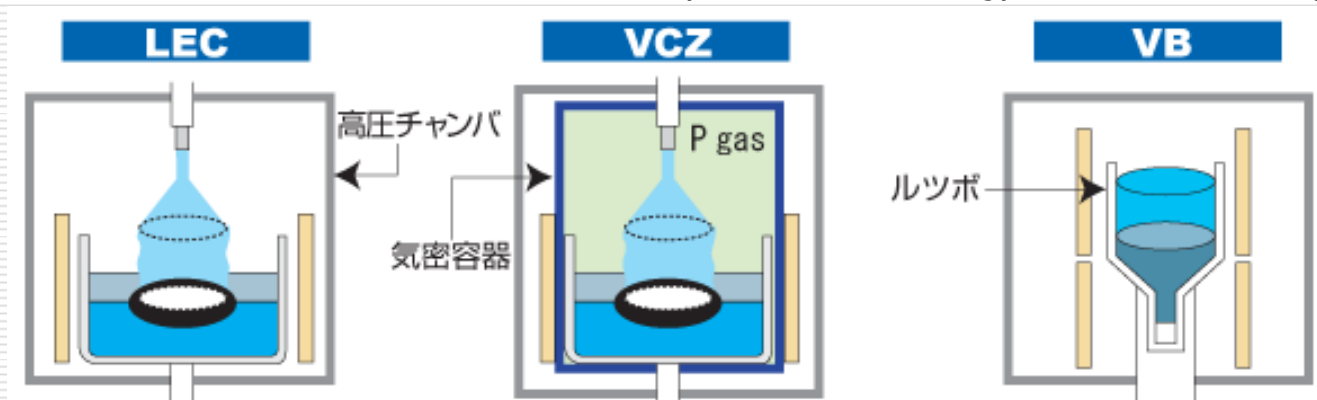


- ❑ InP全体で5.1トン (2.1×10^6 modules)
- ❑ エネルギー分解能: 10%(FWHM)
- ❑ ガンマ線検出用の固体シンチレーター
- ❑ 装置のサイズ: 6.3m X 6.3m X 5.3m
- ❑ $E_{th} \geq 100\text{keV}$ 、5年間で720事象を観測 (LMA解)
- ❑ 統計誤差とSSMの誤差から、~4%のsensitivity

$$\theta_{12} = 29^\circ - 34^\circ$$

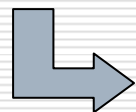
VCZ製法の半絶縁性InP素子

<http://www.sei.co.jp/sc/technical/inp.html>



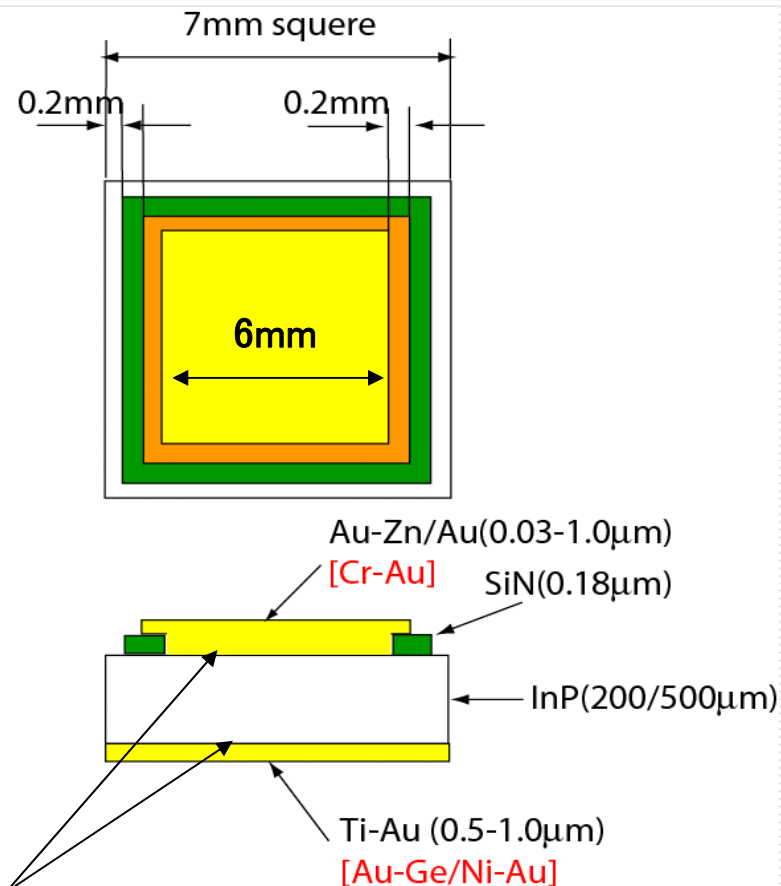
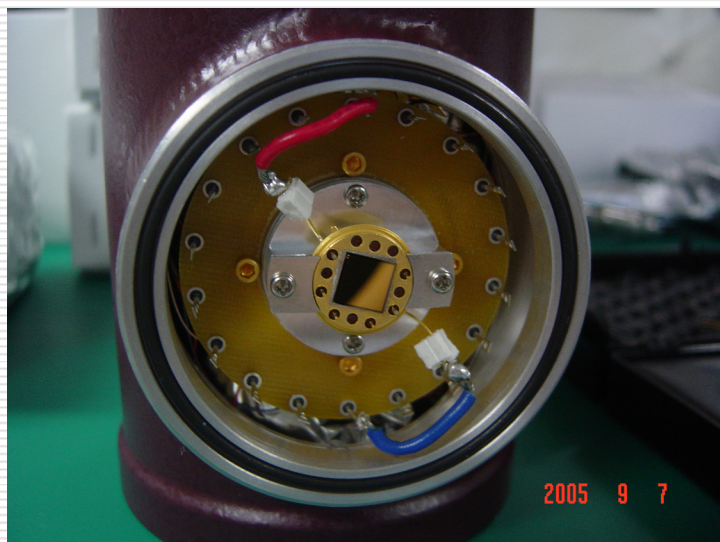
□ InP結晶成長法

	格子欠陥密度	比抵抗	
➤ LEC	高い($\sim 50,000\text{cm}^{-2}$)	$> 10^7 \Omega\text{cm}$	一般的
➤ VGF	低い($\sim 5,000\text{cm}^{-2}$)	$> 10^7 \Omega\text{cm}$	従来用いたもの
➤ VCZ	低い($\sim 5,000\text{cm}^{-2}$)	$> 10^7 \Omega\text{cm}$	



性能が良い兆候が得られている

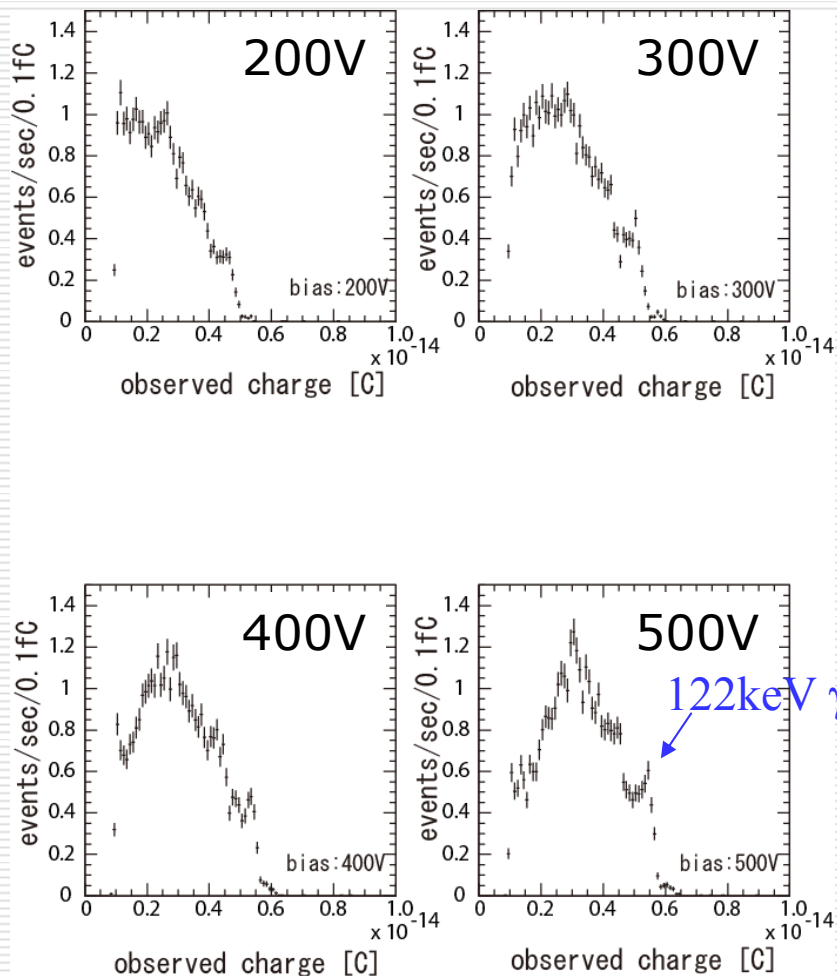
半絶縁性InP半導体検出器



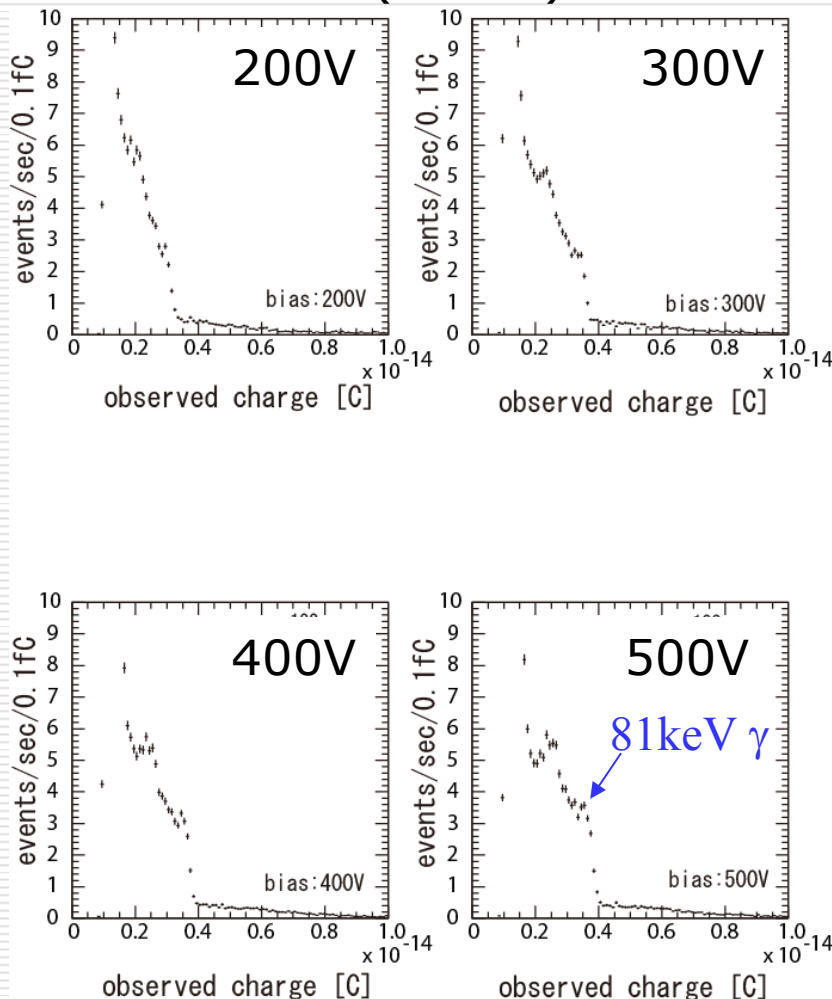
オーミック接触(ショットキー障壁)

$^{57}\text{Co}/^{133}\text{Ba}$ からのガンマ線スペクトル

^{57}Co (122keV/136keV)

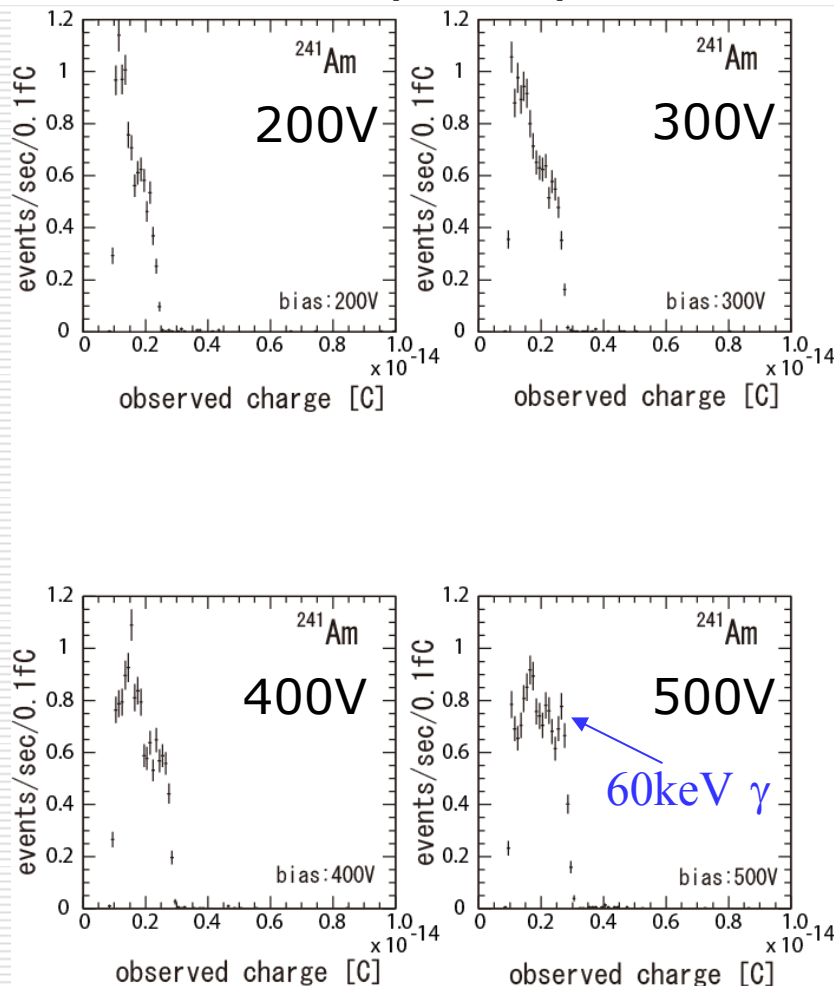


^{133}Ba (81keV)



^{241}Am からのガンマ線スペクトル

^{241}Am (60keV)

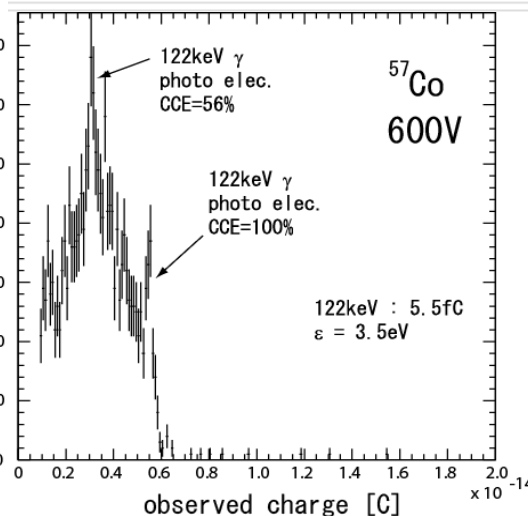
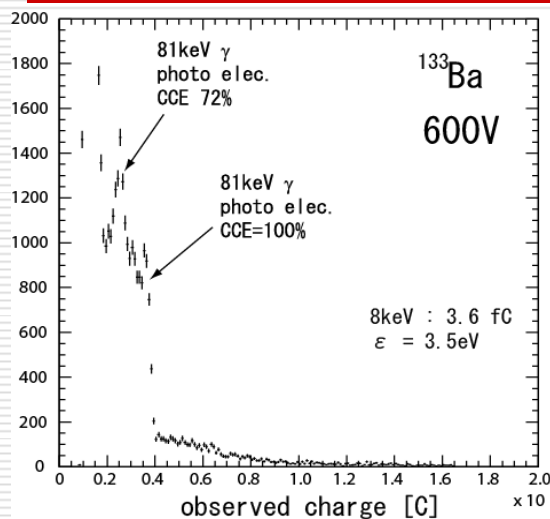


- ❑ ガンマ線の光電吸収ピークを観測
- ❑ 但し、2つピークを観測
- ❑ バイアス電圧を上げると、低い電荷量のピークが増加
- ❑ 電荷量の大きいピークはそれほど増加しない

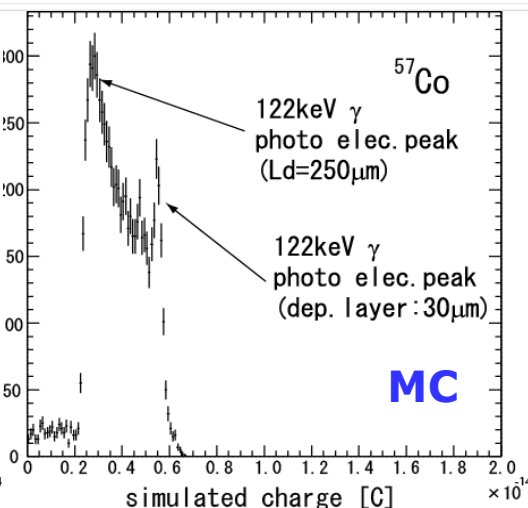
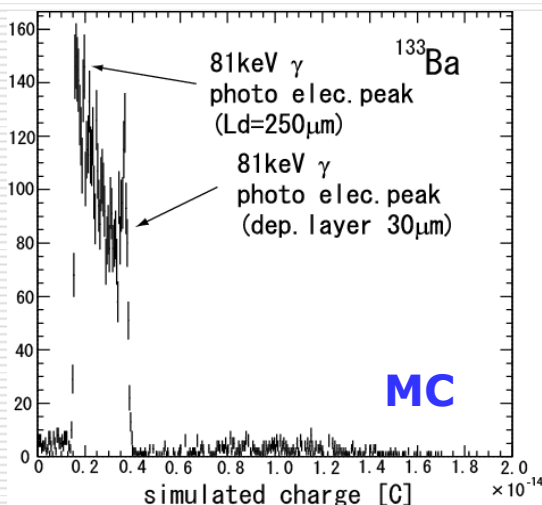


電荷量の大きいピークは
ほぼ100%の電荷量を
収集(CCE:100%)

VCZ基板によるInP検出器の性能



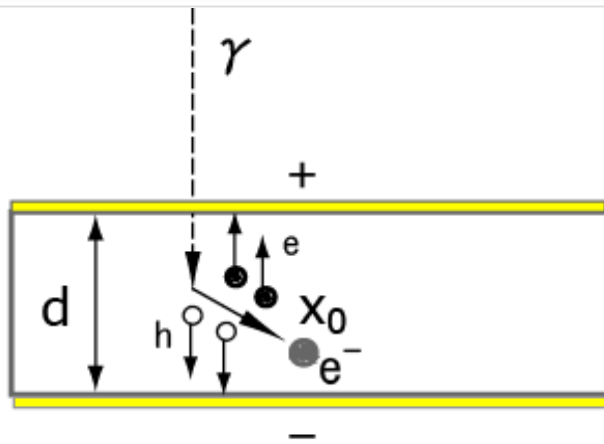
□ 空乏層は100%の電荷収集、それ以外はドリフトによる電荷収集をシミュレーションするスペクトルと一致



□ MCよりキャリアのドリフト長は **250μm**

□ 100%CCEのピーク位置より、e/h生成エネルギー: **3.5eV**

半絶縁性InP半導体を用いた検出原理



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

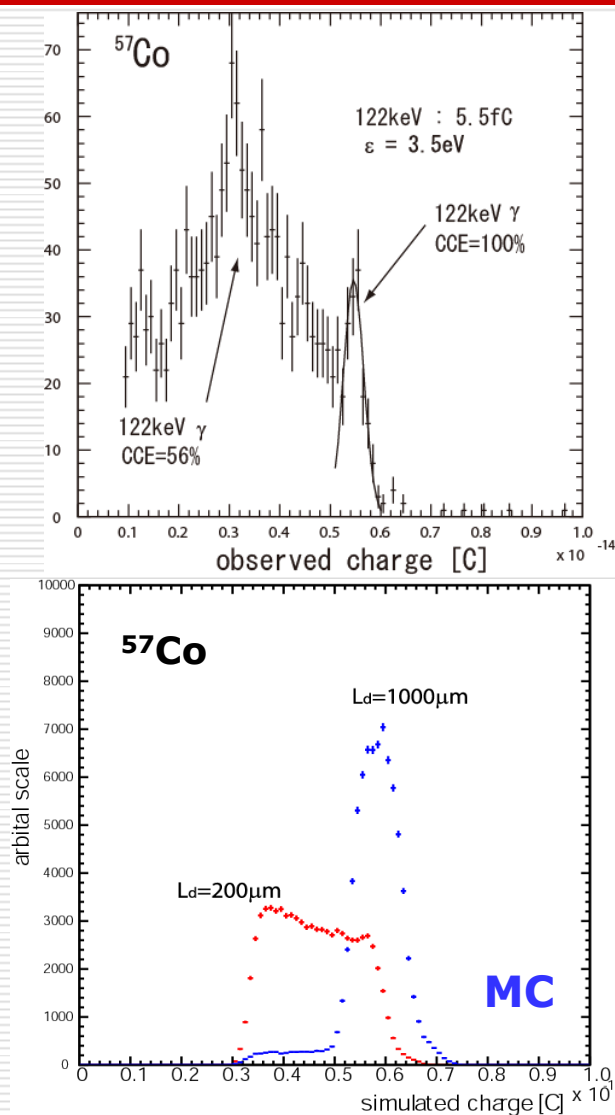
$$L_d \neq \infty \quad Q_{\text{obs}}[\text{C}] = \int_0^R (dE/dx) / \epsilon_{eh} e^{-x/L_d} dx \times e$$

ドリフト長を伸ばす



電荷収集効率の向上

キャリアのドリフト長の改善案



- 固有のエネルギー分解能は $\sigma=5\% @ 122\text{keV}$



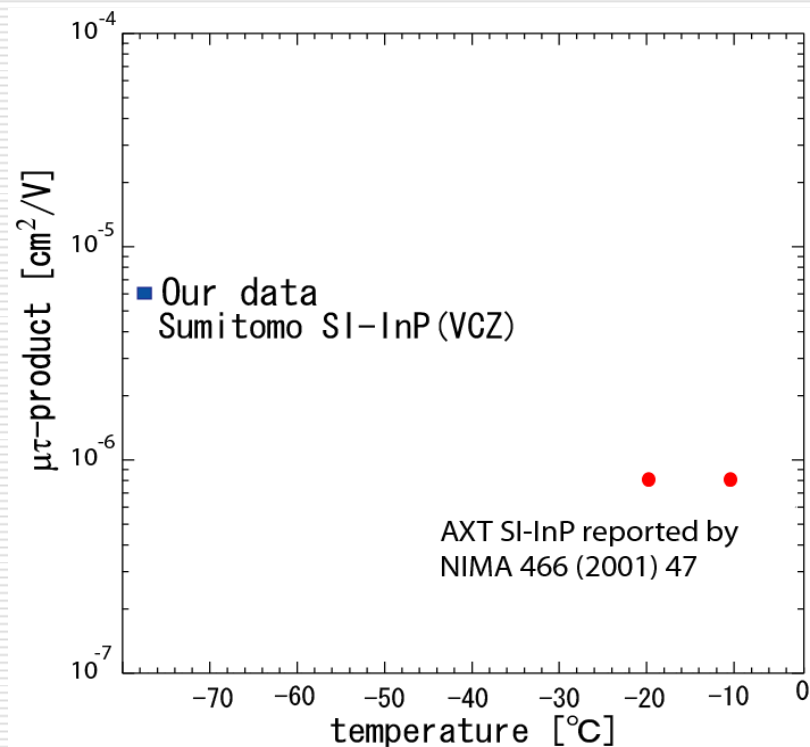
目標値10%(FWHM)にほぼ到達している。

- キャリアーのドリフト長を伸ばすことによりスペクトルも改善する

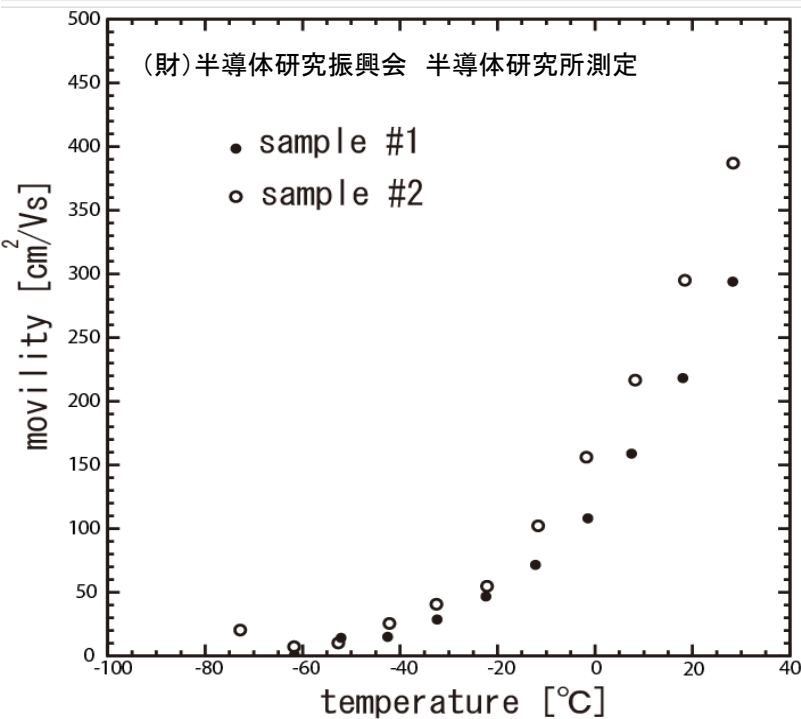


- $\mu\tau$ 値を拡大させる
(低温化?)
- 電圧を上げる

$\mu\tau$ product値の比較



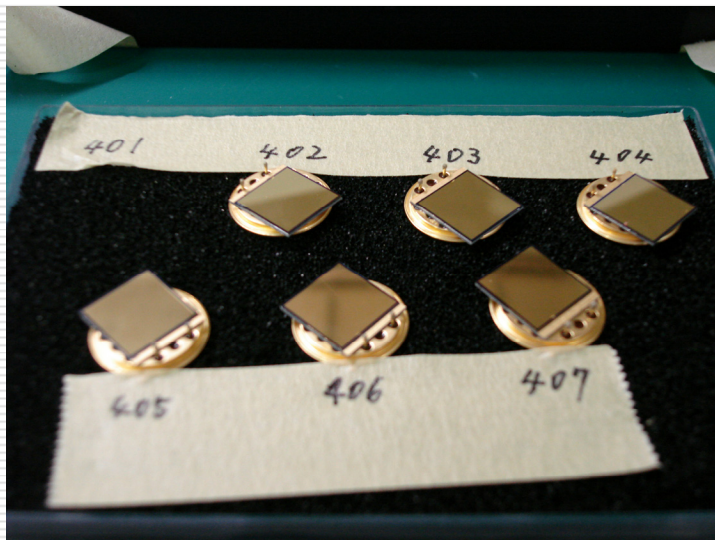
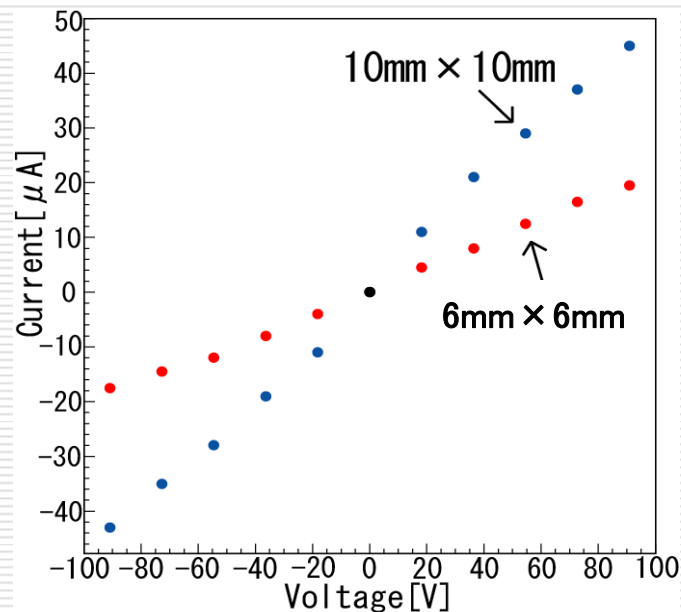
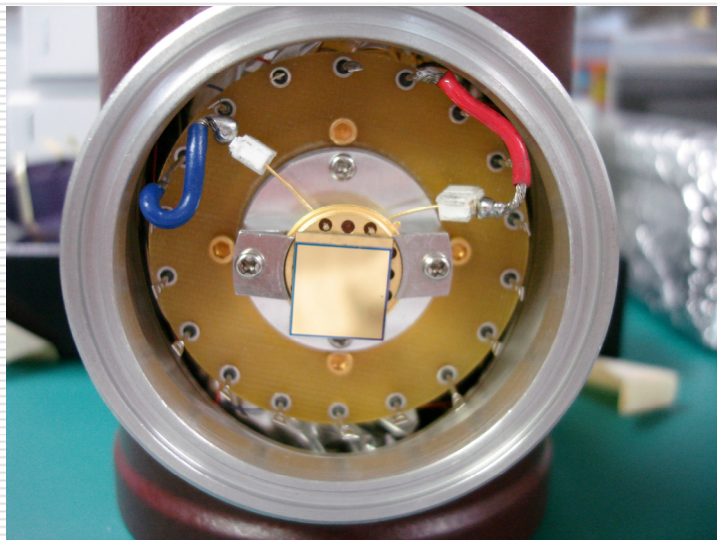
低温下で $\mu\tau$ が上昇



逆に移動度 μ は減少

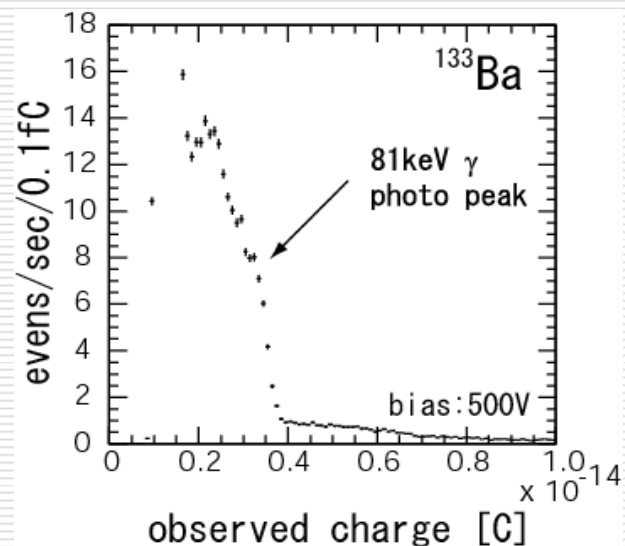
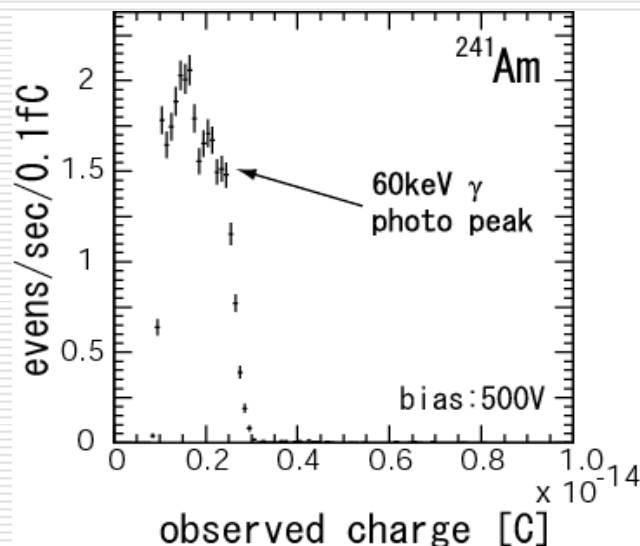
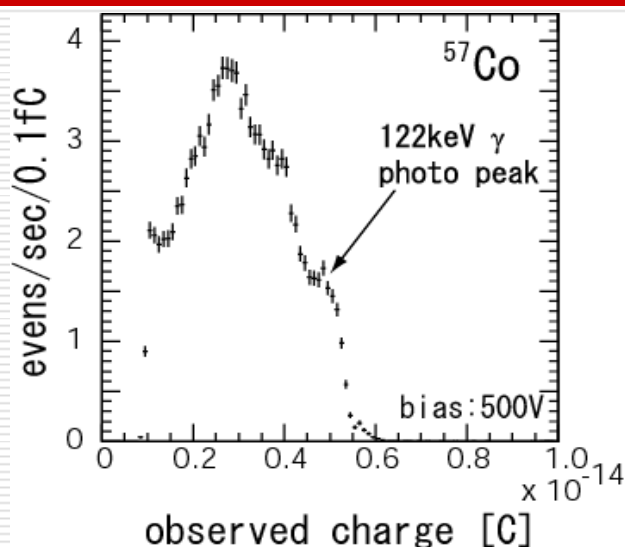
更に低温しても $\mu\tau$ が上昇するか不明

プロトタイプ検出器の開発



- ❑ 1素子のサイズ:
10mm × 10mm × 200
μm
- ❑ 電極の面積に比例した暗
電流

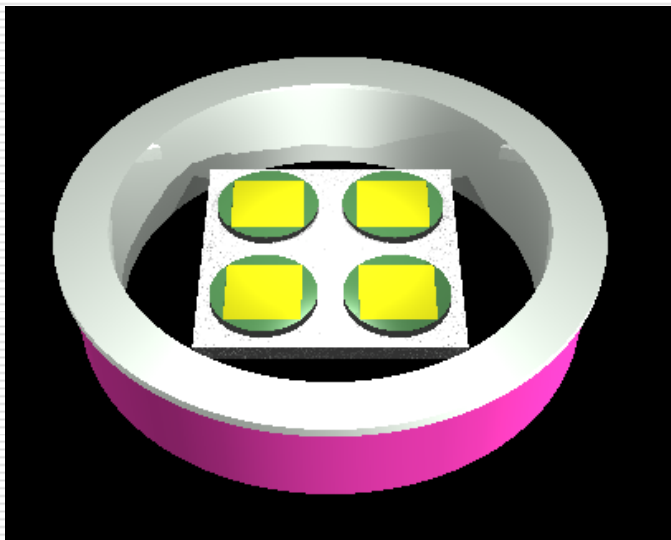
プロトタイプ素子の γ 線スペクトル



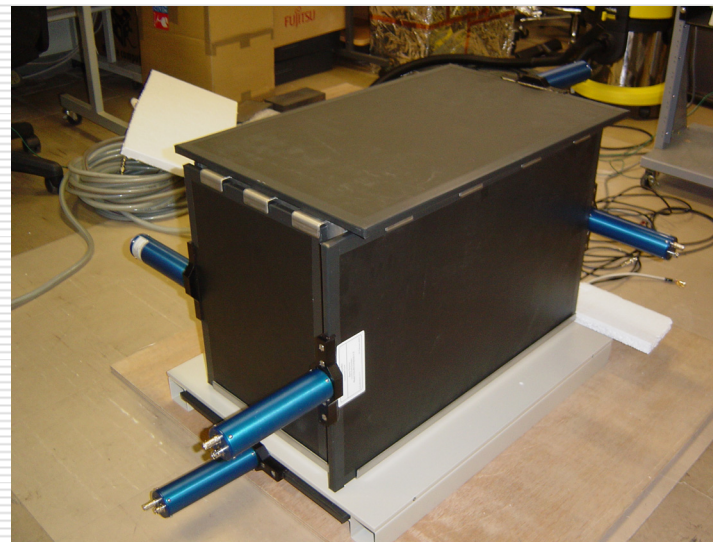
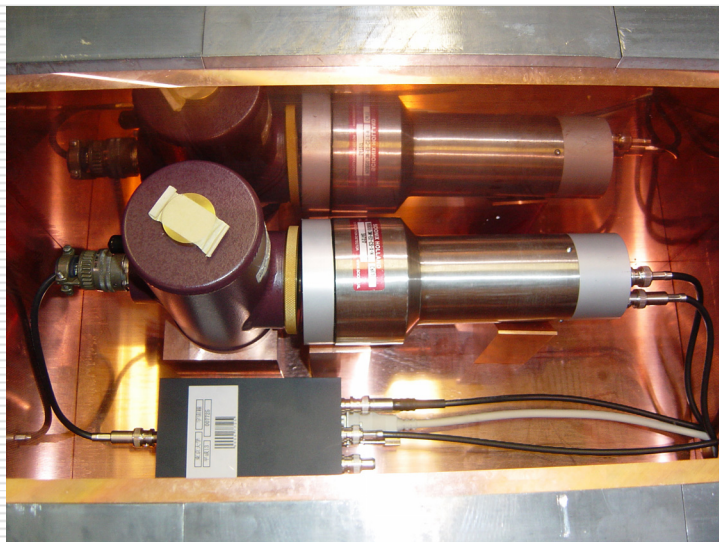
- ❑ $36\text{mm}^2 \rightarrow 100\text{mm}^3$ の3倍の拡大(電極領域に比例)
- ❑ 光電ピーク γ 線スペクトルを観測

エネルギー分解能は暗電流に大きくは依存しない

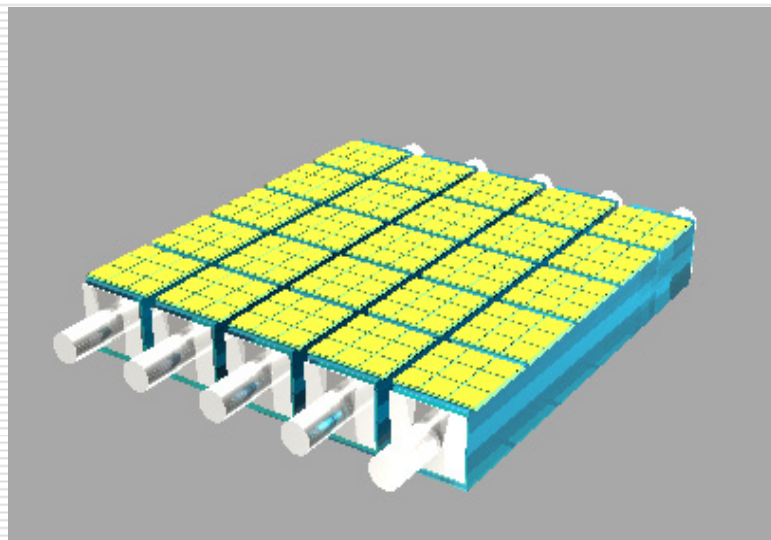
^{115}In の自然 β 崩壊と制動輻射の観測



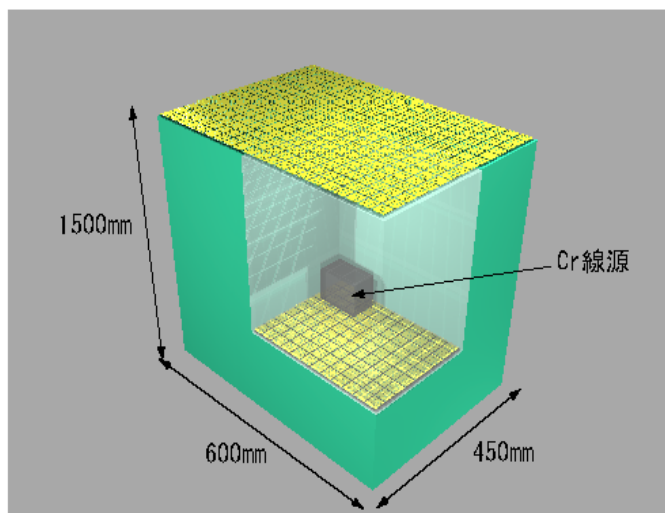
- プロトタイプ検出器は multi-cell 構造
- $^{115}\text{In} \rightarrow ^{115}\text{Sn} + \boxed{e^-} + \nu$
- 制動輻射をCsIで観測
- 宮教大で実験中



電子ニュートリノ捕獲断面積測定計画



- ❑ 60PBqの ^{71}Cr 線源(半減期27日)による電子ニュートリノソース
- ❑ $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 素子9個を1検出器
- ❑ InP1kg相当(~ 1000 検出器)
- ❑ 1ヶ月の測定: ~ 10 事象を観測
($\sigma = 222 \times 10^{-46} \text{cm}^2$)
- ❑ 神岡坑内は可能か？
(予算申請中)



まとめ

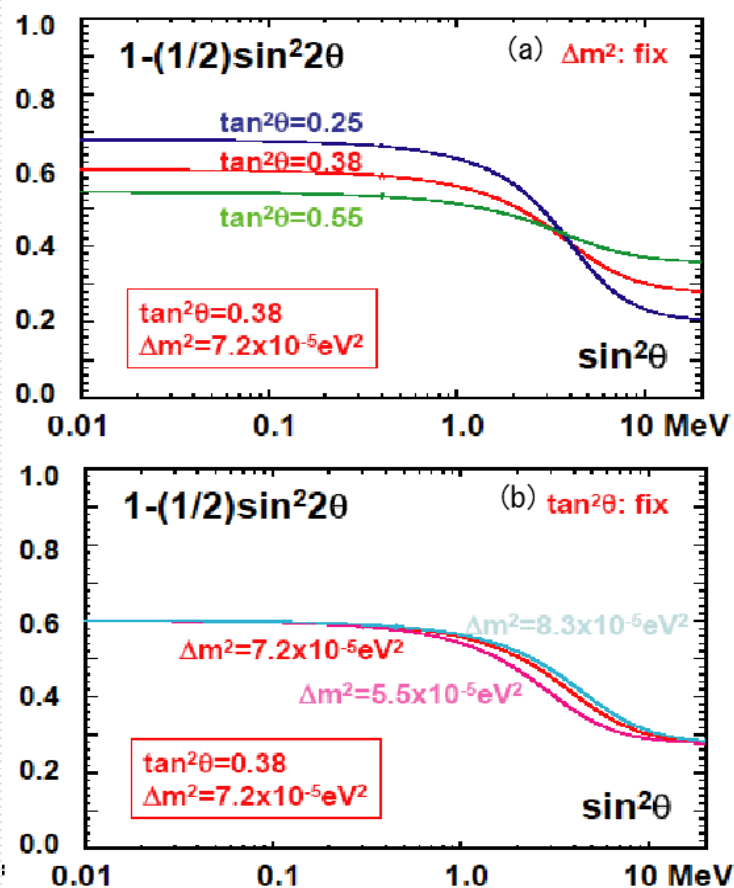
- ❑ プロトタイプ検出器 (10mm × 10mm × 0.2mm) を制作
- ❑ ガンマ線の光電ピークを観測
- ❑ 電荷収集効率の低い信号が主流
 - ✓ エネルギー分解能 : 30%@122keV
 - ✓ 電荷量 : 2.3fC /100keV

今後の計画

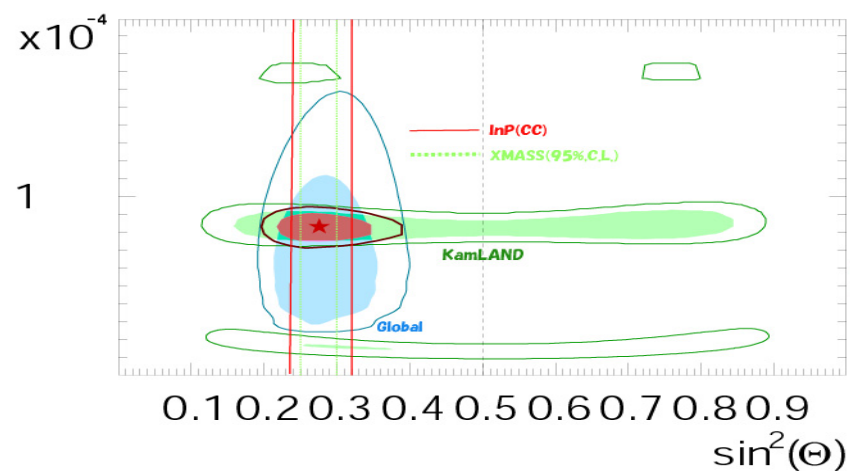
- ❑ ^{115}In β 崩壊と制動放射BGの測定 (測定中)
- ❑ 高電荷収集化 (低EPD素子「VB」の使用)
- ❑ 電子ニュートリノ捕獲断面積測定計画

目的

□ θ_{12} の精密観測



Y.Suzuki@v2004



Sub-MeV以下の太陽 ν の
測定が θ_{12} を制限