

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Ⅷ

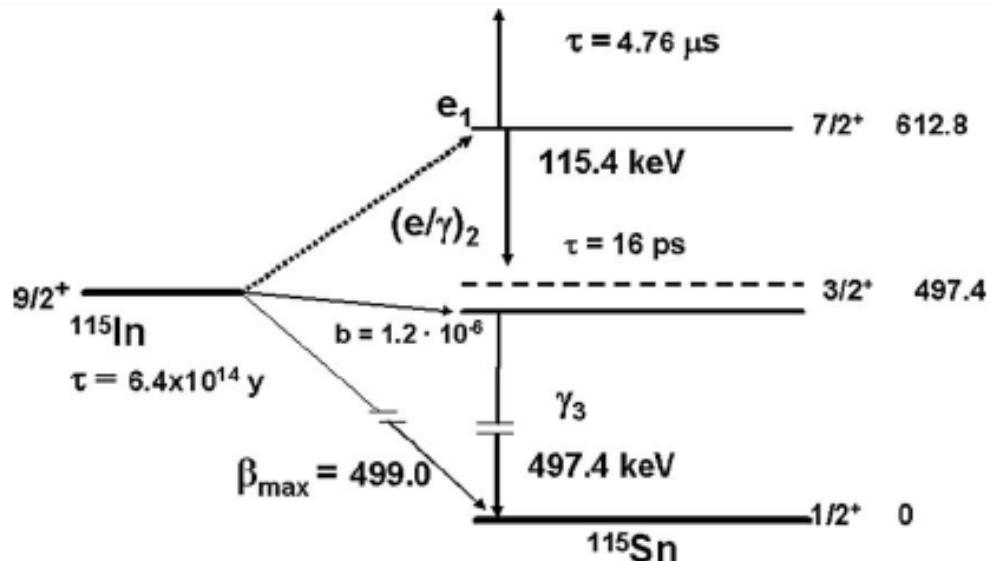
日本物理学会 第62回年次大会
2007年9月24日

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
東大素粒子センター 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、朝倉雅之

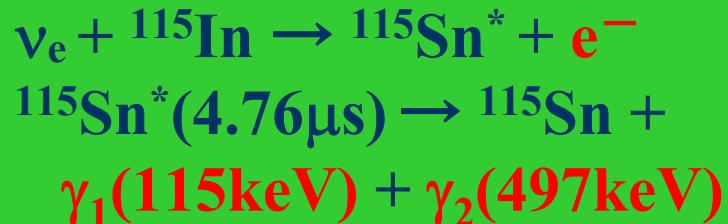
平成17～19年度 科学研究費補助金 基盤研究B
平成17年度 稲盛財団 研究助成
平成19年度 旭硝子財団 自然科学系 奨励研究

^{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
- エネルギーを観測

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

→ ppv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

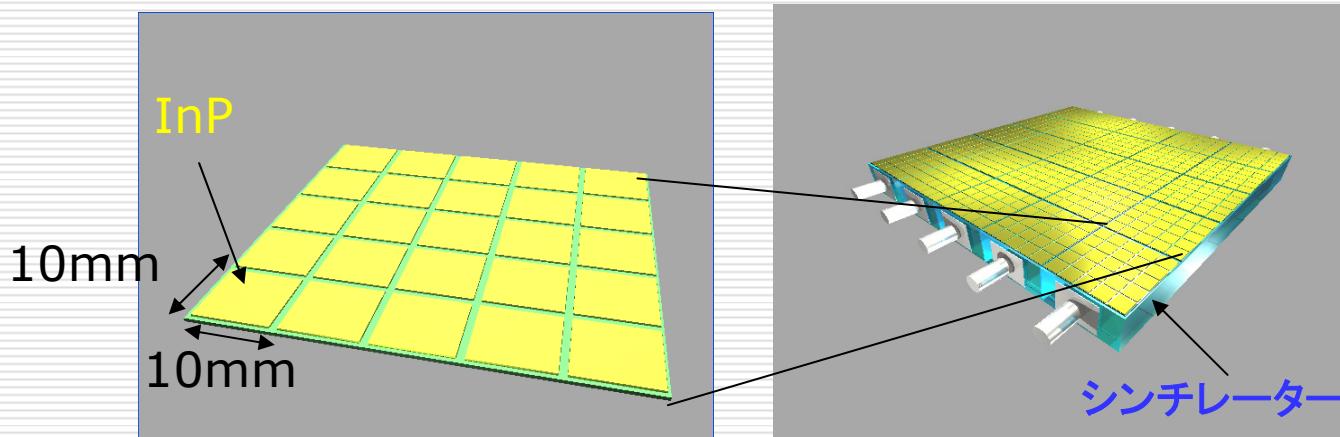
^{115}In 自身のベータ崩壊
($\tau_{1/2} = 6.4 \times 10^{14}$ 年)

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

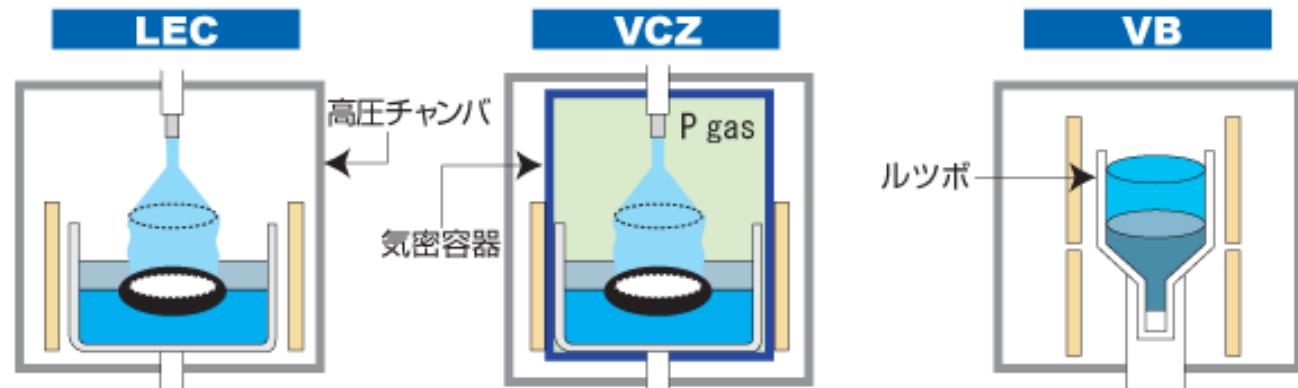


- InP全体で5.1トン (2.1X10⁶ modules)
- エネルギー分解能: 10% (FWHM)
- ガンマ線検出用の固体シンチレーター
- 装置のサイズ: 6.3m X 6.3m X 5.3m
- $E_{th} \geq 100\text{keV}$ 、5年間で720事象を観測 (LMA解)
- 統計誤差とSSMの誤差から、~4%のsensitivity

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

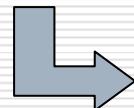
VCZ製法の半絶縁性InP素子

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



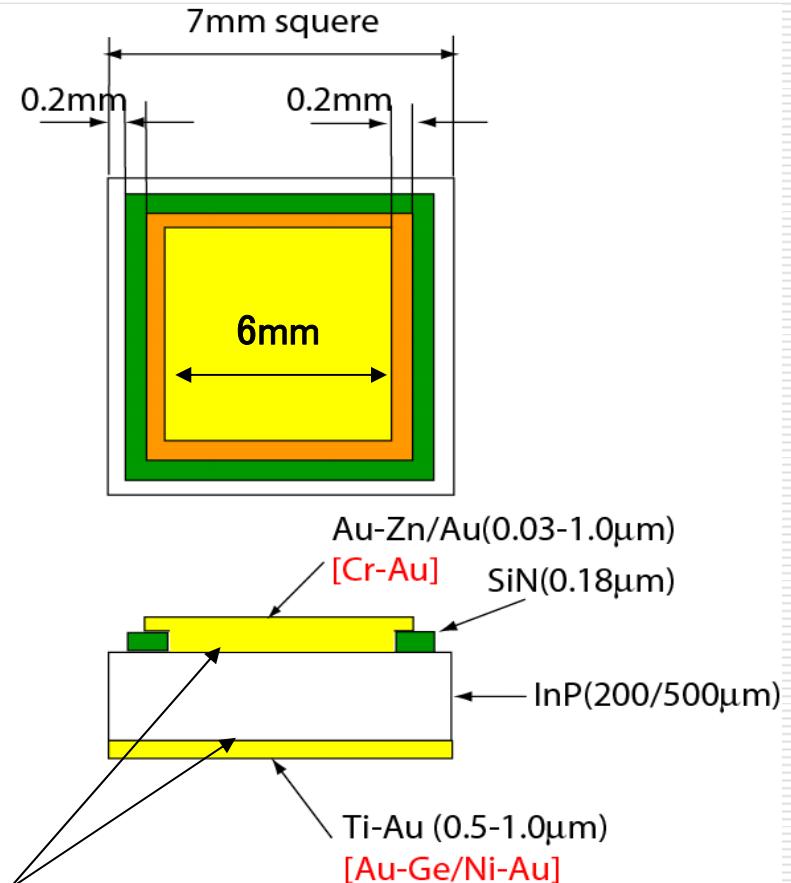
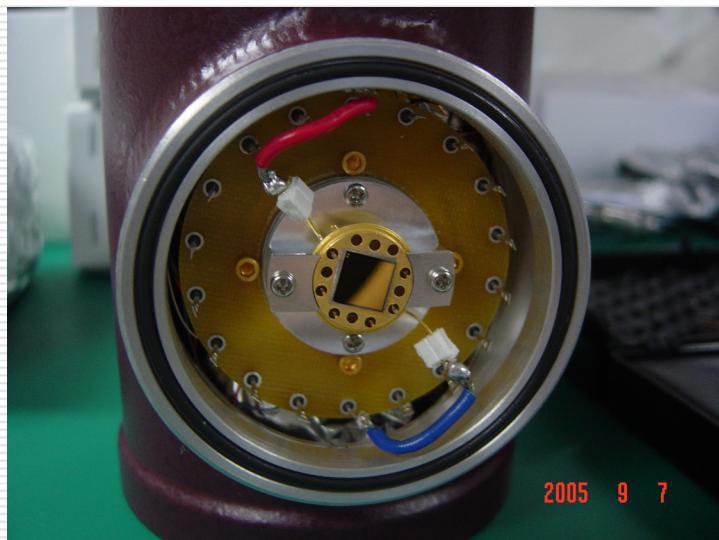
□ InP結晶成長法

	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($\sim 5,000\text{cm}^{-2}$)	$> 10^7 \Omega \text{cm}$	



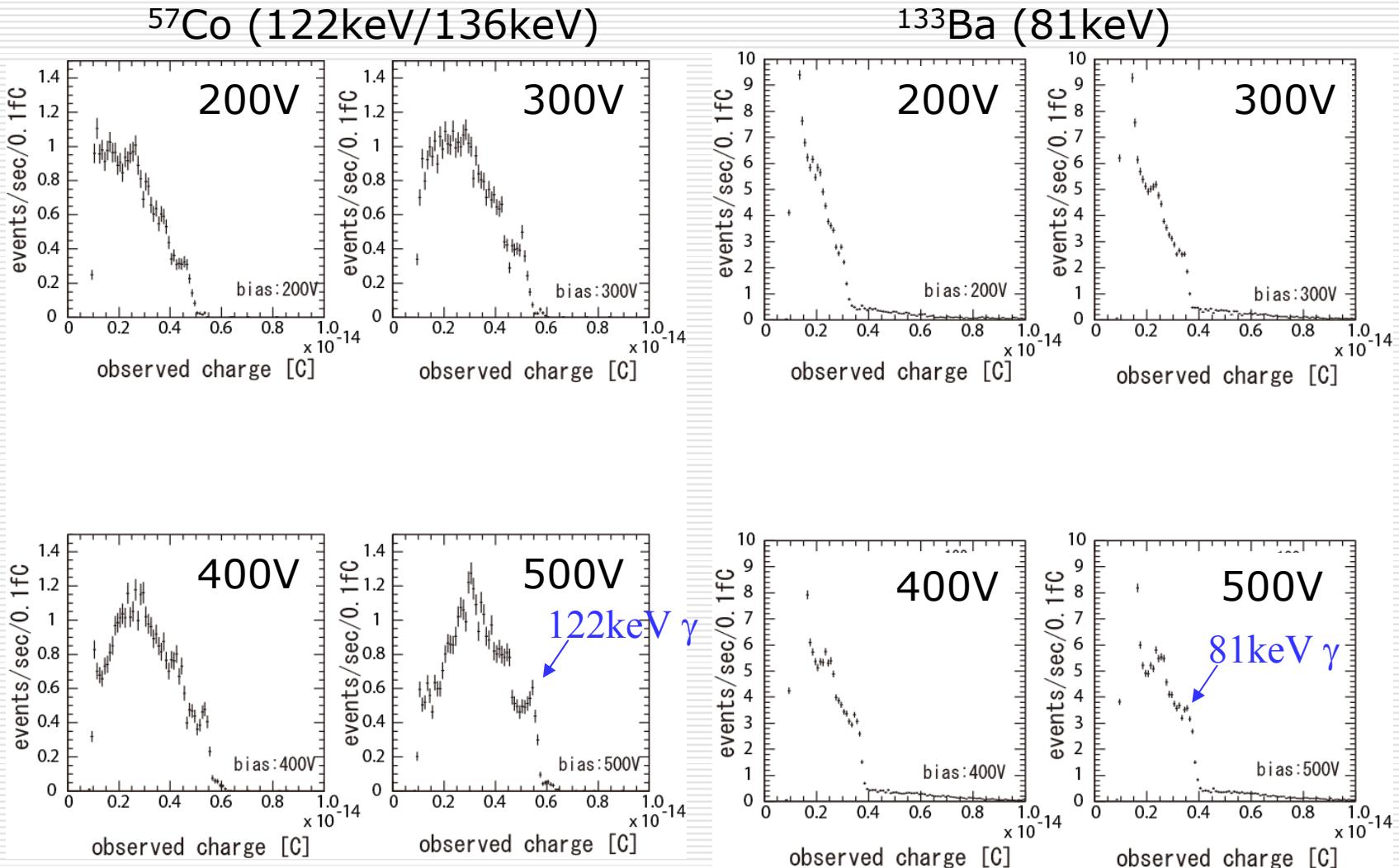
性能が良い兆候が得られている

半絶縁性InP半導体検出器

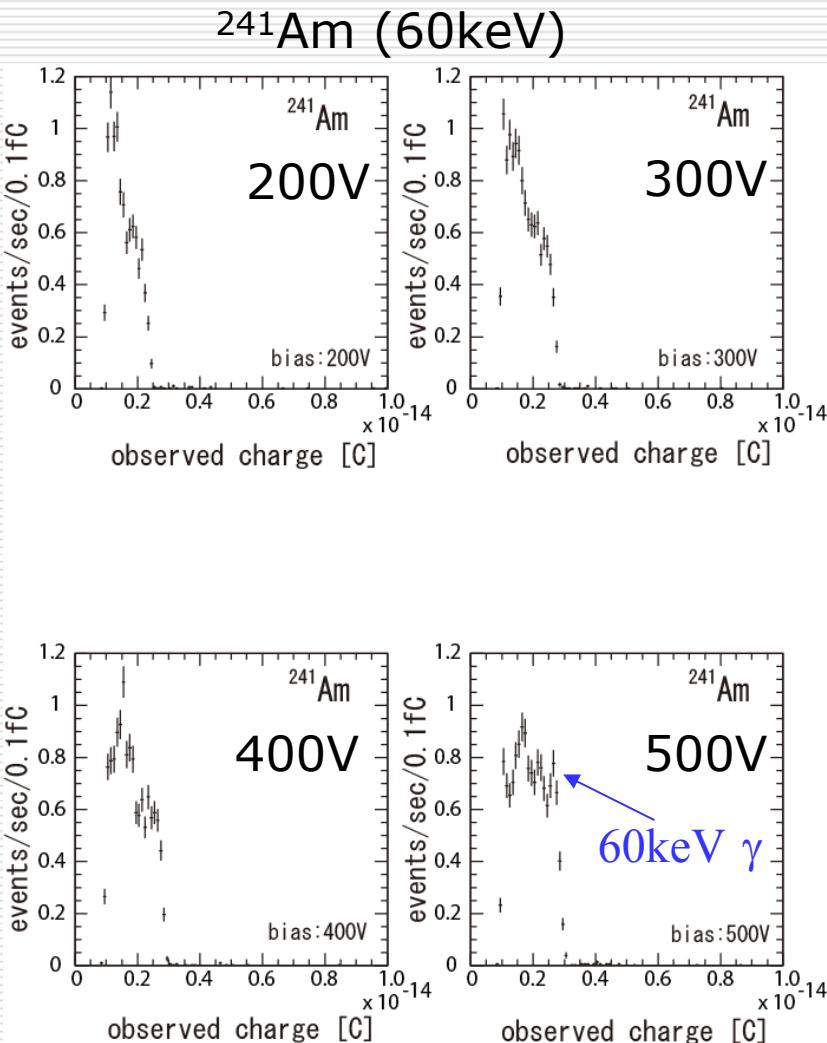


オーム接触(ショットキー障壁)

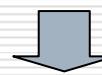
$^{57}\text{Co}/^{133}\text{Ba}$ からのガンマ線スペクトル



^{241}Am からのガンマ線スペクトル

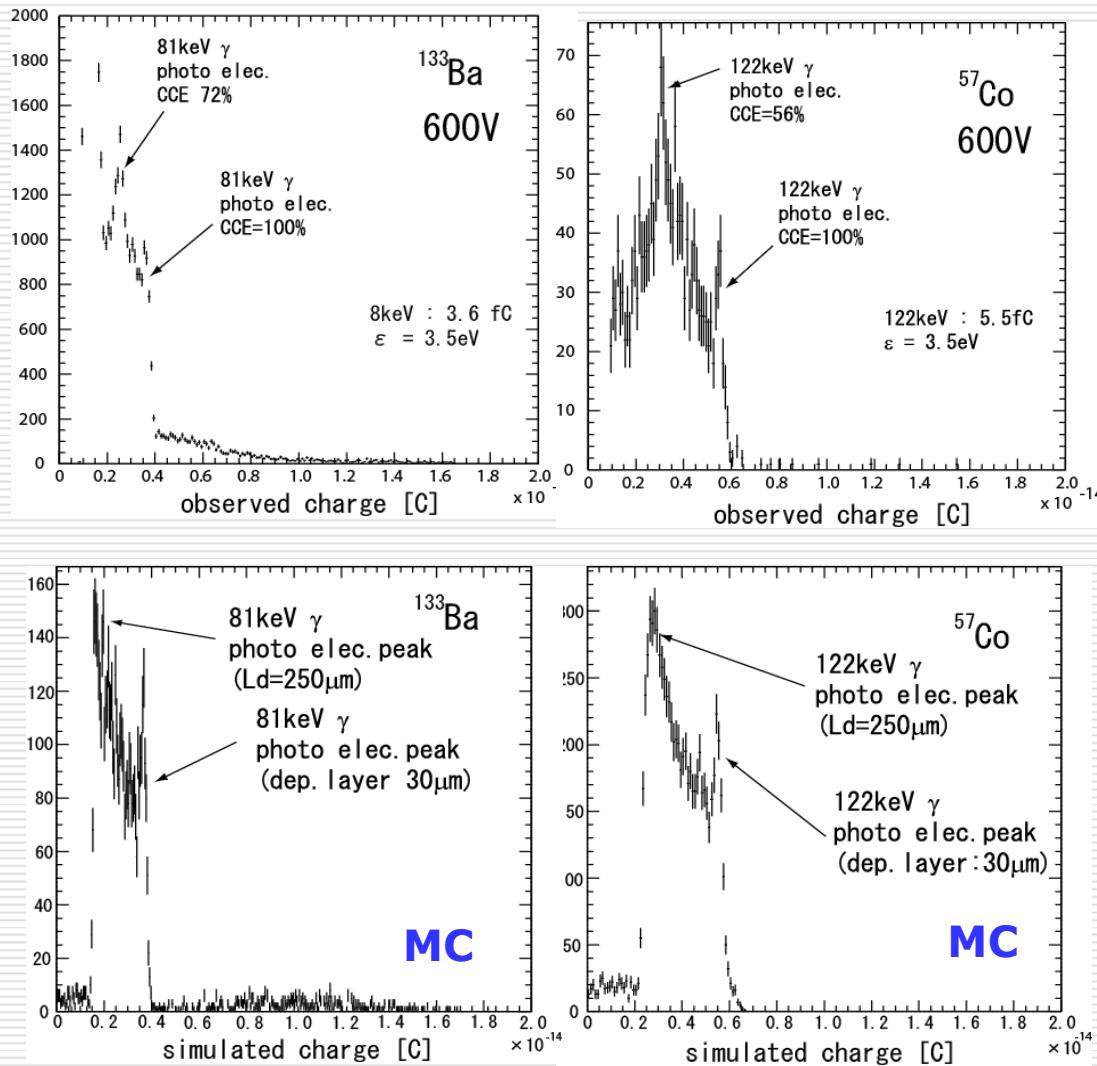


- ガンマ線の光電吸收ピークを観測
- 但し、2つピークを観測
- バイアス電圧を上げると、低い電荷量のピークが増加
- 電荷量の大きいピークはそれほど増加しない



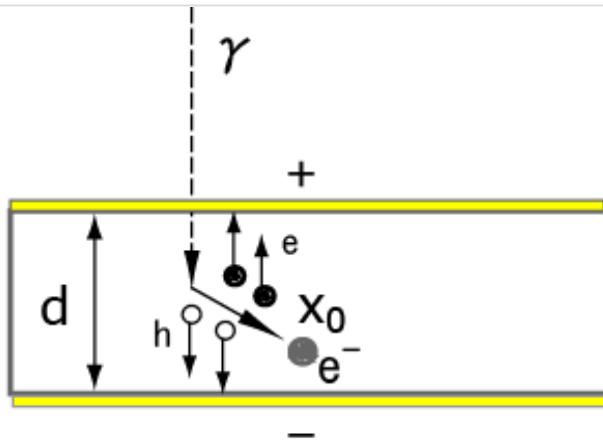
電荷量の大きいピークは
ほぼ100%の電荷量を
収集(CCE:100%)

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 [$m^2v^{-1}s^{-1}$]

v : carrier velocity [ms^{-1}]

E : electric field [vm^{-1}]

V_0 [volts] 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 $Q_{total}[C] = (\text{electron energy}) / \varepsilon_{eh} \times e$

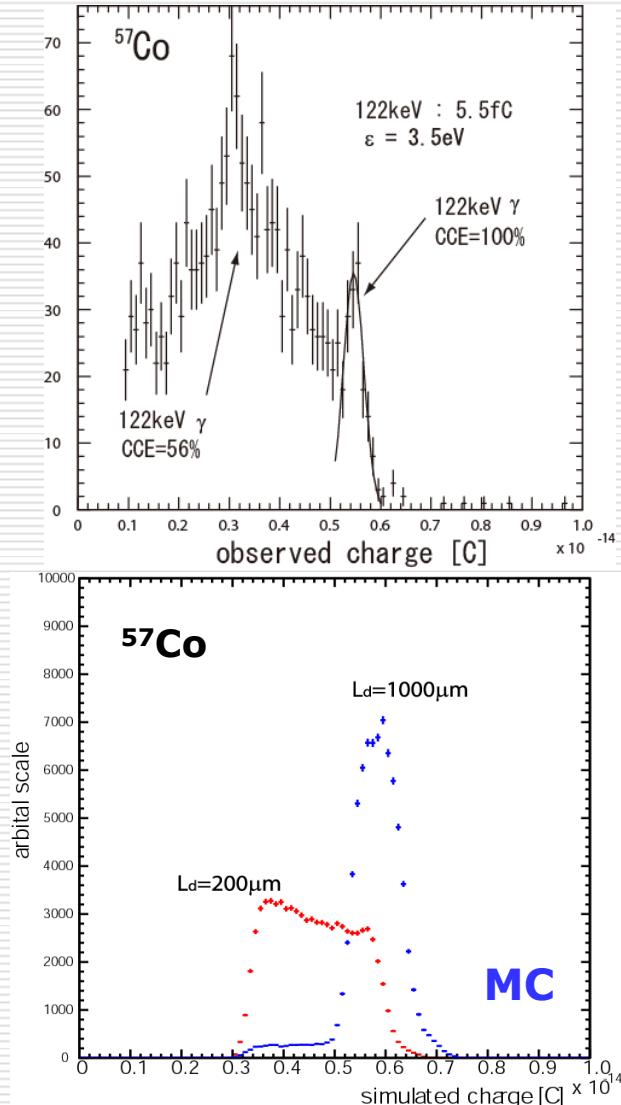
$$L_d \neq \infty \quad Q_{obs}[C] = \int_0^R (dE/dx) / \varepsilon_{eh} e^{-r(x)/L_d} dx \times e$$

ドリフト長を伸ばす

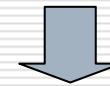


電荷収集効率の向上

キャリアのドリフト長の改善案

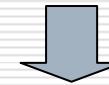


□ 固有のエネルギー分解能は $\sigma=5\% @ 122\text{keV}$



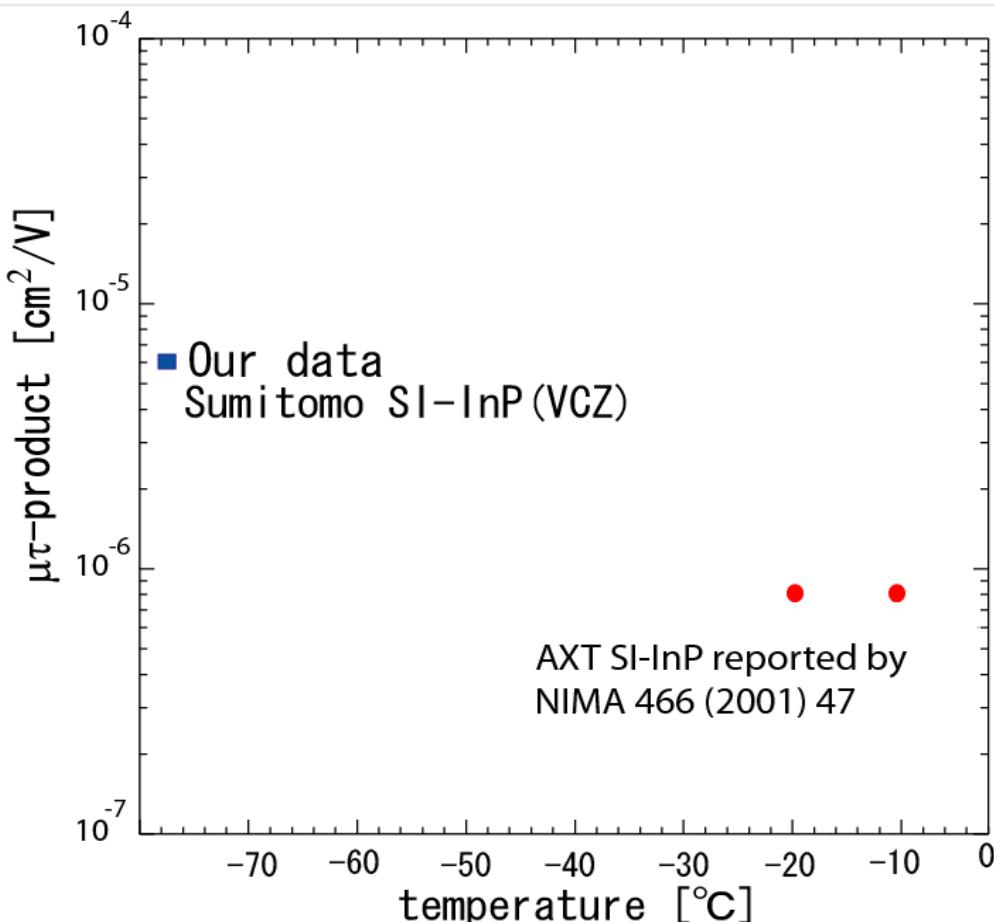
目標値 10% (FWHM)
にほぼ到達している。

□ 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



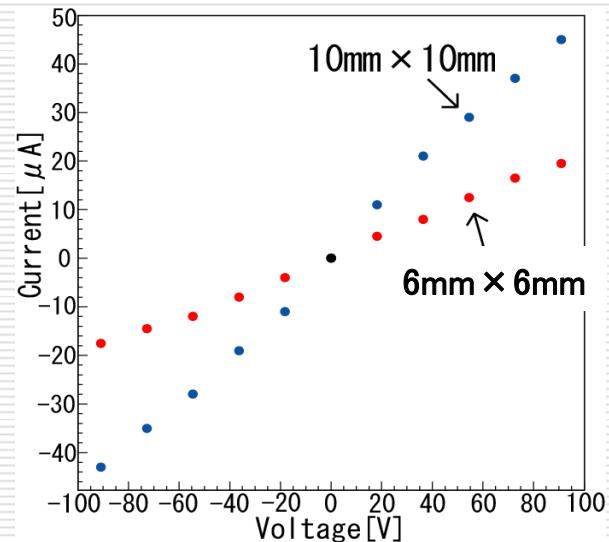
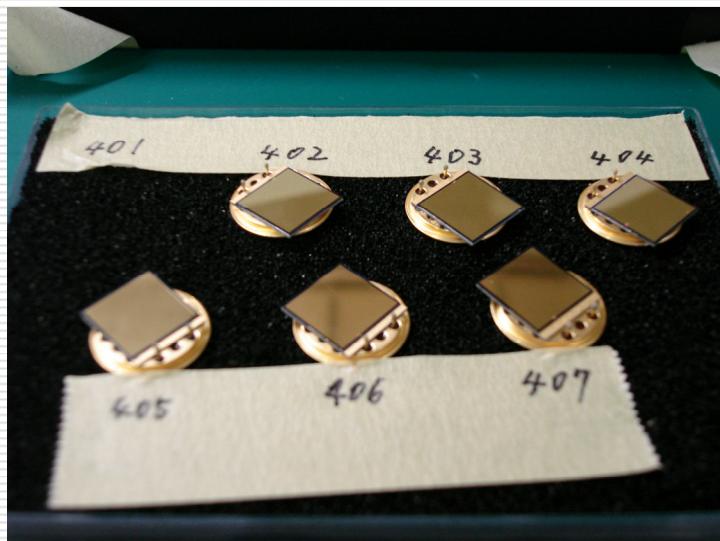
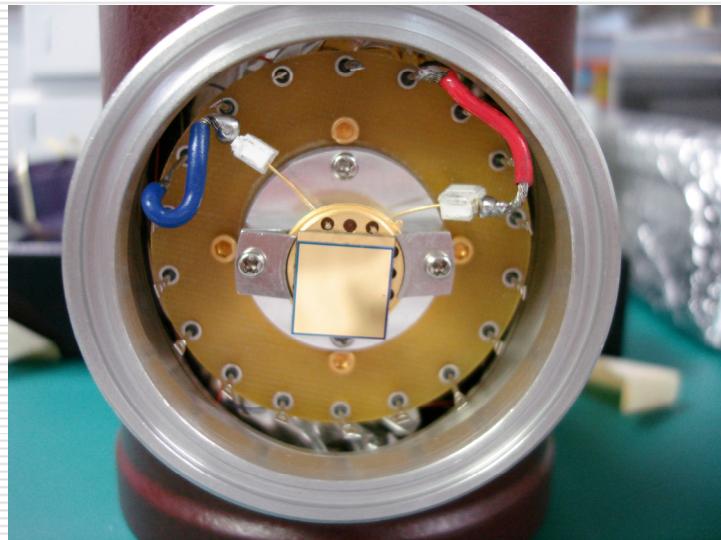
- $\mu\tau$ 値を拡大させる
(低温化: LN₂)
- 電圧を上げる

$\mu\tau$ product値の比較



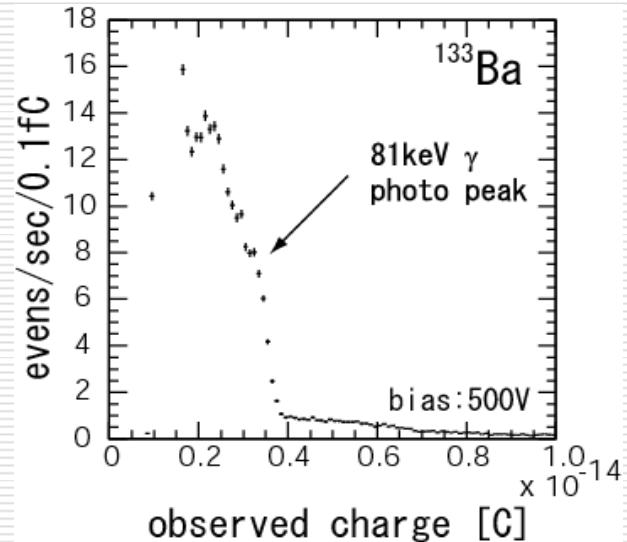
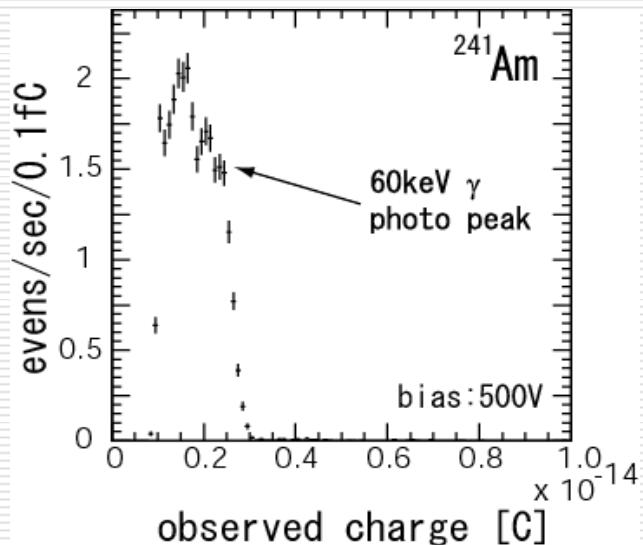
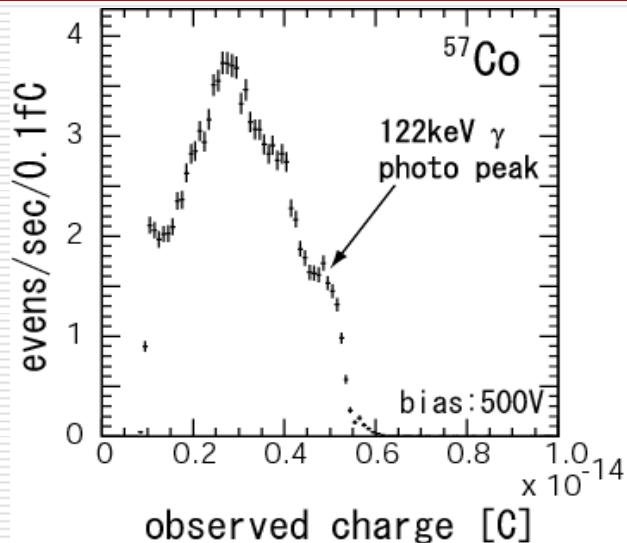
低温下で $\mu\tau$ が上昇する？→移動度の測定を半導体研究所に委託

プロトタイプ検出器の開発



- VCZ基板
- 1素子のサイズ:
 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 0.2\mu\text{m}$
- 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

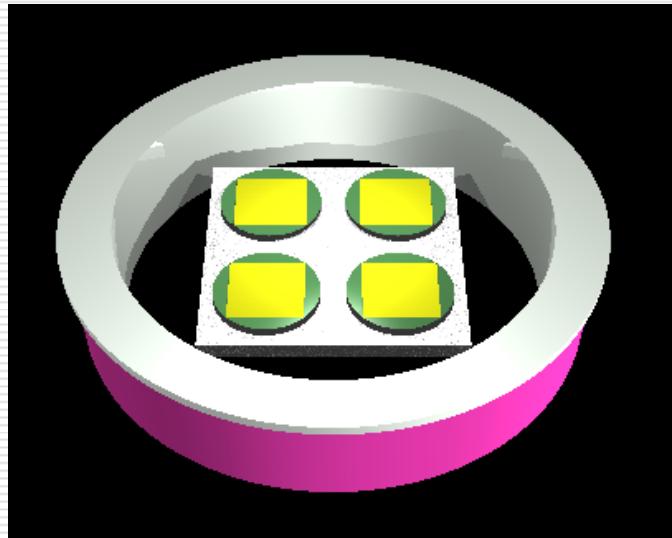


- $7\text{mm}^3 \rightarrow 20\text{mm}^3$ の3倍の拡大(電極領域に比例)
- 同様の γ 線スペクトルを観測

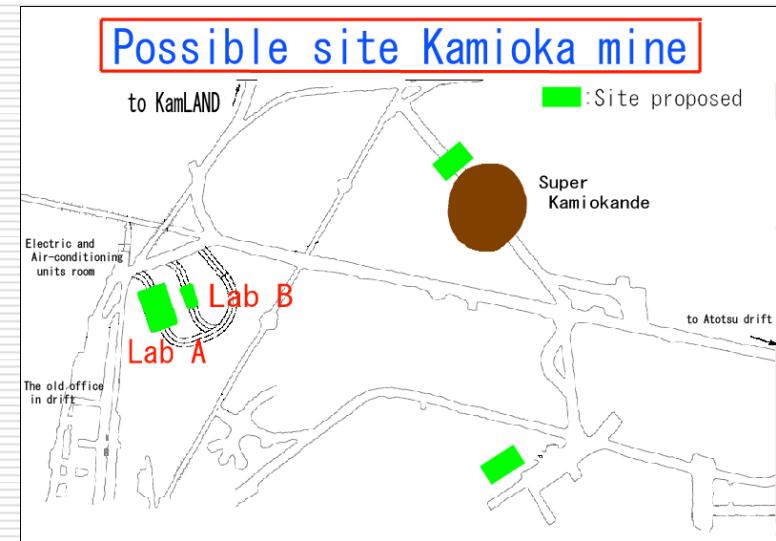
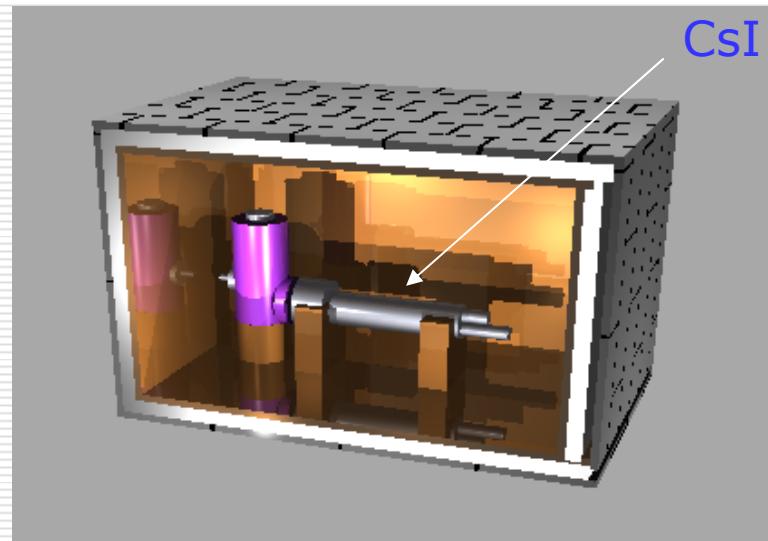


エネルギー分解能は暗電流に大きくは依存しない

^{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
- $^{115}\text{In} \rightarrow ^{115}\text{Sn} + e^- + \nu$
- 制動輻射をCsIで観測
- 宮教大で実験後、神岡に移設



まとめ

- ガンマ線の光電ピークをクリアに観測
- 電子・ホール対生成エネルギー: 3.5eV
- 固有エネルギー分解能 σ : 5%@122keV
- 電荷収集効率の低い信号が主流



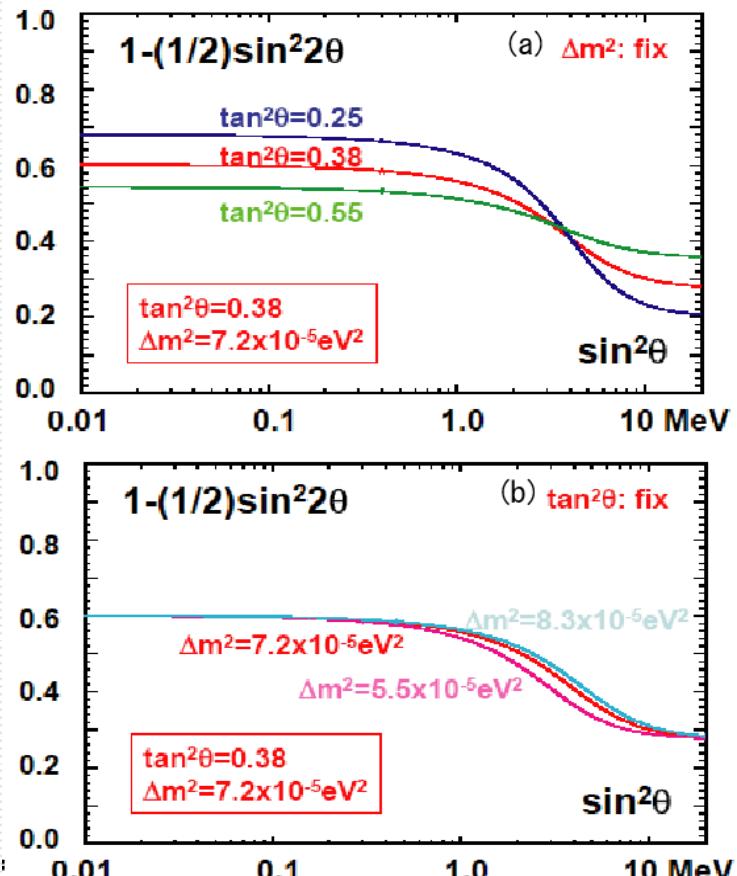
キャリアの収集効率向上が必要

今後の計画

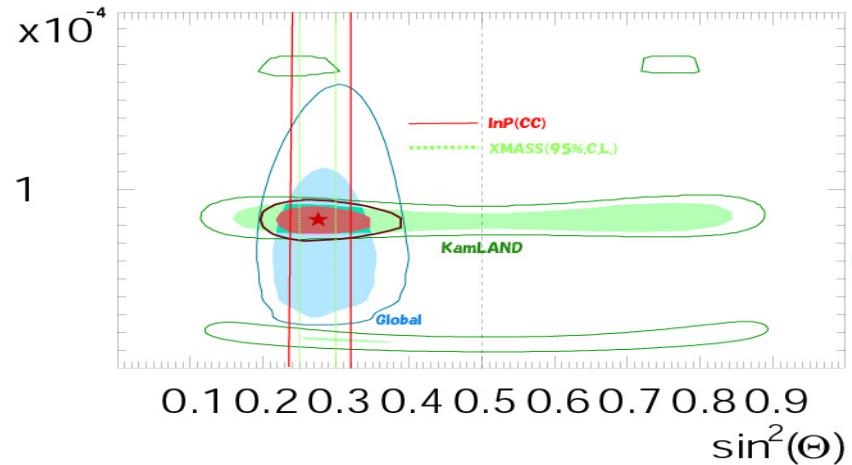
- プロトタイプ検出器の性能評価
- ^{115}In β 崩壊とその制動放射X線の測定

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