

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23年度共同利用研究成果発表研究会

2011年12月17日

宮城教育大学 福田善之

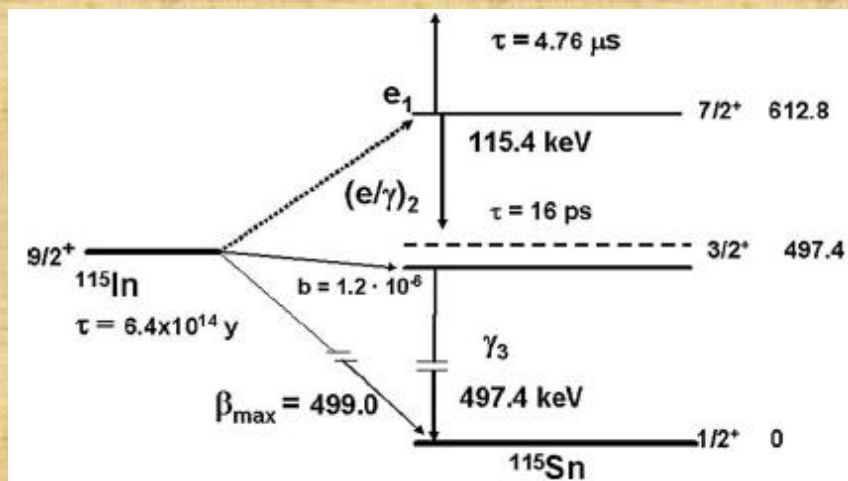
東大宇宙線研 森山茂栄*、関谷洋之

東大素粒子国際センター 難波俊雄

2011年度 採択額: 4万円(旅費)

Capture of low energy solar neutrinos by ^{115}In

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



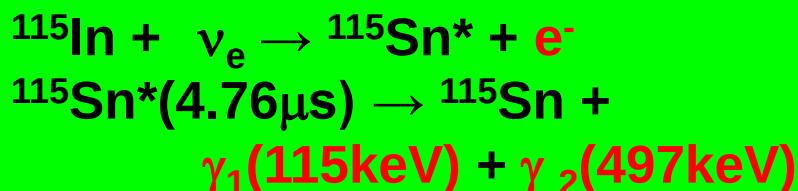
Nuclear Physics A 748 (2005) 333-347

● Advantage

- large cross section ($\sim 640\text{SNU}$)
- direct counting for solar neutrinos
- sensitive to low energy region ($E_\nu \geq 125\text{keV}$)
- energy measurement ($E_e = E_\nu - 125\text{keV}$)
- triple fold coincidence to extract neutrino signal from huge BG ($e_1 + \gamma_2 + \gamma_3$)

● Disadvantage

- natural β -decay of ^{115}In ($\tau_{1/2} = 4.4 \times 10^{14} \text{ yr}$, $E_e \geq 498\text{keV}$)
- possible BG due to correlated coincidence by **radiative Bremsstrahlung**



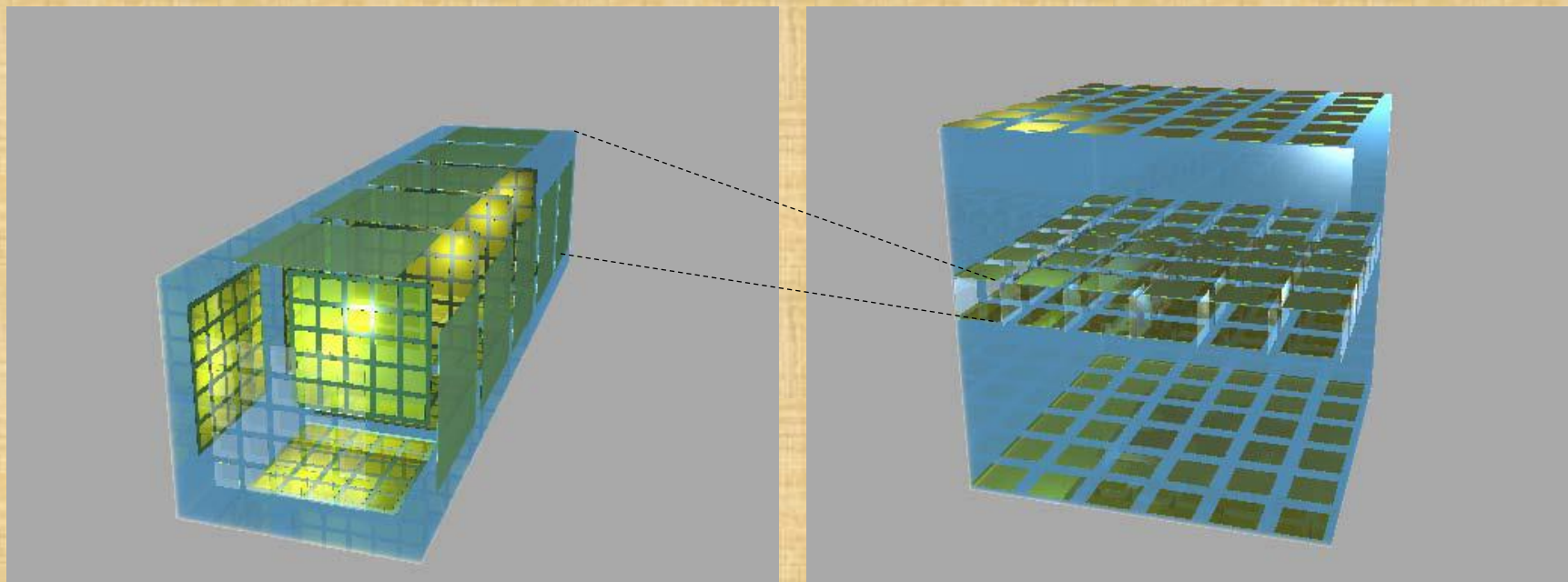
Requirement for the detector

1. Good energy resolution : 10%(FWHM)
2. Fine segmentation (10^4 - 10^5)
3. High efficiency γ detection

IPNOS phase-I experiment for Solar ν experiment

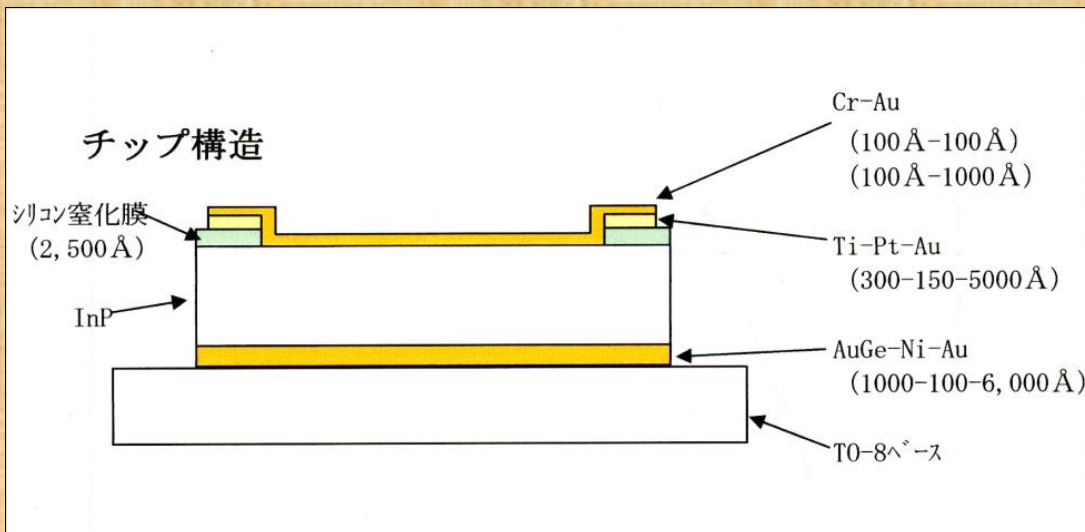
InP multi-pixel detector inside of Liquid Xenon.

30cm cubic chamber (like XMASS 100kg prototype) includes ~10kg InP detector



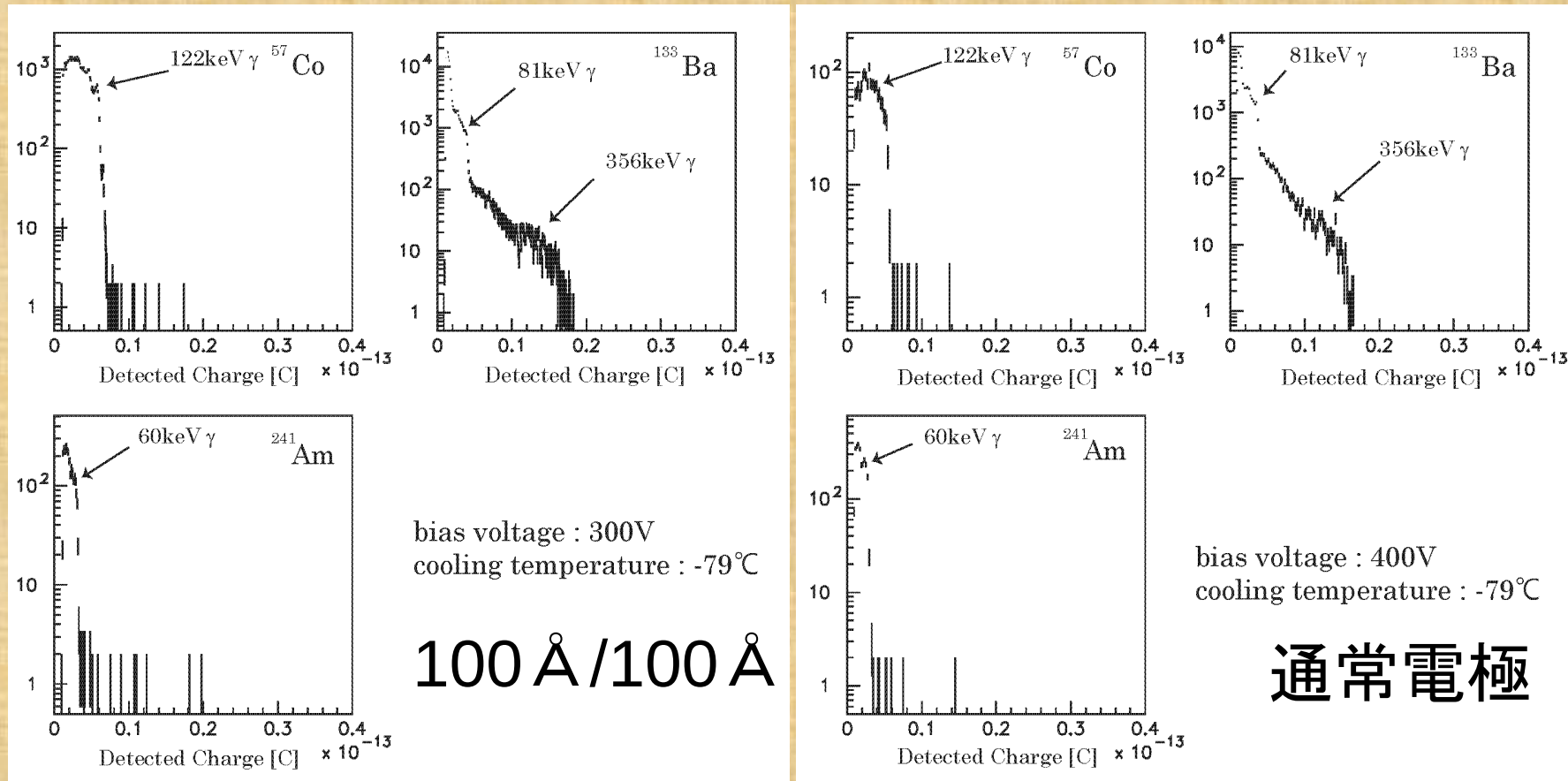
液体キセノンのシンチレーション光も観測

薄膜電極型InP検出器の開発



- 液体キセノンのシンチレーション光の減衰を抑える必要がある
- Au/Crの電極の厚みが 100 Å (VCZ型)と 50 Å (VB型)の検出器を開発

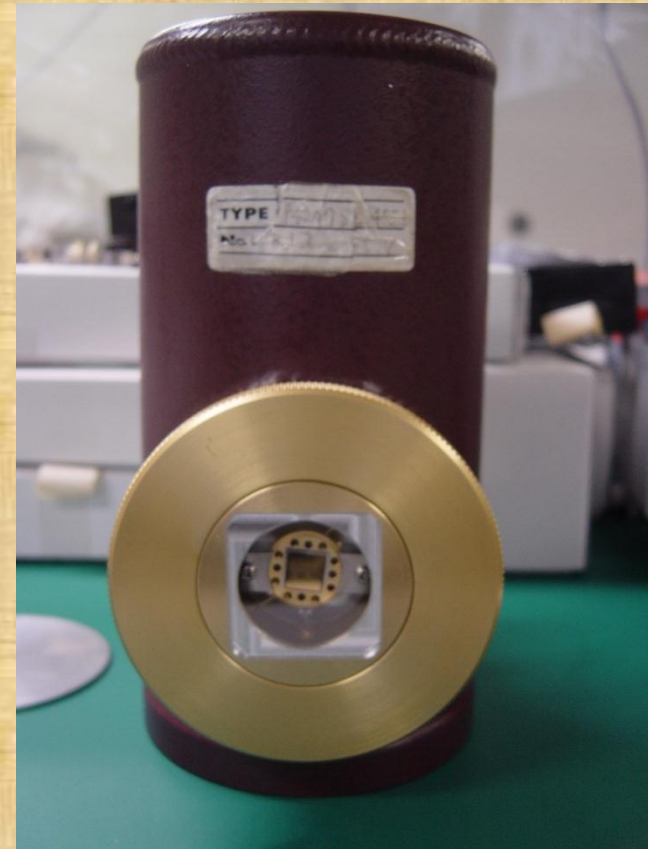
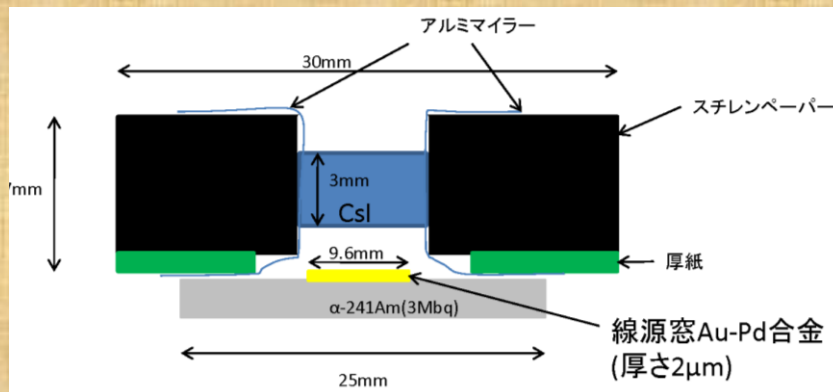
薄膜電極型InP検出器(VCZ)による放射線測定



ガンマ線によるスペクトル測定では、従来の性能と変わらない

薄膜電極型InP検出器(VCZ)によるシンチレーション光測定

- CsIシンチレータ
- ^{241}Am の α 線によるシンチレーション光
22000photon/MeV



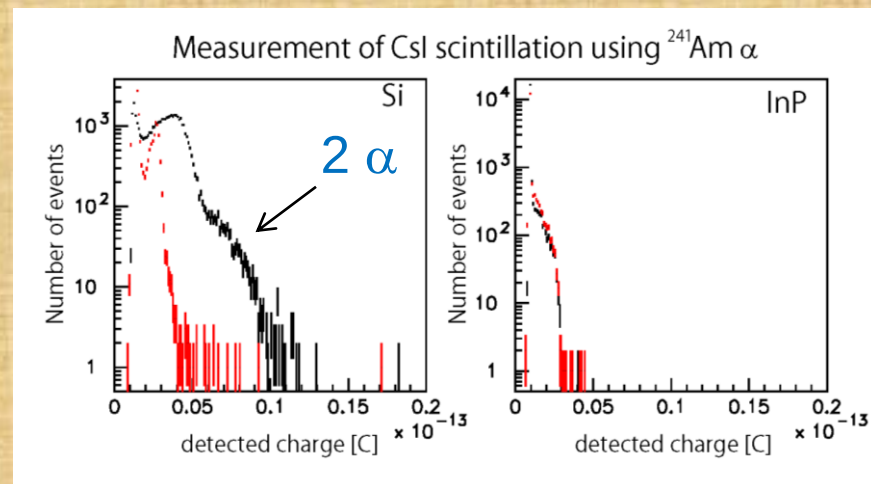
薄膜電極型InP検出器(VCZ)によるシンチレーション光測定(1)

■ Siダイオード

$22000 \text{ photon/MeV} \times 4 \text{ MeV}$
 $\times 0.4 \text{ (立体角)} \times 0.8 \text{ (量子効率)}$
 $\times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} = 4.5 \text{ fC}$

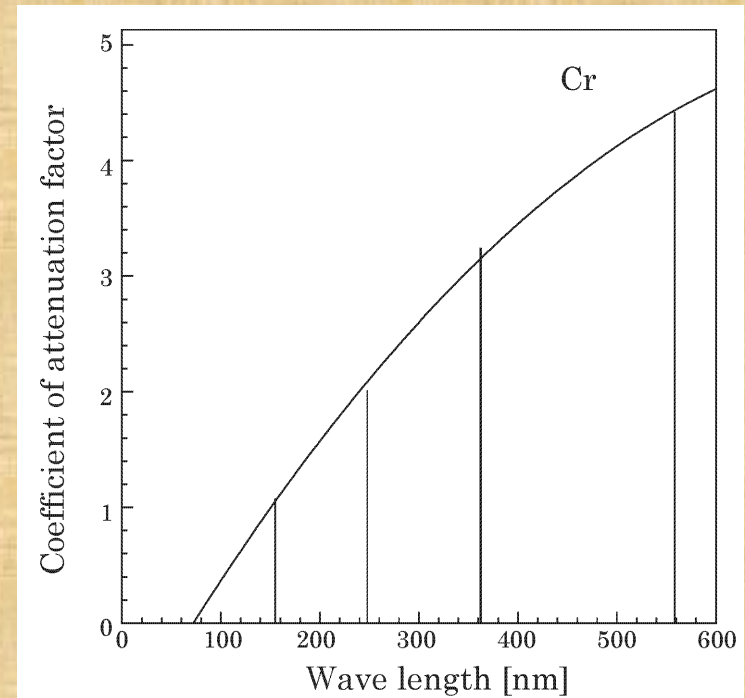
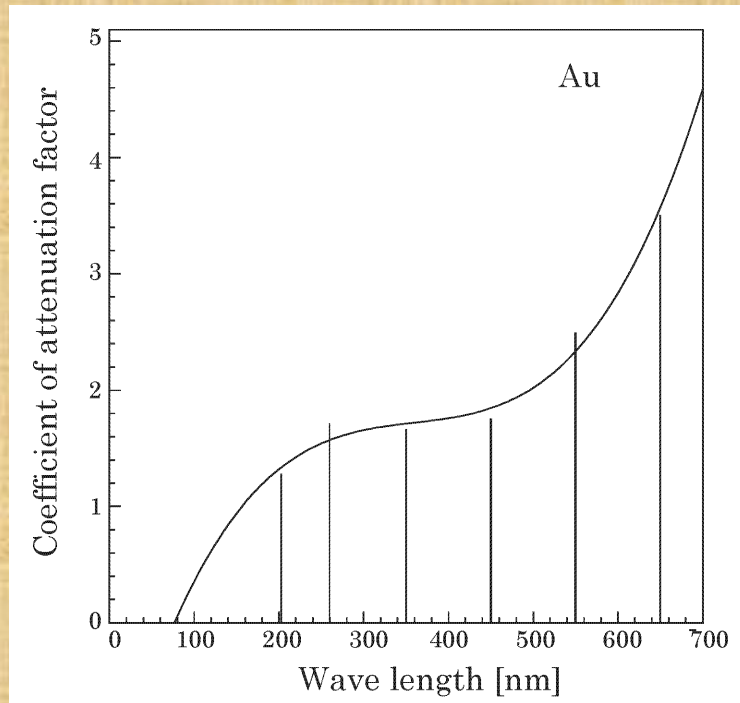
■ InP detector

$22000 \text{ photon/MeV} \times 4 \text{ MeV} \times 0.25 \text{ (立体角)} \times 0.8 \text{ (量子効率)}$
 $\times 0.85 \text{ (ガラスの透過率)} \times \text{Auの透過率} \times \text{Crの透過率}$
 $\times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$



ノイズに隠れている

Au/Cr電極の透過率@550nm



$\tau = \exp(-ax)$ t : 透過率 x : 透過長 a : 吸収係数

$$a = 4\pi k / \lambda$$

$$100 \text{ \AA} : \tau_{\text{Au}} = 0.57 \quad \tau_{\text{Cr}} = 0.36$$

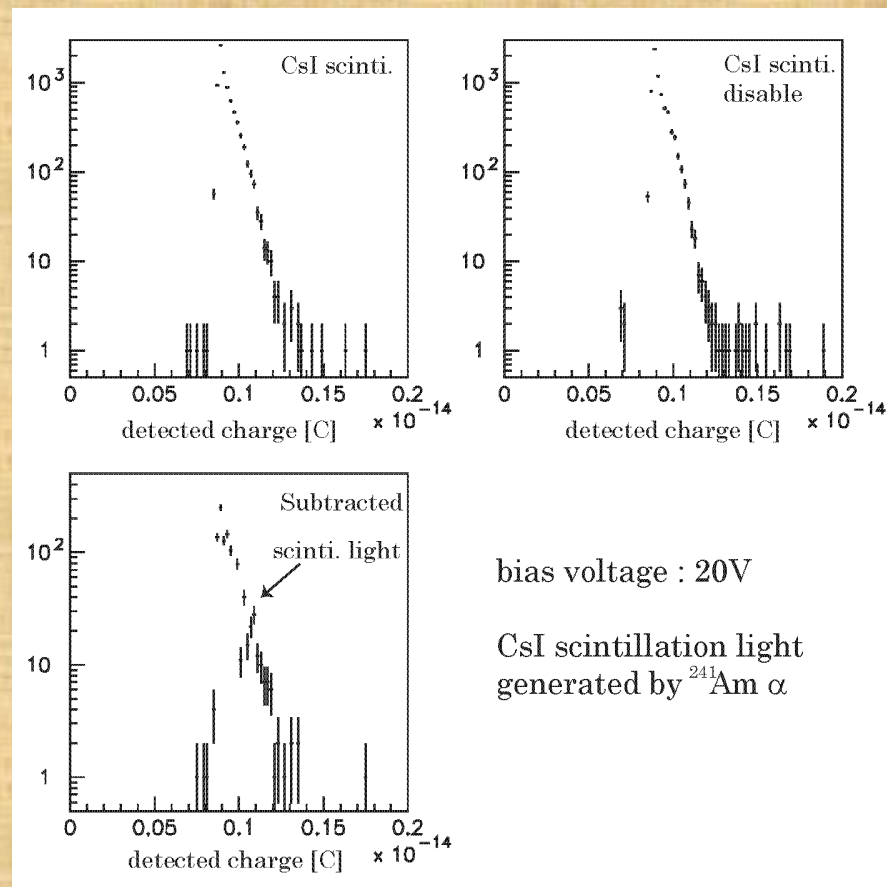
$$50 \text{ \AA} : \tau_{\text{Au}} = 0.75 \quad \tau_{\text{Cr}} = 0.6$$

薄膜電極型InP検出器(VCZ)によるシンチレーション光測定(2)

- 予想電荷量: 0.5fC
- 暗電流によるノイズを抑えるため、バイアス電圧を300Vから20Vに低減



ノイズにより明確な信号が見えなかった。50 Å 薄膜電極が必要(予想電荷量1.0fC)



薄膜電極方InP検出器(VB)の性能評価

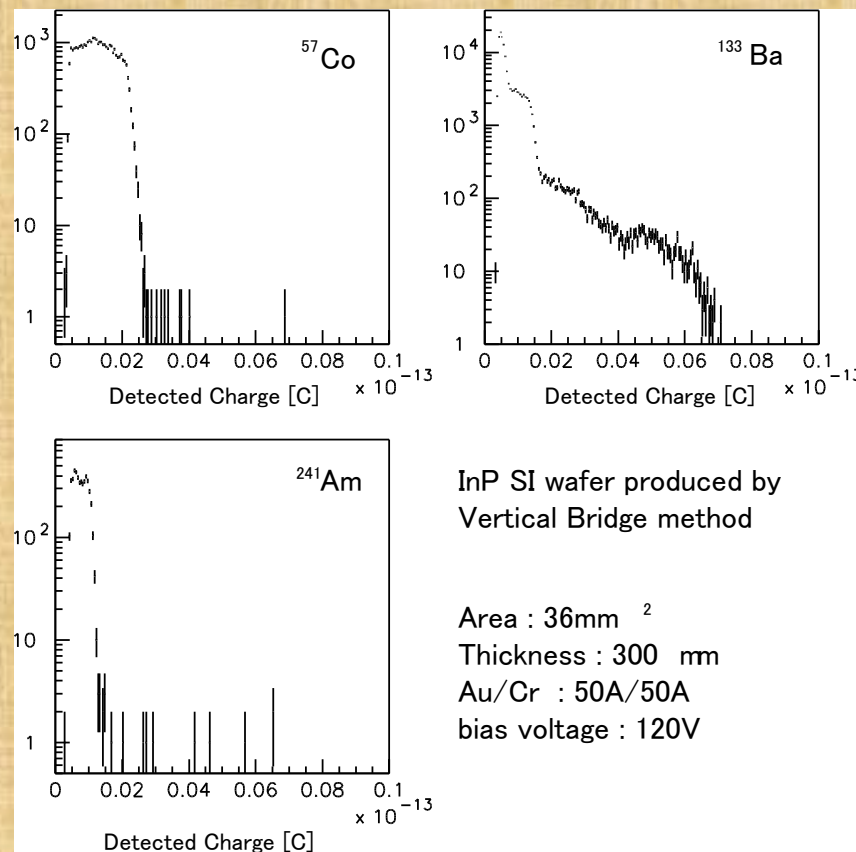
- Vertical Bridge法によるInP検出器(Au 50 Å / Cr 50 Å)

- 比抵抗が大きい
($4.5 \times 10^7 \Omega \text{cm} \rightarrow 6.4 \times 10^7 \Omega \text{cm}$)

- 暗電流が小さくなり、ノイズが減少

- EPDが小さい
($5000 \text{cm}^{-2} \rightarrow 1500 \text{cm}^{-2}$)

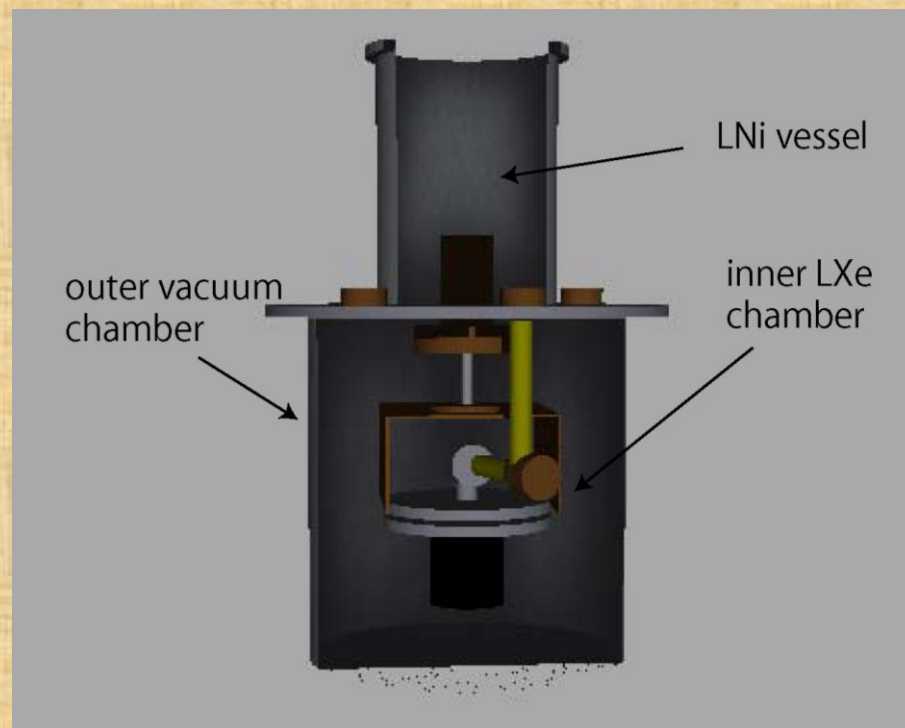
- ドリフト長が長くなり、分解能が改善



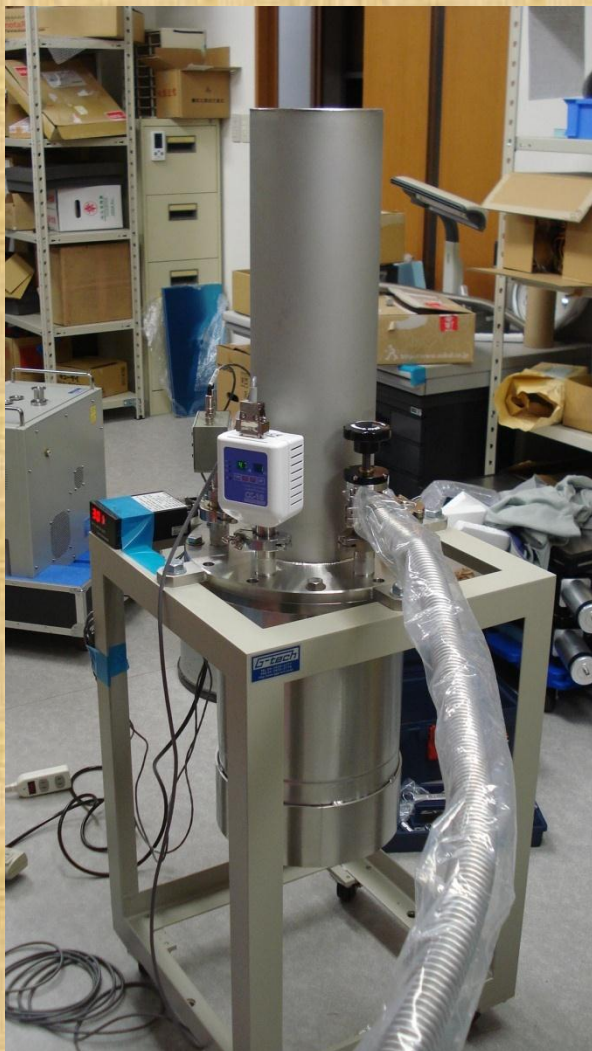
120Vでもピークを観測
(分解能の改善)

液体キセノンによるシンチレーション光測定用真空チェンバーの製作

- 24ccの液体キセノンのシンチレーション
- 4台のInP検出器を液体キセノンに浸ける(冷却とシンチレーション光集光)
- 光電子増倍管による同時計測



液体キセノンチェンバーの冷却試験



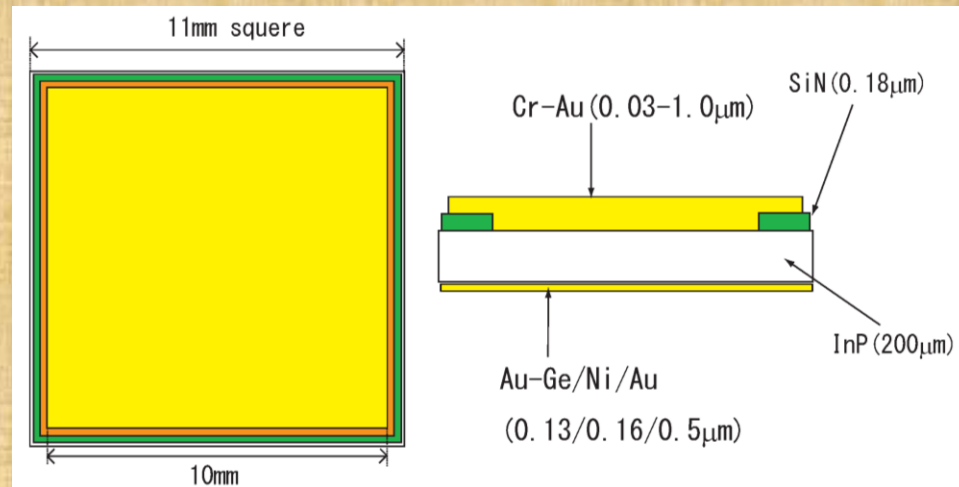
結果

- 薄膜電極型InP検出器(VCZ)を開発 (Au 100 Å / Cr 100 Å)
 - ✓ ガンマ線による応答性は従来同様
 - ✓ 5.4MeV α 線によるCsIシンチレーション光の明確な信号は観測されなかった  ノイズ多い
 - ✓ 50 Å の電極厚が必要
- 薄膜電極方InP検出器(VB)を試作 (Au 50 Å / Cr 50 Å)
 - ✓ 低バイアス電圧でも信号が確認
 - ✓ CsIシンチレーション光を観測可能なノイズレベル
- 液体キセノンのシンチレーション光観測実験
 - ✓ 液体キセノンチェンバー製作・冷却試験中



BACKUP

半絶縁性InP半導体検出器



真空容器にマウントされた検出器

- 住友電気工業製 VCZ法・VB法による半絶縁性 InP 半導体基板
- 浜松ホトニクス制作
- ドライアイス冷却(-79 °C)

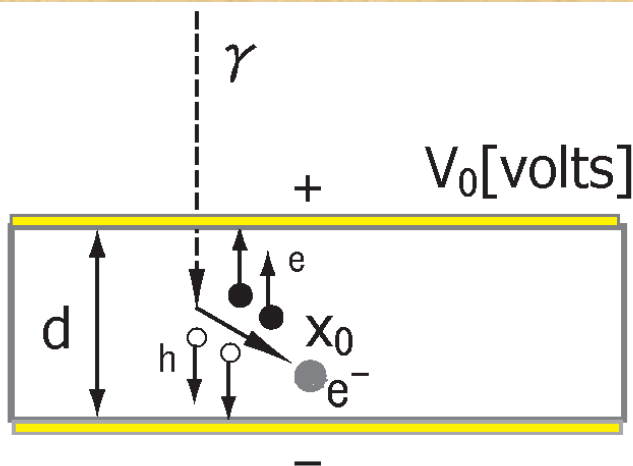
Surface area :

6mm × 6mm × 0.3mm

Electrode :

- Ohmic contact
- evaporated Au/Cr base metal
- Insulator (SiN) to avoid leak current
- thin Au/Cr 100 Å/100 Å 50 Å/50 Å

電荷収集の原理



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]

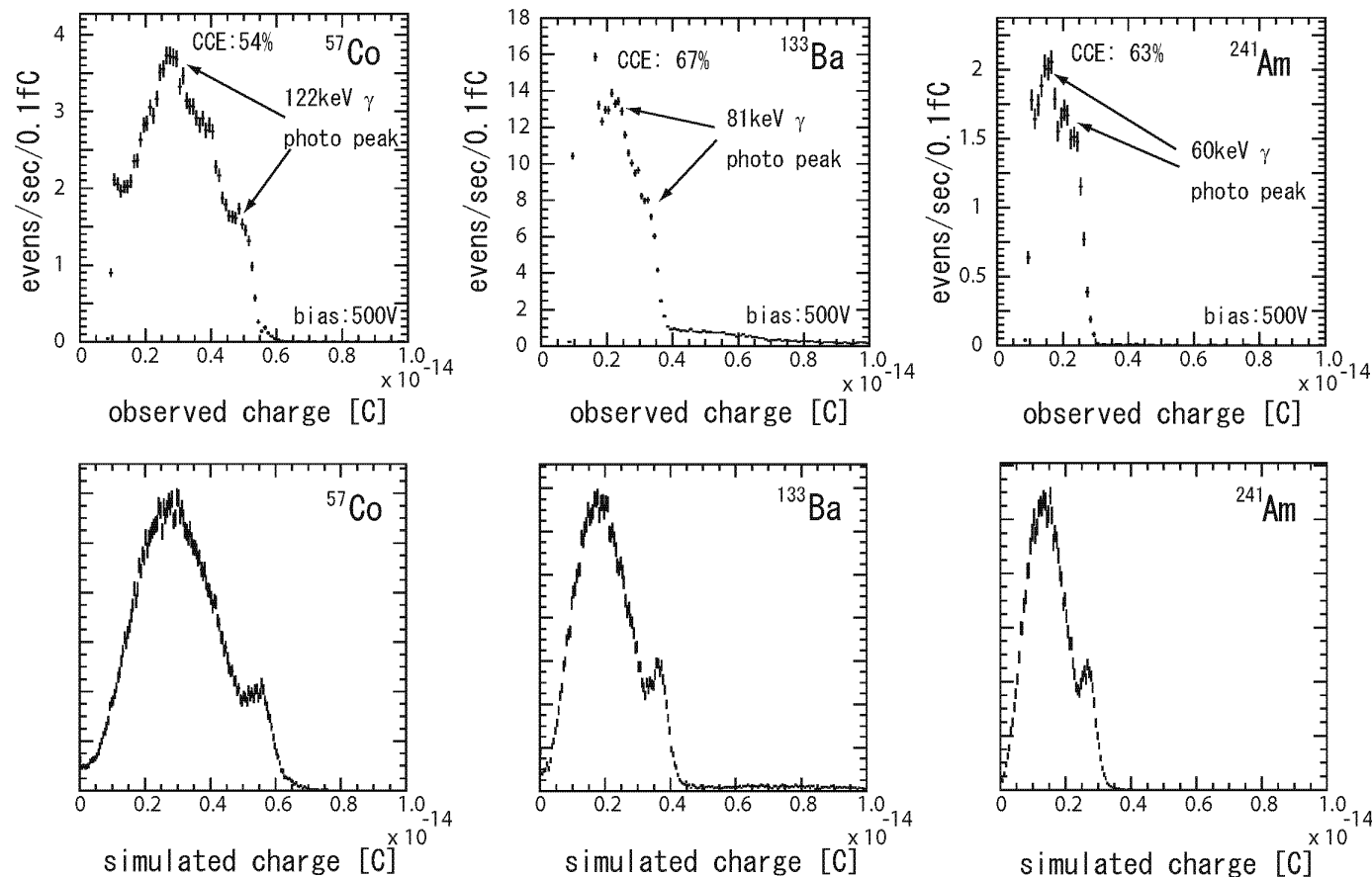
■ 誘導電荷 : $dQ = q dx/d$

■ Hecht formula,

$$Q = Q_0 \left\{ \left(\frac{L_e}{d} \right) \left(1 - e^{-\frac{x}{L_e}} \right) + \left(\frac{L_h}{d} \right) \left(1 - e^{-\frac{(d-x)}{L_h}} \right) \right\}$$

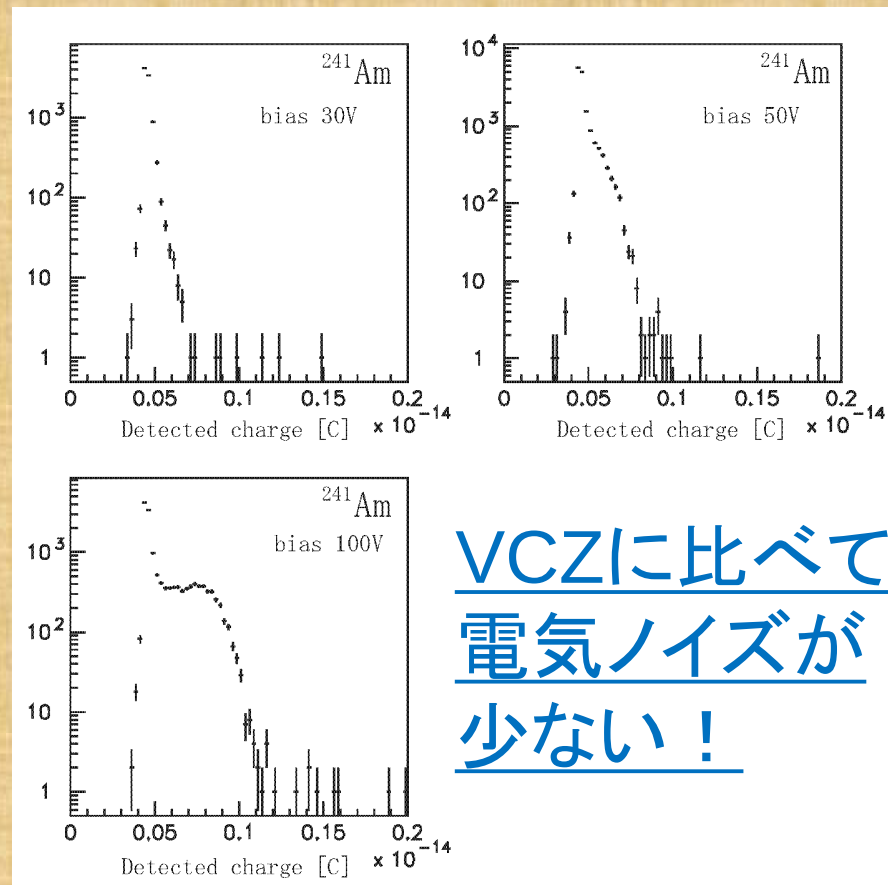
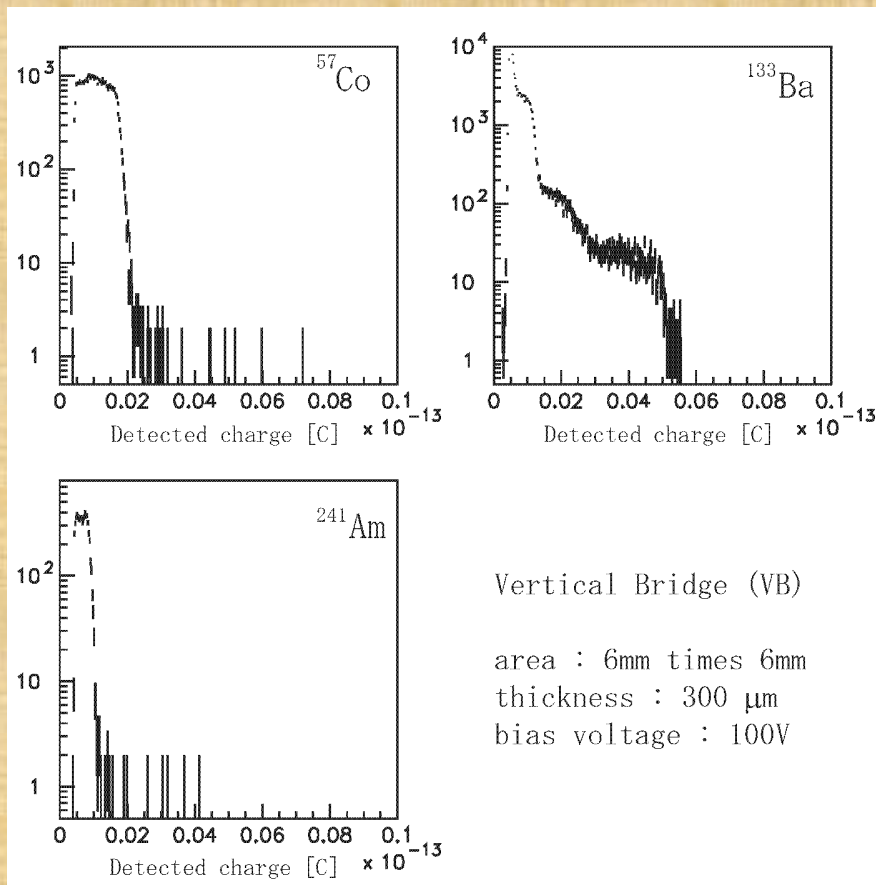
■ 全電荷収集 ($L_e + L_h \sim d$) $Q = Q_0$

シミュレーションによるスペクトル形状の再現



- 電子のドリフト長 $L_e \sim 200\mu\text{m}$ とホール drift 長 $L_h \sim 30\mu\text{m}$ を仮定すると、2ピーク構造がシミュレーションによる再現

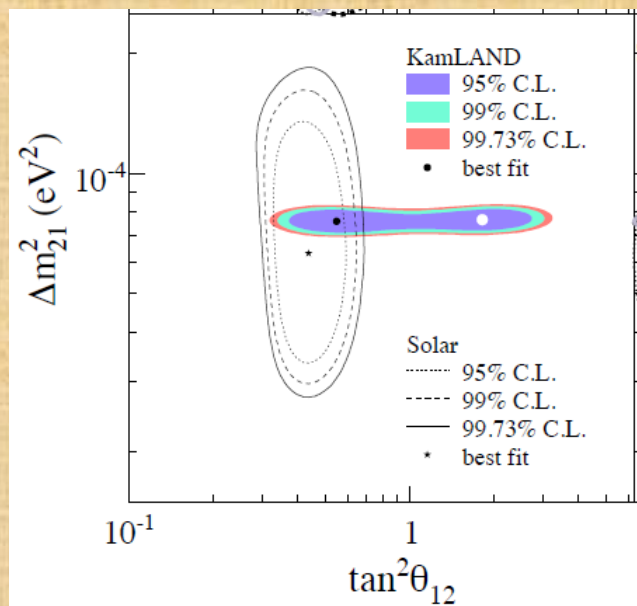
VB基板によるInP検出器の性能評価(2)



シンチレーション光の観測が
可能(かもしれない)

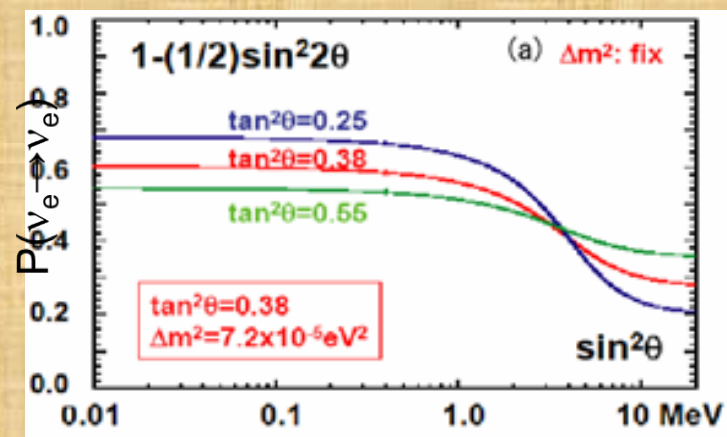
Motivation

Allowed region obtained by combined results and KamLAND



Survival probability for solar matter oscillation below 1MeV

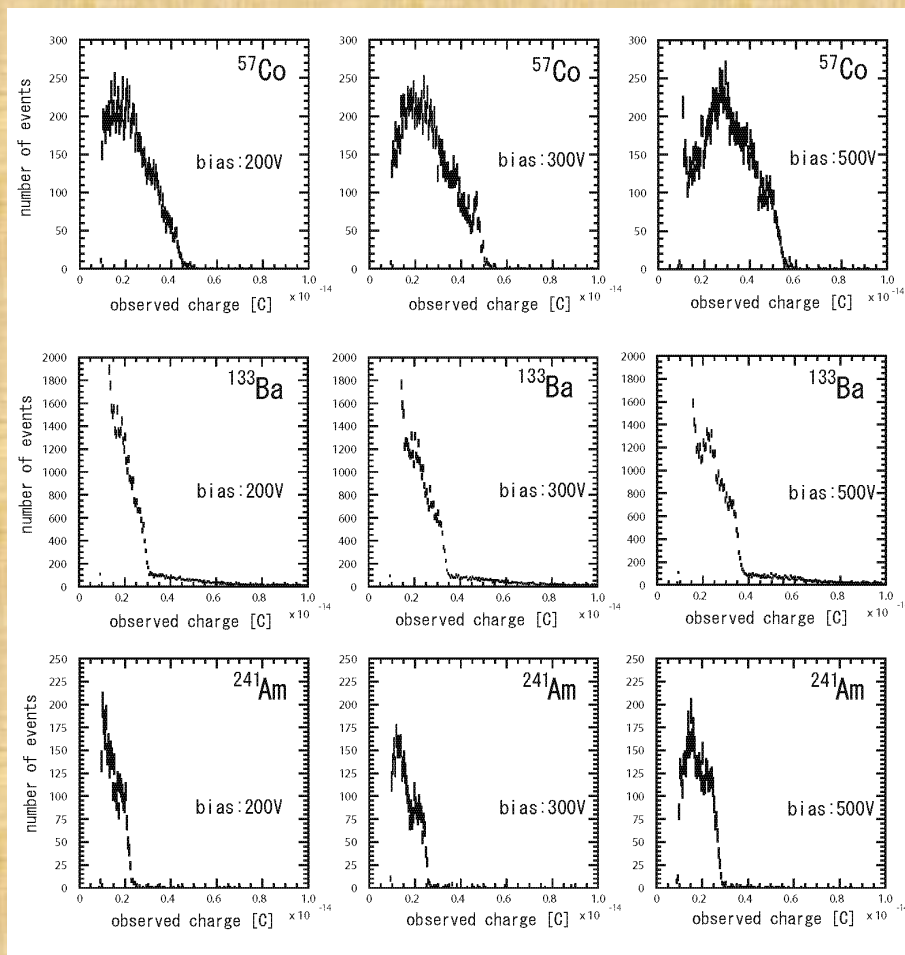
Y.Suzuki@Neutrino2004



- mixing angle θ_{12} is not well determined compared with θ_{23} obtained by Atm. ν .
- Survival probability could increase at 5MeV or less in case of LMA solution, and the value of probability depends on θ_{12} .

pp/⁷Be solar neutrino spectrum gives us precise θ_{12}

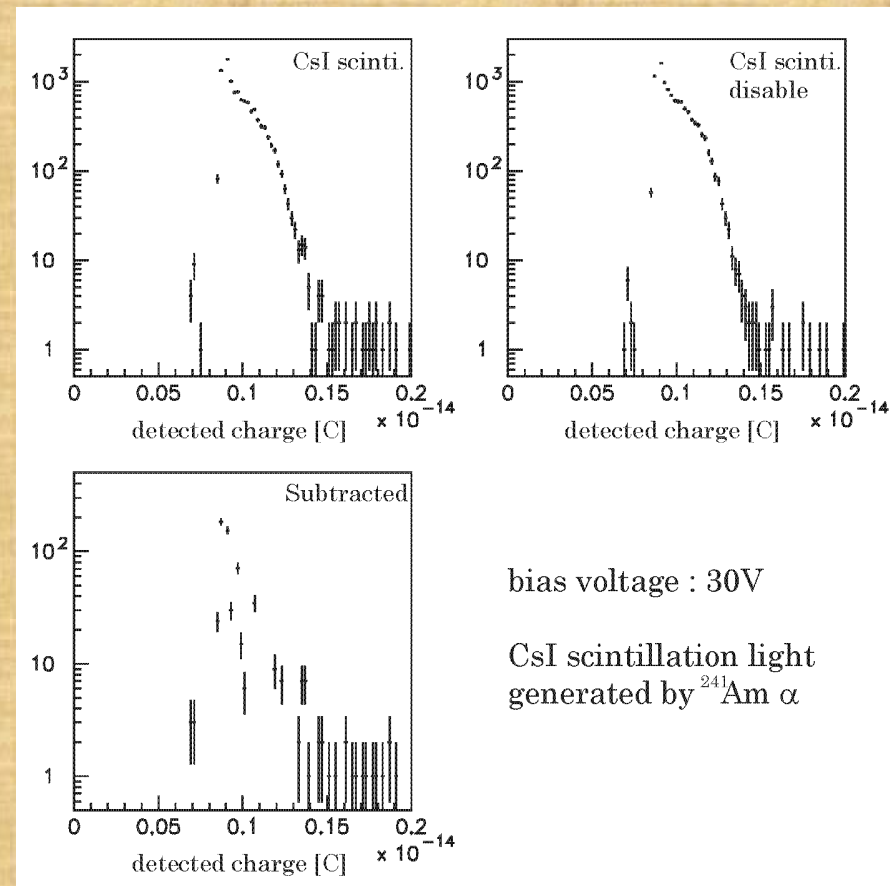
InP 検出器によるガンマ線スペクトル観測



- 光電ピークを観測しているが、2ピーク構造となっている
- Low Q peak: キャリアがドリフトすることによる誘導電荷
- High Q peak: 全電荷収集
- 電子・ホール平均生成エネルギー: 3.5eV
- エネルギー分解能: $25\% @ 122\text{keV}$ (intrinsic resolution : 3%)

薄膜電極型InP検出器によるシンチレーション 光測定(3)

- 予想電荷量: 0.5fC
- 暗電流によるノイズを抑えるため、バイアス電圧を300Vから30Vに低減



メッシュ電極型InP検出器の開発

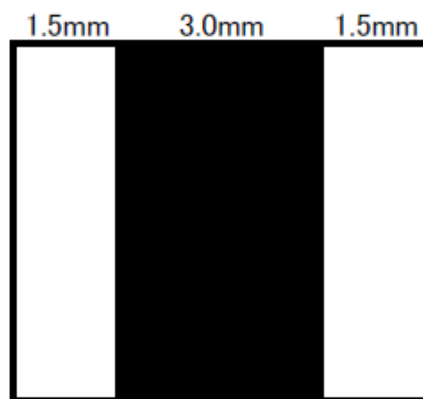


- 電極の厚み
 $\text{Au}100 \text{ \AA} / \text{Cr}100 \text{ \AA}$
- 表面電極の極性は共通
- 基板の厚み
 $200 \mu\text{m} / 300 \mu\text{m}$

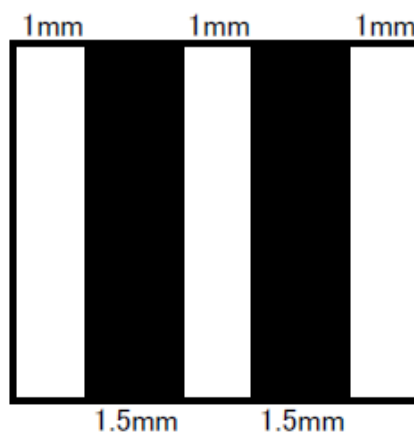
メッシュ電極型InP検出器の設計

面積 : 6mm × 6mm
厚さ : 0.2mm 、 0.3mm
電極(表) : Cr 100 Å Au 100 Å
電極(裏) : AnGe 1000 Å Ni 100 Å Au 6000 Å

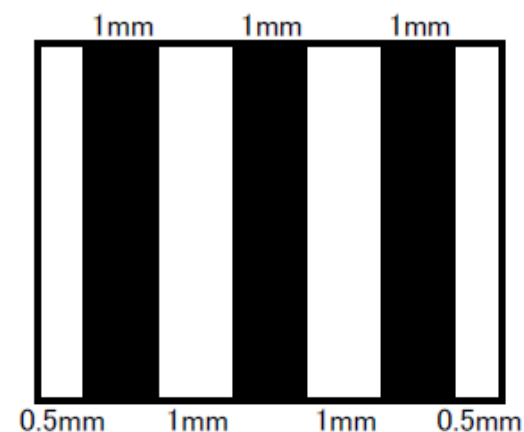
メッシュ電極パターン 開口率 50%



パターンA



パターンB



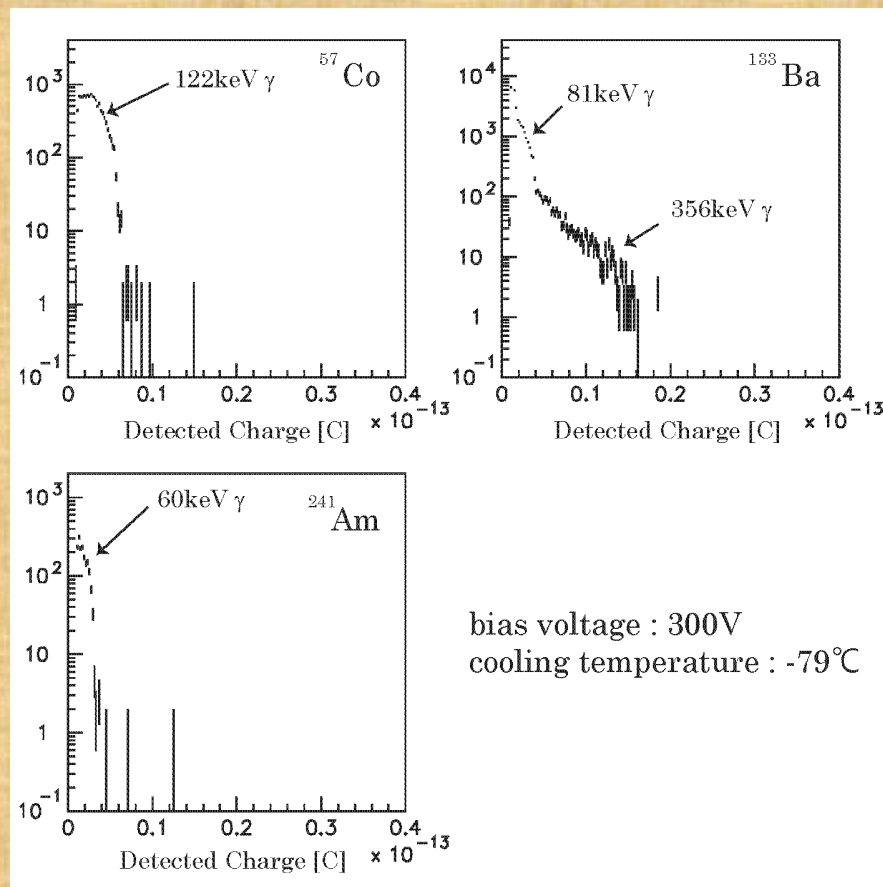
パターンC

メッシュ電極型(C) InP検出器による放射線測定

- ガンマ線によるスペクトル測定では、形状は従来の性能と変わらない。
- 観測事象数がおおよそ半分程度に減少



開口部分に電場が無い
ため、不感領域
になっている可能性



メッシュ電極型(C) InP検出器によるシンチレーション光測定

- 直接入射光により
2.5fC程度の電荷収集が予想



60keV γ 線事象と区別がつかず、明確な信号が観測されない
(表面電極の効果は不明)

