

InPダイオードと液体キセノンを用いた低エネルギー太陽ニュートリノ検出器の開発

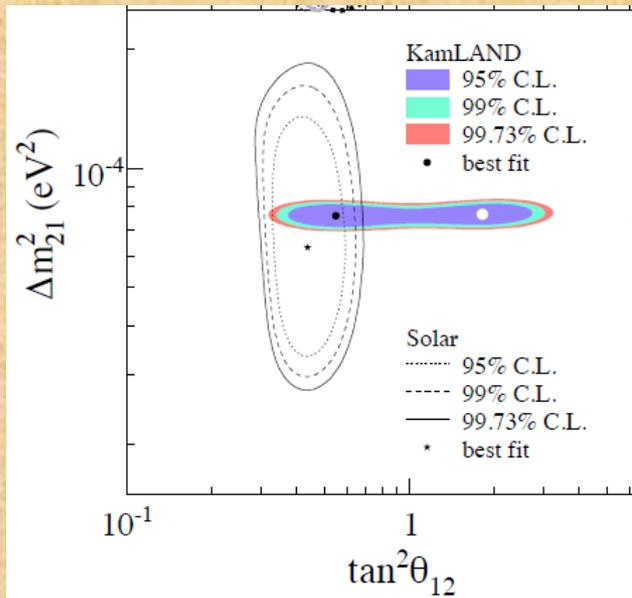
特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会 2011

2011年7月2日

宮城教育大学 福田善之 東大宇宙線研 森山茂栄

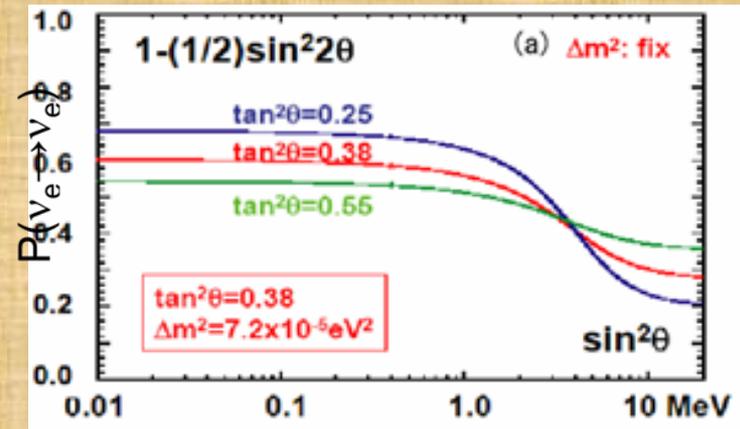
Motivation

Allowed region obtained by combined results and KamLAND



Survival probability for solar matter oscillation below 1MeV

Y.Suzuki@Neutrino2004



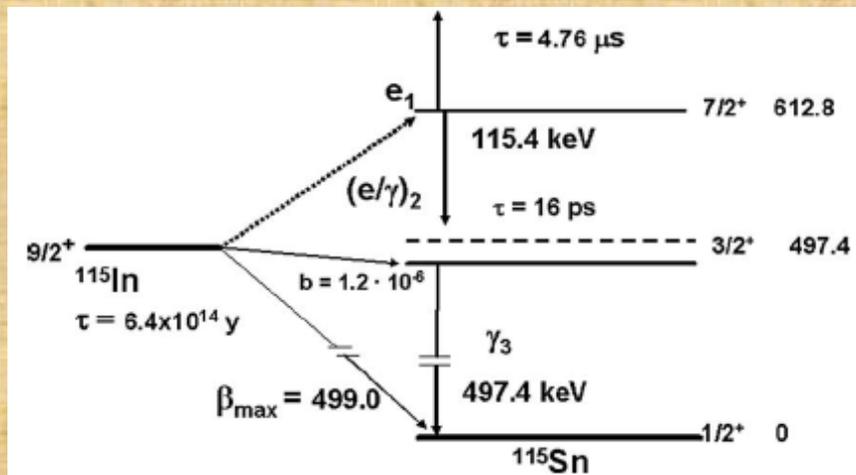
Neutrino energy

- 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}

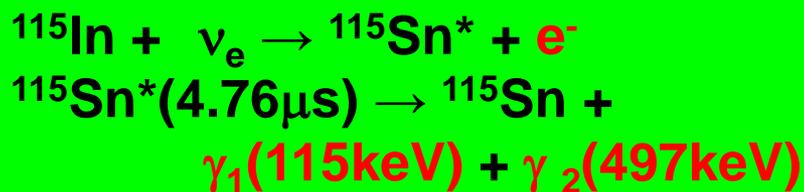
Capture of low energy solar neutrinos by ^{115}In

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



Nuclear Physics A 748 (2005) 333-347

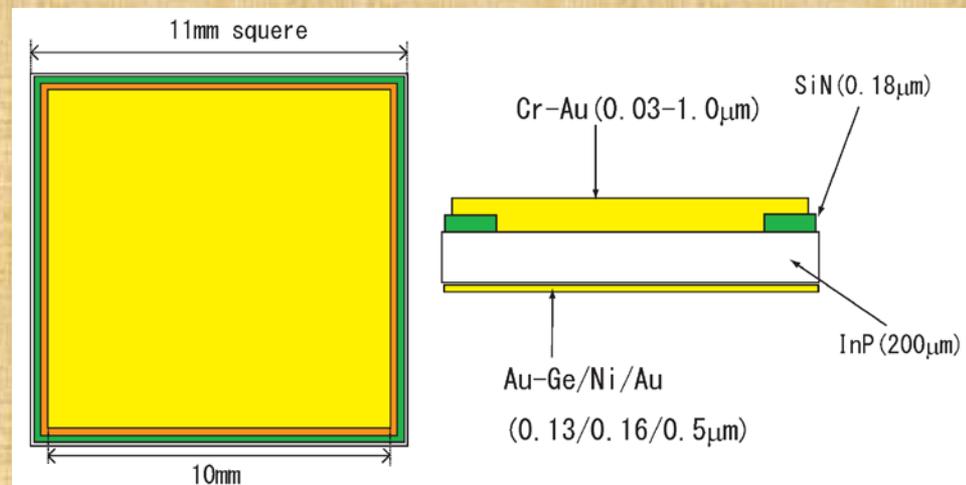
- Advantage
 - large cross section ($\sim 640\text{SNU}$)
 - direct counting for solar neutrinos
 - sensitive to low energy region ($E_\nu \geq 125\text{keV}$)
 - energy measurement ($E_e = E_\nu - 125\text{keV}$)
 - triple fold coincidence to extract neutrino signal from huge BG ($e_1 + \gamma_2 + \gamma_3$)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

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)

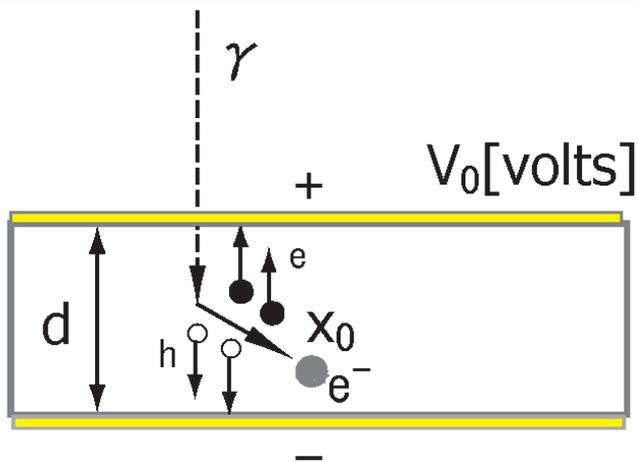
Surface size:

10mm × 10mm × 0.2mm
(6mm × 6mm × 0.2/0.23/0.28/0.45mm)

Electrode :

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

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]

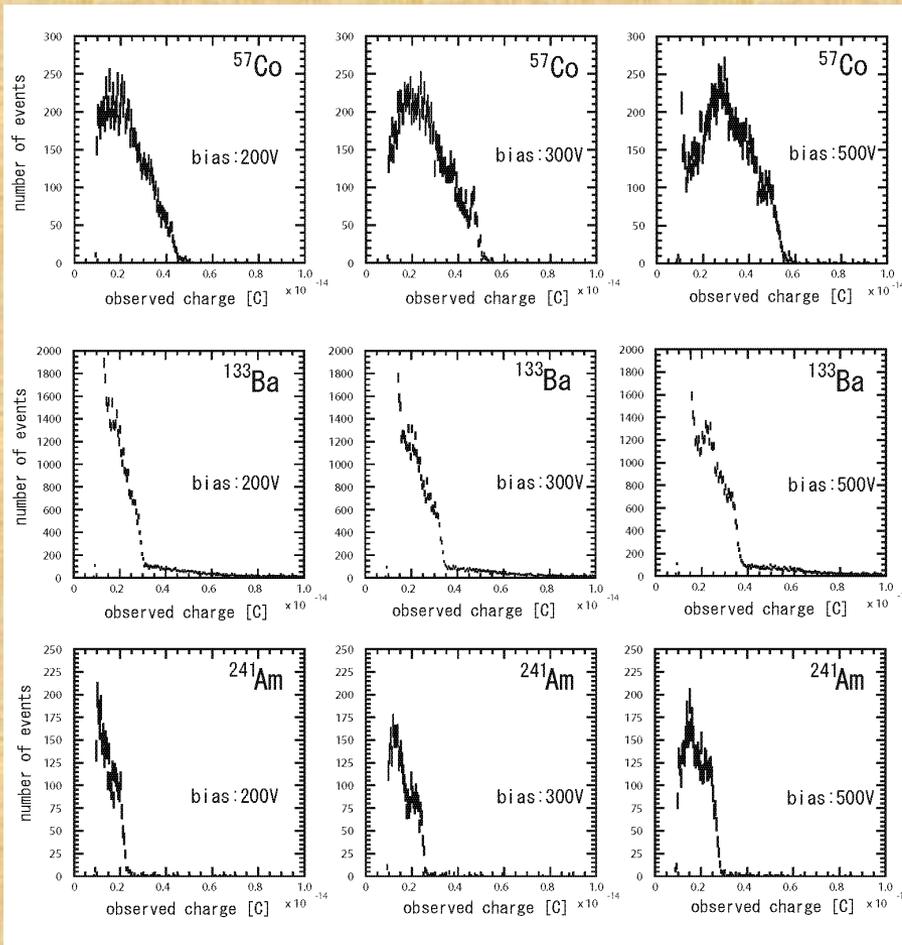
■ 誘導電荷 : $dQ = q dx/d$

■ Hecht formula,

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

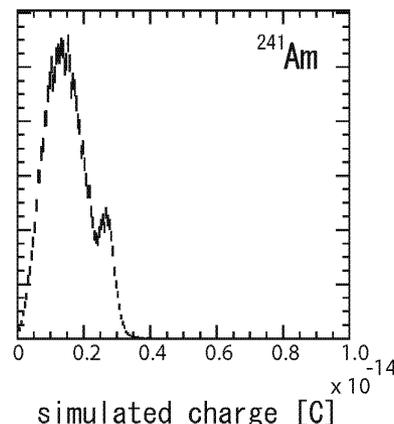
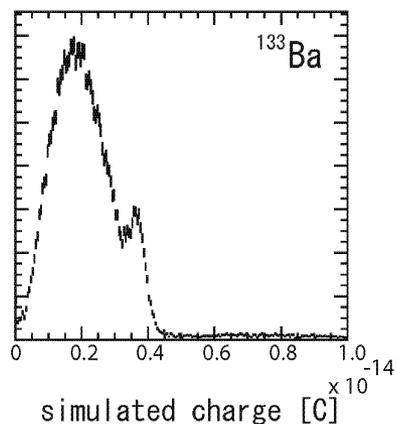
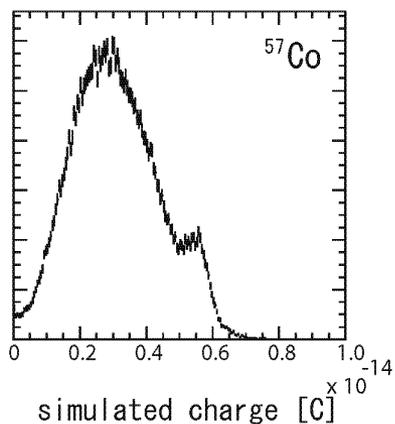
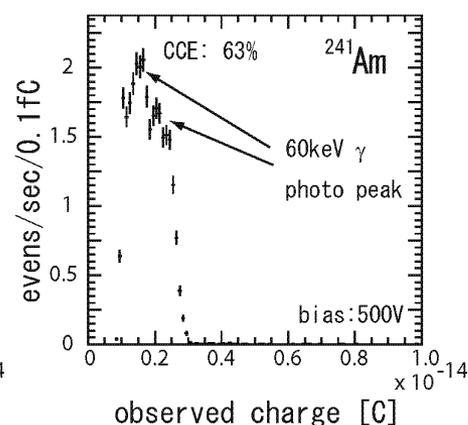
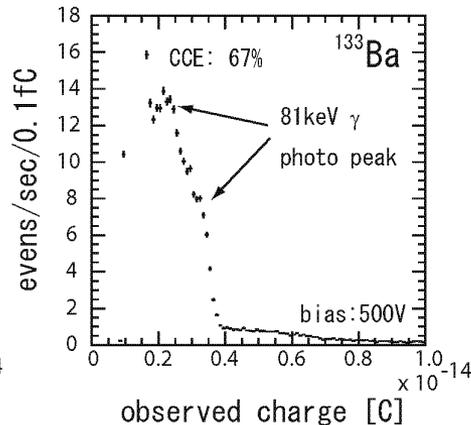
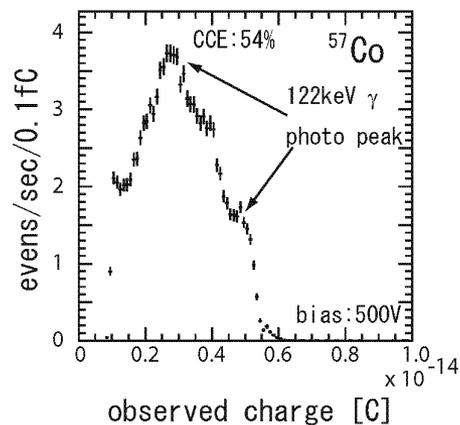
■ 全電荷収集 ($L_e + L_h \sim d$) $Q = Q_0$

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%)

シミュレーションによるスペクトル形状の再現

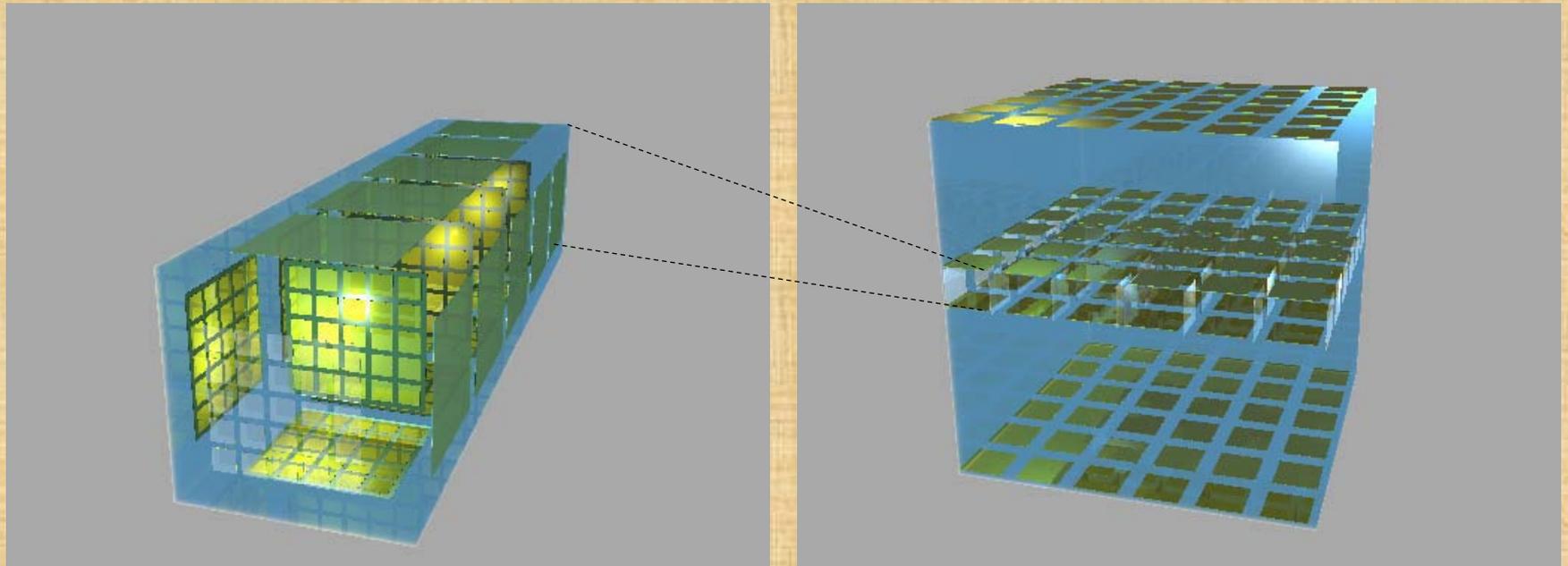


- 電子のドリフト長 $L_e \sim 200 \mu\text{m}$ とホール半導体のドリフト長 $L_h \sim 30 \mu\text{m}$ を仮定すると、2ピーク構造がシミュレーションによる再現

IPNOS phase-I experiment for Solar ν experiment

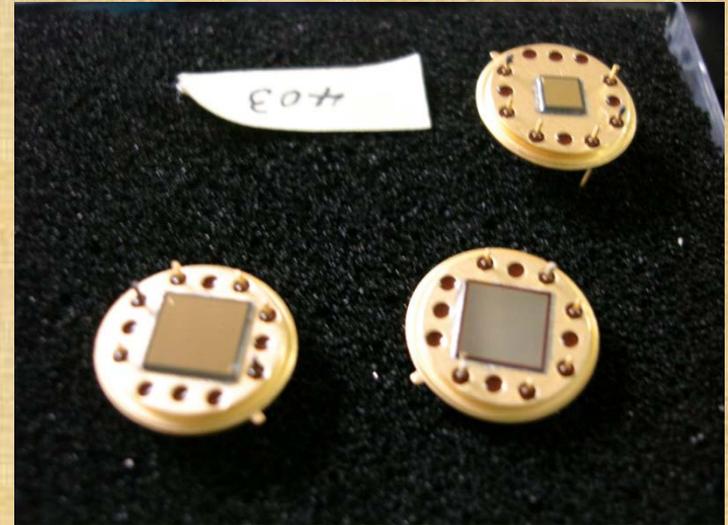
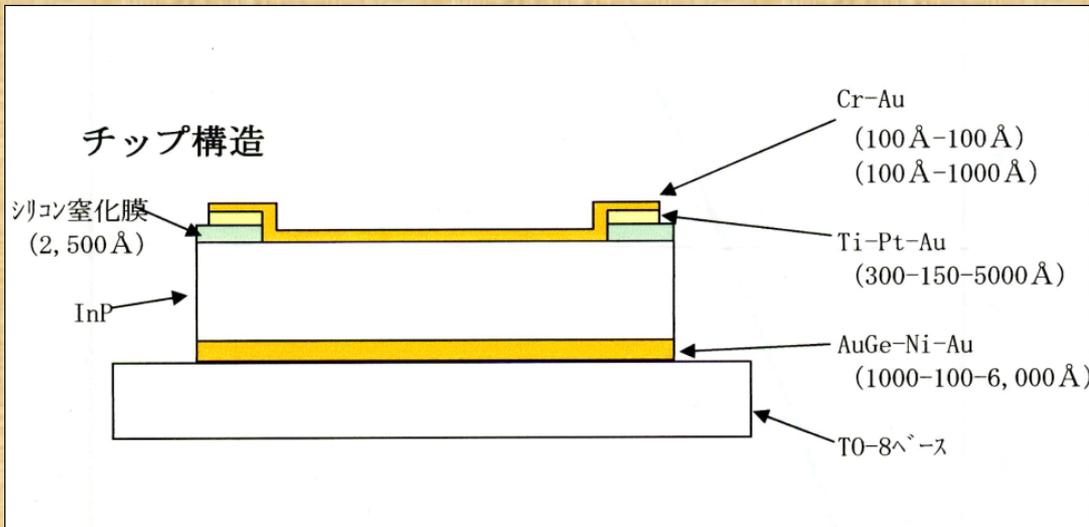
InP multi-pixel detector inside of Liquid Xenon.

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



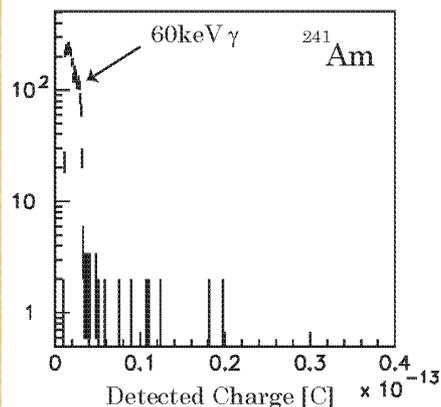
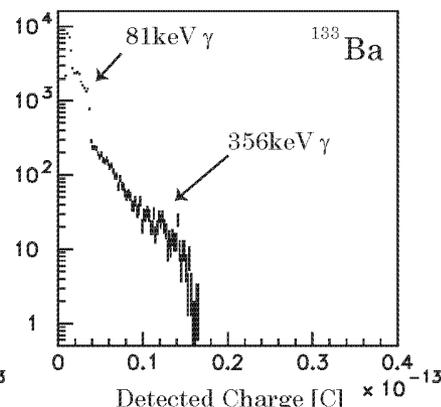
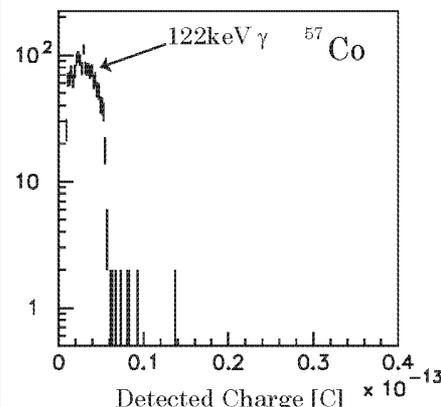
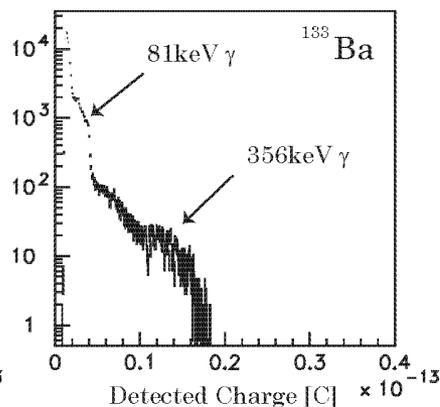
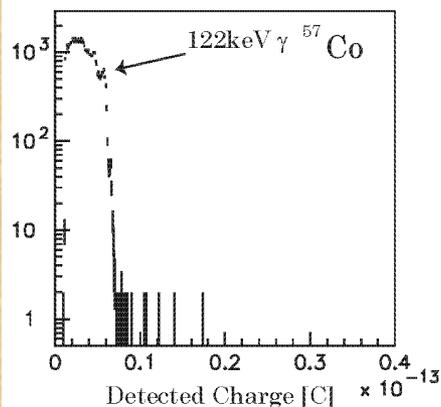
液体キセノンのシンチレーション光も観測

薄膜電極型InP検出器の開発



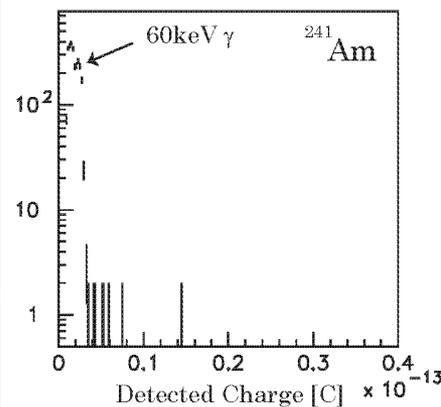
- 液体キセノンのシンチレーション光の減衰を抑える必要がある
- Au/Crの電極の厚みを100 Å (10nm)/1000 Å (100nm)の検出器を開発

薄膜電極型InP検出器による放射線測定



bias voltage : 300V
cooling temperature : -79°C

100 Å / 100 Å



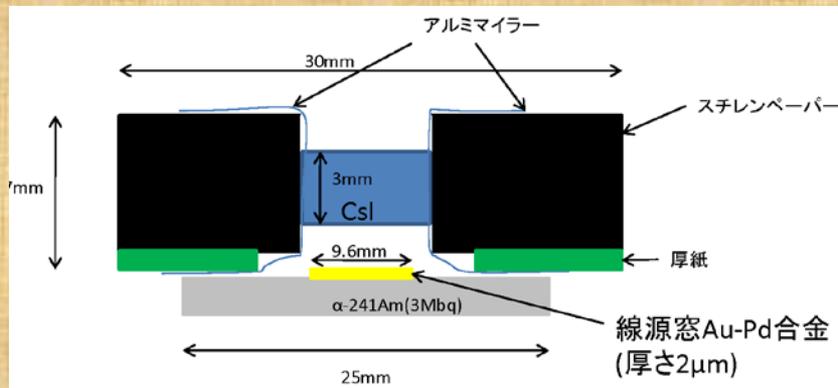
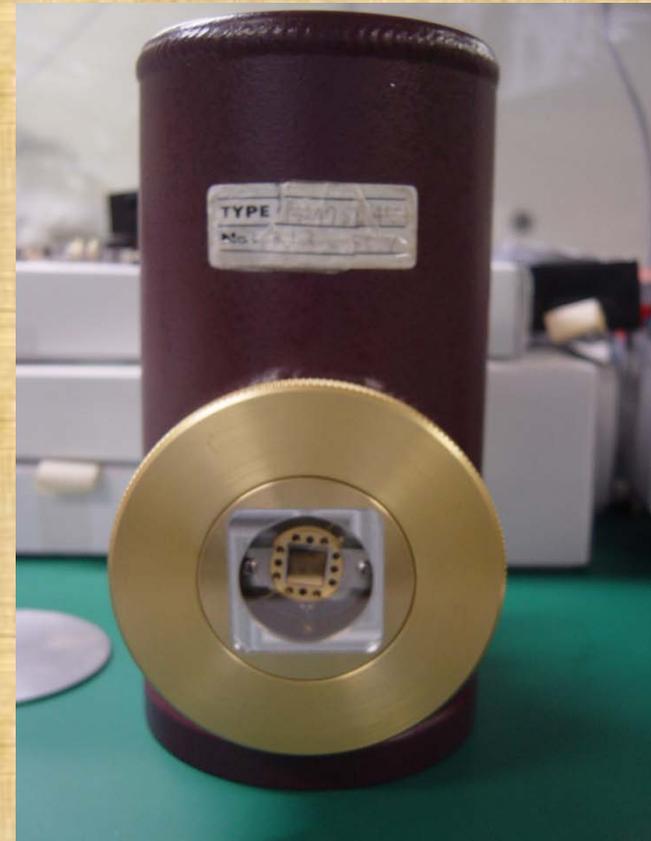
bias voltage : 400V
cooling temperature : -79°C

通常電極

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



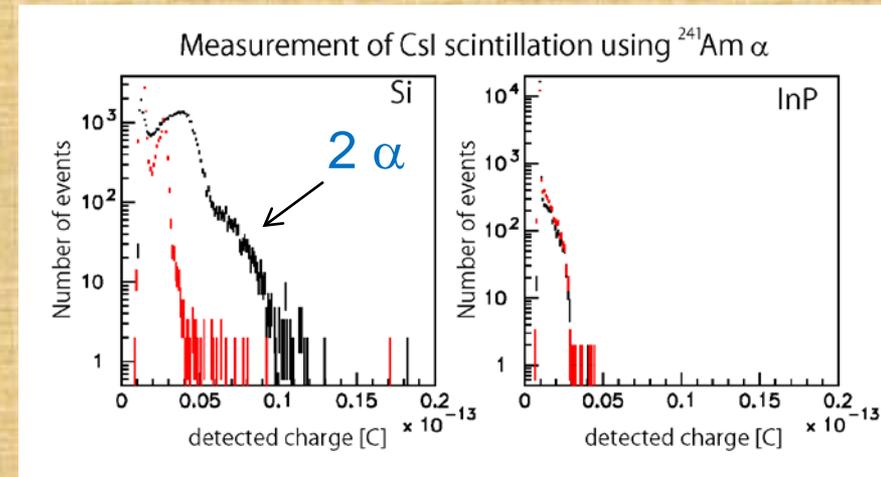
薄膜電極型InP検出器によるシンチレーション光測定(1)

■ Siダイオード

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

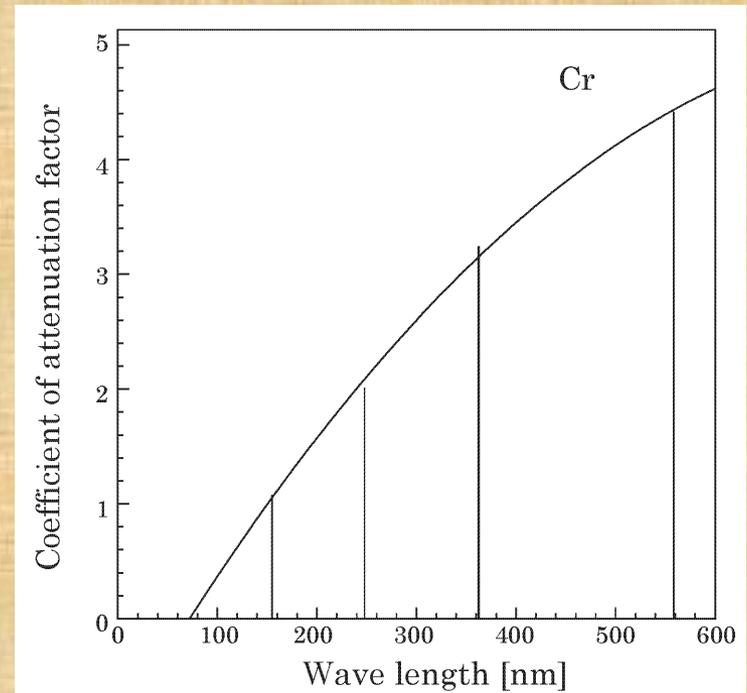
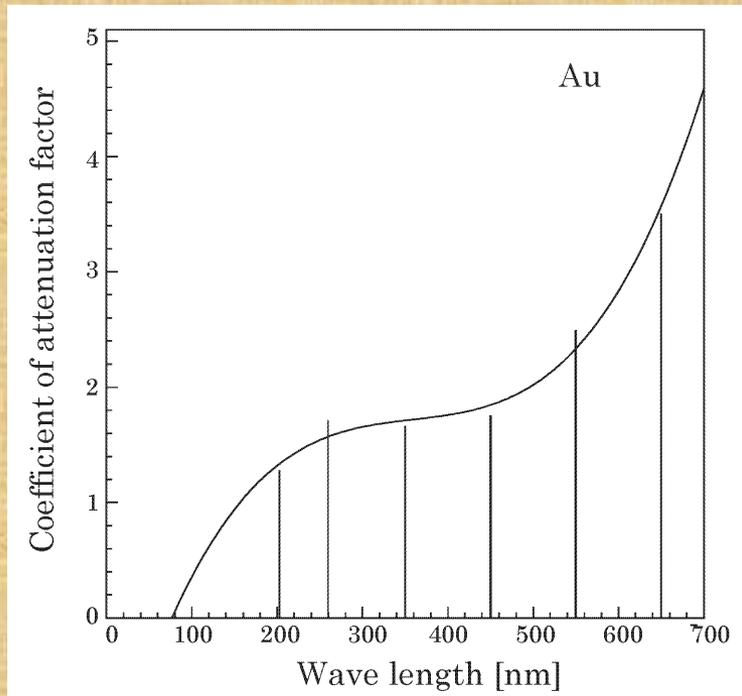
■ InP detector

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

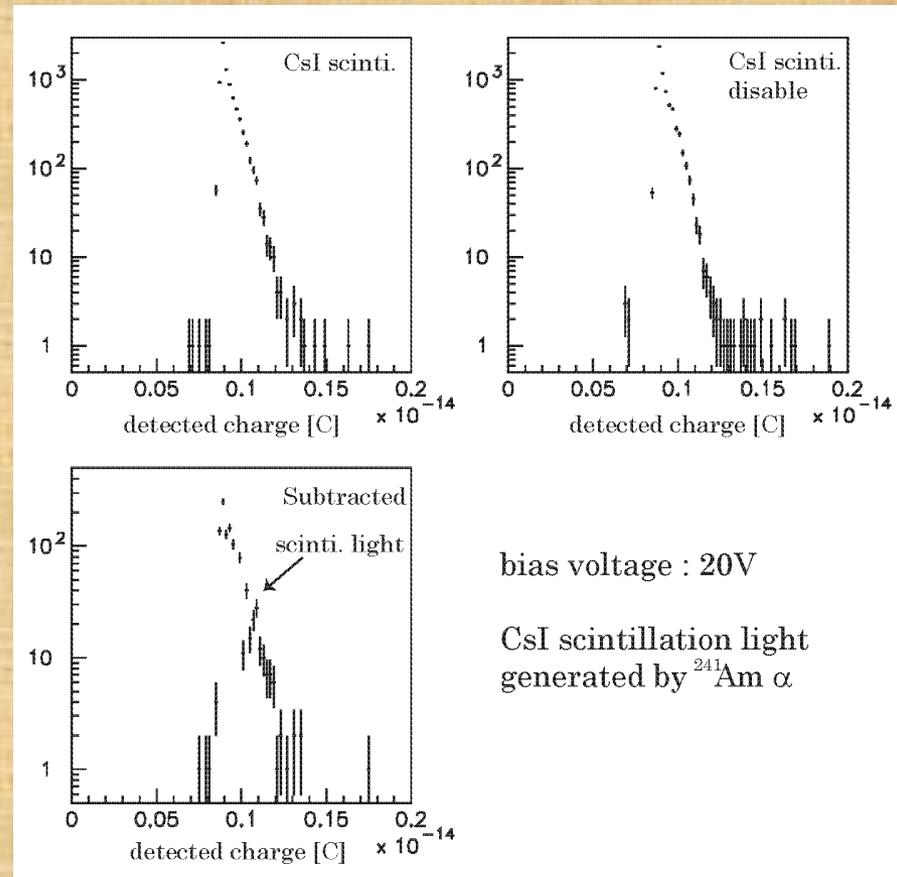


$$\tau = \exp(-ax) \quad t : \text{透過率} \quad x : \text{透過長} \quad a : \text{吸収係数}$$
$$a = 4\pi k / \lambda \quad \tau_{\text{Au}} = 0.57 \quad \tau_{\text{Cr}} = 0.36$$

薄膜電極型InP検出器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

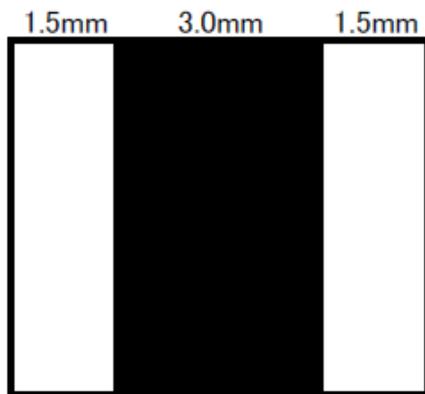
↓
CsIのシンチレーション光を観測(但し、 2α の信号)



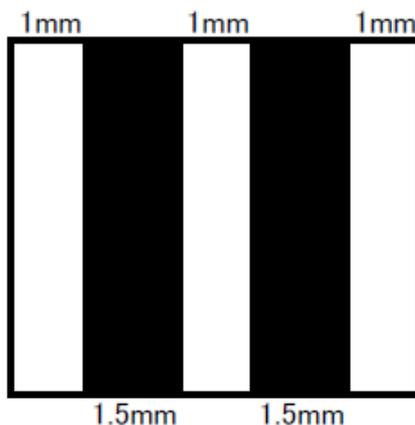
メッシュ電極型InP検出器の設計

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

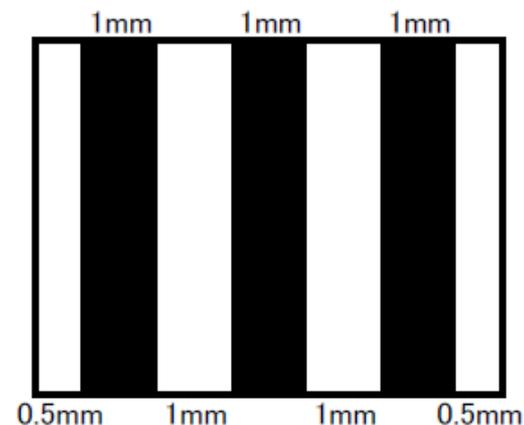
メッシュ電極パターン 開口率 50%



パターンA



パターンB



パターンC

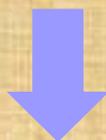
メッシュ電極型InP検出器の開発



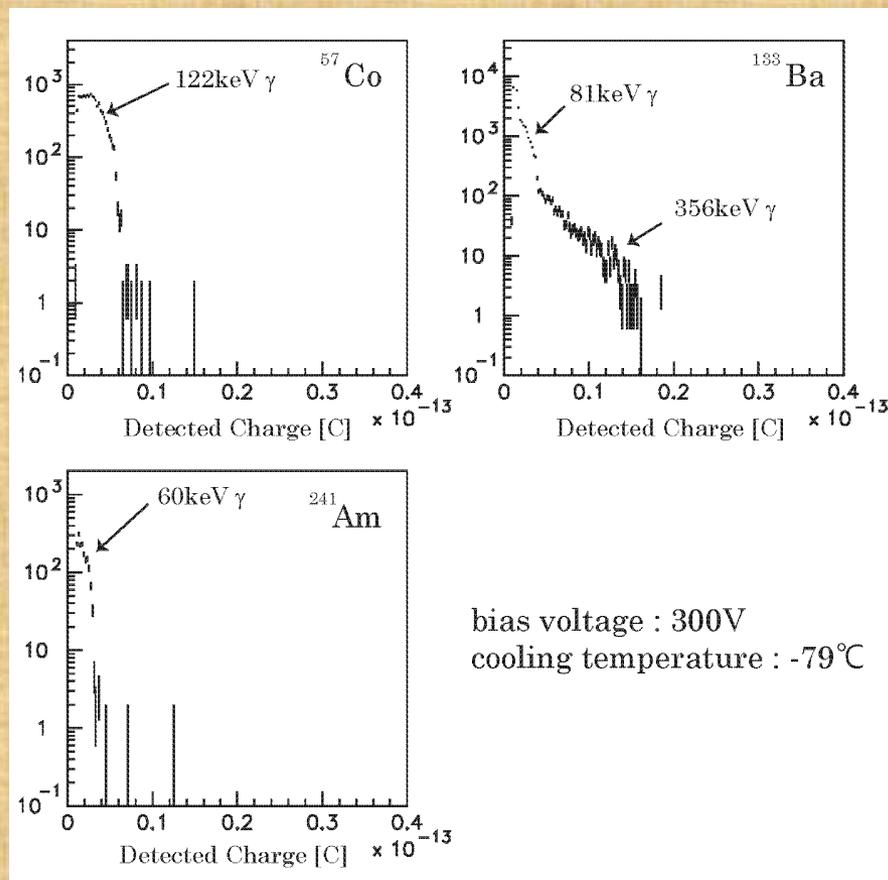
- 電極の厚み
Au100 Å / Cr100 Å
- 表面電極の極性は共通
- 基板の厚み
200 μ m/300 μ m

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

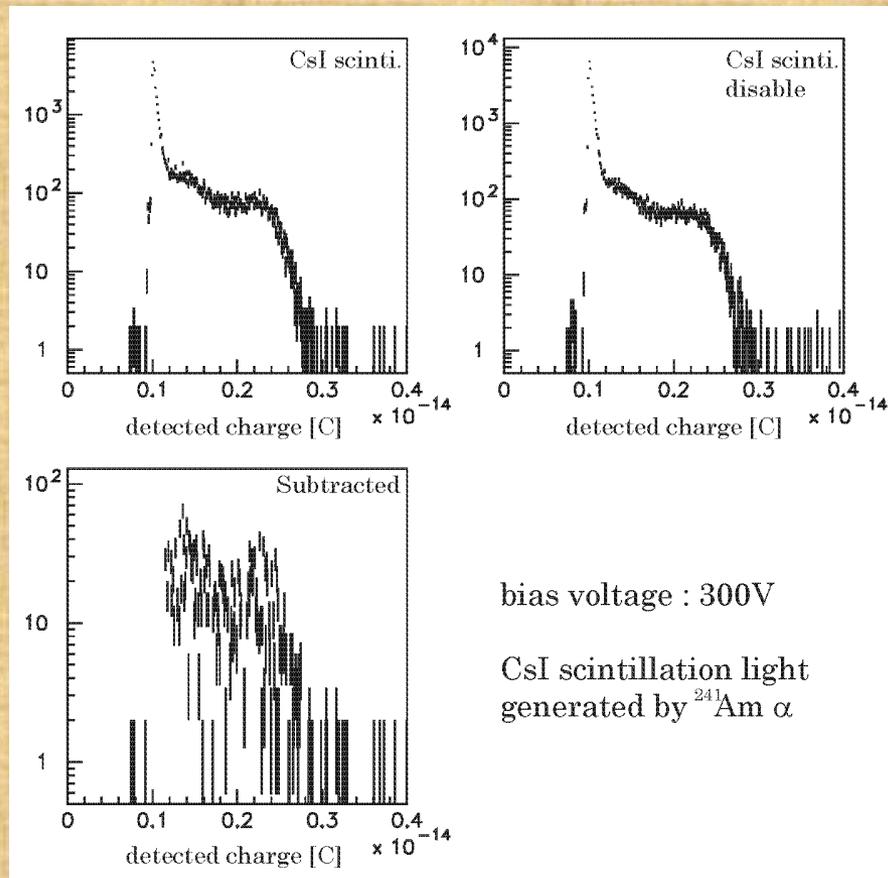


メッシュ電極型(C) InP検出器によるシンチレーション光測定

- 直接入射光により
2.5fC程度の電荷収集が予想

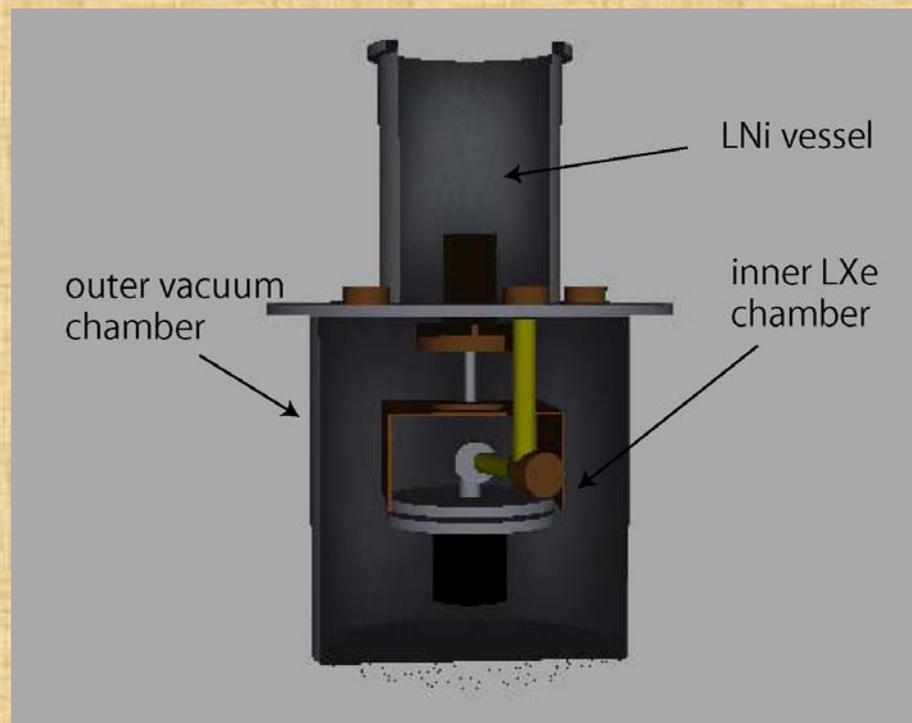


60keV γ 線事象と区別がつかず、明確な信号が観測されない
(表面電極の効果は不明)



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検出器を開発

- ✓ ガンマ線による応答性は従来同様
- ✓ ^{241}Am 5.4 MeV α 線によるCsIシンチレーション光を観測した
- ✓ LXeシンチレーション光を観測するには、50 Åの電極厚が必要  浜松と共同開発中

■ メッシュ電極型InP検出器を試作

- ✓ ガンマ線による応答性はあるが、開口部分が不感領域
- ✓ 直接光の検出が確認できなかった

■ 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

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

