

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59回年次大会

3月30日

宮城教育大学 福田善之、千葉芳明、太田忠之

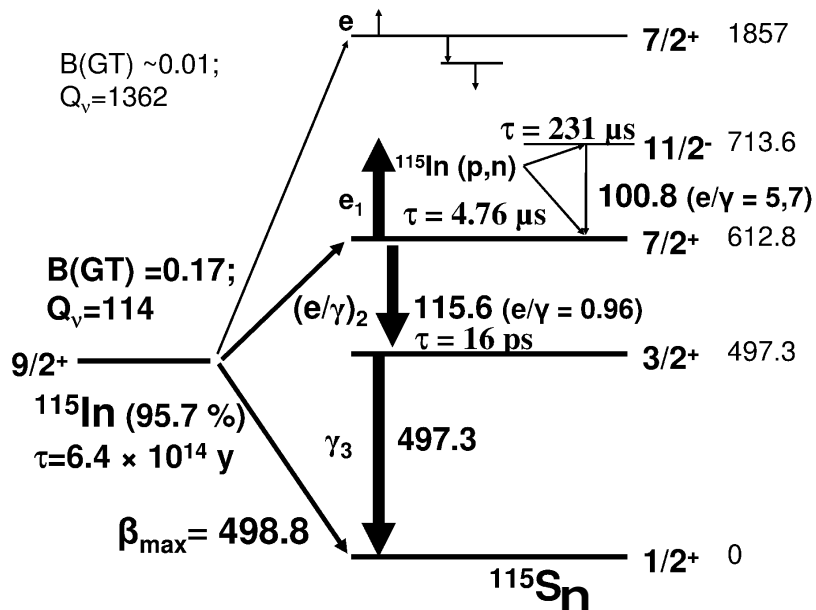
東大宇宙線研 森山茂栄、塩澤真人、小汐由介、
竹内康雄、難波俊雄

浜松ホトニクス(株) 固体事業部

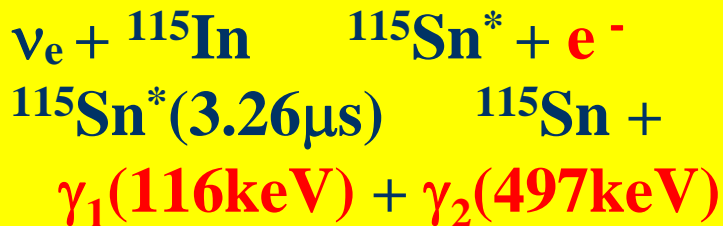
犬塚智也、井澤利之

インジウムによる太陽ニュートリノの検出原理

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

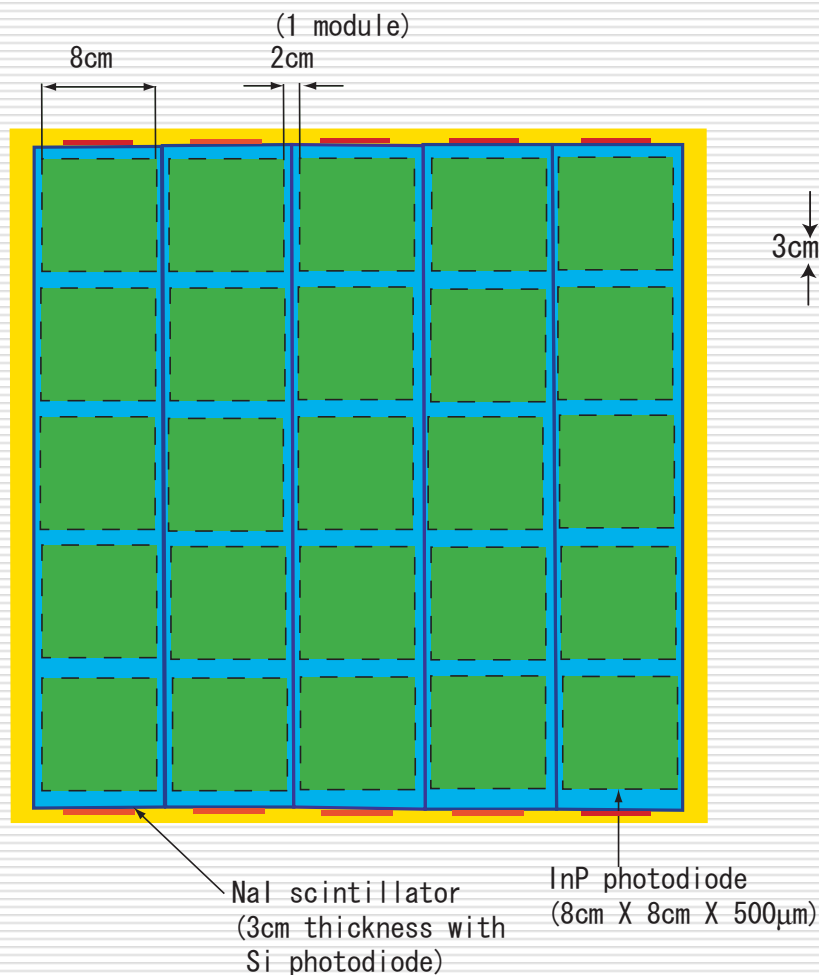


- Real-time measurement
- ν energy measurable
($E_e = E_\nu - 125 \text{ keV}$)
- 3 fold coincidence to extract neutrino signal
- β -decay from ^{115}In
($\tau_{1/2} = 6 \times 10^{14} \text{ yr}$)
- Correlated chance coincidence-Bremsstrahlung
- Correlated chance coincidence impurities

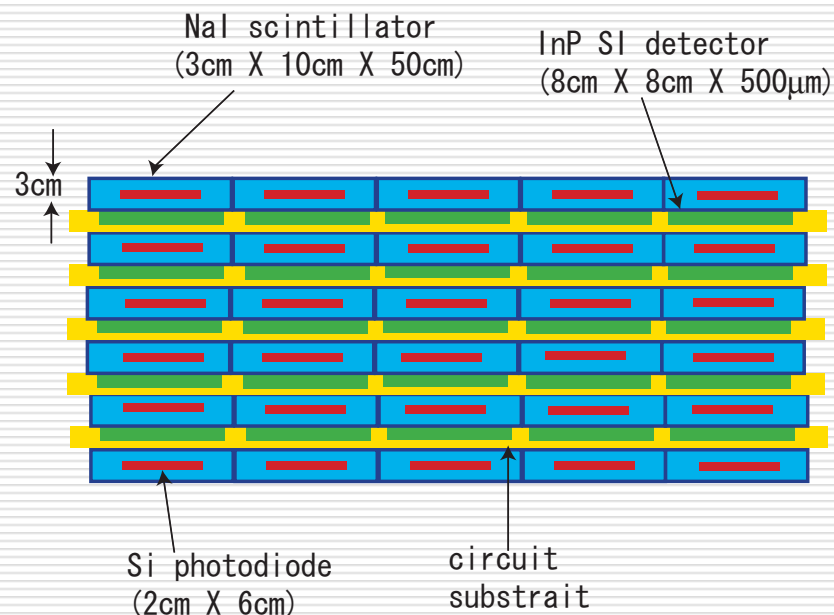


InP Semi-Insulating (SI) hybrid detector

Top view of InP SI hybrid detector



Side view of InP SI hybrid detector



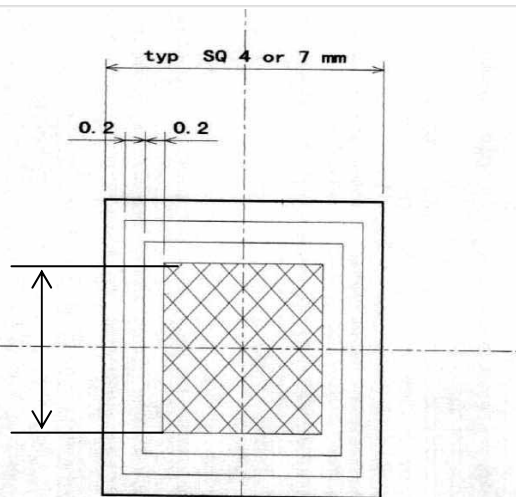
High energy resolution, high granularity
High speed read out, No quenching



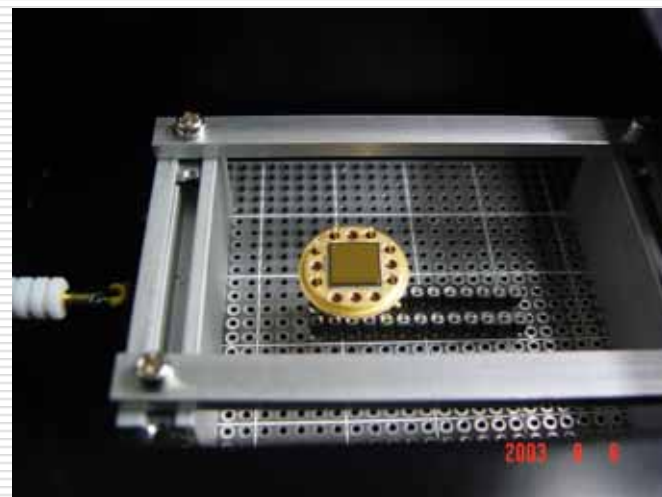
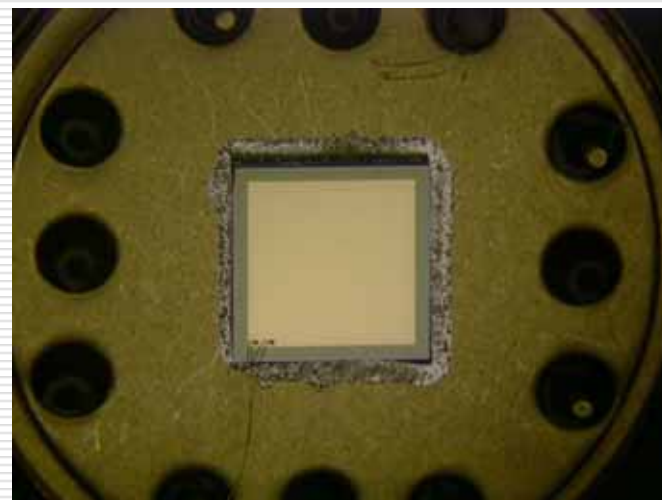
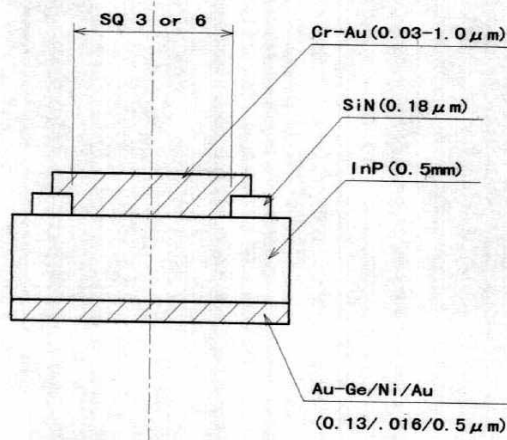
High BG reduction could be done

InP SI proto-type 検出器

6mm



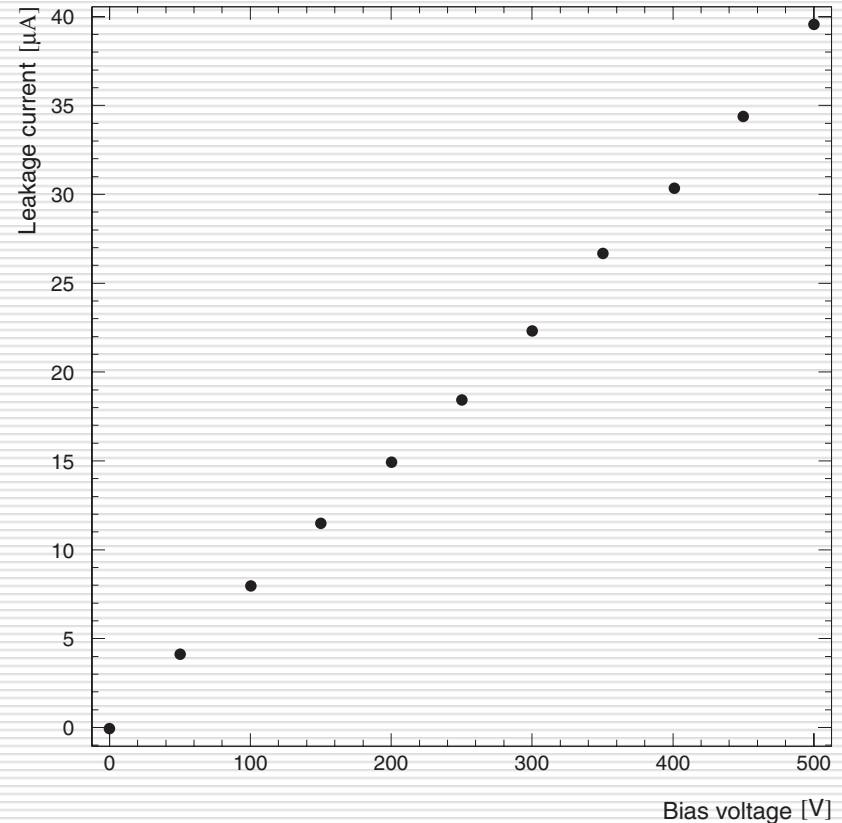
世界最大級の大きさ
体積: 0.018cm^3



(presented by Hamamatsu photonics)

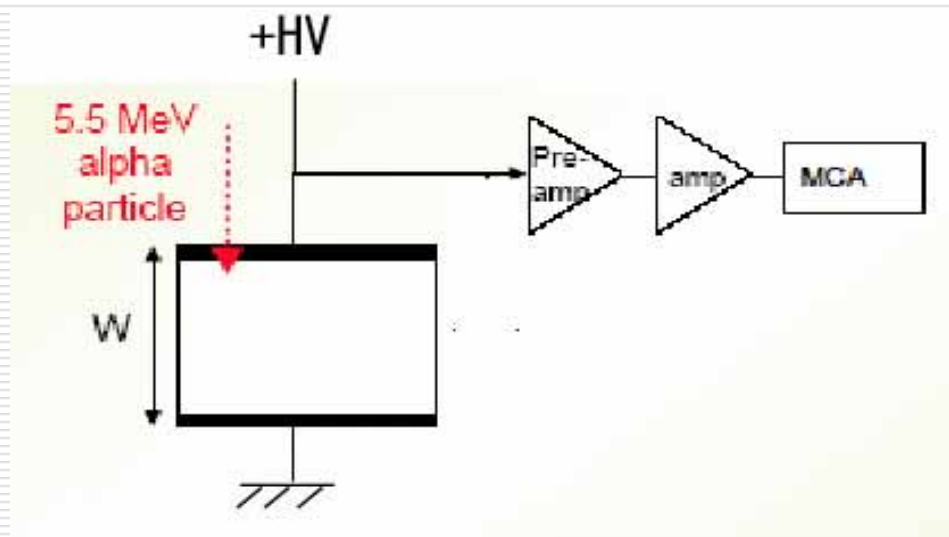
半導体特性

- 米国AXT社 VGF製法
- 半絶縁型 InP(Fe)
- 非抵抗値 $0.5-5 \times 10^8$
m
- 転位密度 2,000以下
- ウエハー径 50.0 ± 0.3
mm
- ウエハー厚
 $450 \pm 25 \mu\text{m}$
- 表面・裏面処理 鏡面
- 暗電流のバイアス電圧に対する特性
 - 半絶縁型なので極性がない



^{241}Am α 線による応答

□ 測定の設定アップ



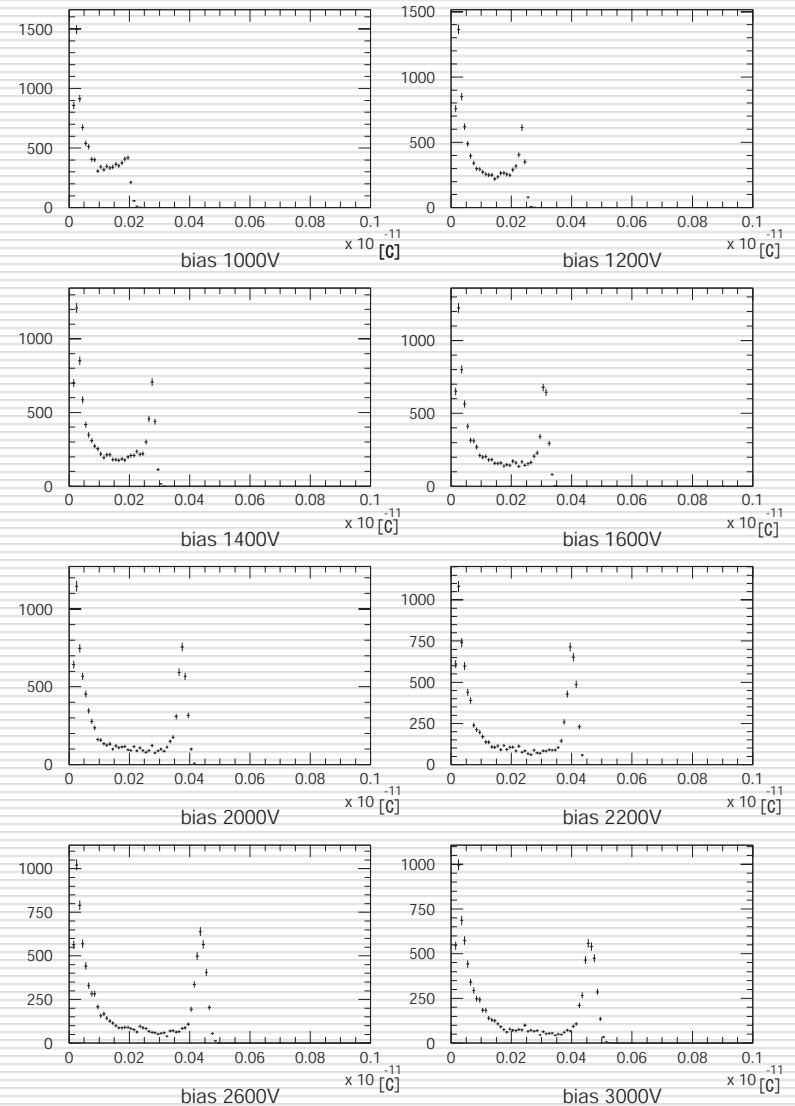
□ 改良点

- 前置増幅器をクリアパルス製581Kに変更
- バイアス電圧を最大3kVまで印可

^{241}Am α 線による応答

観測データ

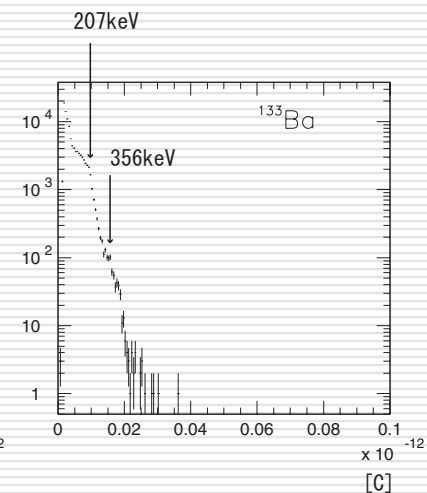
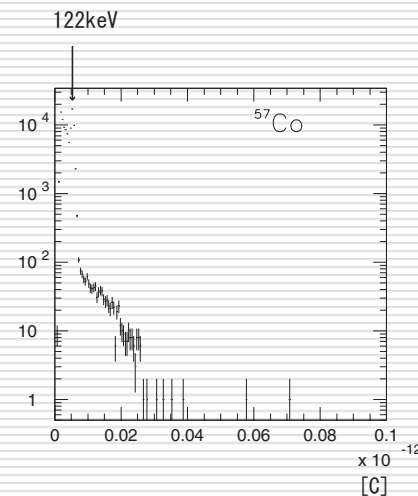
- クリアなsingle peakが観測された
- バイアス電圧の増加により電荷収集効率(CCE)が明らかに上昇している



検出電荷量のキャリブレーション

□ Siダイオード(300 μm)による検出電荷量キャリブレーション

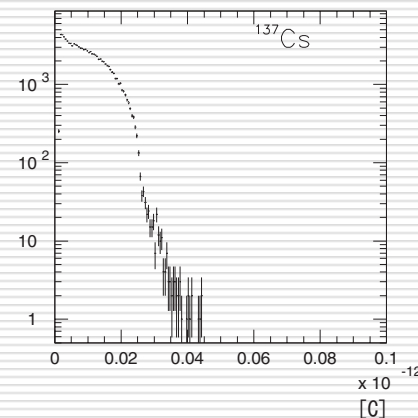
- ^{57}Co (122keV)
- ^{133}Ba (356keV)
- ^{137}Cs (662keV)
- ^{241}Am (5.486MeV)



検出電荷量 =

エネルギー / キャリア対生成の平均エネルギー \times 素電荷

cf Siの平均生成エネルギーは3.6eV



前置増幅器のテストパルスによる検出電荷量のキャリブレーションと一致

InP SI素子のキャリアー生成エネルギー

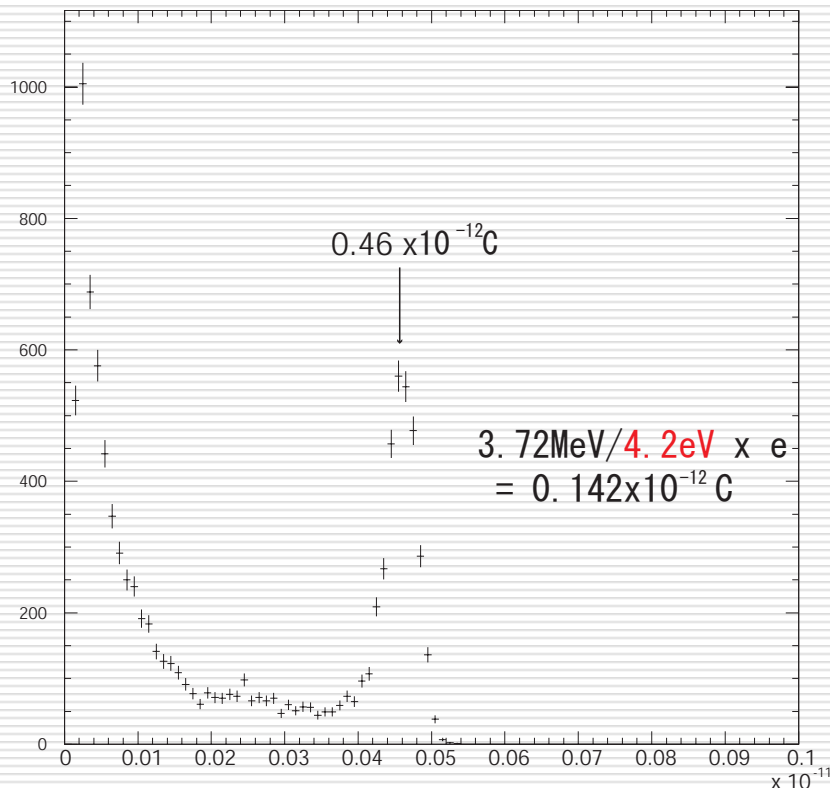
□ 過去の文献

キャリアー生成の平均
エネルギー : **4.2eV**

cf NIM A458 (2001) 400

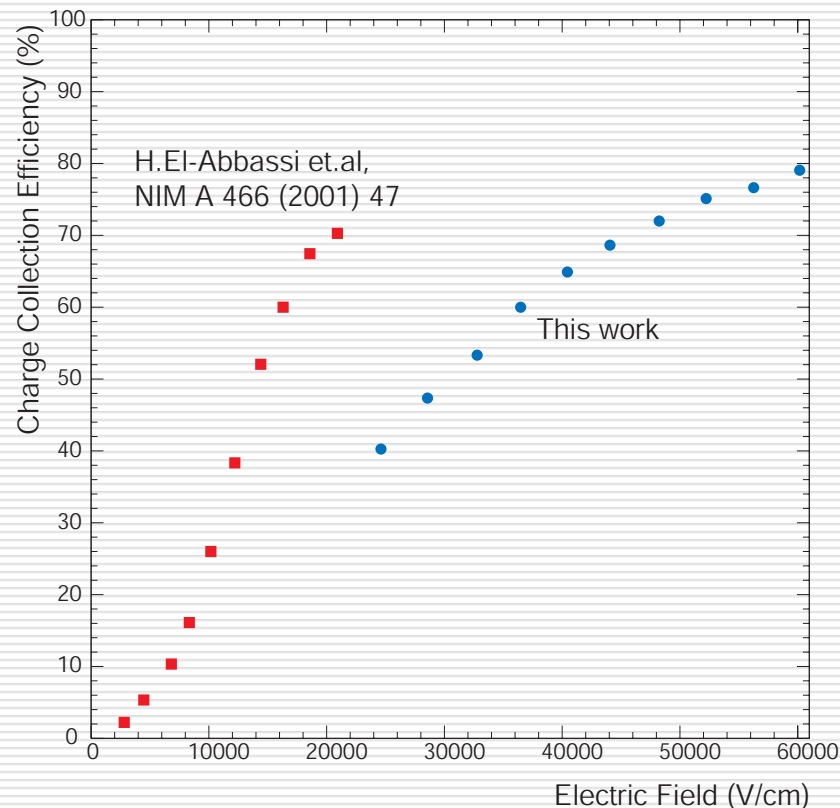
- Siの測定から予想される電荷量は
 $1.42 \times 10^{-13} [C]$
- 観測された電荷量は
 $4.6 \times 10^{-13} [C]$

キャリア生成エネルギー
が異なっている？



線に対する電荷収集効率

□ 電荷収集効率の測定と過去のデータとの比較

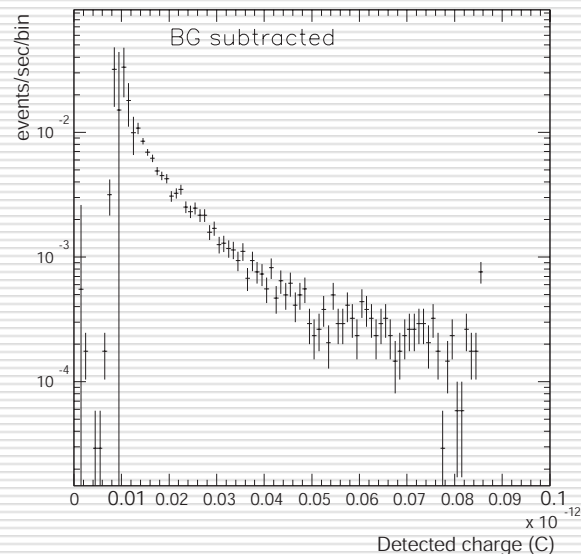
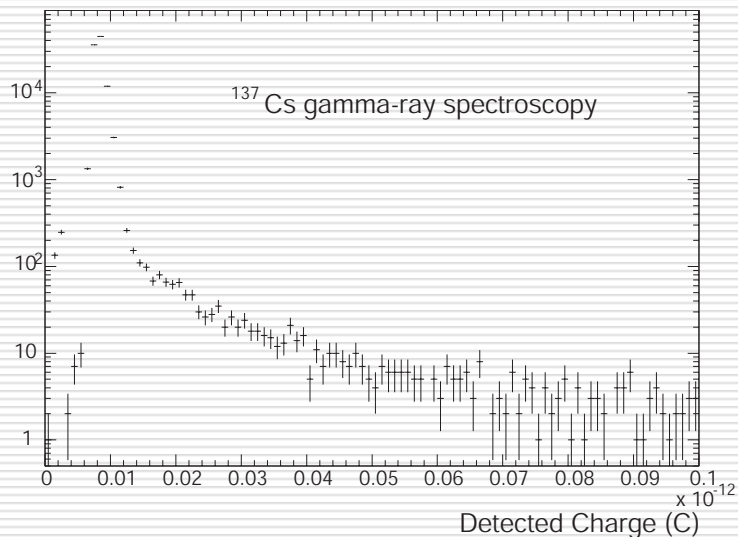
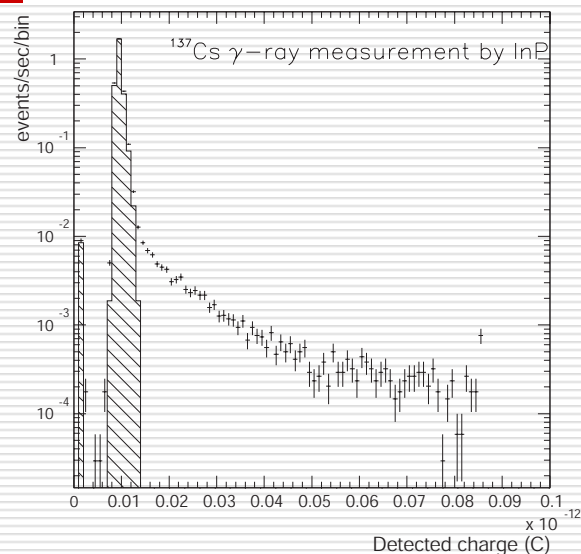


3kVバイアスで80%のCCEが達成

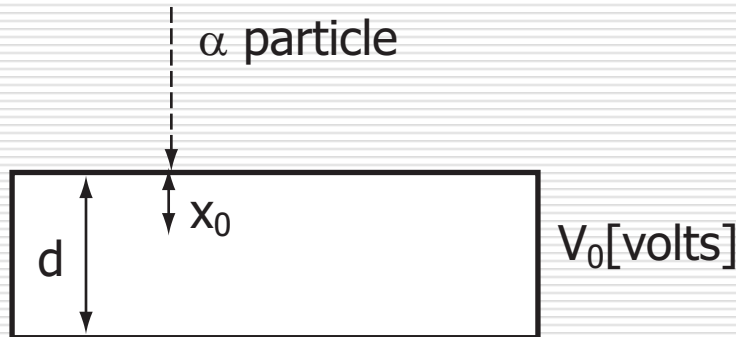
InP SI検出器による 線の測定

□ ^{137}Cs による観測

- 明らかな 線事象を観測
- 但し、コンプトン端が見えない
- 電荷収集効率(CCE)が低い可能性



InP検出器における電荷収集効率



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 α particle

$$E = V_0/d \quad v = \mu E = \mu V_0/d$$

average length $L = \tau v = \mu \tau V_0/d$ τ : carrier lifetime [s]

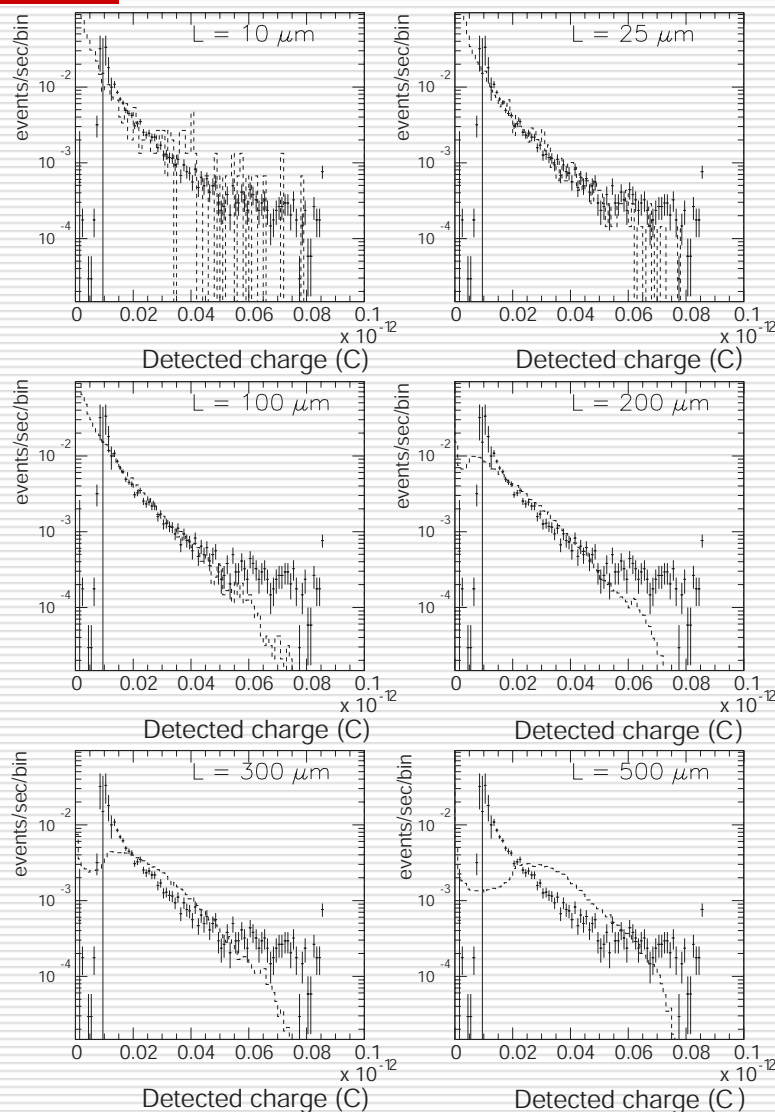
$\mu \tau$ is measured by H.El-Abassi et al. NIMA466(2001)47
 $\mu \tau = 5 - 8 \times 10^{-7}$ [cm^2V^{-1}] (@-21 to 19 degree)

Thus $L = 5 \times 10^{-7} [\text{cm}^2\text{V}^{-1}] \times 1000 [\text{V}] / 500 [\mu\text{m}]$
 $= 0.01 [\text{cm}] \gg x_0$ ($\sim 16 \mu\text{m}$ in InP 4MeV α)

However, it means that average length is not enough to collect all charge

シミュレーションによる 線のスペクトラム

- ^{137}Cs のコンプトンによるスペクトラムをシミュレーション
 - $L = \mu\tau V/d$ (有効領域) をパラメーターとして変化させる
 - スペクトルの形状が有効領域に依存している
 - χ^2 検定 0.15-
 0.8×10^{-13} [c]の範囲で数でnormalize

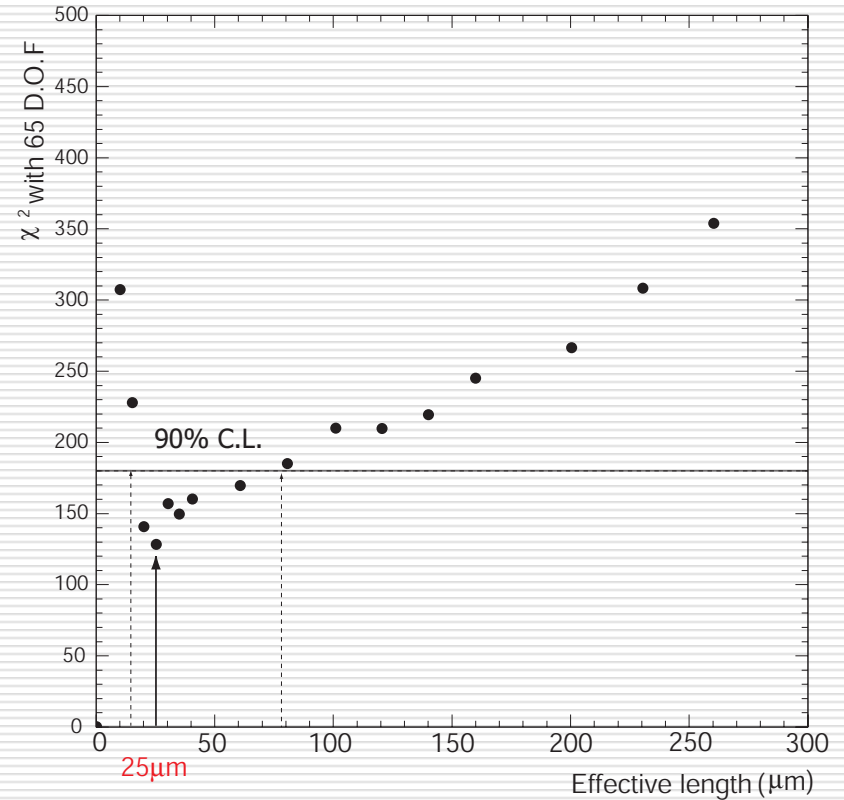


χ^2 分布

□ 有効領域を変化させたときの χ^2 の変化

- $L=25\text{mm}$ @ χ^2 minimum
- 各々の有効領域を使って 線のシミュレーションを行う
- キャリア対生成の平均のエネルギー

$$1.03+0.26-0.11\text{eV}$$



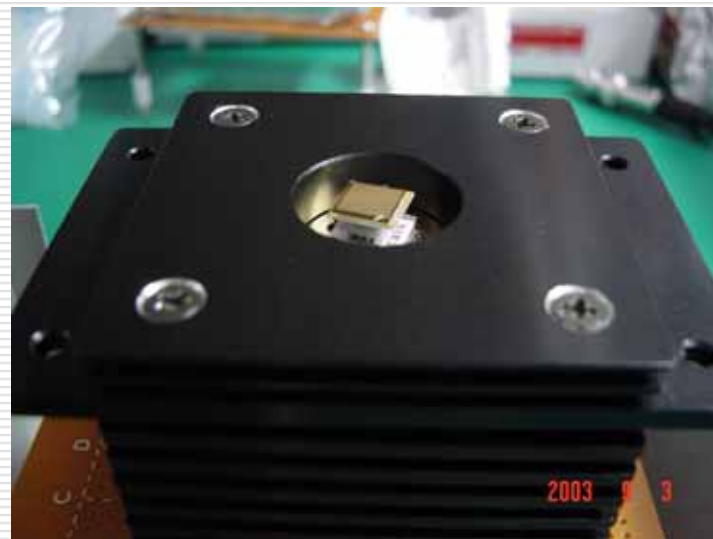
結果

- ❑ 測定装置の改良により **線のシングルピーク**を観測した
- ❑ ^{137}Cs の 線を検出したがコンプトン端は観測されなかった
- ❑ シミュレーションの結果、有効領域は **$25+48-7\mu\text{m}$** (90%C.L.)であり、検出器全体($500\mu\text{m}$)には到達していない
- ❑ キャリア対生成の平均エネルギーは **1.03eV** の値が得られ、これまで知られていた **4.2eV** より小さい結果であった
- ❑ 以上の結果から、バイアス3kVにおける 線の電荷収集効率は**80%**が得られた。

今後の予定

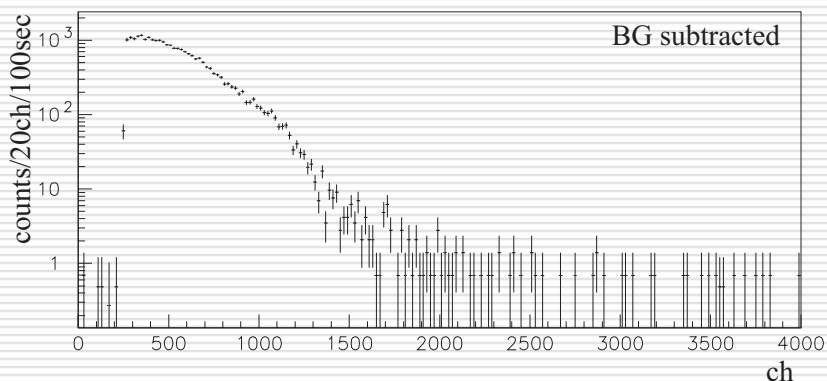
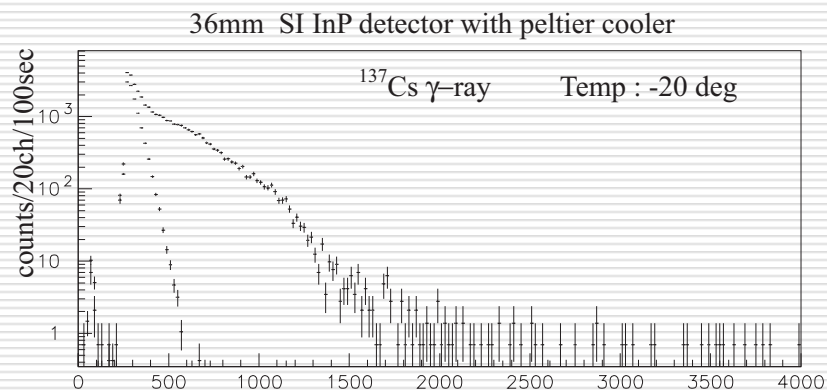
- ❑ 有効領域の拡大を図るため
 - **-40** 程度に冷却する
 - バイアスを5kVで印可し電場を上げる
 - $\mu\tau$ が**100倍**大きいと言われているInP(Mn/Ti) SI基板の使用 (Semicond. Sci. Techno. 16(2001)1002)
- ❑ 電極の効果(ノイズの減少、CCE増加等)を確認する
- ❑ 冷却によるノイズ減少を再確認する

ペルチェ冷却型SI InP半導体検出器



低温時の ^{137}Cs ガンマ線のスペクトル

- ❑ ペルチェ冷却型SI InP検出器による ^{137}Cs 線 (662keV)の測定



^{137}Cs の線は観測しているが、**コンプトン端 (440keV)が見えない**

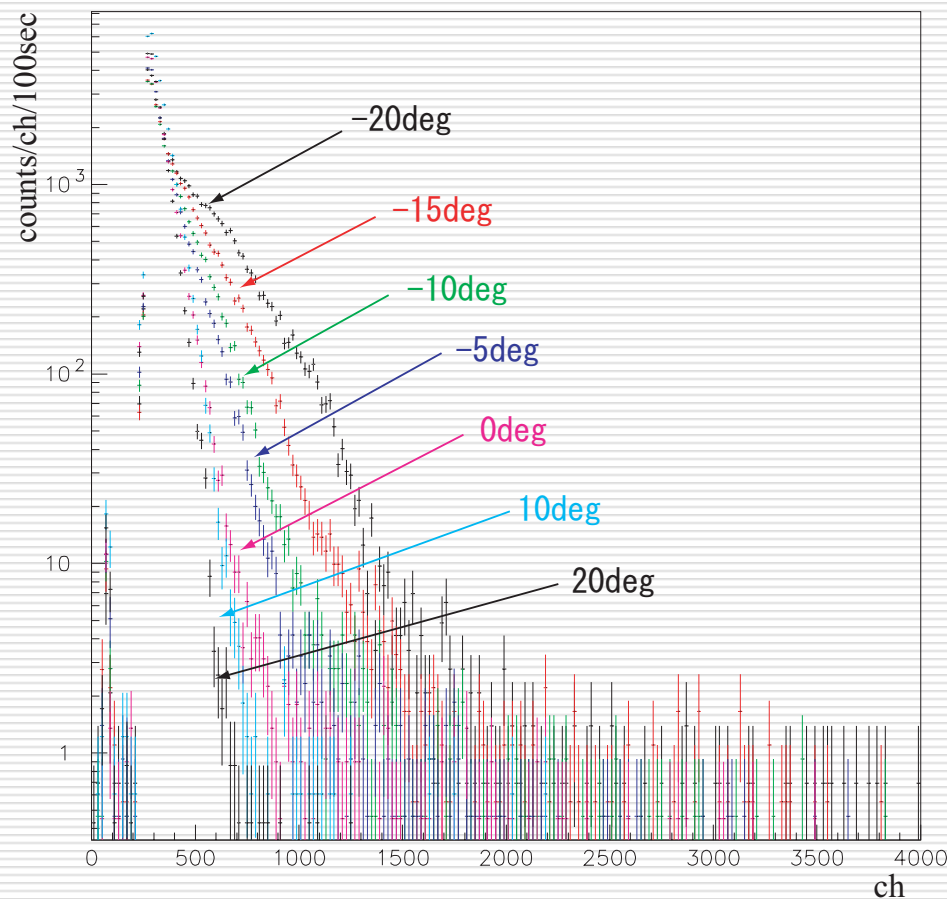
cf Range ~ 300 μm in InP



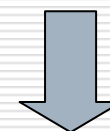
有効領域はまだ十分広がっていない

スペクトラムの温度依存

- ❑ ペルチェ冷却型SI InP 検出器による ^{137}Cs 線の波高分布の温度依存性



0 以下でガンマ線の
信号が観測されている



CCEの改善が観測
されている