

「インジウムを用いたpp - ^7Be 太陽ニュートリノ実験」

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
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

1. 目的

1996年に開始したスーパーカミオカンデ(SK)は、大気ニュートリノの観測データから1998年にミューニュートリノ振動の証拠を発見した。その後に行われたK2K実験では、KEKの1GeVPSで生成した ν_μ ビームをSKに入射した結果、観測数は期待値に対して有意に低く、エネルギー分布も歪んでいたことから、2004年6月にミューニュートリノ振動を99.99% C.L.で確定した。一方で、SKは ^8B 太陽ニュートリノのフラックスおよびエネルギー分布の観測から電子ニュートリノ振動がLMAである可能性をいち早く示唆し、2001年に発表されたSNOの荷電カレントによる観測結果と総合すると電子ニュートリノ振動が確立するという画期的成果を得た。又、全ての太陽ニュートリノ実験の結果を基にニュートリノ振動に対するglobal fitを施すと、LMA領域にニュートリノ振動解が存在していることがわかり、KamLANDの原子炉ニュートリノの観測結果もそれを強く支持している。以上のことから、次世代の太陽ニュートリノ実験の主な目的として、以下の2点が挙げられる。

- 1) ニュートリノ振動の混合角 θ_{12} の精密な測定
- 2) 恒星進化論の検証等の太陽物理の総合的研究

電子ニュートリノ振動における混合角 θ_{12} の精密測定には、ppサイクルの初期過程で生成されるpp及び ${}^7\text{Be}$ ニュートリノフラックスやエネルギー分布を正確に測定することが重要である。これらのニュートリノはエネルギーが1MeV以下と低いため、技術的な問題だけでなく自然バックグラウンドが大量に存在するため、測定が困難である。現在尤もらしいILMA解では、5MeV以下で電子ニュートリノの存在確率が図1のように増す傾向があり、その形状が混合角 θ_{12} に強く依存しているため、ppと ${}^7\text{Be}$ ニュートリノのフラックス(とエネルギー分布)を測定出来る実験が求められている。荷電カレント反応を用いた実験が混合角 θ_{12} の測定に有利である。

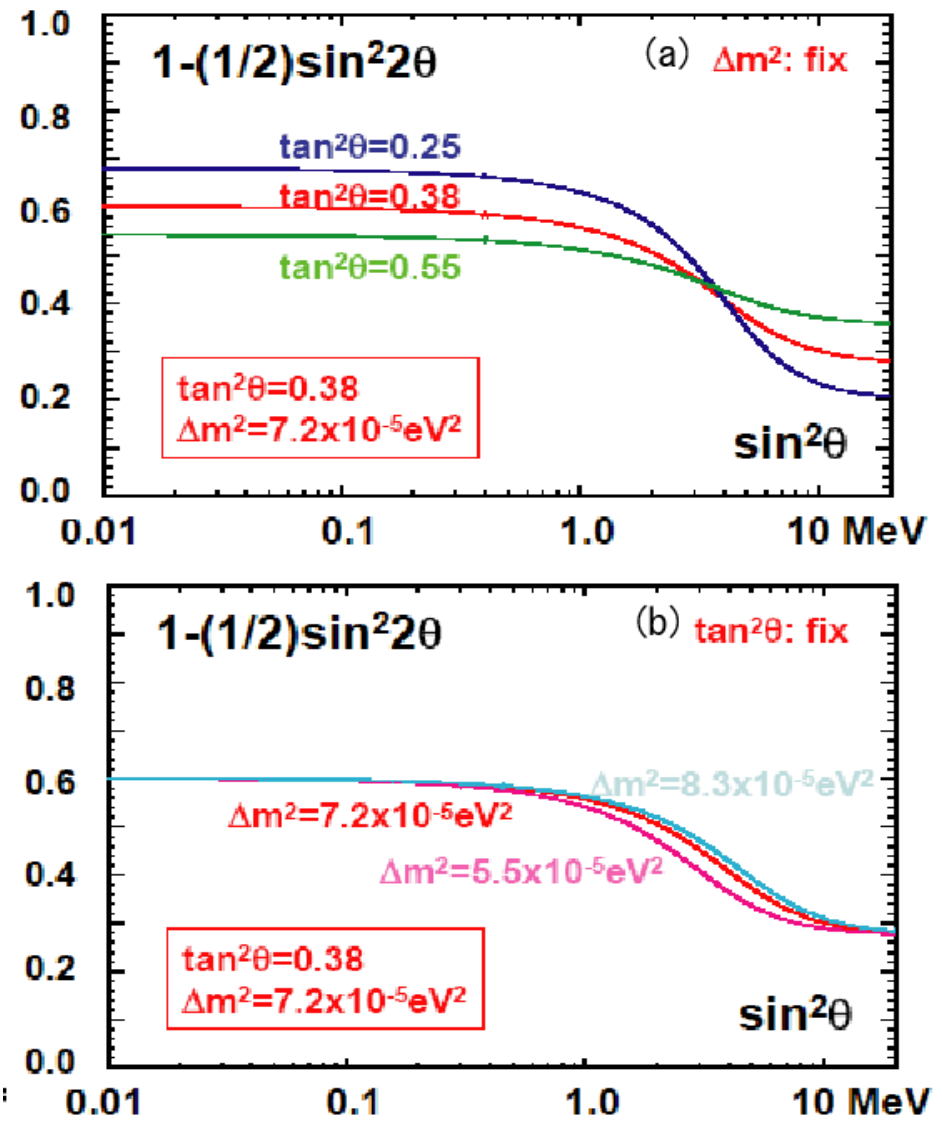
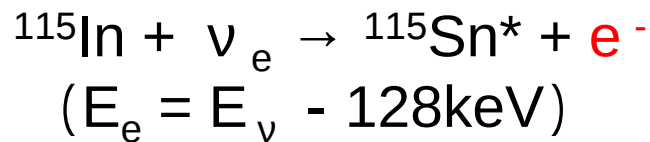


図1 (a) Δm^2 を固定して $\sin^2 \theta$ を変化させた場合、(b) $\sin^2 \theta$ を固定して Δm^2 を変化させた場合の、電子ニュートリノの残存確率 $P_{\nu e}$ のエネルギー依存性 (Y. Suzuki@Neutrino2004)

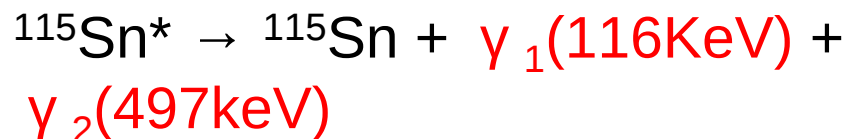
2. インジウムを用いた太陽ニュートリノ実験の原理

1976年、R.Raghavanは ^{115}In が低エネルギー太陽ニュートリノを捕獲する反応断面積が大きいと提唱し、4tonのインジウムで1年あたりpp- ν が377事象、 ^7Be - ν が102事象である。

^{115}In による電子ニュートリノ捕獲反応は



捕獲後の Sn^* は励起状態で、半減期4.76 μs で基底状態に遷移する。



崩壊に伴い2本の γ 線を放出するが、 γ_1 は50%の確率で内部転換を起こす。

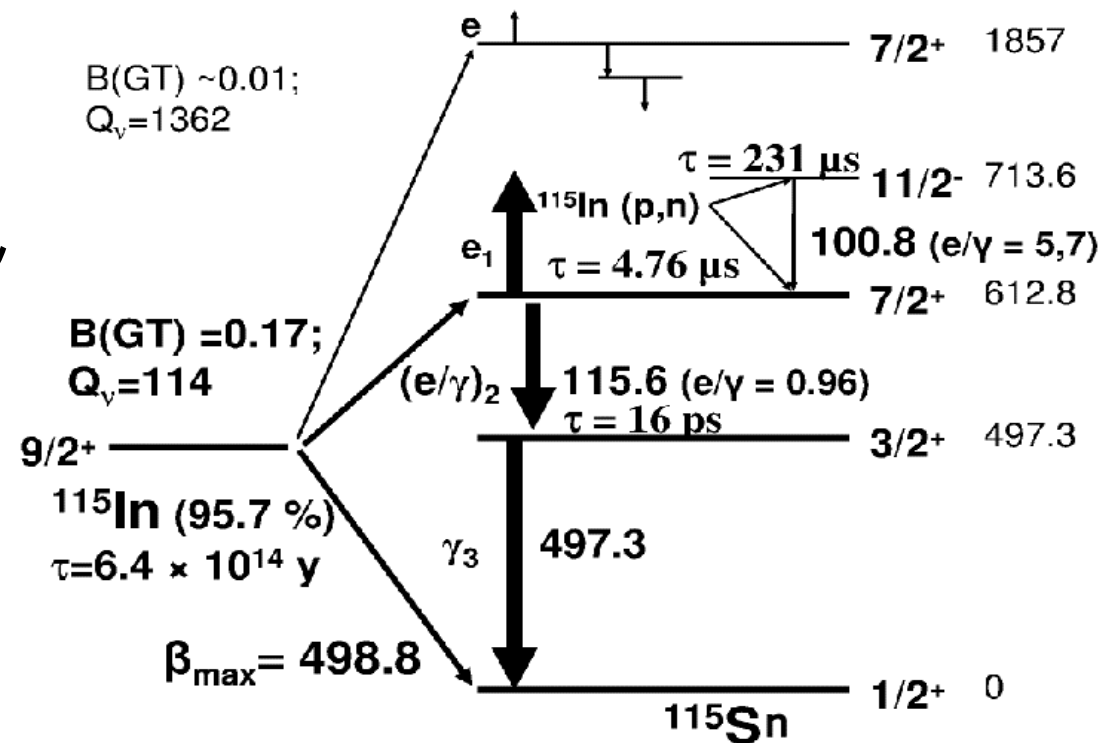
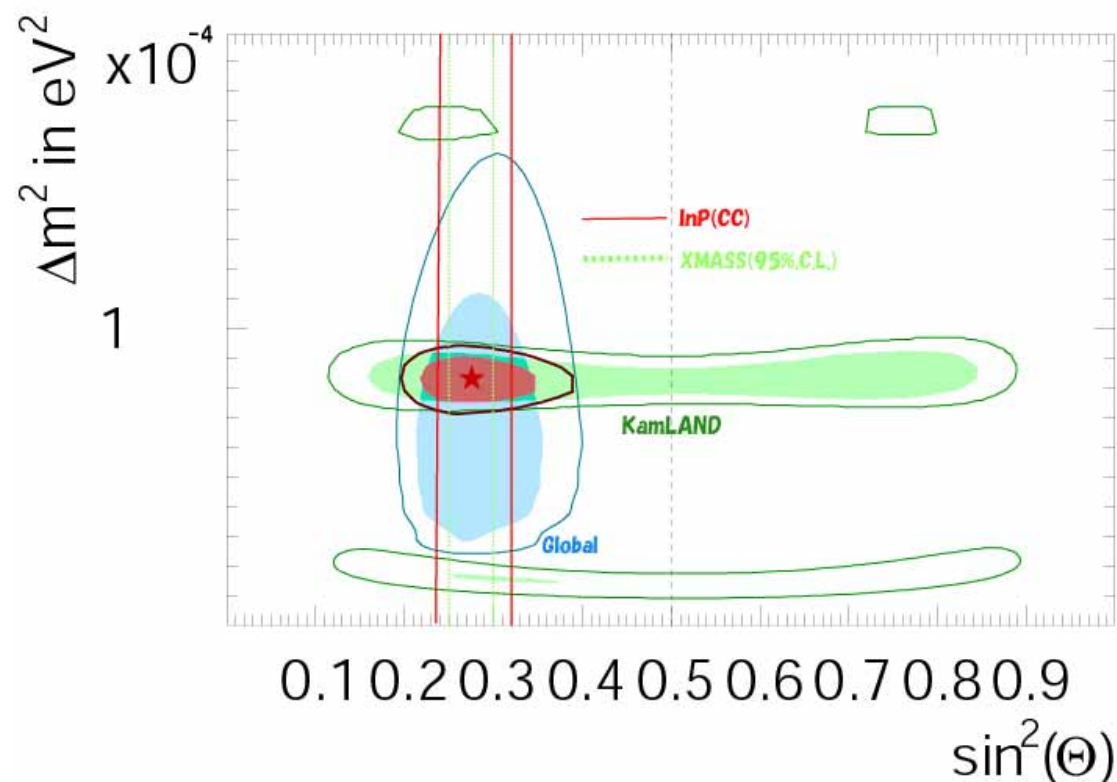


図2： ^{115}In の崩壊式

電子ニュートリノ、つまり低エネルギーのpp/ ^7Be 太陽ニュートリノを捕獲する反応で、Q値は128keVである。励起状態の ^{115}Sn は、半減期4.76 μs で基底状態に崩壊し、2本の γ 線を放射する。また、 ^{115}In はそれ自身で、 $6.4 \times 10^{14} \text{ year}$ という半減期で ^{115}Sn の基底状態へと β 崩壊する。4 t の ^{115}In では、719kHzになる。

図3は、4tonのインジウムによりpp太陽ニュートリノを5年間測定した場合のニュートリノ振動の混合角 θ_{12} の判別感度の図である。期待されるイベント数は1885イベントである。ニュートリノ振動を仮定し、検出器のエネルギー閾値を100keVとすると、約720イベントとなる。統計誤差とSSMの理論誤差を考慮した全体の誤差は3.9%である。インジウムの反応が荷電カレントのみの反応なので、赤線の感度となり、XMASS実験に近い感度になることがわかる。



図：InP太陽ニュートリノ実験を5年間測定した場合のニュートリノ振動の混合角 θ の判別感度の図。global fitで求めた95%C. L. の許容解とKamLANDの結果による許容解も示している。赤線はpp/ Beニュートリノを独立測定できた場合。緑線はXMASS実験の場合である。

3. プロトタイプ SI InP放射線検出器

使用したFeドーパの半絶縁性InPウェハは、米国AXT社のVGF法 (Vertical Gradient Freeze) 結晶成長によるもので、直径2インチ、厚さ $500 \pm 25\text{mm}$ の基板である。プロトタイプ SI InP放射線検出器は、浜松ホトニクス(株)固体事業部の協力で作された。現在のプロトタイプ検出器の描写図と実際の表面の写真を図4に示す。電極はオーミック接合により、接触している。

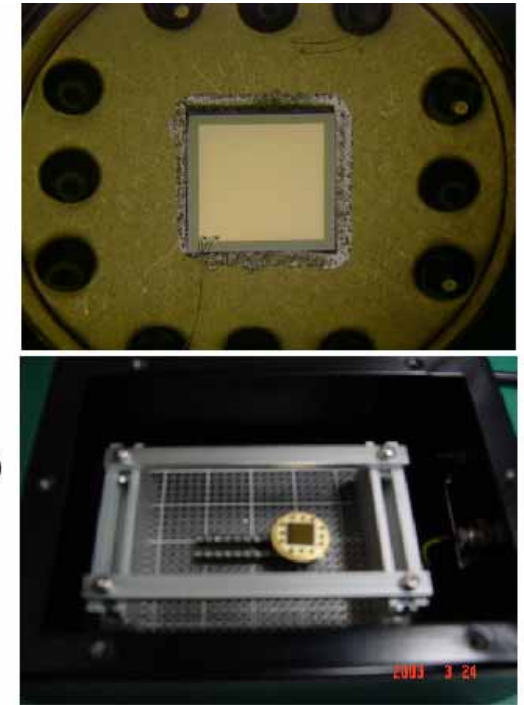
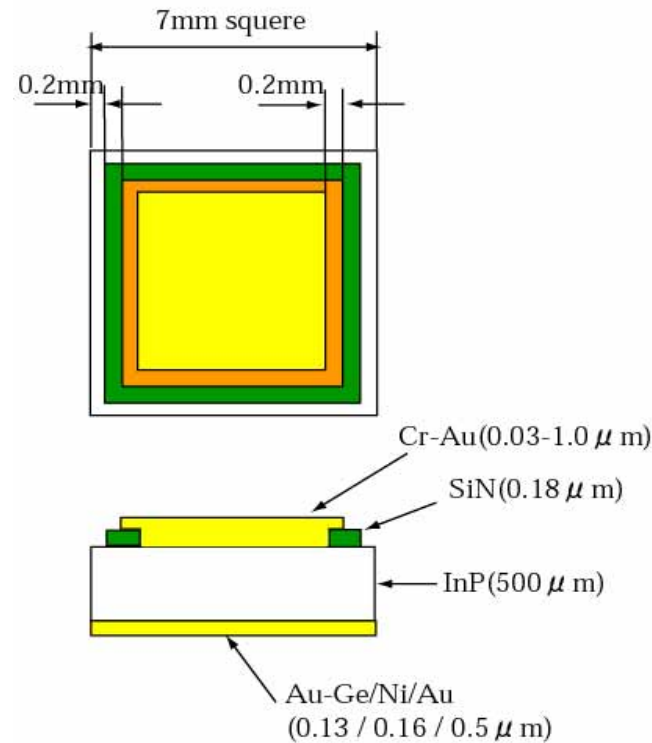


図4：プロトタイプ検出器

左図：プロトタイプ検出器の描写図（旧電極）
上部の電極のサイズは $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ です。電極と InP の接合部はオーミック接触によって作られています。

右図：上がプロトタイプ検出器を上から見た写真
下がプロトタイプ検出器をテストベンチに据え付けた写真

検出器は全体で5種類存在する。それぞれを表のように区分する。

検出器番号	電極	電極面積	InP厚さ
No.1 - 6	旧タイプ	3mm × 3mm	500μm
No 7 - 12	旧タイプ	6mm × 6mm	500μm
No.13 - 16	新タイプ	6mm × 6mm	200μm
No.17 - 18	新タイプ	3mm × 3mm	500μm
No.19 - 20	新タイプ	6mm × 6mm	500μm

(旧タイプの電極 Cr - Au、Au - Ge/Ni/Au
新タイプの電極 Au - Zn/Au、Ti - Au)

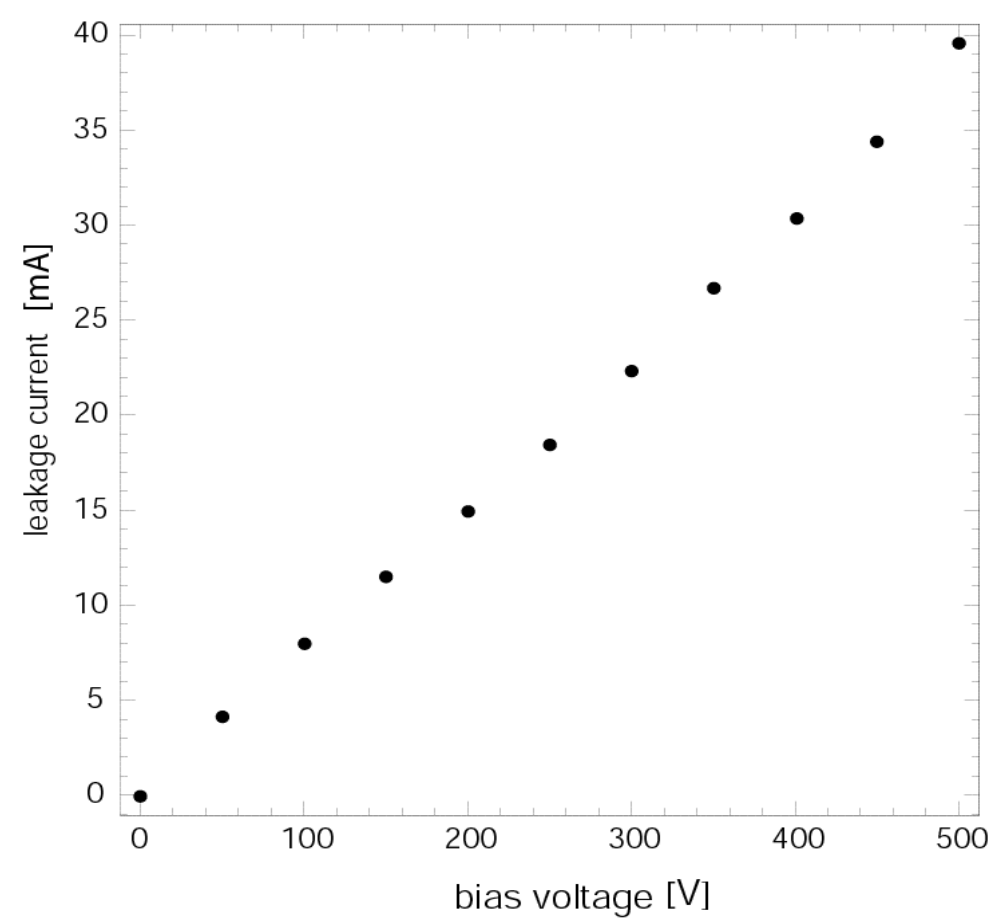


図 5：暗電流のバイアス依存性

図6は、神岡宇宙素粒子研究施設に敷設した超低バックグラウンドGe検出器によって測定したInP結晶に含まれるU/Th系列による γ 線のエネルギースペクトルである。

InP結晶の量は4.7gであり、 ^{115}In 3.7gに相当する。すでに知られているピーク値を用いて計算すると、InP結晶に含まれるU/Th系列は、それぞれ $5 \times 10^{-11}\text{g/g}$ 、 $3 \times 10^{-11}\text{g/g}$ 以下になる。これは、その素材自身がとてもクリーンであり、そして放射線源により発生するバックグラウンドがごくわずかであることを示す。

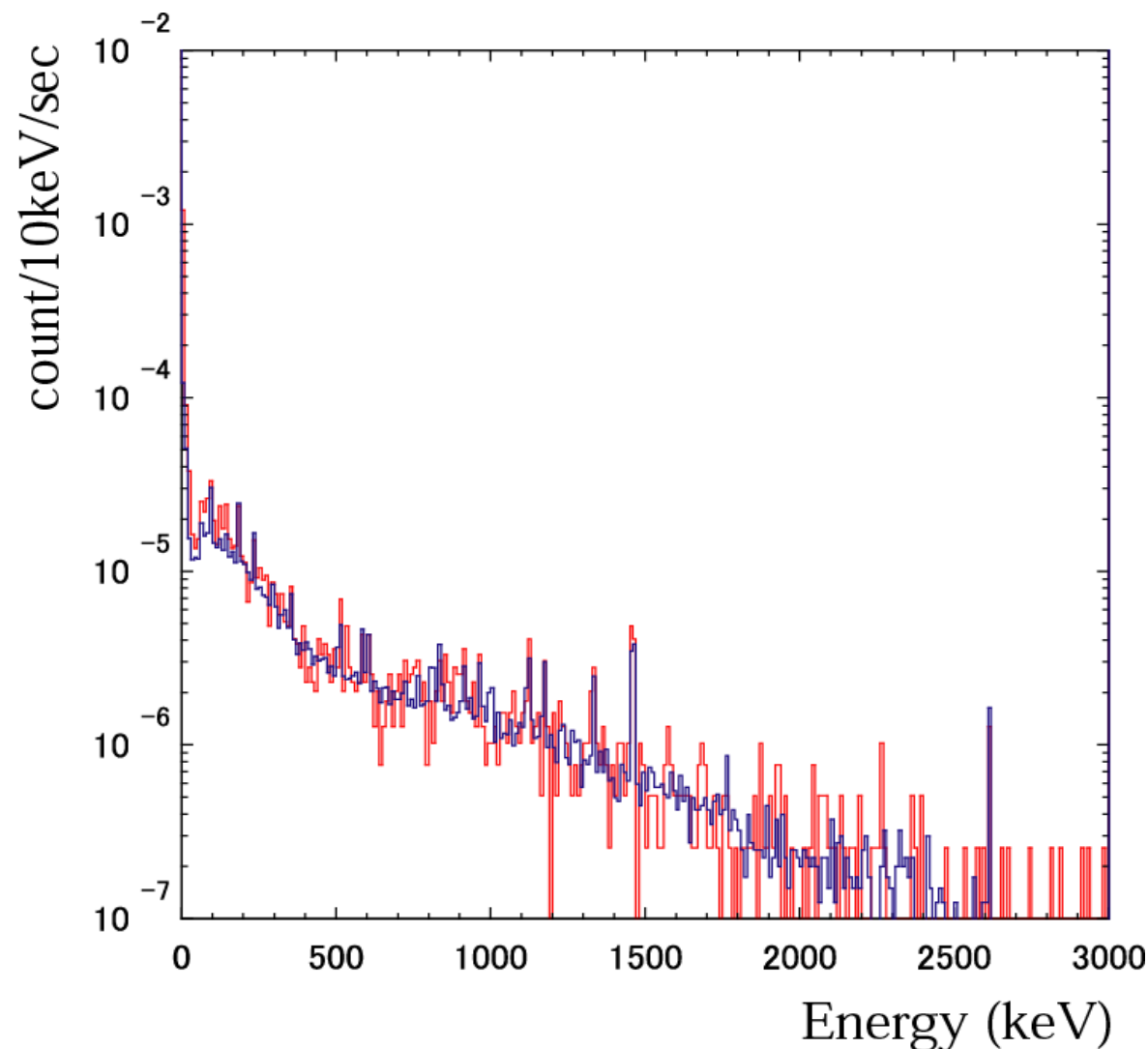


図6：超低バックグラウンドGe検出器によって測定されたInP結晶に含まれているU/Th系列から出てくる γ 線のエネルギースペクトルの図。青線及び赤線はそれぞれ結晶有り及び無しの場合

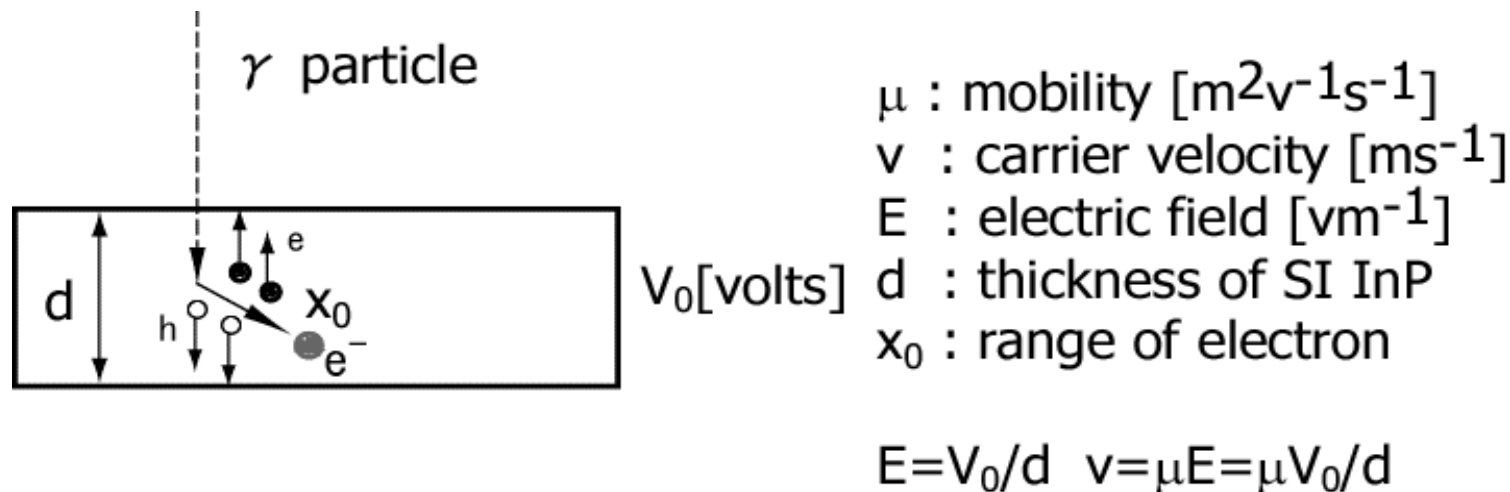
4. 放射線による反応

γ 線による放射線応答性を測定した。

反応した電子がエネルギー損失し、電子・ホール対を生成する。

電子・ホールの電荷は、図7の拡散長に従い収集される。

拡散長は、キャリアーの移動度と寿命と電場に比例する。



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

averaged energy of e/h creation : ε

charge $Q_{\text{total}}[\text{C}] = (\text{electron energy})/\varepsilon * e$

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

図 7 : 電荷収集の原理

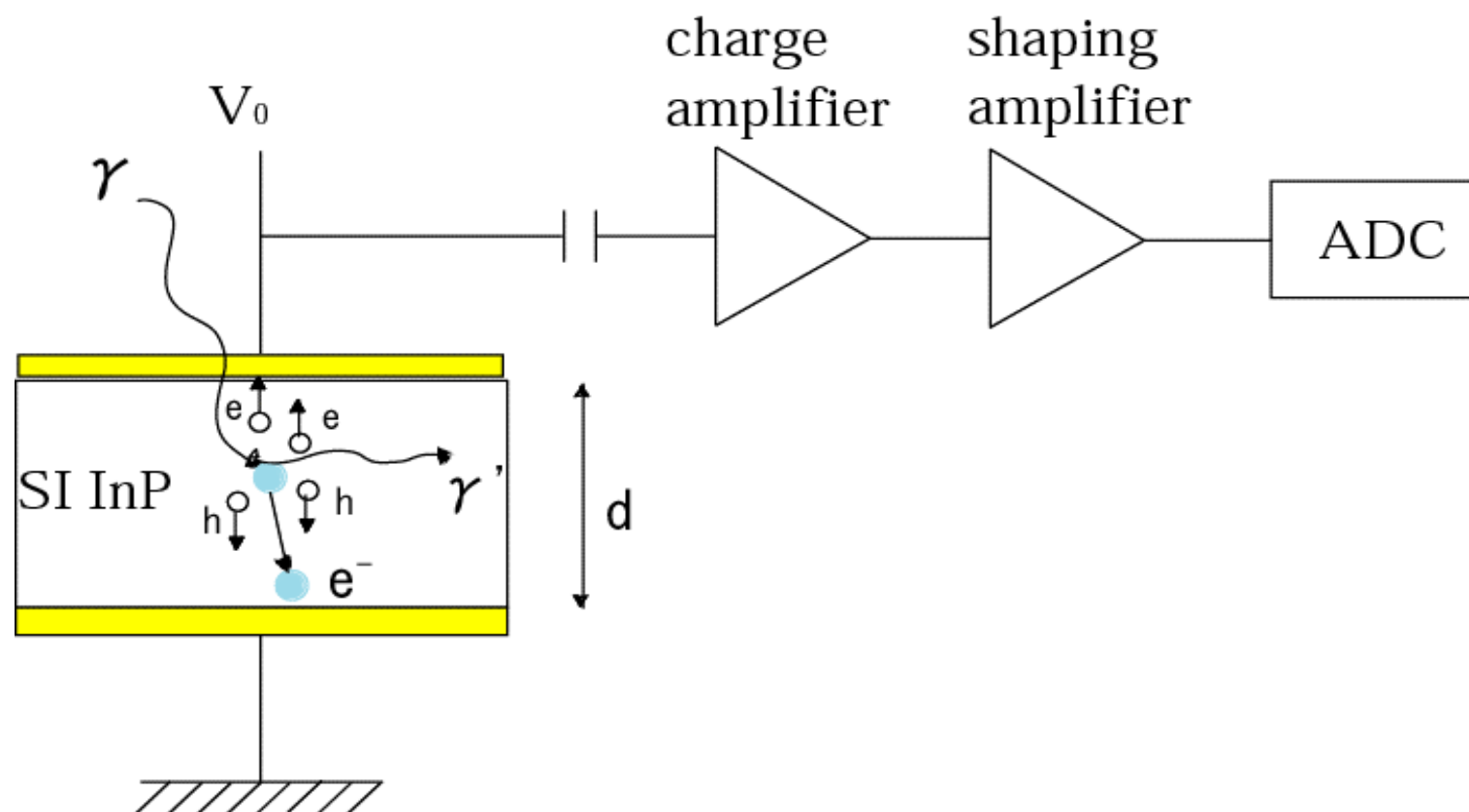


図8:SI InPプロトタイプ検出器のセットアップ配置

高電圧は上部の電極で正極に印加される。電極ではオーミック接合されている。

使用した γ 線源は ^{133}Ba 、 ^{57}Co 、 ^{137}Cs の3種類である。図9にNo.7で観測された γ 線のエネルギー分布を示す。

^{133}Ba の356keV(62%)の γ 線のコンプトン端および光電ピーク、および276keV(7%)、302keV(18%)の γ 線の光電ピークが観測されている。ここで、図9の点線は電子・ホール対生成エネルギーを0.3eV、キャリアの拡散長を600 μm のシミュレーションである。

InPのバンドギャップから計算される電子・ホール対生成エネルギー4.2eVの約1/10であり、Geに匹敵する大量の電荷を生成していることを世界で初めて確認した。

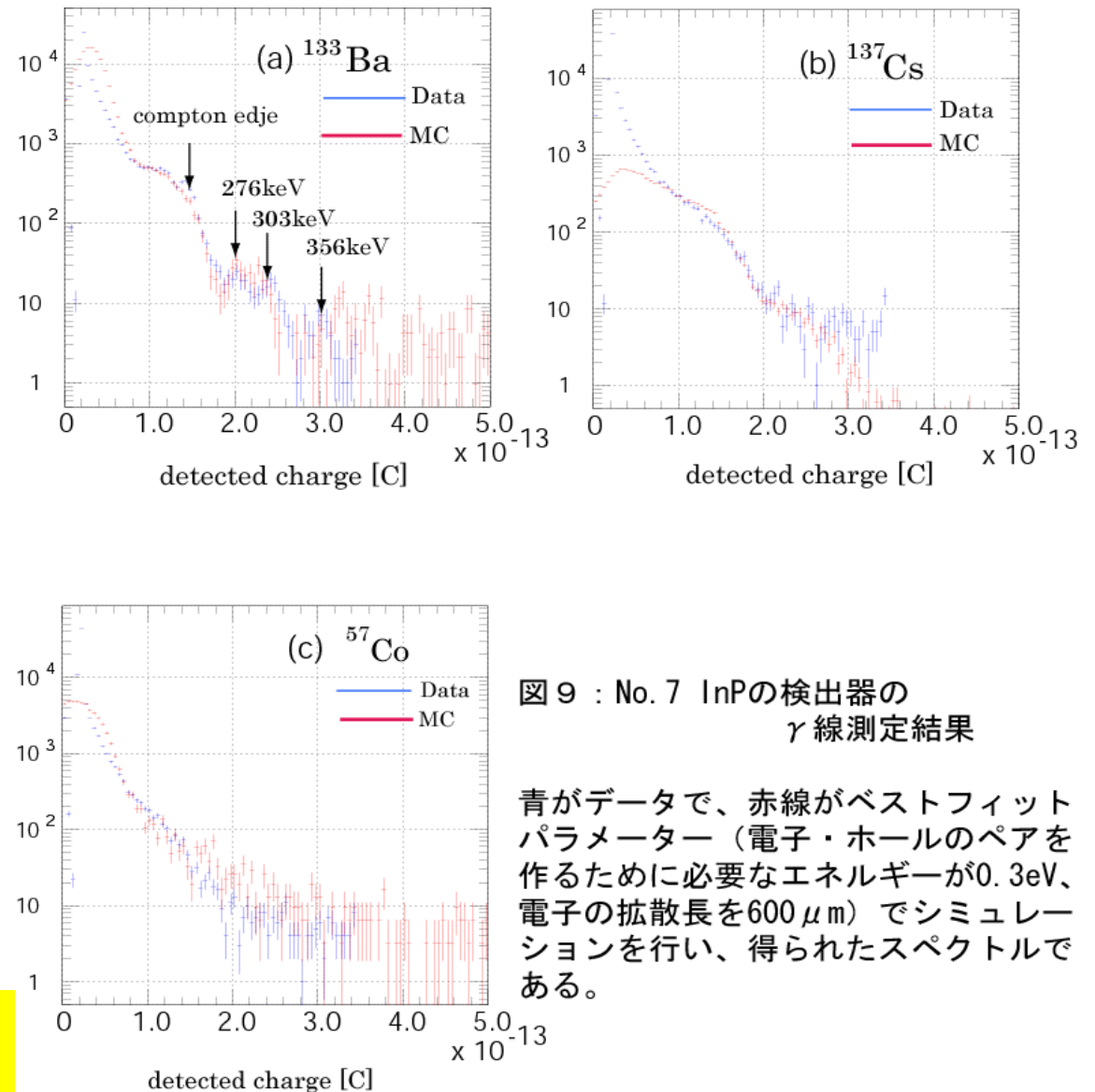


図9 : No. 7 InPの検出器の γ 線測定結果

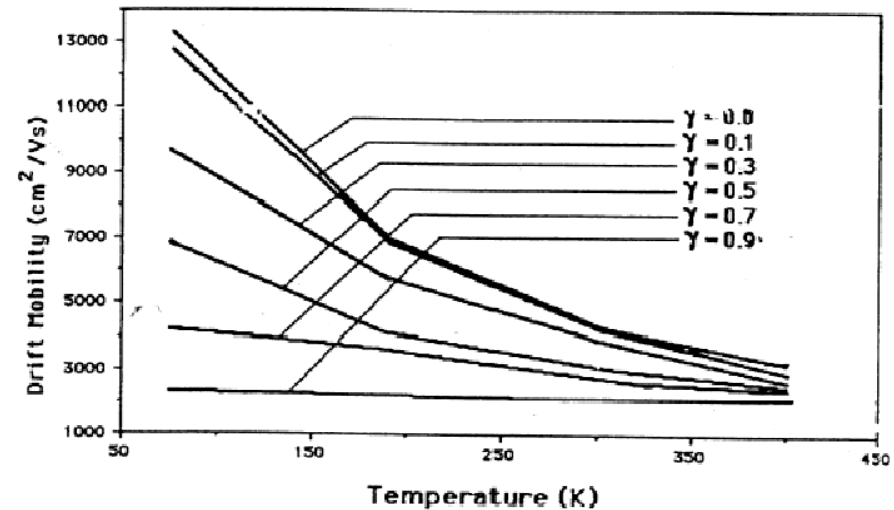
青がデータで、赤線がベストフィットパラメーター（電子・ホールのペアを作るために必要なエネルギーが0.3eV、電子の拡散長を600 μm ）でシミュレーションを行い、得られたスペクトルである。

今後の課題及び予定

(ア) 検出器の個体差が大きいため、
電極蒸着の方法を確立しなければならない → ショットキー蒸着を行う

(イ) 大量の電荷を生成しているにも
拘わらず、拡散長が短いため100keV
付近の γ 線が見えない、分解能も悪い → 検出器を冷却

- (A) 拡散長を拡大する
- (B) 熱雑音を低下する



Ref: J. Costa and A. Peczalski, *J. Appl. Phys.* 66(2), (1989) p674-679

図10：移動度の温度依存性

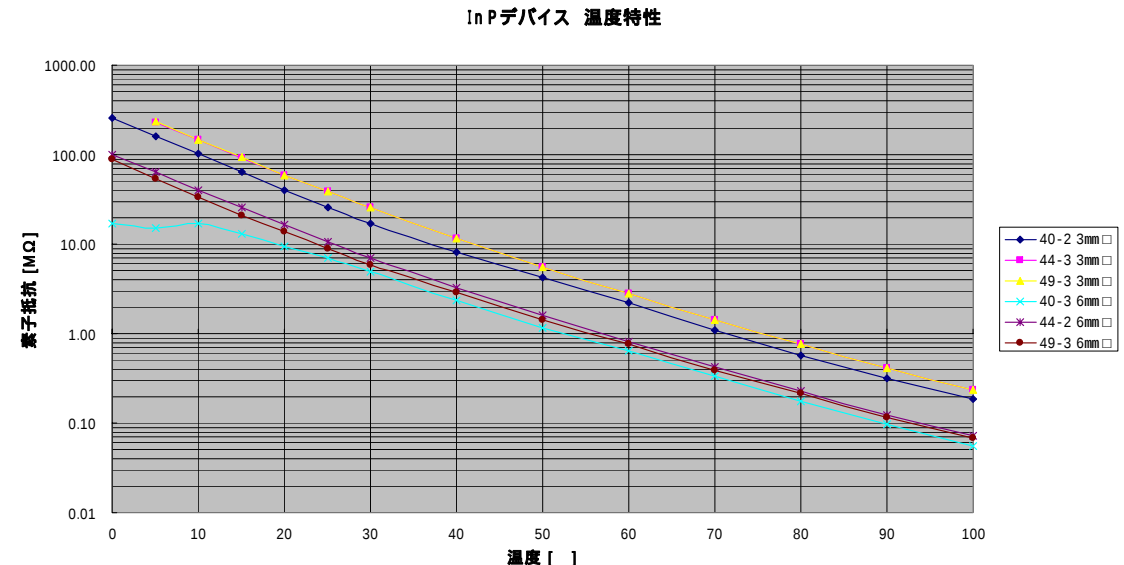


図11：抵抗の温度依存性

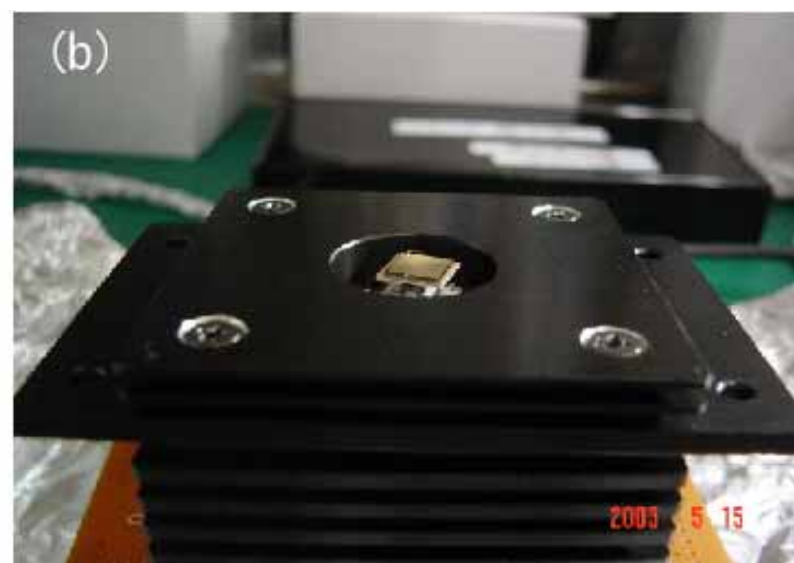
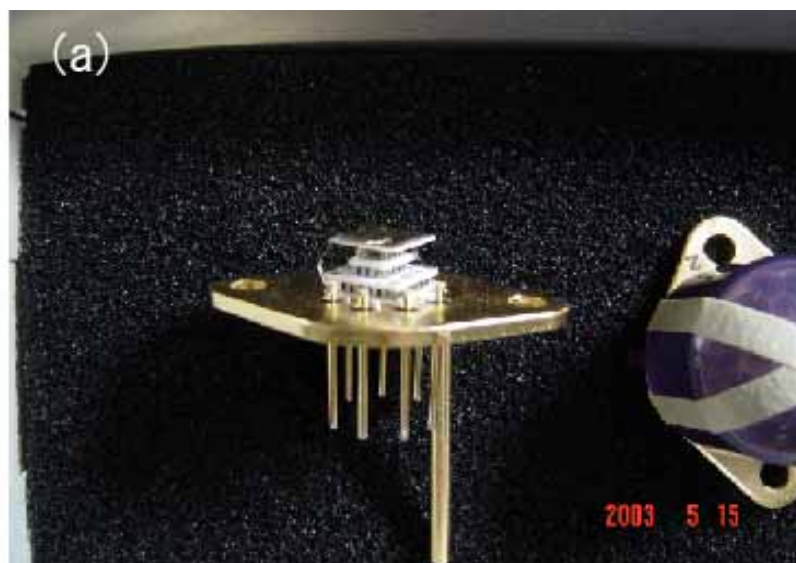


図12 : (a) ペルチェにマウントした新プロトタイプInP SI検出器
(b) 放熱板にマウントした検出器
(c) 真空チェンバーに入れた検出器
(d) 真空ポンプに接続した冷却システム全体

5. 太陽ニュートリノInP実験

10cm × 10cm × 0.05cmのbulkサイズ
SI InP検出器を仮定する。

検出器の重さ 24g ($\rho = 4.79\text{g/cm}^3$)

→ インジウム19gに相当

(^{115}In の自然存在比 約96%)

^{115}In を4トン使用すると仮定すると、
220,000チャンネルのモジュールが必要となる。このモジュールは、
10mm × 10mm × 500 μm の検出器
100個を111mm × 111mmの大きさの
基板上に配置し、バイアス電圧を並列
印可し、信号は一つにまとめて取り出
す多素子型構造を考える。このモジュール
25個を5列 × 5列で基板上に配置した
ものを一層と考え、その層を10層重
ねたものをスーパーモジュールと呼ぶ。

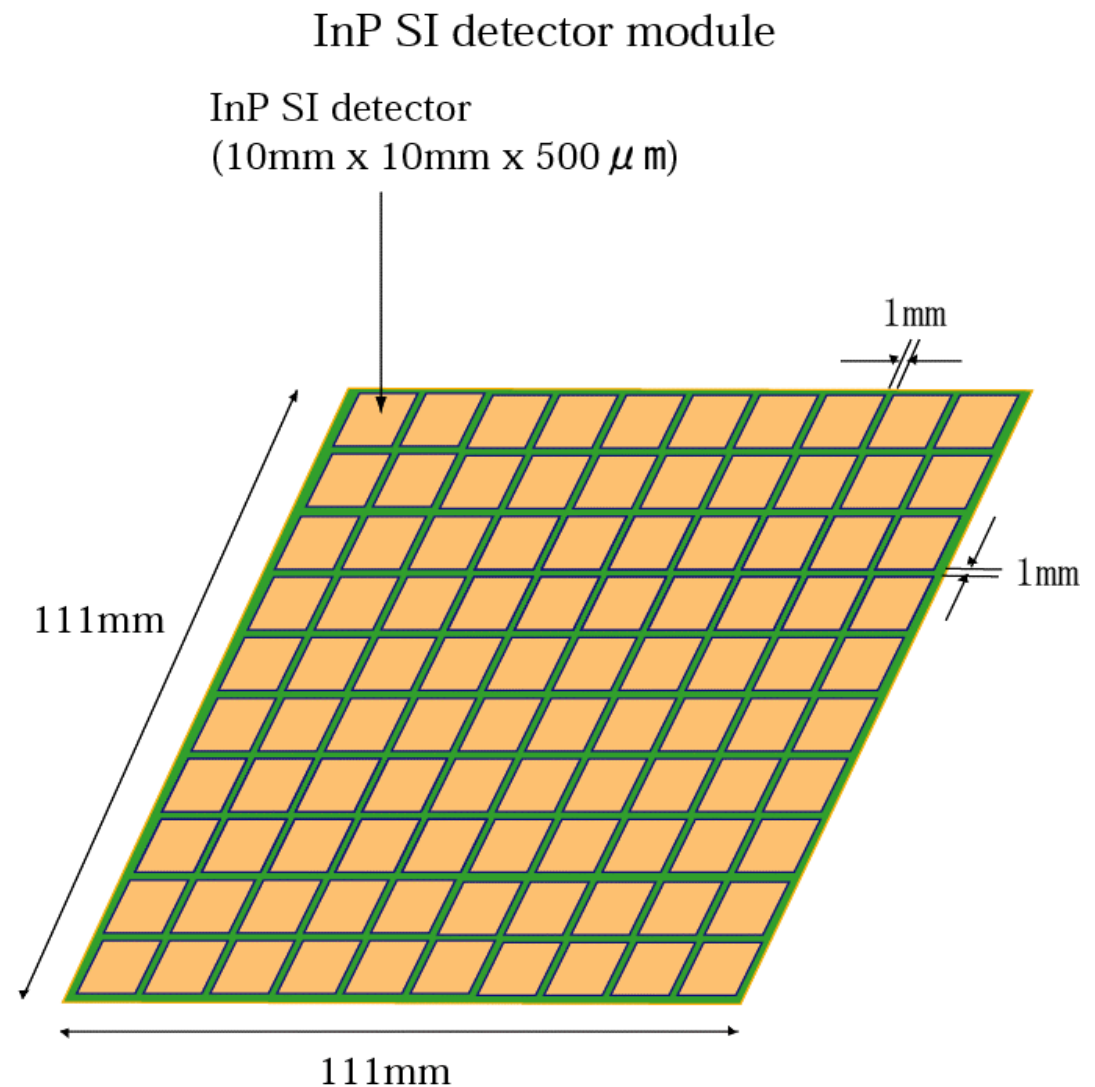


図13：モジュール検出器

InP SI検出器モジュールを拡大した図で、10列 × 10列
計100個のInP SI検出器からなっています。

スーパーモジュールは、上下に互い違いにNaIシンチレータを設置し、同時計測により突き抜けミュオンを選別するトリガー回路を構築できるという特徴がある。

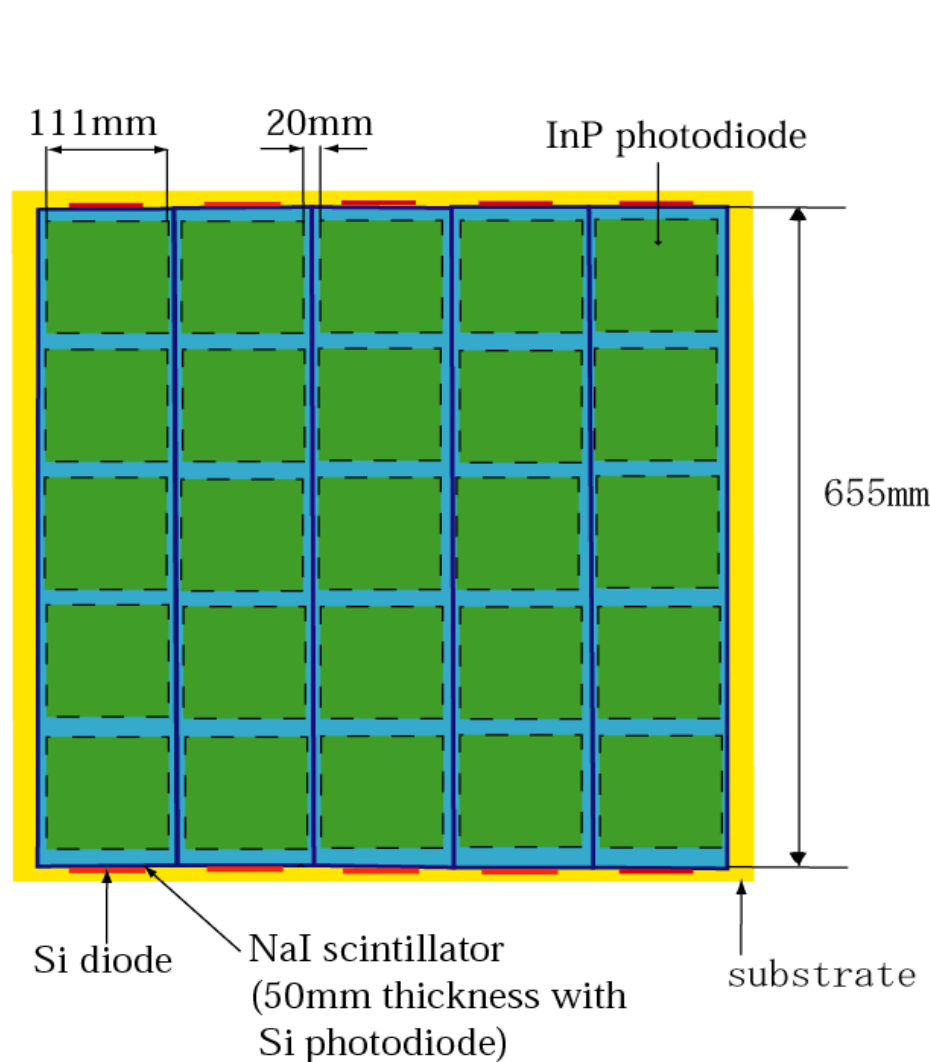


図14: スーパーモジュールの上面図

この上から見た1層を10層重ねたものが1個のスーパーモジュールです。1層は5列×5列 計25個のモジュールからなっています。

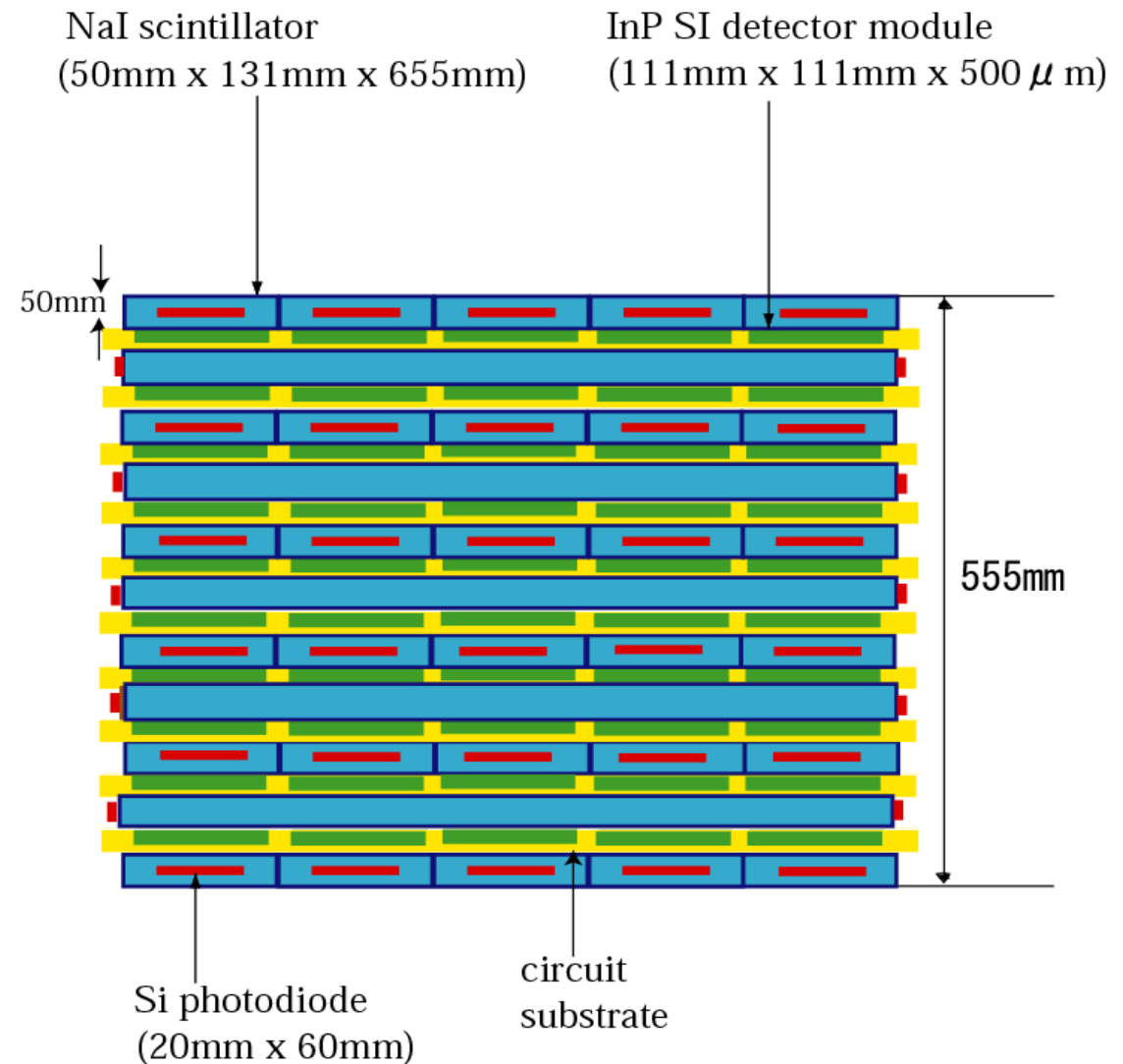


図15: スーパーモジュールの側面図

これはスーパーモジュールを横から見た図です。NaIシンチレーターを1段に5個ずつ置き、互い違いに並べています。

スーパーモジュール1331個を積み重ねた時の全体像

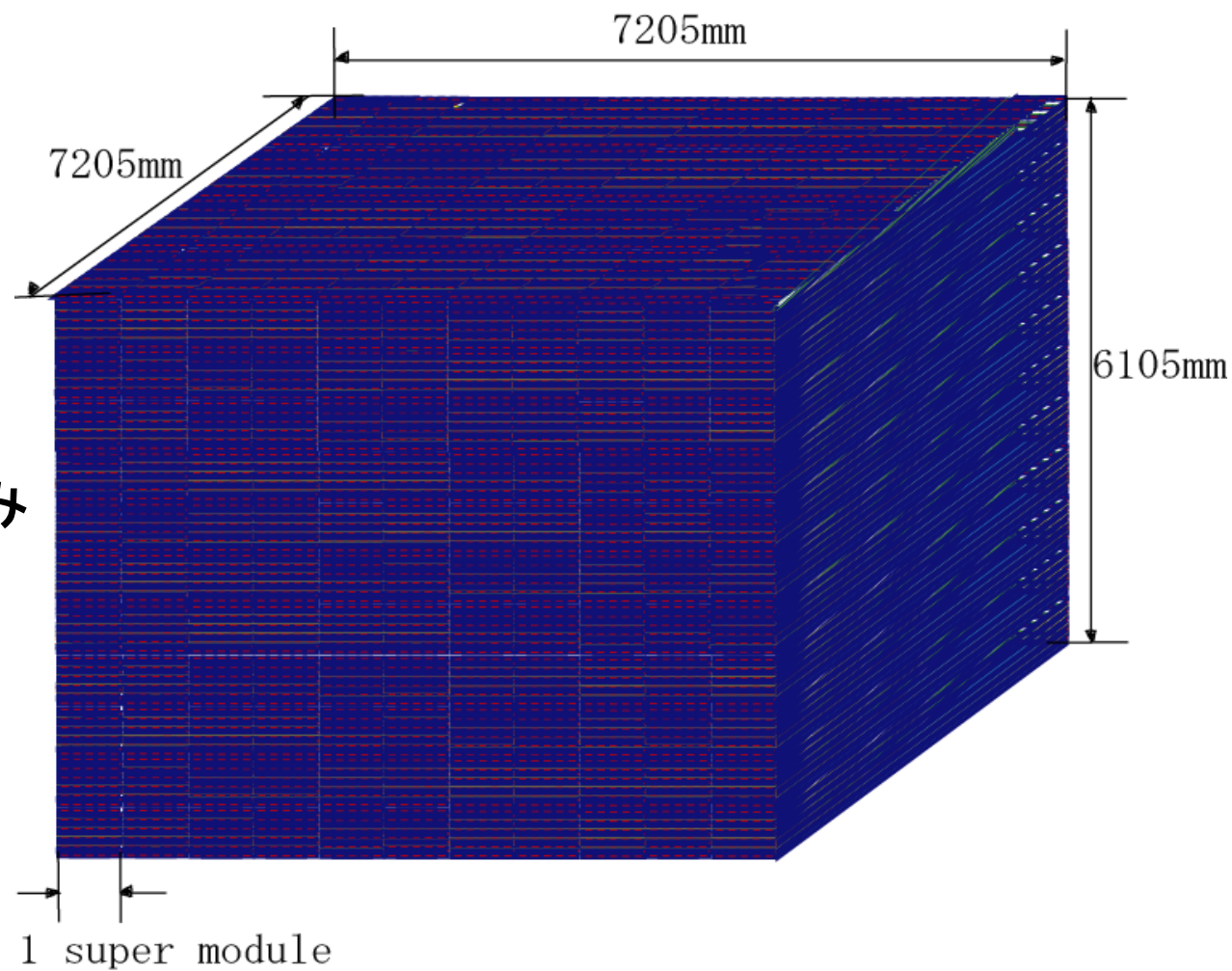
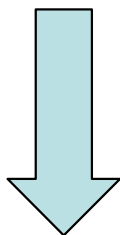


図16 : 11 x 11 x 11個 計1331個のスーパーモジュールを
積み重ねた時の全体図

図17は、1スーパーモジュールの中心でppニュートリノ観測をした場合のシミュレーションである。ここで検出器は100keVで10%のエネルギー分解能であると仮定した。中心に位置するモジュール検出器は、捕獲反応からの放出電子と、 $^{115}\text{Sn}^*$ からの γ_1 の一部と γ_2 のコンプトン電子を観測しており、周りのNaIシンチレータは、残りの γ_1 と γ_2 の残りを観測している。但し、 γ_1 の内部転換電子は考慮していない。



ppニュートリノ検出効率は、
約80%と予想される。

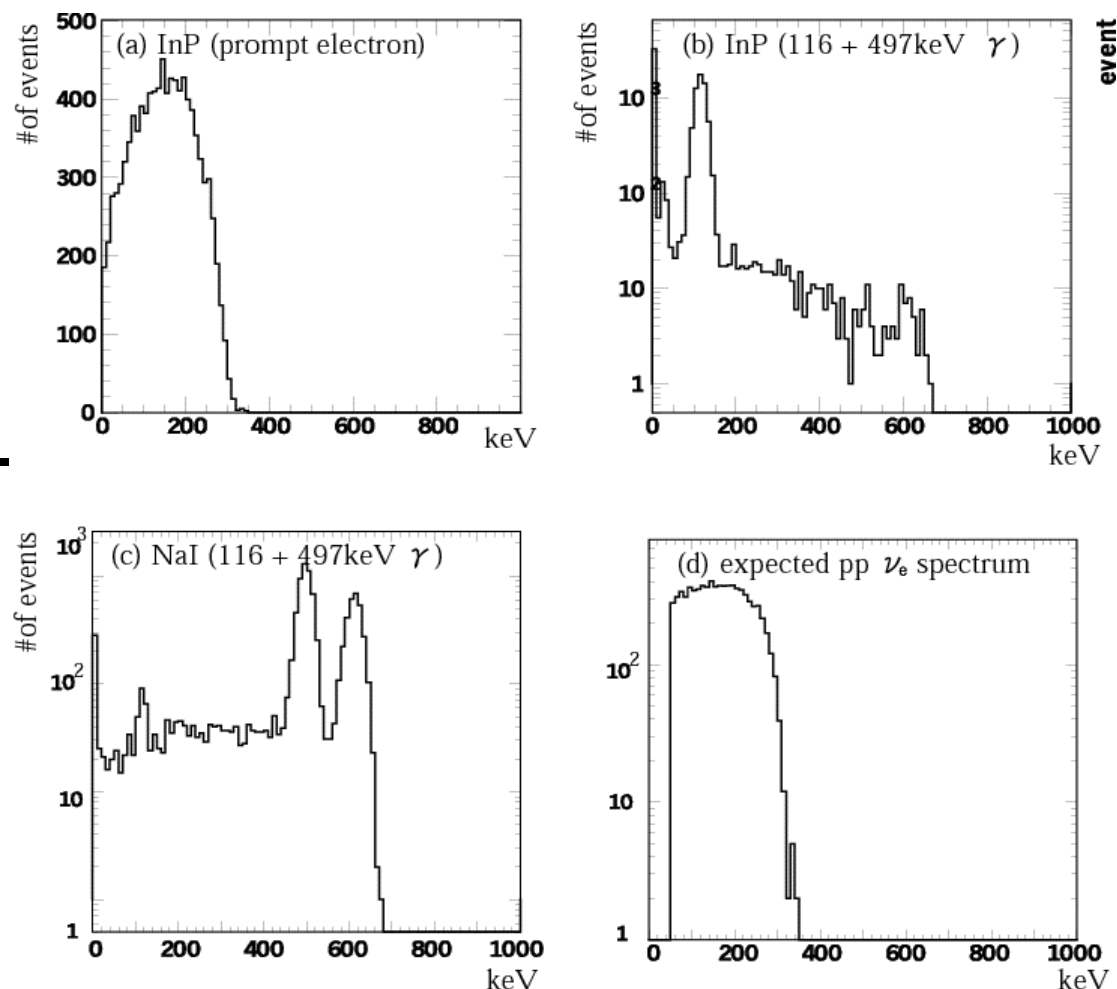


図17: 1個のスーパーモジュールによるppニュートリノ測定で1万個のシミュレーションを行って得られたスペクトル
 (a) InP検出器モジュールで検出した電子のエネルギー
 (b) 同じくInP検出器で測定した γ_1 、 γ_2 のエネルギー
 (c) 周囲のNaIシンチレータで検出した γ_1 、 γ_2 のエネルギー
 (d) 期待されるpp ν -128keVのエネルギー分布

6. その他の物理

InP太陽ニュートリノ実験の測定器では、692tonのNaIシンチレータを使用するハイブリッド型であるため、そのシンチレータを利用した観測も行うことができる。

暗黒物質の探索

この測定器のNaIシンチレータは、CDMSやDAMAで現在行われている暗黒物質探査の実験で用いられているNaIシンチレータよりも10倍ほど大きく、より多くのイベント数を期待することができる。

超新星爆発に伴うニュートリノバーストの観測

過去の超新星爆発に由来するニュートリノの観測

7. 実験のコスト評価

- InP SIモジュール全体：約20億円
- 低バックグラウンドNaI：約40億円
- エレクトロニクス：約30億円
- 掘削費用：？円



実験装置製作費用：
約90億円