

気液2相型アルゴン光TPC検出器による暗黒物質探索 ～物理感度評価編～

2013 / 2 / 20 (Wed)

ICEPPシンポジウム@岳美山荘

早稲田大学 先進理工学研究科 修士2年

杉田慎一郎

杉田発表

□ Introduction

- 暗黒物質
- 気液2相式Ar光TPC検出器

□ 物理感度計算

- 光読出し
- 光収集効率
- 感度評価

□ 早稲田Activity

- これまでの歩み
- ANKOK75実験の紹介

□ まとめと展望

川村発表

□ Ar検出器の要点

- 純度と電場について

□ 実験セットアップ

- 冷凍・循環系
- TPCの構築
- 光検出器

□ テスト実験

- 取得データ
- 宇宙線データ解析
- γ 線データ解析

□ まとめと展望

暗黒物質直接探索

□ 暗黒物質の存在

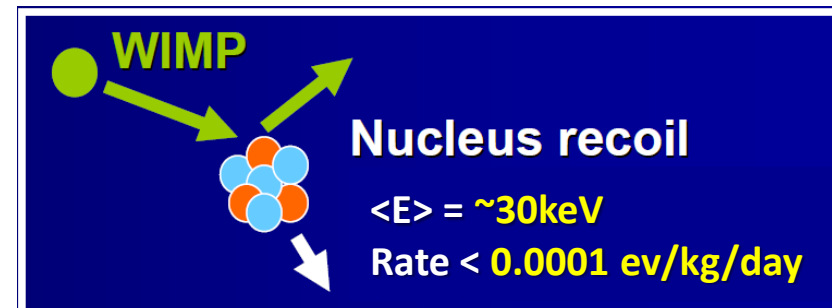
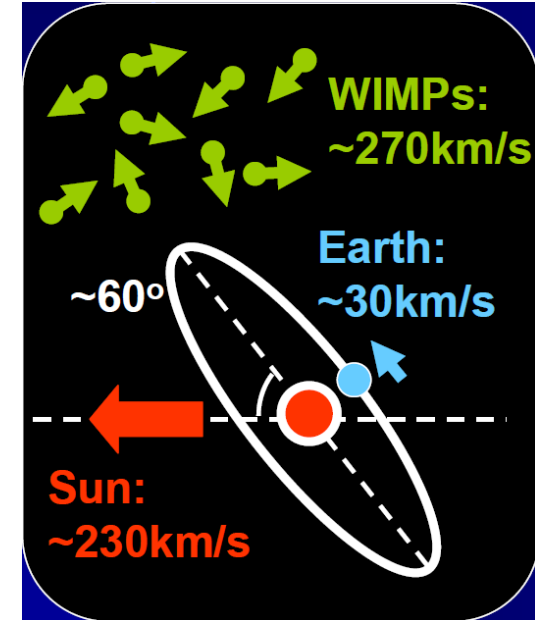
- 銀河の回転曲線、宇宙背景輻射などの観測事実。

→暗黒物質としてWIMP(Weak Interacting Massive Particle)の存在を仮定。

- 電磁相互作用をしない、非相対論的な重い物質
- 銀河中をMaxwell分布していると考える。

□ WIMP直接探索

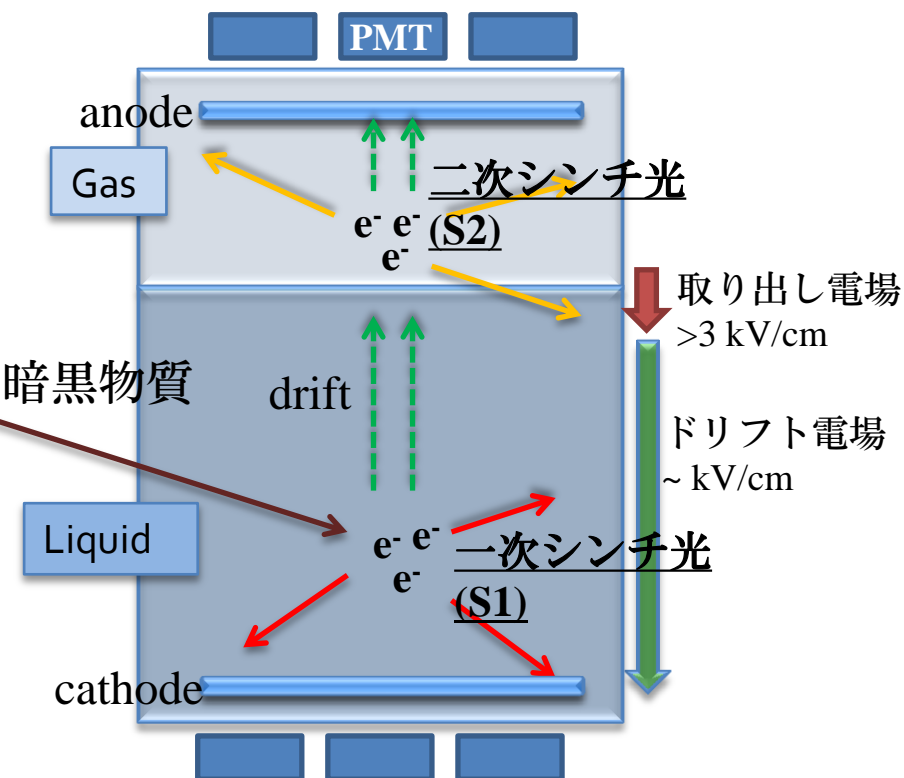
- WIMPと弾性散乱した標的原子核の**反跳エネルギー**を測定。
- 光、電離電子、熱 etcを検出。
- 低イベントレート・低エネルギー反応
 - 低バックグラウンド
 - 低エネルギー閾値な実験を構築することが重要。



2012年Xenon100実験結果より

気液2相型アルゴン光TPC検出器

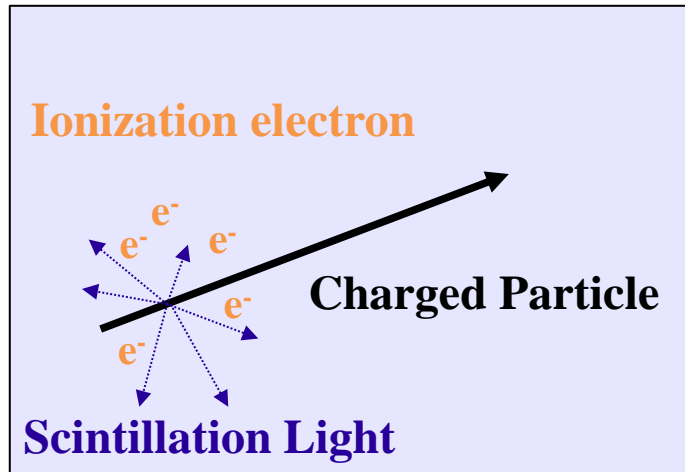
光信号の検出に特化した検出器



- 気相・液相の2相型。
- 媒質として液体アルゴンを使用。
 - 次ページで説明
- 2種類のシンチレーション光で信号を検出する。
 - 1次シンチレーション光 (S1)
 - • • 液相で発生。
 - 2次シンチレーション光 (S2)
 - • • 電離電子が高電場で気相に取り出されるときに発生。

⇒このS1・S2の特徴を用いて背景事象分離。

アルゴンの特徴



□ 液体アルゴン

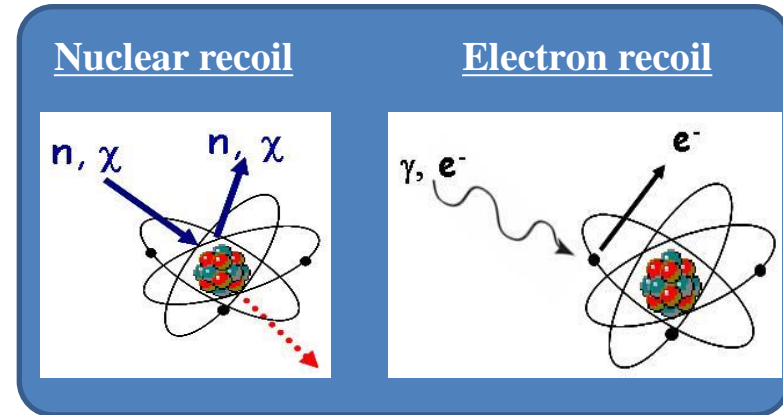
- 沸点が低い： -186°C
 - シンチレーション光が発生。
 - 電離電子が発生。
- ⇒ 純度によって捕獲される。
- 価格は比較的安価。

| | Ne | Ar | Xe |
|-------------------------------|--------|-------|-----------|
| 沸点 (K) | 27 | 87 | 165 |
| 密度 (g/cm^3) | 1.2 | 1.4 | 3.0 |
| 放射長 (cm) | 24 | 13 | 2.8 |
| 電離電子 (個/keV) | - | 40 | 64 |
| シンチレーション光 (個/keV) | 30 | 50 | 42 |
| 波長 (nm) | 78 | 128 | 175 |
| 値段 (¥/L) | 50,000 | 1,000 | 1,000,000 |

背景事象

□ 背景事象

- $\gamma \cdot e$ などによる電子反跳イベント
- 中性子による原子核反跳イベント
- 地下実験、シールドなどで低減する。



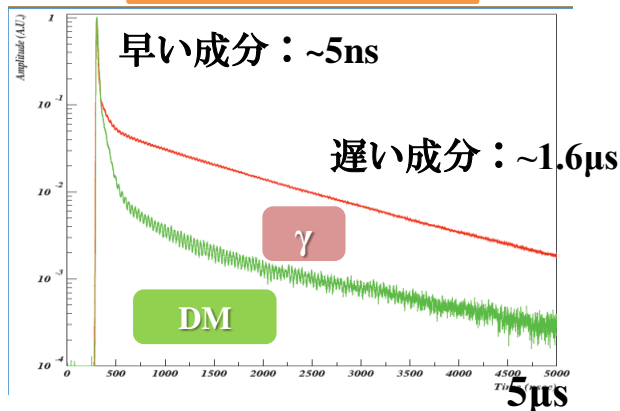
□ 液体アルゴンでの課題

- ^{39}Ar による内部 γ 線： $\sim 1 \text{ Bq/1kg}$
- $100\text{kg} \times 100\text{days}$ では 8.6×10^8 程度

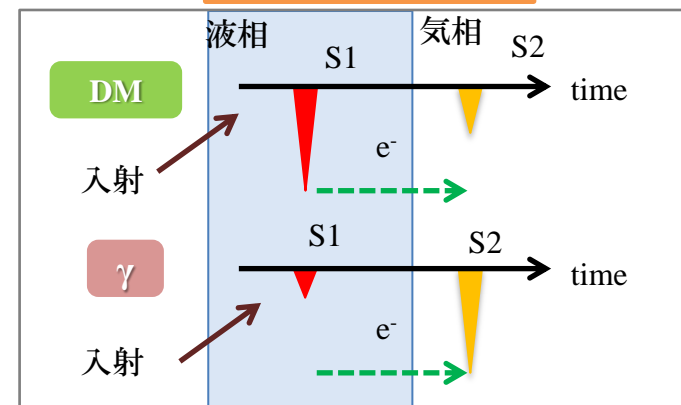


γ の分離能力は $\sim 10^9$ を達成しなければならない

S1の信号波形



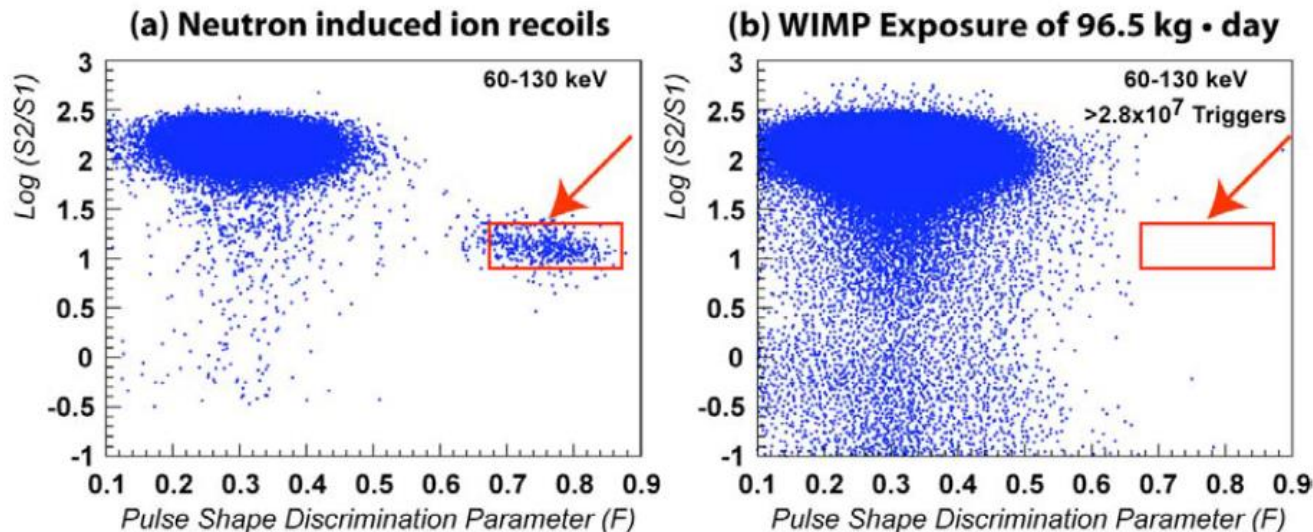
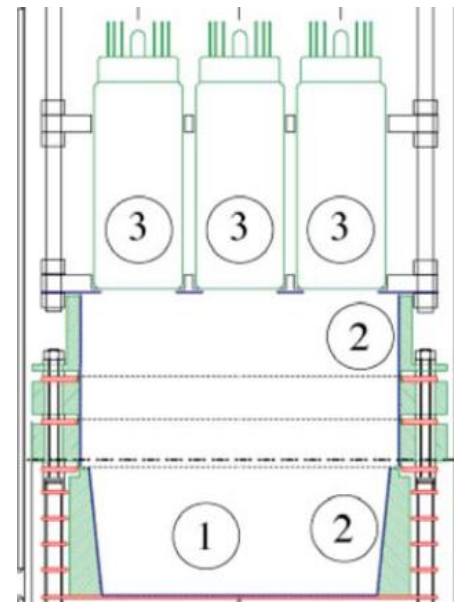
S1/S2の信号比



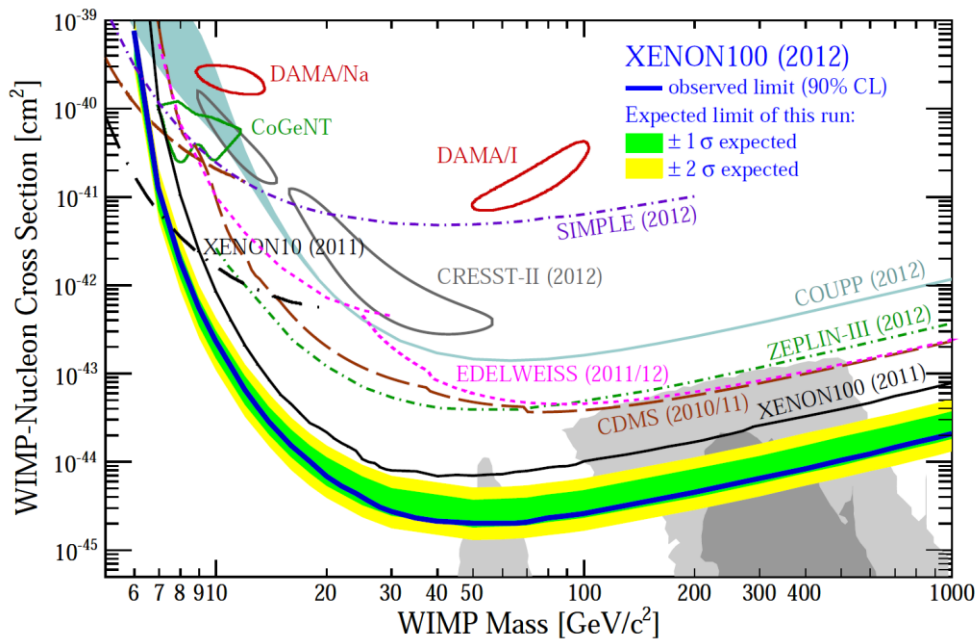
WARP(WIMP Argon Program)実験

□ イタリア・グランサツソにおける地下実験

- 有効質量1.8kgの2相式Ar検出器
- 2007年に物理結果 (1.8kg×53days = 96.5)
- 側面に反射材を入れ、
上部の7本のPMTで読み出し
- エネルギー閾値： > 60 keV



物理目標



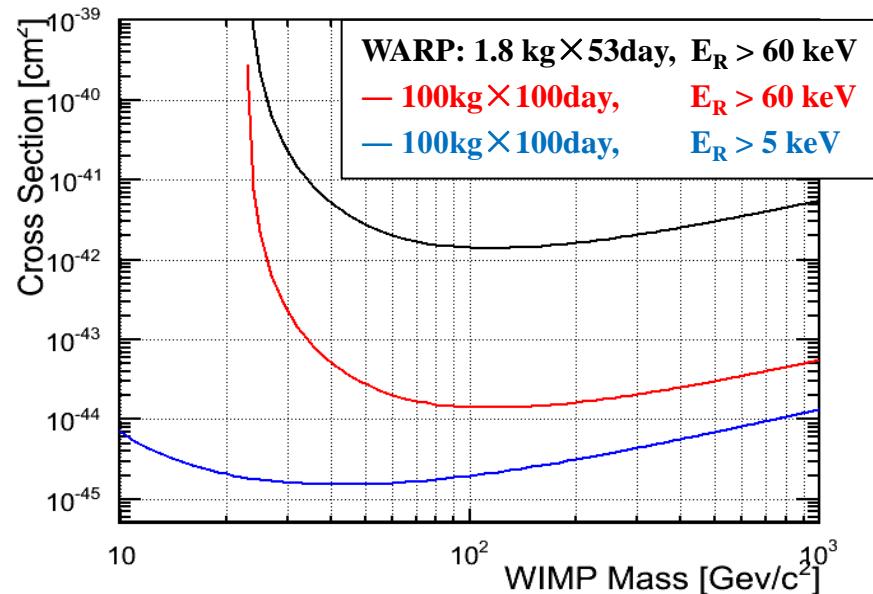
物理的に興味がある領域

高質量低反応断面積領域
→理論計算による予想。

低質量高反応断面積領域
→いくつかの実験が存在を主張。

物理目標

- 大型・長期運用 (100kg×100days)
- エネルギー閾値の引き下げ(高感度化)を行い、
到達感度 $\sim 10^{-44}\text{cm}^2$ 以上を達成し、
かつ低質量領域にも感度を持つ実験で
物理結果を出すことを目指す。

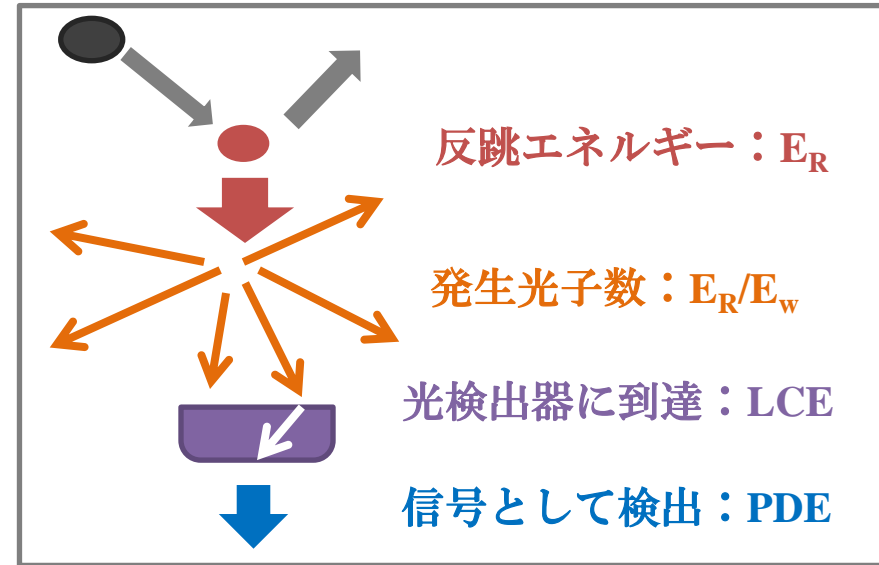


検出器内での物理現象

- 光電子の数(= N_{pe})として検出。

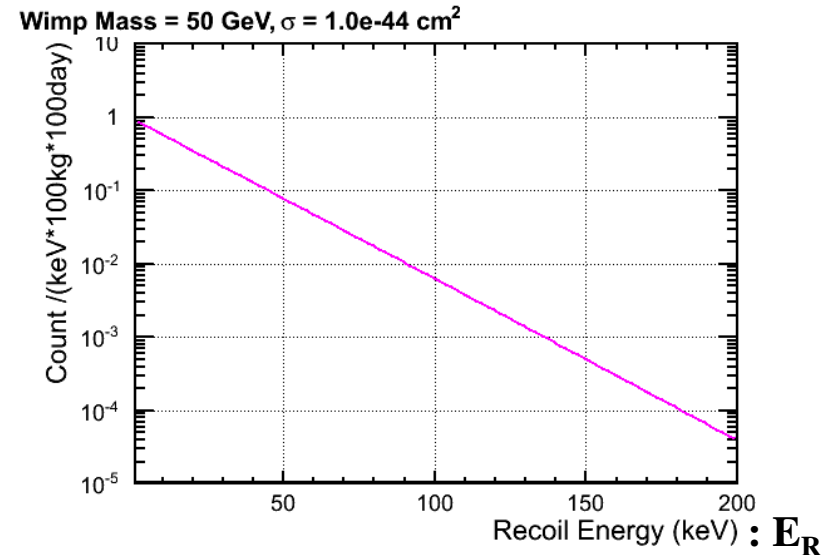
$$N_{pe} = \frac{E_R}{E_w} \times LCE \times PDE$$

- E_w : 1つの光子の生成に必要なエネルギー (LArでは ~20 eV)
- **LCE (Light Collection Efficiency)** : 光子の収集効率
- **PDE (Photon Detection Efficiency)** : 検出器に到達した光子が検出される確率



□ WIMPと原子核の反応レート

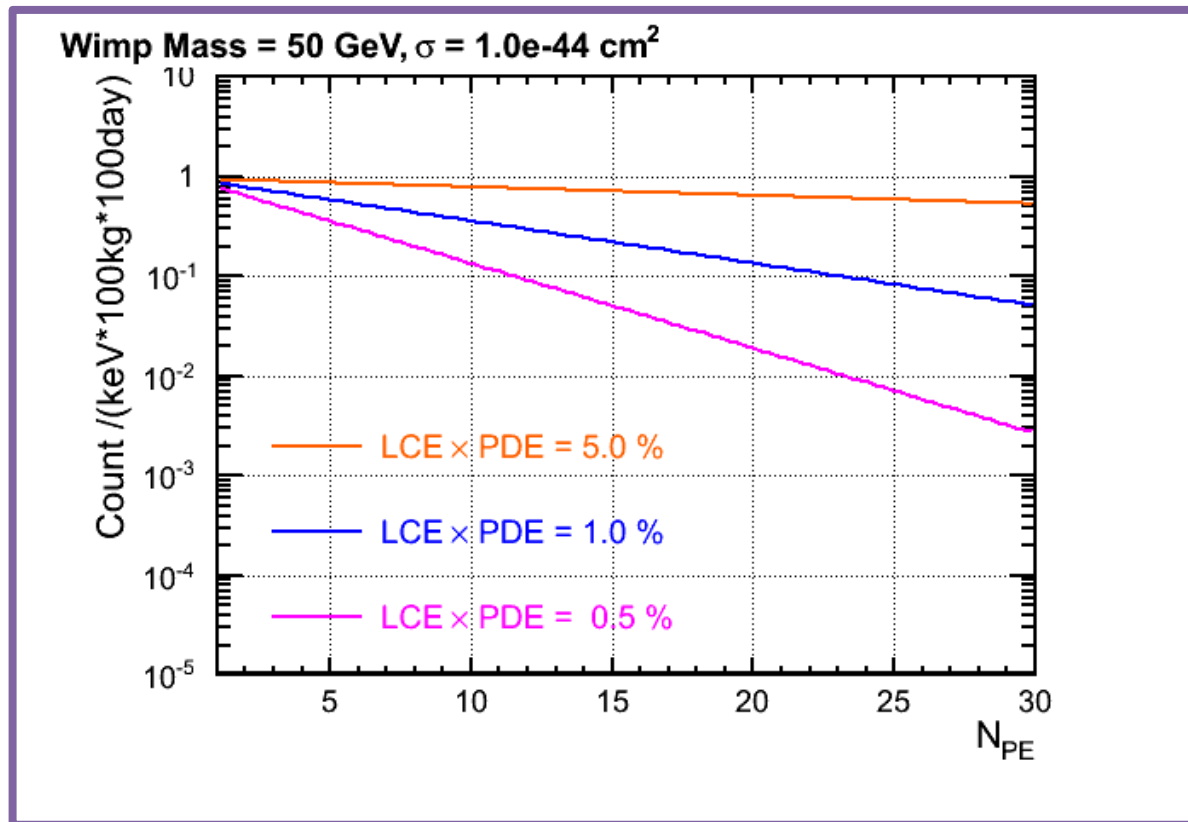
- WIMP Mass = 50 GeV/c²
- 反応断面積 = 1.0×10^{-44} cm²
- WIMPと地球の相対速度 = 230 km/s



WIMPと原子核の反応レート

反応レートを
 N_{pe} の関数で書き直した。

$$N_{pe} = \frac{E_R}{E_W} \times LCE \times PDE$$



LCE×PDEを改善 ⇒ エネルギー閾値を下げる。

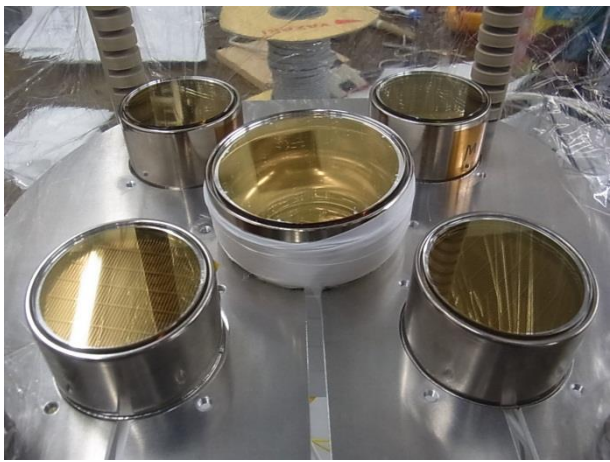
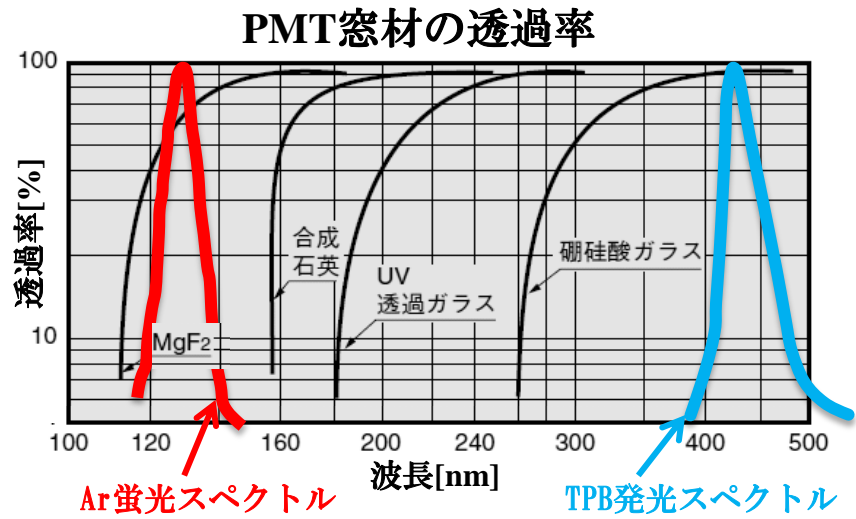
PDE(Photon Detection Efficiency) : 光読出し

- 128nmの光はMgF₂窓のPMTでしか検出できない。
- 低温使用可能なMgF₂窓PMTは存在しない。

TPBで420nmに変換して検出

TPB...テトラフェニルブタジエン

TPB と パラロイド を トルエン に 溶かし
PMTの窓面を浸して塗布



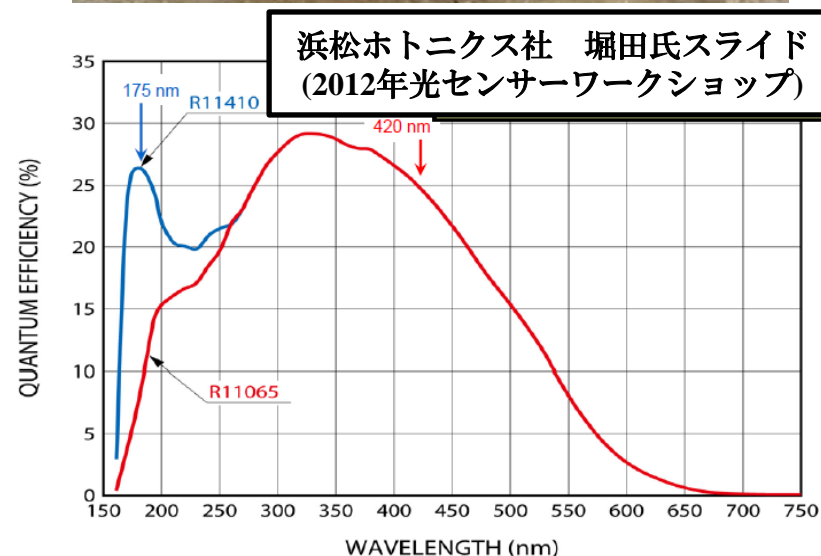
PDE(Photon Detection Efficiency) : 光読出し

□ TPBによる波長変換

- 吸収した光は等方的に放射。
- 変換効率×Acceptance = ~50%

□ 本実験で使用するPMT : R11065

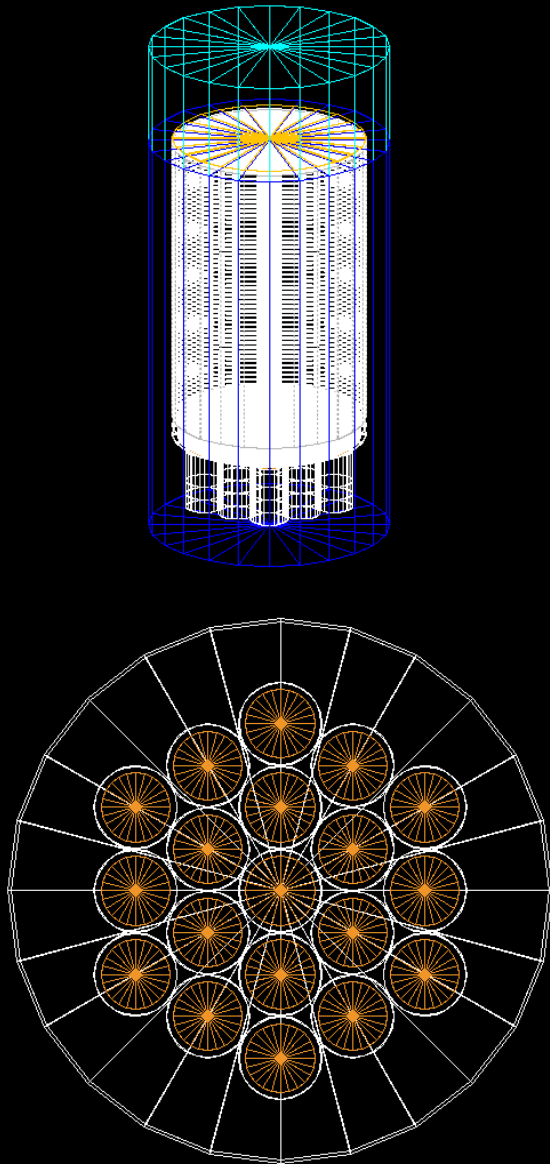
- 3inch・ヘッドオン型
 - 低温(-186°C)動作可能
 - 420nmでQE = 25%
 - 低放射性物質
- 浜松ホトニクス社で改良が重ねられており、新しいものを使用。



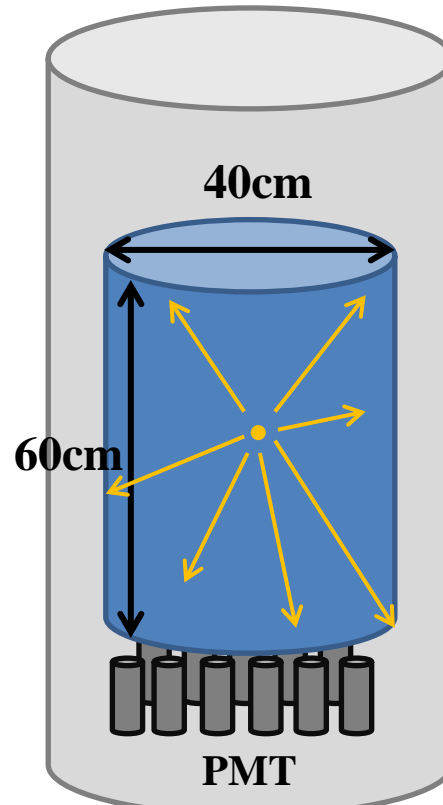
⇒ 今回の物理感度評価ではPDE = 10%とした。

有効質量100kg検出器とLCEの評価

$$N_{pe} = \frac{E_R}{E_W} \times LCE \times PDE$$



200L容器



- 光検出器は3inchのPMT
- 側面には反射板(反射率90%)

□ Geant4で光の収集効率を見積もる。

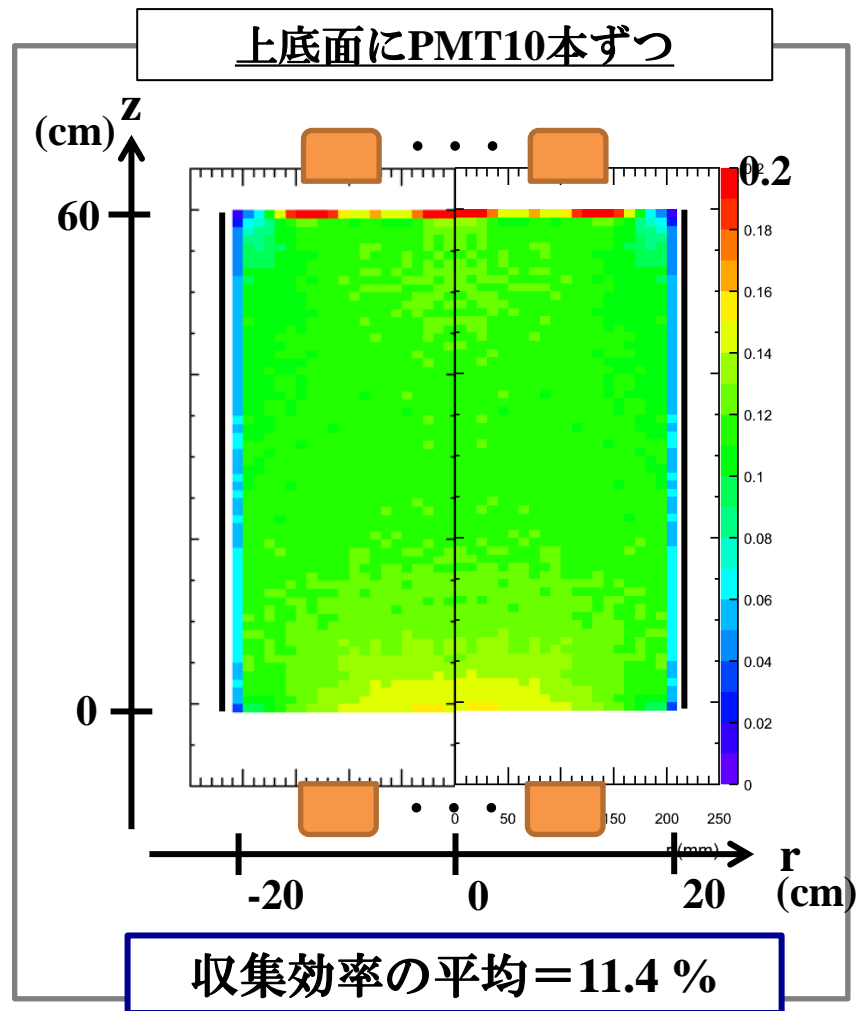
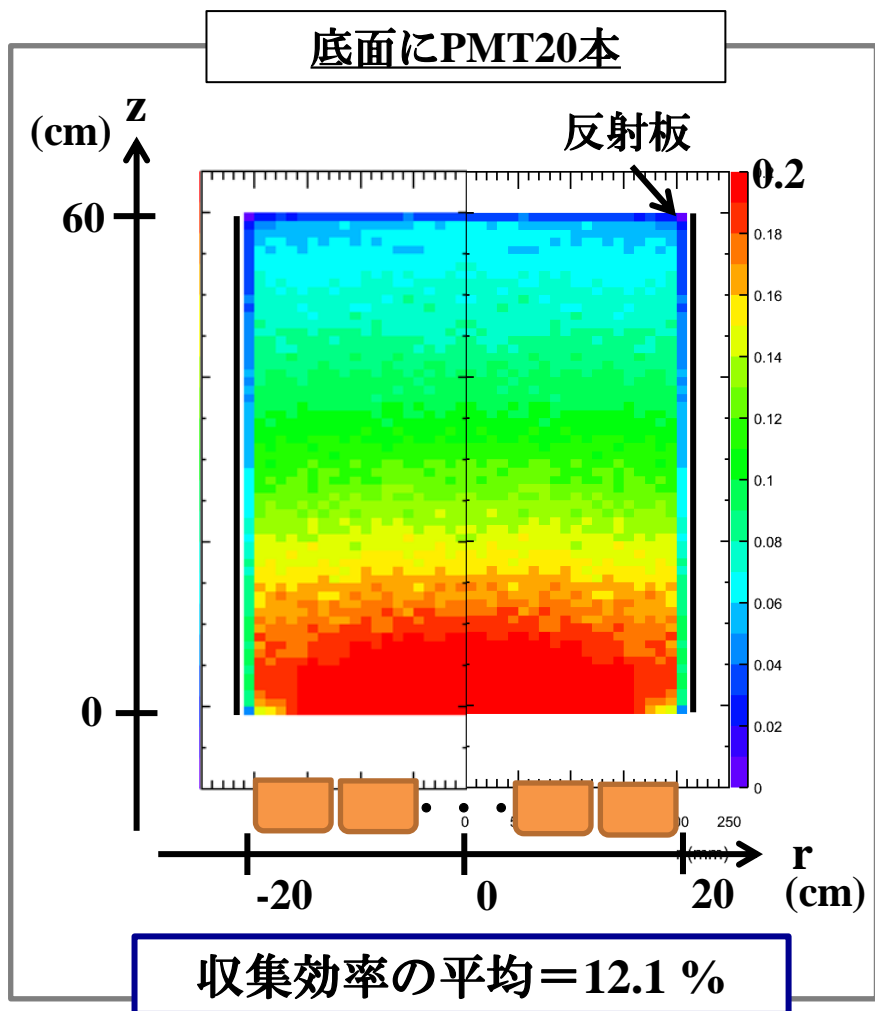
収集効率：LCE

$$LCE = \frac{\text{受光面に到達}}{\text{生成光子数}}$$

- 20本のPMTを、
 1. 底面に20本
 2. 上底面に10本ずつに配置

シミュレーション結果

- 検出器のr-Z平面における収集効率の大きさを示す。



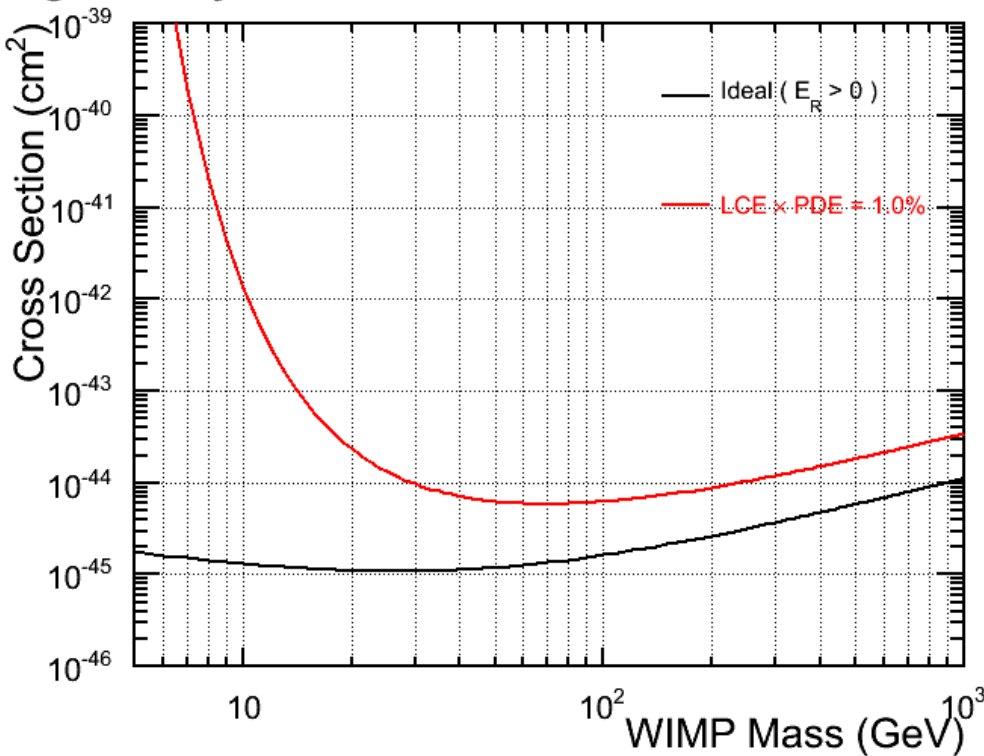
20本のPMTで10%以上のLCEが達成できる。

光子の検出効率の変化に対する物理感度

$$\frac{N_{pe}}{>10} = \frac{E_R}{E_W} \times \frac{LCE}{\sim 10\%} \times \frac{PDE}{\sim 10\%}$$

- E_R : 反跳エネルギー
- $E_w = 20 \text{ eV}$

100kg × 100days

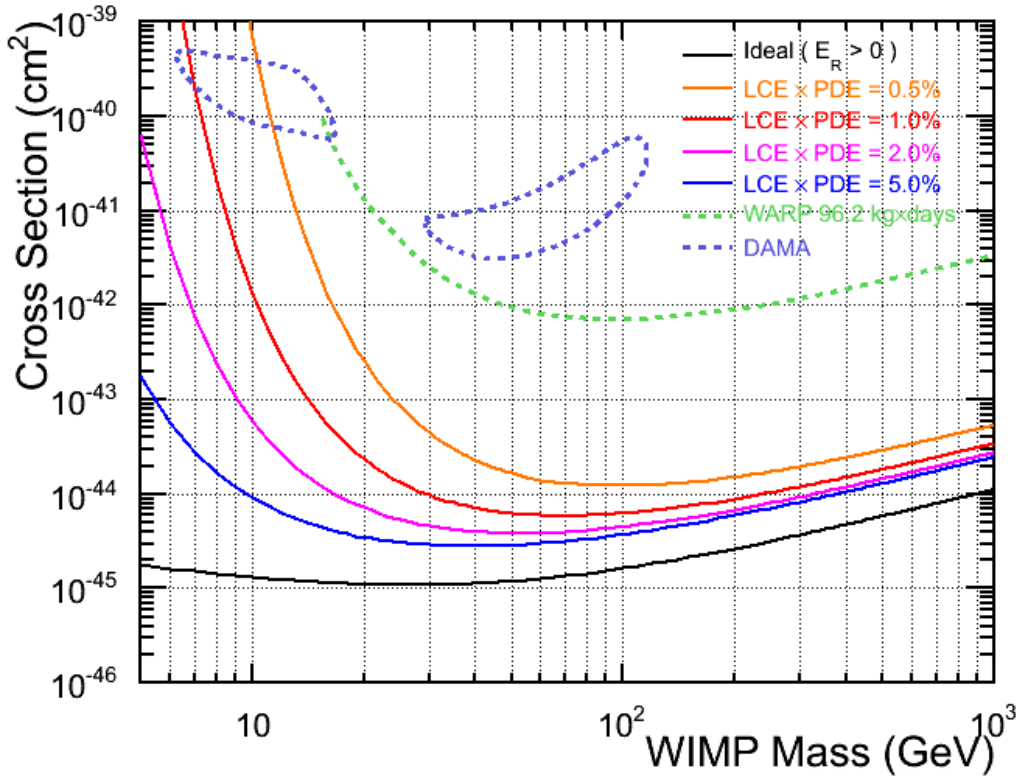


□ 100kg × 100daysでの物理感度

- 黒線：理想的な検出器
- 赤線：
 - ✓ LCE × PDE = 1.0 %
 - ✓ ID efficiency = 50 % と仮定
 - ✓ $N_{pe} > 10$ 以上
 - $E_R > 20\text{keV}$ に相当

光子の検出効率の変化に対する物理感度

100kg × 100days



□ 100kg × 100daysでの物理感度

➤ 黒線：理想的な検出器

➤ 色線：LCE × PDEを変化

➤ 点線：WARP・DAMA実験の結果

□ 高質量領域(~50 GeV)：LCE × PDE = 1% であれば $\sigma = 10^{-44} \text{ cm}^2$ が達成できる。

□ 低質量領域(5~10 GeV)：

DAMA実験を棄却するためには、LCE × PDE = 1% 以上が必要。

杉田発表

- Introduction
 - 暗黒物質
 - 気液2相式Ar光TPC検出器
- 物理感度計算
 - 光読出し
 - 光収集効率
 - 感度評価
- 早稲田Activity
 - これまでの歩み
 - ANKOK75実験の紹介
- まとめと展望

川村発表

- Ar検出器の要点
 - 純度と電場について
- 実験セットアップ
 - 冷凍・循環系
 - TPCの構築
 - 光検出器
- テスト実験
 - 取得データ
 - 宇宙線データ解析
 - γ 線データ解析
- まとめと展望

早稲田Activity

2009年8月

2010年

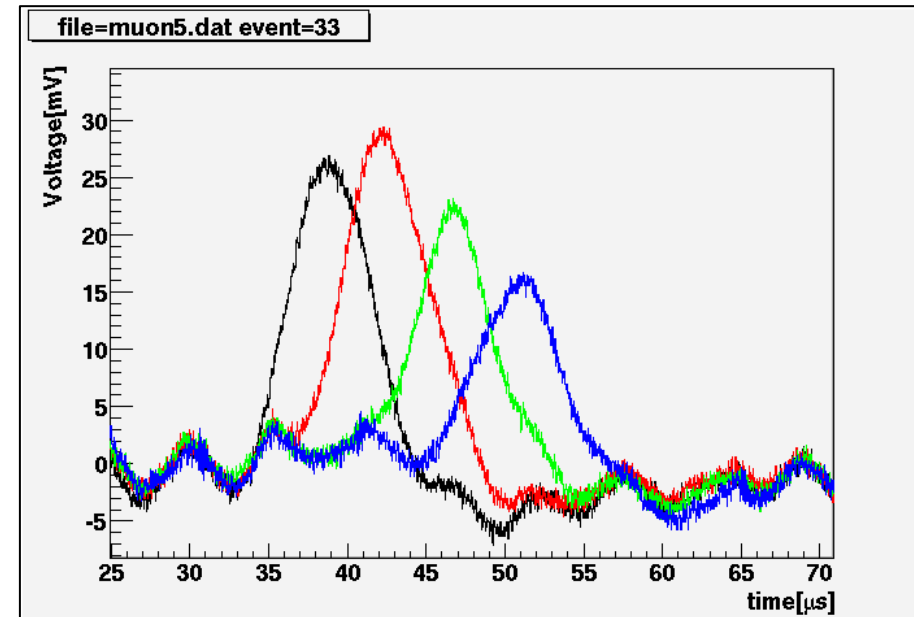
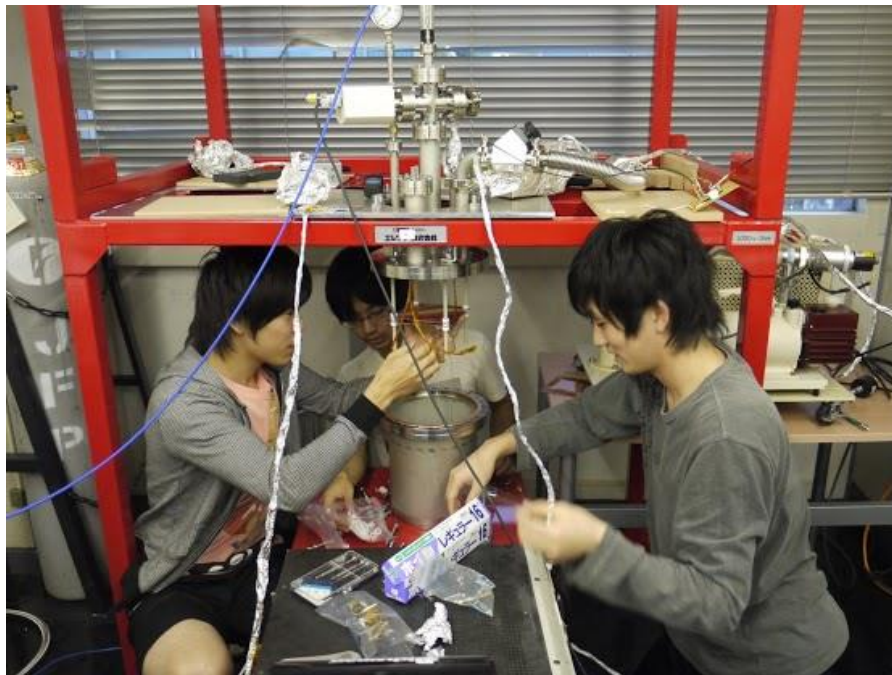
2011年

10L 容器

開発開始

液体1相宇宙線信号観測(4ch)
GEM増幅・Wire増幅
TPBによる128nm光観測

2相式の達成
→線種による違いを確認 (γ/n)
MPPC低温特性評価



早稲田Activity

2009年8月

2010年

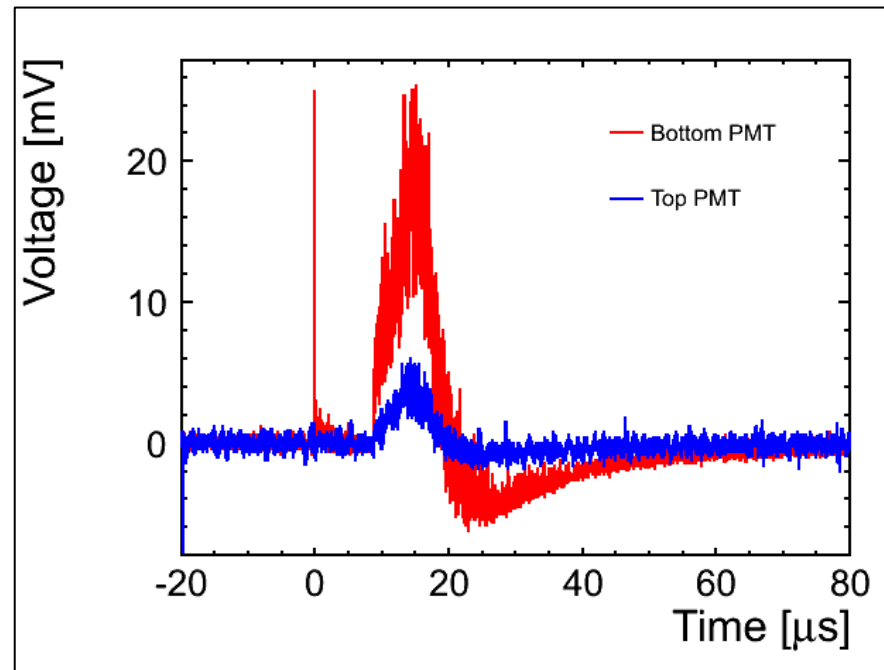
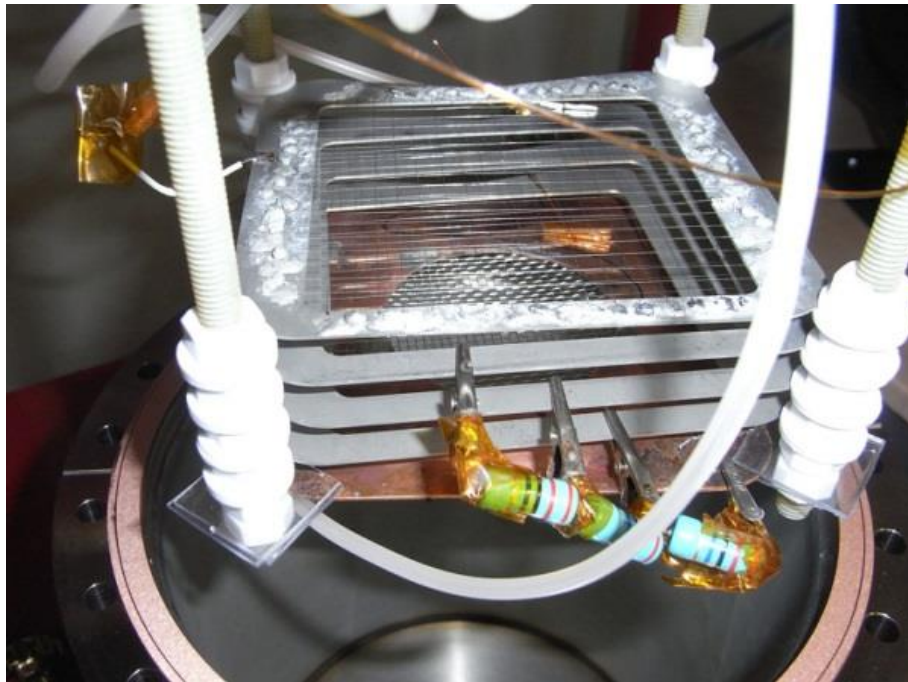
2011年

10L 容器

開発開始

液体1相宇宙線信号観測(4ch)
GEM増幅・Wire増幅
TPBによる128nm光観測

2相式の達成
→線種による違いを確認 (γ/n)
MPPC低温特性評価



早稲田Activity

2012年

2013年

現在

10L 容器

光シミュレーション

MPPC低温特性評価

75L 容器

PDEの算出

75L容器制作

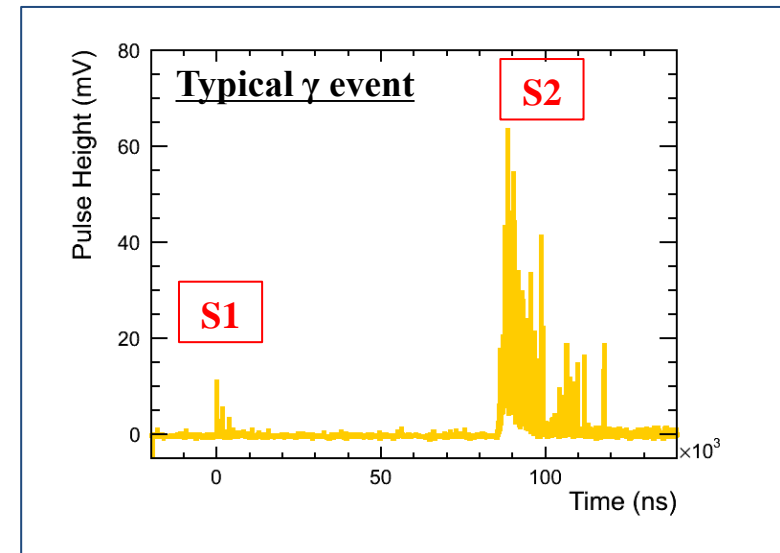
Run I (1週間)

Run II (1週間)

Run III (2週間)

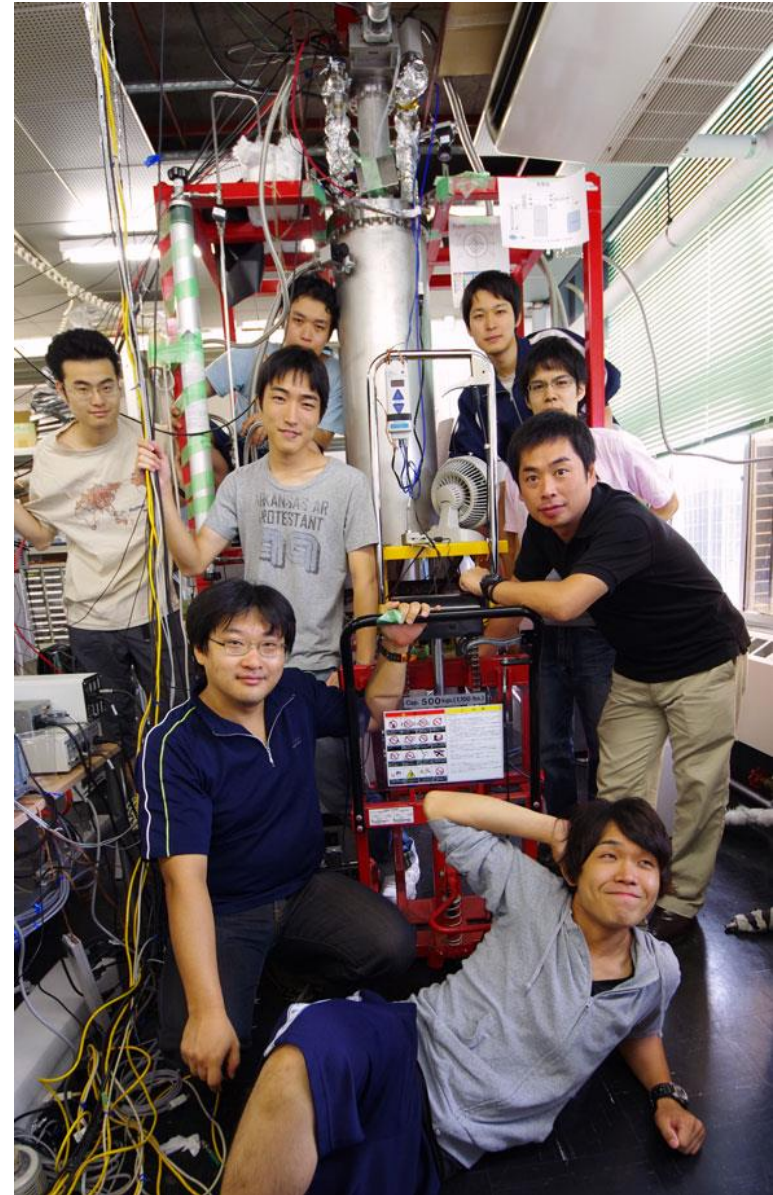
有効体積10kg

100kg検出器にむけた小型プロトタイプ



75Lプロトタイプ実験：ANKOK75

- 早稲田大学・寄田研実験室に構築し、暗黒物質探索に向けた予備実験を行っている。
- 内径30cm・長さ105cm (75Lチェンバー)の真空断熱容器内に検出器を構築。
- R&D項目
 - ~ppbの液体アルゴン純度の達成および維持。
 - 高電場印可システムの実装。
 - 長期実験に向けた安全管理体制の構築。
 - 光読出しの最適化study。
 - Ar光TPC検出器での背景事象分離能力の評価。
- 地上でできるあらゆるテストを行い、検出器の増強・地下実験施設での長期実験を行う。

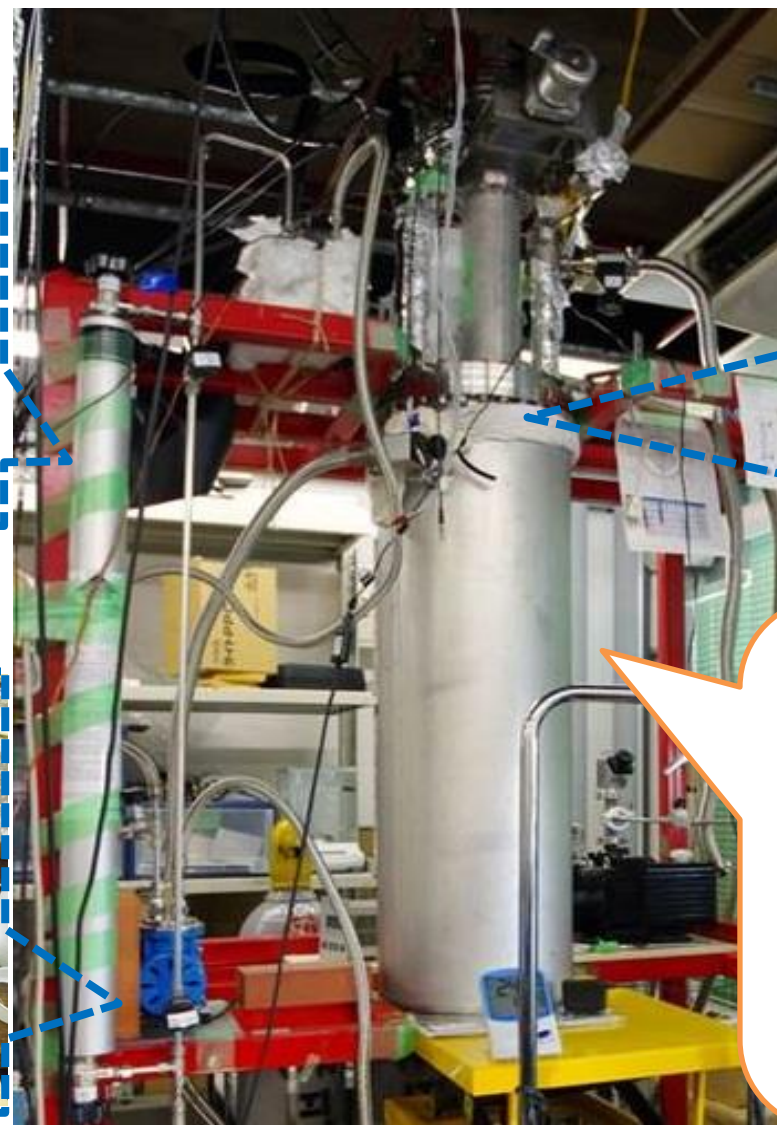


ANKOK75概要：液体充填・純化系

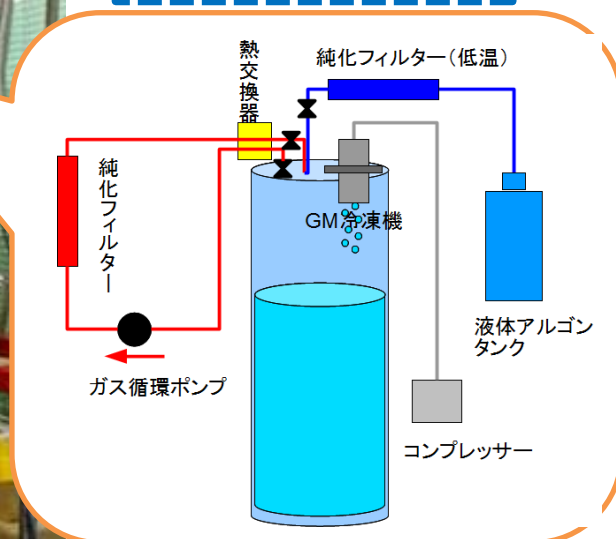
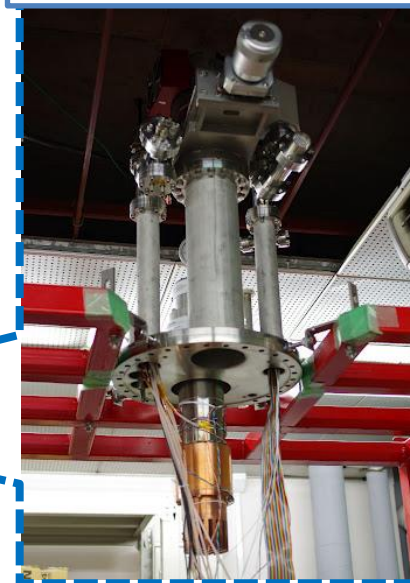
純化フィルター



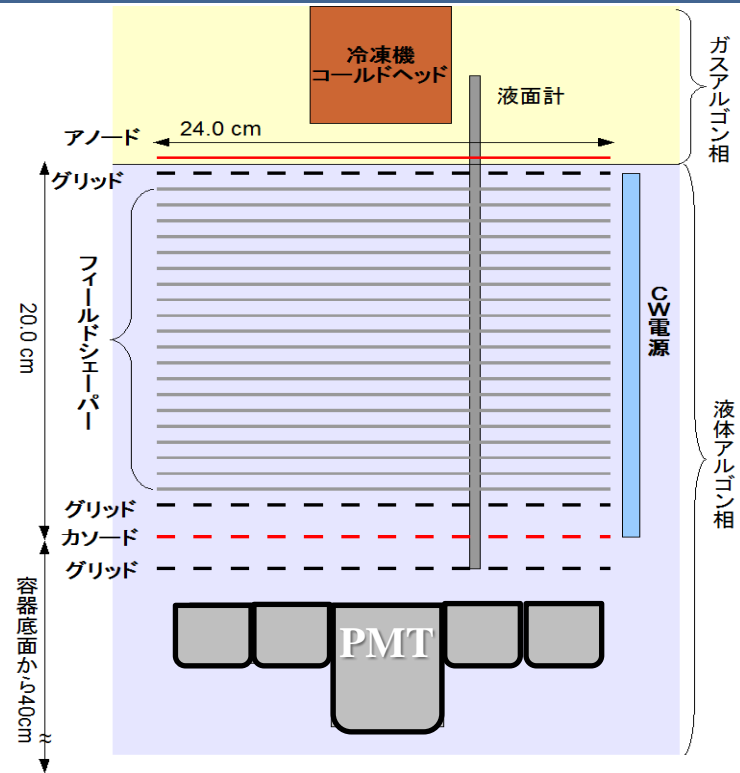
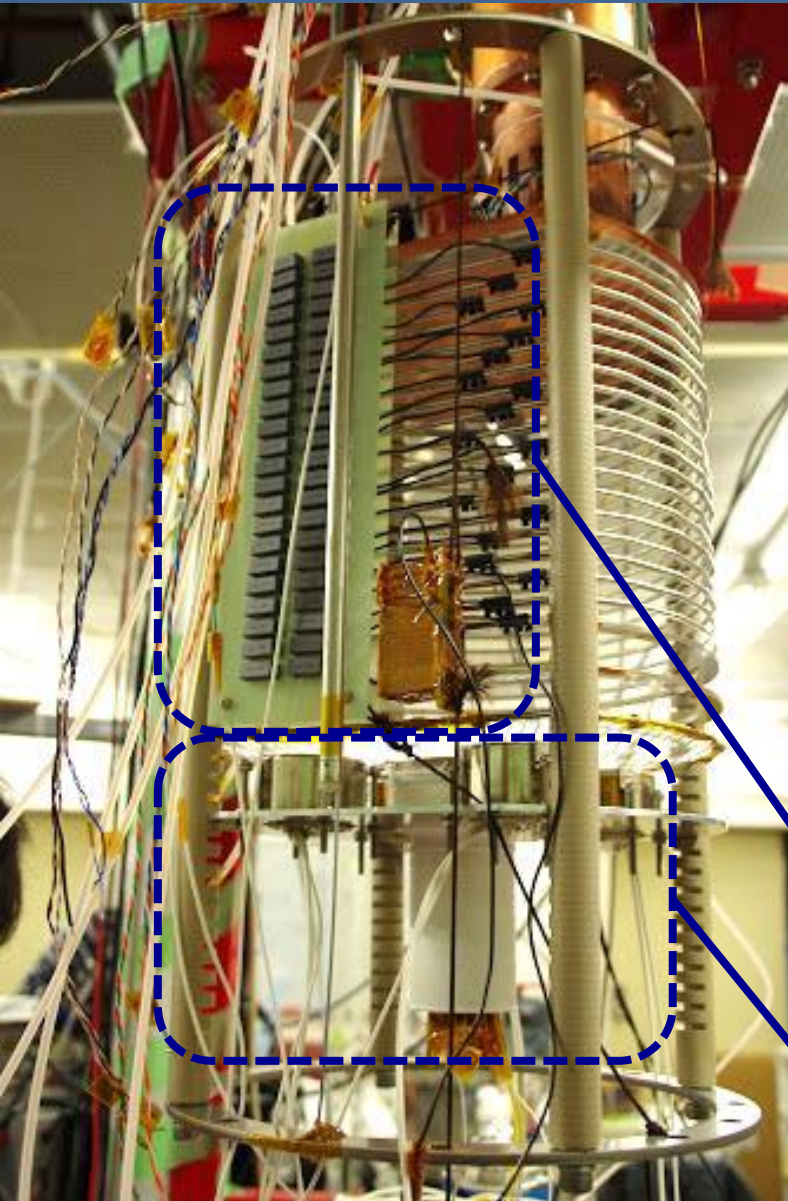
ガス循環ポンプ



GM冷凍機

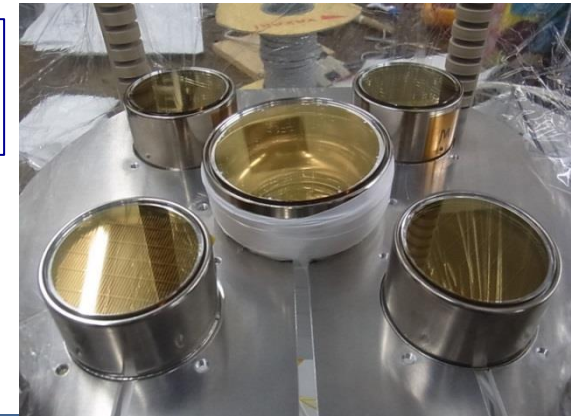


ANKOK75概要：TPC

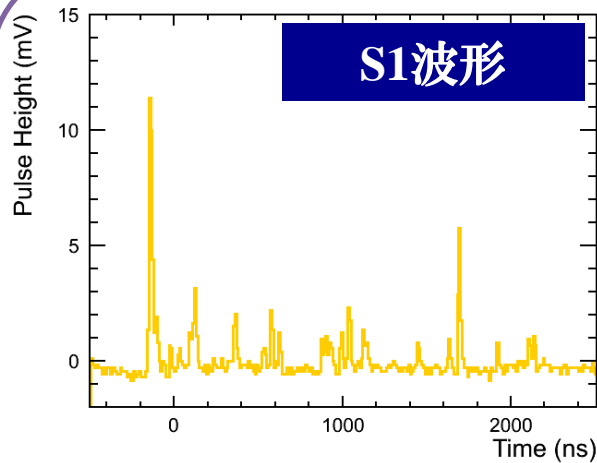
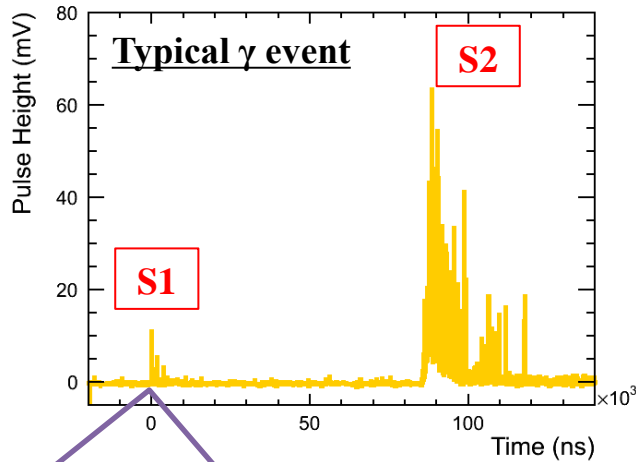


• 高電場印可システム
➤ CW回路

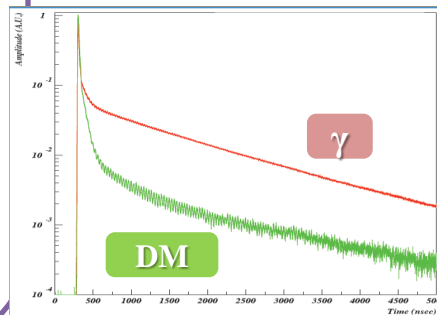
• 底面に5本のPMT
➤ 3inch × 1
➤ 2inch × 4



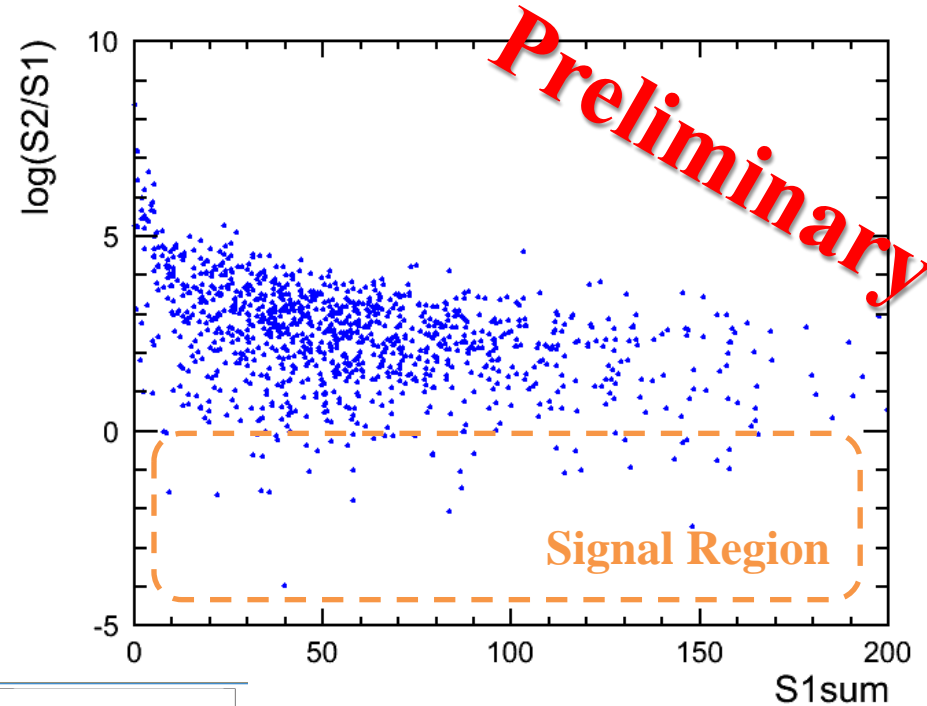
ANKOK75概要：背景事象の評価(^{60}Co からの γ 線)



S1の遅い成分が確認できる。



S1/S2比



- γ 線の信号を確認。
- ✓ S1の遅い成分
- ✓ S1/S2比が大きい

Summary & Future Plan

Summary

- 我々が目指す気液2相型アルゴン光TPC検出器の概要を説明した。
- 反応レートの計算・光の検出効率の評価を行い、大型・長期運転時の物理感度の評価を行った。
- 早稲田大学における検出器開発の紹介。

Future Plan

- 中性子源を用いた原子核反跳事象のデータ取得を行う。
- データを用いたシミュレーションの校正。
- 地下実験施設での背景事象数を見積もり、より現実的な感度評価を行う。

Back Up

PMT : R11065

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

暗黒物質探査用光電子増倍管

| | 現在所持 | | 開発予定 | |
|---------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 型名 | R11410 R11065 | R11410-10 R11065-10 | R11410-20 R11065-20 | R11410-30 R11065-30 |
| ステム | ガラス | セラミック | セラミック | サファイア |
| メタル管 | コバル金属 | コバル金属 | コバルトフリー 金属 | コバルトフリー 金属 |
| インシュレータ | セラミック | コルツ | コルツ | コルツ |
| アルミシール | 標準 | 標準 | 高純度 | 高純度 |

NOTE : R11410-10/R11065-10 廃盤予定

現在所持

5本発注済み

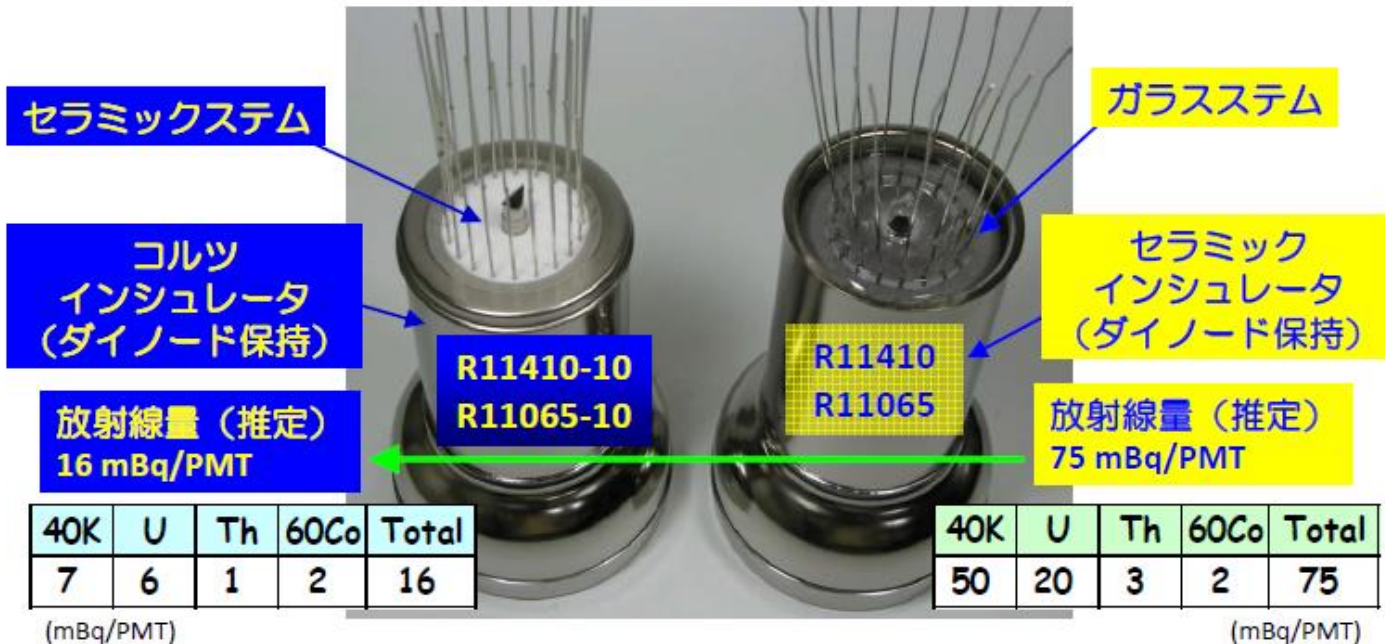
浜松ホトニクス社 堀田氏スライド
(2012年光センサーワークショップ)

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved. 22

PMT : R11065

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

暗黒物質探査用光電子増倍管



浜松ホトニクス社 堀田氏スライド
(2012年光センサーワークショップ)

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved. 20

PMT : R11065

General

| Parameter | | Description / Value | Unit |
|--------------------------------|------------------------|----------------------|--------|
| Spectral response | | 200 to 650 | nm |
| Wavelength of Maximum Response | | 420 | nm |
| Window material | | Synthetic silica | - |
| Photocathode | Material | Bialkali | - |
| | Minimum Effective Area | φ64 | mm |
| Dynode | Structure | Box & Linear-focused | - |
| | Number of Stages | 12 | - |
| Suitable Socket | | E678-20B (supplied) | - |
| Operating Ambient Temperature | | -186 to +50 | deg. C |
| Storage Temperature | | -186 to +50 | deg. C |

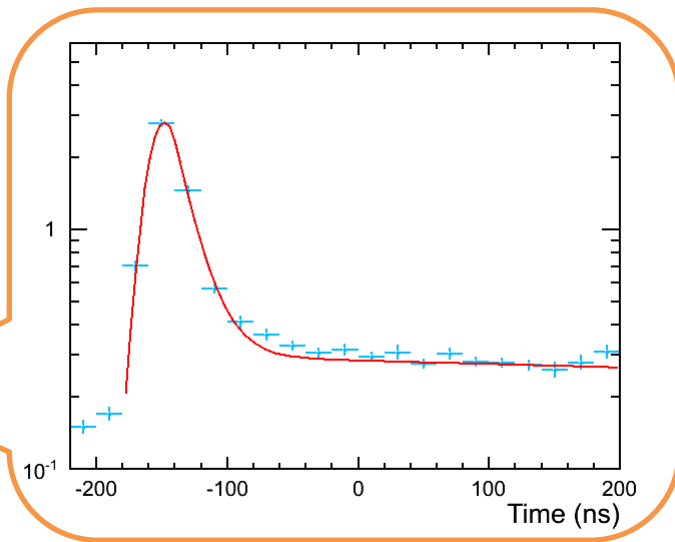
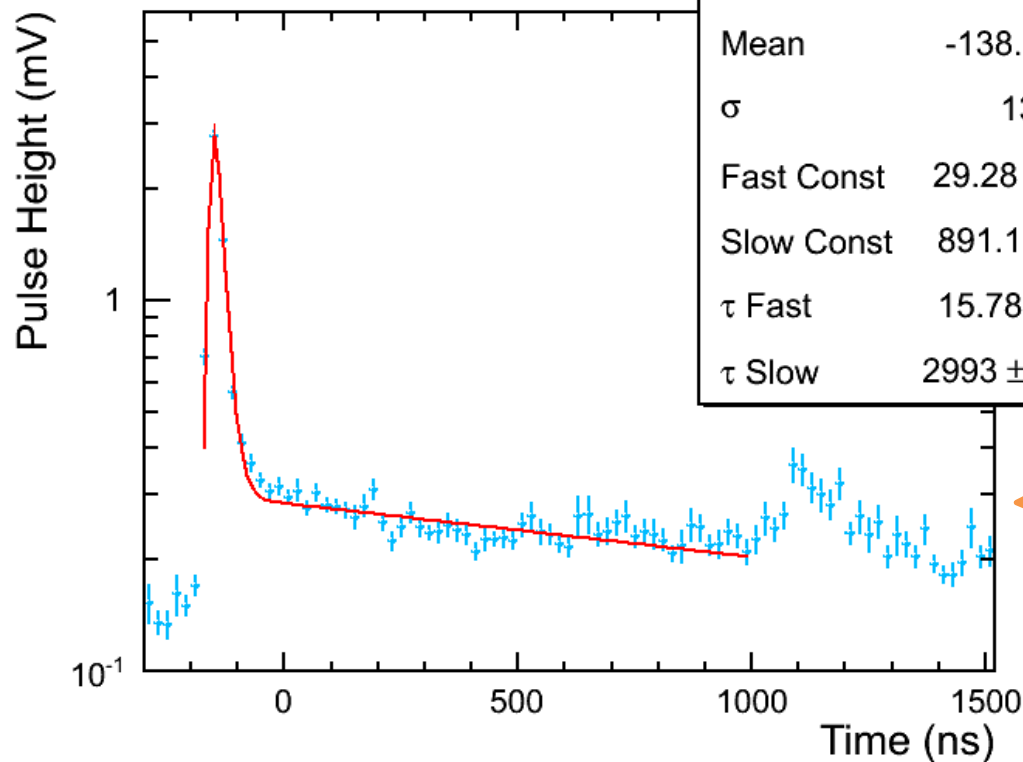
Characteristics at 25 deg. C

| Parameter | | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|--|----------------------------------|------|-------------------|------|-------|
| Cathode Sensitivity | Luminous (2856K) | - | 90 | - | uA/lm |
| | Quantum Efficiency at 420 nm | - | 25 | - | % |
| | Blue Sensitivity Index (CS 5-58) | - | 10 | - | - |
| Anode Sensitivity | Luminous (2856K) | - | 450 | - | A/lm |
| Gain | | - | 5.0×10^6 | - | - |
| Anode Dark Current (after 30 min. storage in darkness) | | - | 10 | 100 | nA |
| Time Response | Anode Pulse Rise Time | - | 5.5 | - | ns |
| | Electron Transit Time | - | 46 | - | ns |
| | Transit Time Spread (FWHM) | - | 9 | - | ns |
| Pulse Linearity at +/-2% deviation | | - | 20 | - | mA |

NOTE : Anode characteristics are measured with a voltage distribution ratio and supply voltage shown below :

γ 線データのS1信号波形（~1300イベントの平均）

hAveR_ch4



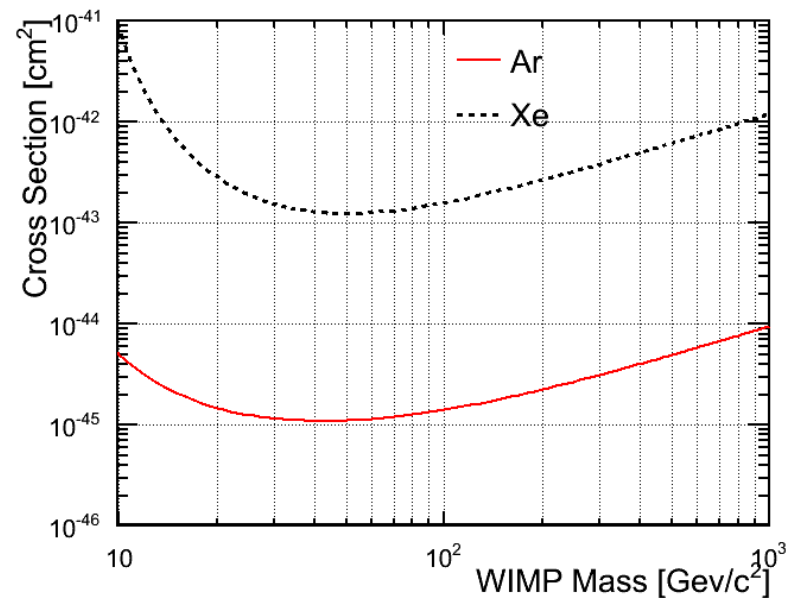
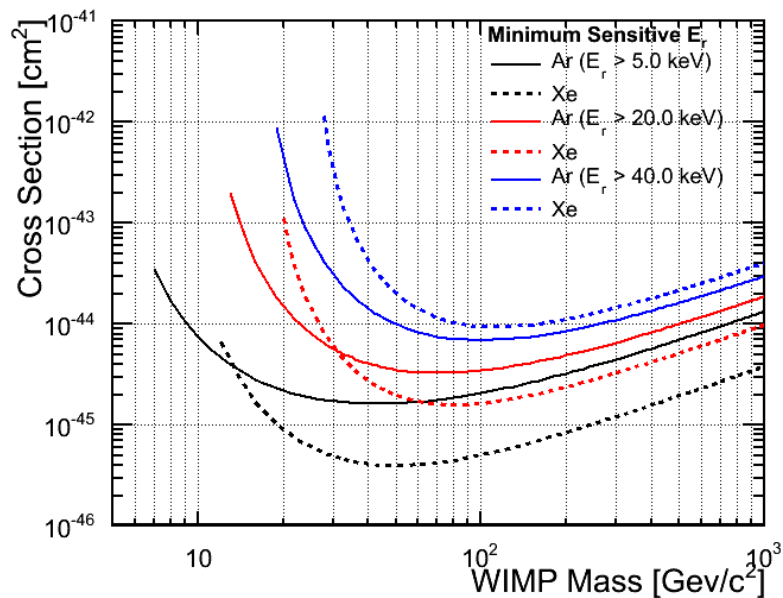
➤ アイスキャンしたデータの平均を次の関数でフィット

$$f(t) = \text{Gaus}(t_0, \sigma) \otimes H(t - t_0) \times \left(\frac{A}{\tau_{fast}} \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_{fast}}\right) + \frac{B}{\tau_{slow}} \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_{slow}}\right) \right)$$

S1の早い成分の時定数：15.8 ns

S1の遅い成分の時定数：3.0 μ s

ArとXeの物理感度の比較



左図：エネルギー閾値 $E_r > 5, 20, 40$ keVでのArとXeの到達感度の比較。

- 最高到達感度ではXeが優位。
- 低質量領域ではArが優位。
- 高いエネルギー閾値では、常にArが優位。

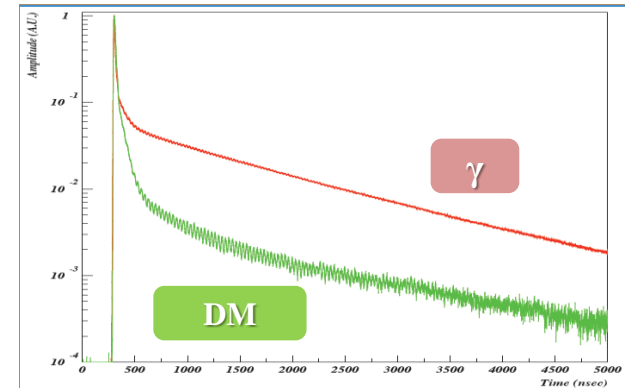
右図：Ar・Xeともに10万円で購入できる量を用いての物理感度評価。(Er > 5 keV)

- Ar：1000円/L → 100 L
- Xe：100万円/L → 0.1 L

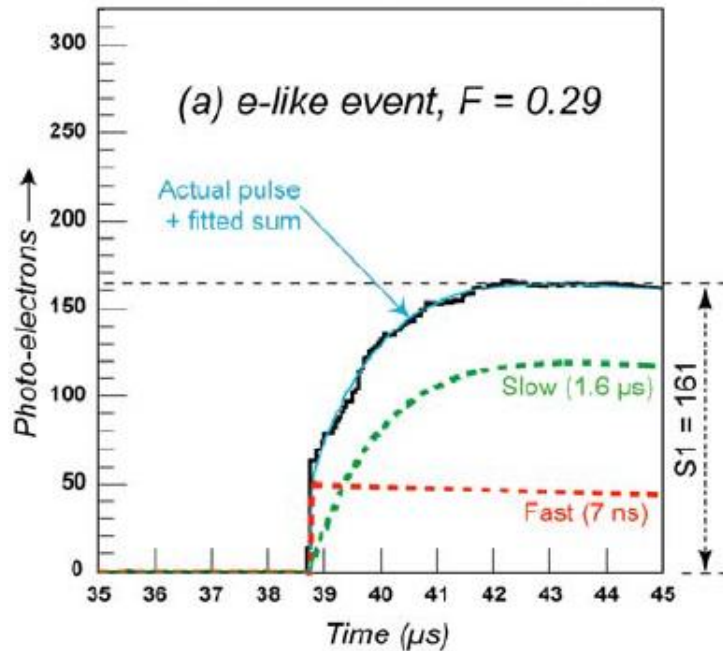
WARP : S1波形解析

S1の遅い成分と早い成分の比により、波形解析

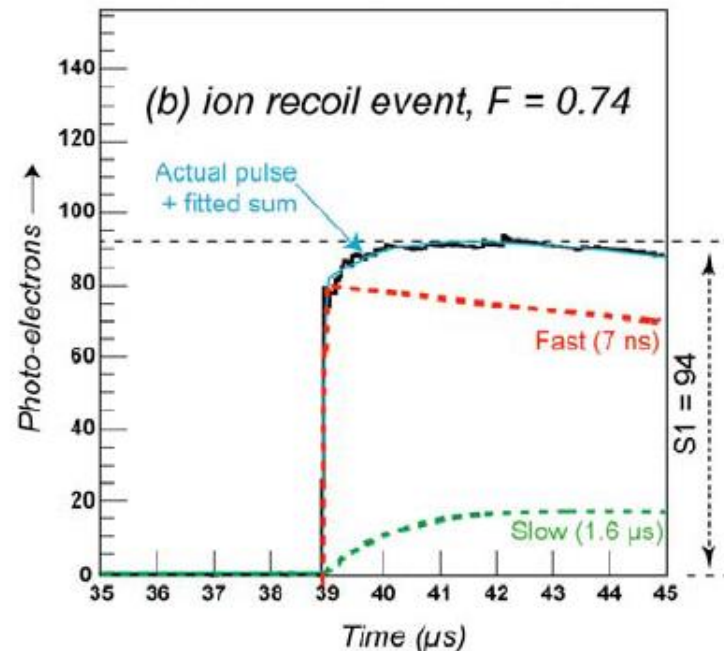
$$F = \frac{I_{fast}}{I_{fast} + I_{slow}}$$



Integrated S1 signal ($\theta = 40 \mu\text{s}$)



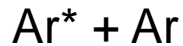
Integrated S1 signal ($\theta = 40 \mu\text{s}$)



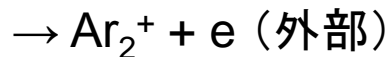
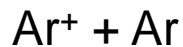
アルゴン励起による発光

Arと粒子の衝突から2つの励起プロセス

(A) Arの直接励起



(B) Arのイオン化、再結合、励起



発光プロセス



- Ar_2^* は2つの励起状態を持つ。

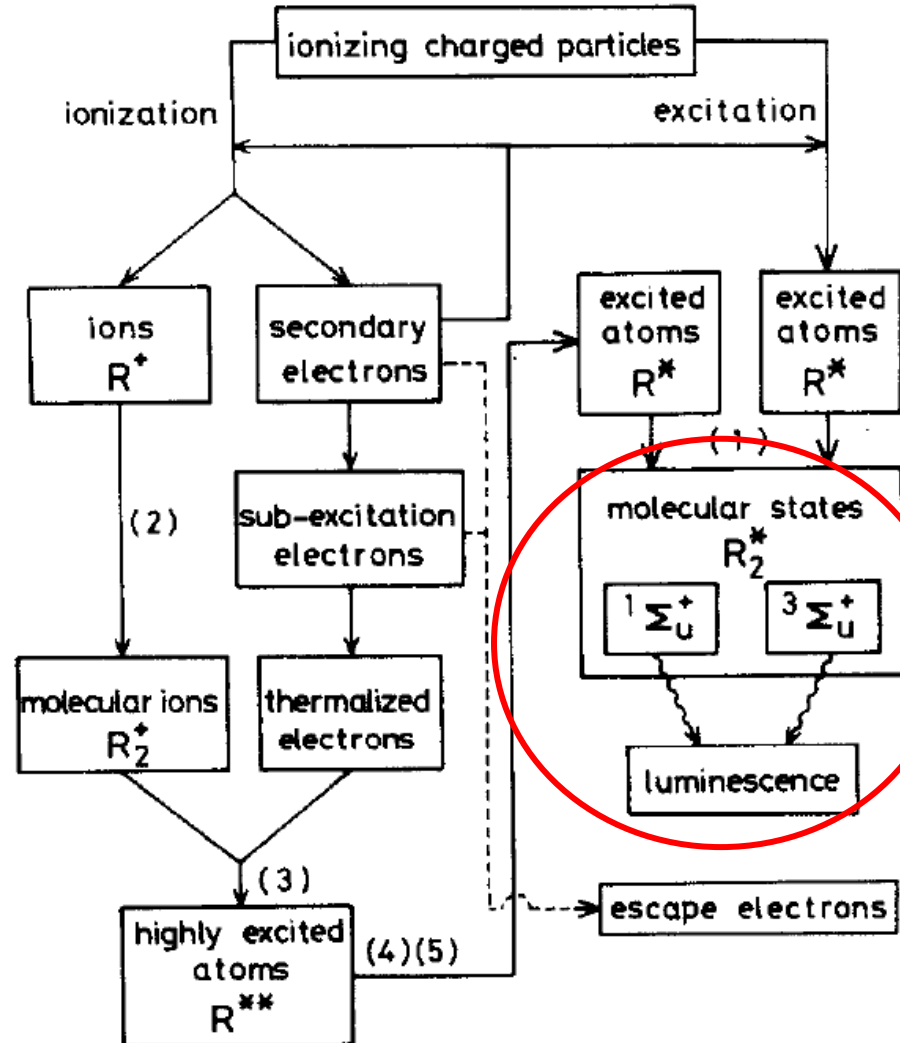
- ${}^1\Sigma_u^+$: 早い発光 (~5ns, ~5ns)

- ${}^3\Sigma_u^+$: 遅い発光 (~3.2 μs , 1.6 μs)

カッコ内 (気体Ar, 液体Ar)

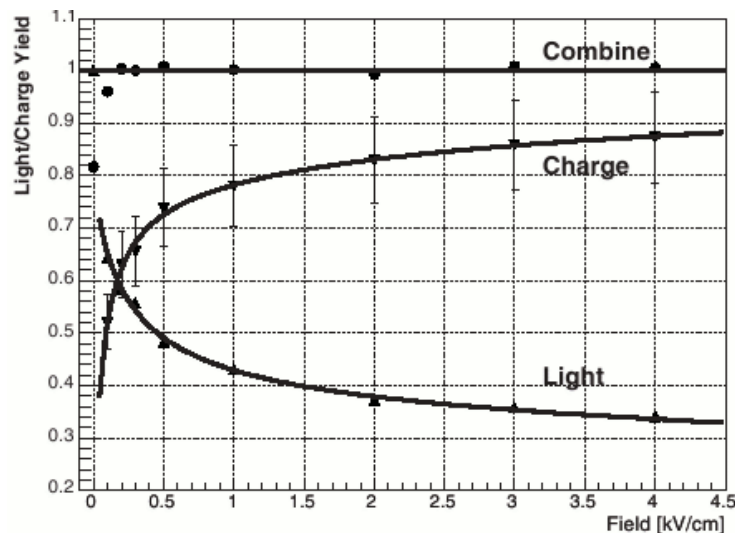
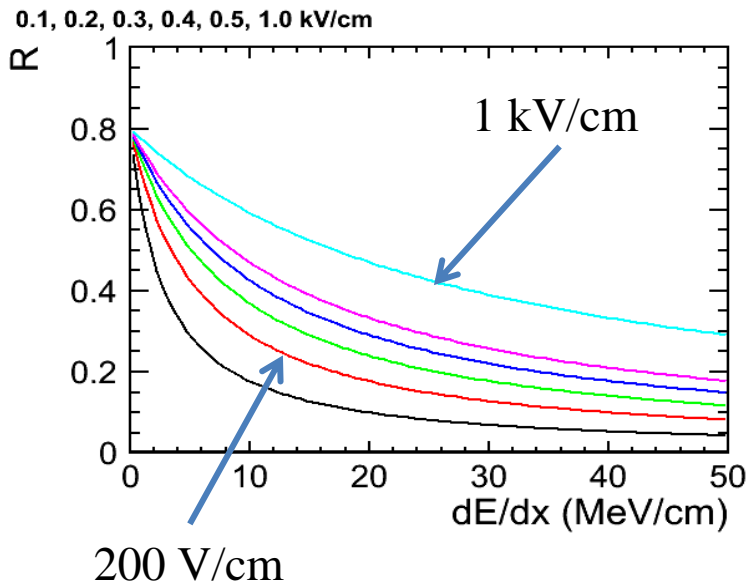
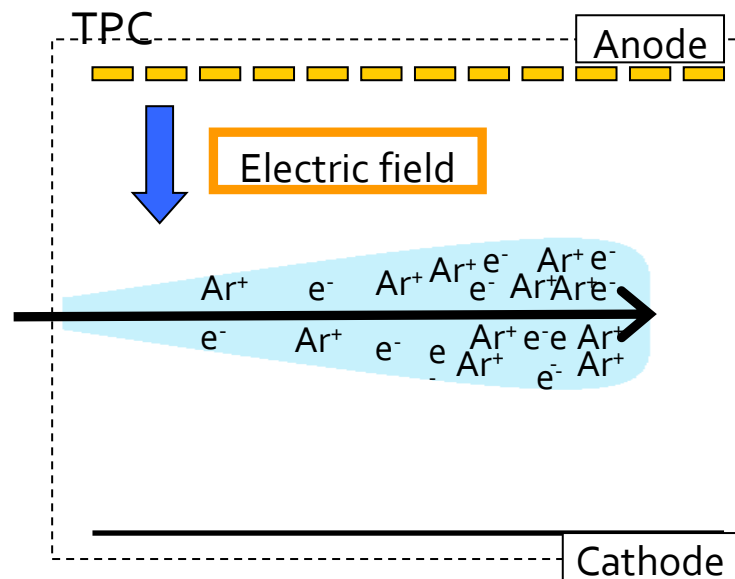
このシンチレーション光ではArはイオン化されない

M Suzuki, NIM 192 (1982) 565



電離電子再結合(Recombination)

- 荷電粒子による電離: $\text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + e^-$
- 電子がドリフトする前に Ar^+ に吸収される
→ Recombination
Recombination: シンチレーション光を生成
- Recombinationにより
 - 電離電子の密度: dE/dx が大きい場合に大きな損失
 - ドリフト電場が大きければ損失が小さくなる



側面における光検出

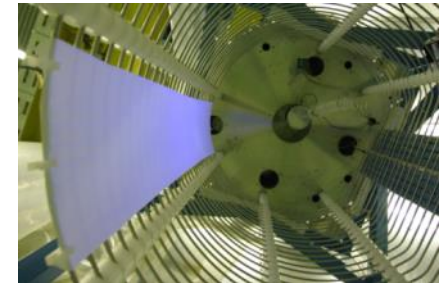


ドリフト領域の中心で発光
→光量の多くが側面方向へ

側面方向への光の取得方法

1. 反射板を用いる

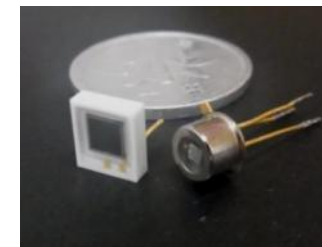
- Xenon100やArDM、WARP実験で採用されている。
- PMTによる位置分解能が悪化



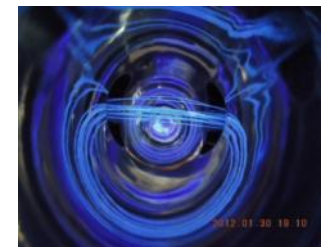
ArDMの反射板
arXiv:0904.0246v1

2. 側面で直接検出する

早稲田ではMPPCや光ファイバーを用いた手法を研究している



MPPC



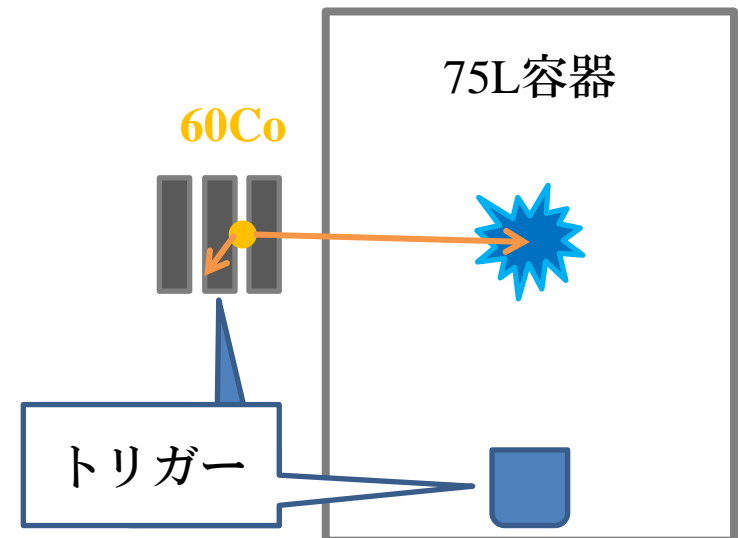
光ファイバー

γ 線源を用いた背景事象分離能力の評価

□ 75Lプロトタイプ検出器を用いたテスト実験

➤ 構成：

- 底面に5つのPMTを配置。
- γ 線源として ^{60}Co を使用($\sim 1\text{MeV}$)し、容器外に張り付けた。
- 外部シンチレータ + 内部PMT1つの同期をトリガーとした。
- 解析に使用したデータ： ~ 7000 event



^{39}Ar

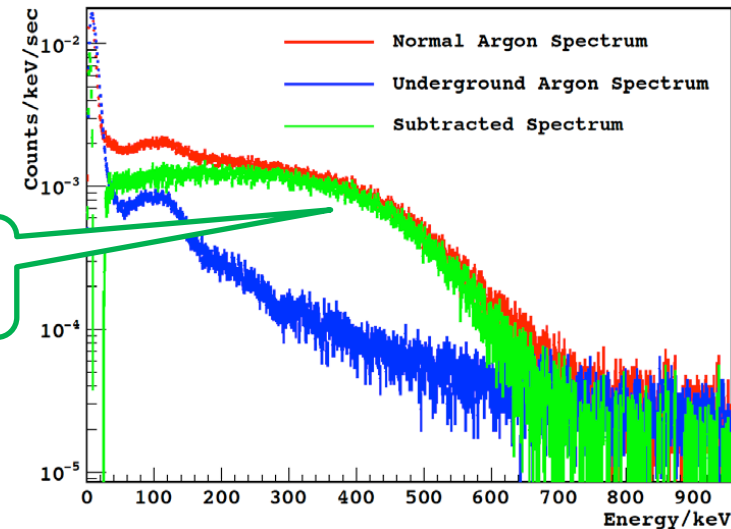
□ ^{39}Ar

- ~ 1 Bq/kg
- 半減期：269年
- < 565 keV

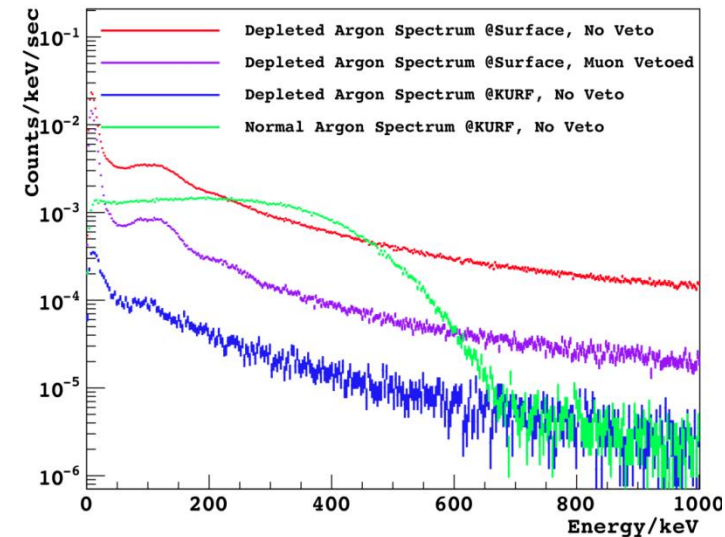
□ 地下で生成することにより、地上での場合に比べて0.65%以下に落とせる。
(DarkSide実験より)

□ 価格が上がる。

^{39}Ar
Spectrum



Depleted Argon Measurement



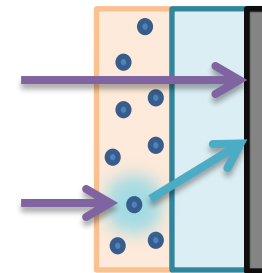
光読出し

□ TPBによる光検出効率の低下

$$PDE = \boxed{\varepsilon \times A} \times \boxed{QE}$$

- ε : 波長変換効率 (128nmが吸収され、420nmが放射する確率)
- A : Acceptance (等方的に放射した変換光が光電面に入る確率)

実験的に測定する必要がある。
 $\varepsilon \times A = \sim 50\%$
(詳細は川村発表)



- QE : 量子効率 (各PMTで固有な値、波長依存)

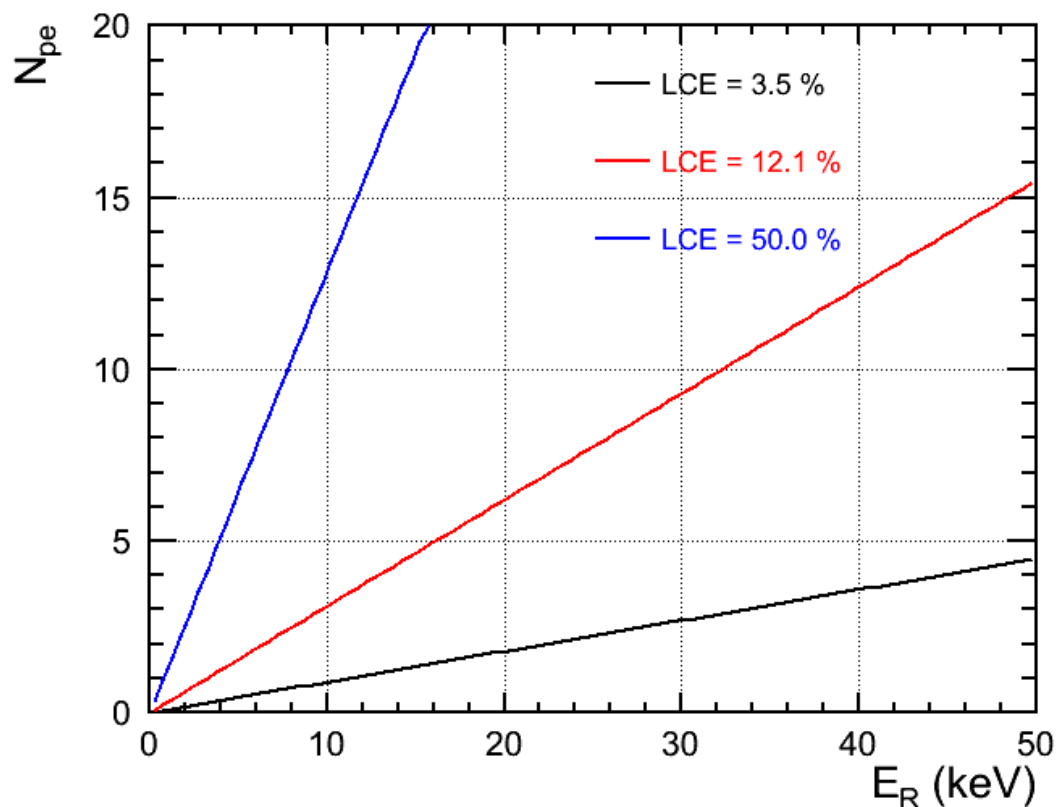
本研究室で使用しているPMT : R11065
 $QE = 25\% @ 420\text{nm}$



⇒ 今回の物理感度評価では $PDE = 10\%$ とした。

原子核の反跳エネルギーに対する取得光子数

$$N_{pe} = \frac{PDE \cdot LCE}{E_W} \times E_R$$



- LCE : Light Collection Efficiency
- Total QE = 5%
- W値(photon) = 19.5 eV

75Lプロトタイプ検出器の構成

