

TXePET

Liquid Xe TPC

with Scintillation Readout

Aki Maki

KEK

# 動機

- 高エネルギー物理学実験における粒子測定器の経験
- 3次元位置測定器TPC
  - 大立体角
  - 高い位置分解能
- 液体希ガスTPC
- 蛍光読み出し液体Xeカロリメータ (52.8 MeV  $\gamma$ )
  - 高速計測
  - 高分解能(位置、エネルギー)
- パルス管冷凍機の発達
- データ処理エレクトロニクスの進歩
  - 多量データの高速処理
- 高感度、高分解能PETへの期待
- 高機能物質の開発
  - 固体蛍光体(LaBr<sub>3</sub>)
  - 半導体
- 蛍光体の細分化
  - 3次元細分化
  - 多点数、多チャンネル
  - 高価格

# Time Projection Chamber

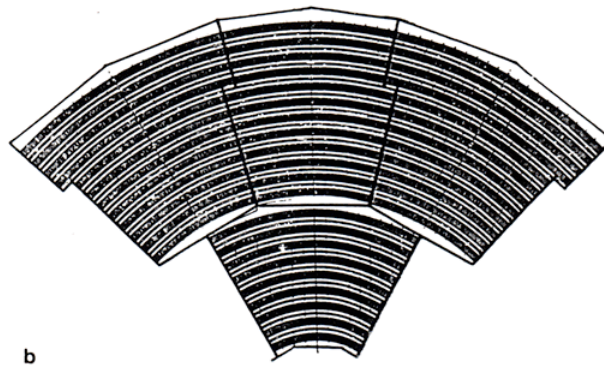
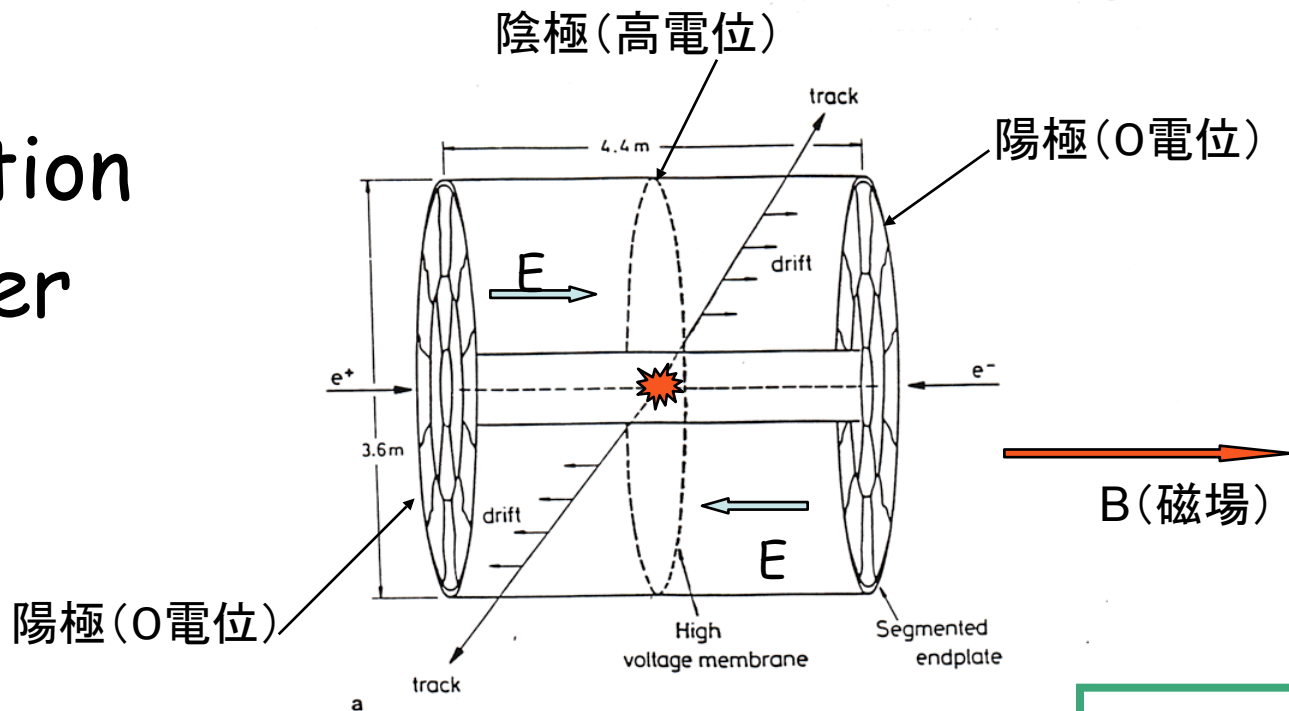
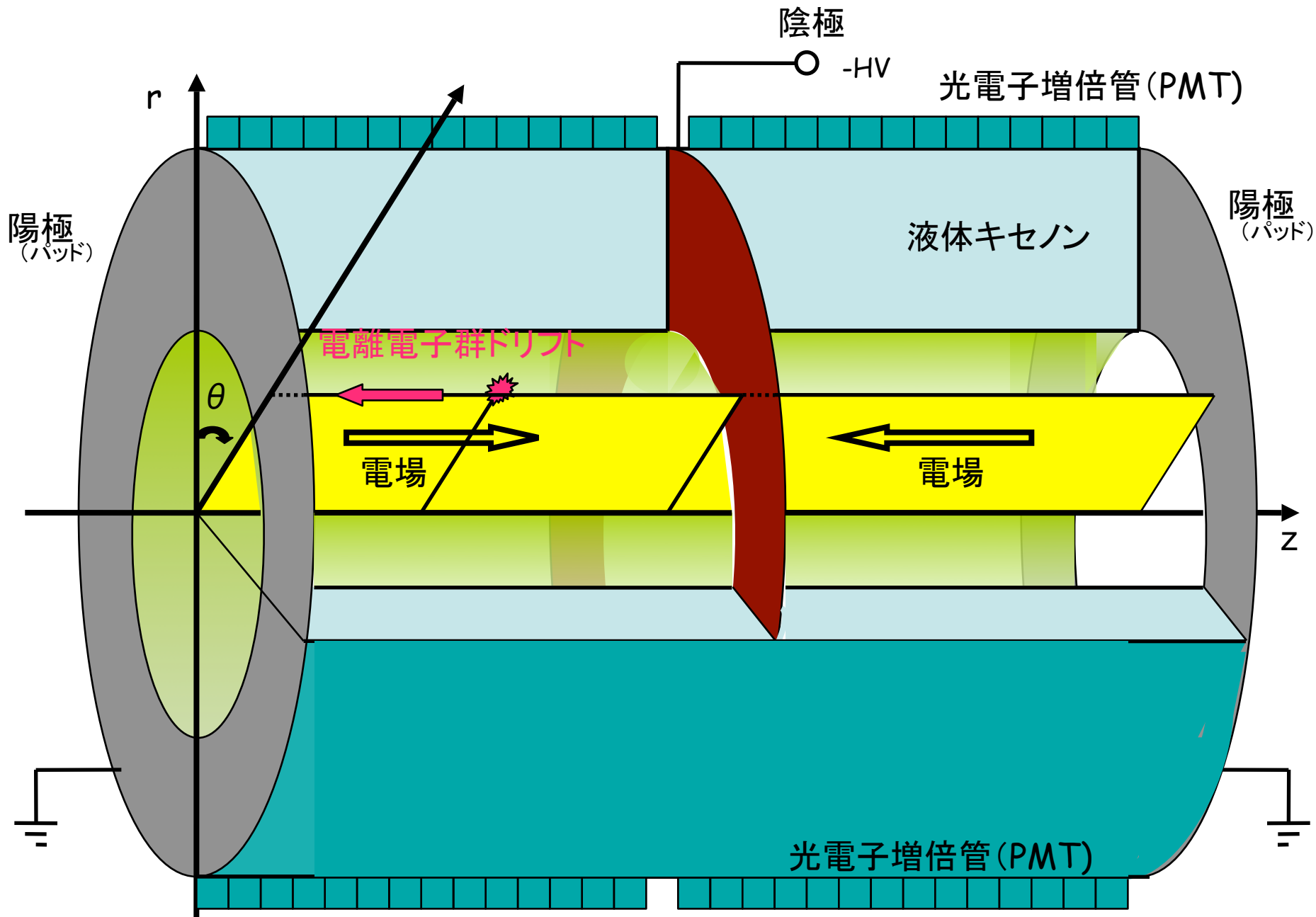


Fig. 1a, b. Schematics of the ALEPH TPC a and of the end-cap geometry b [10]

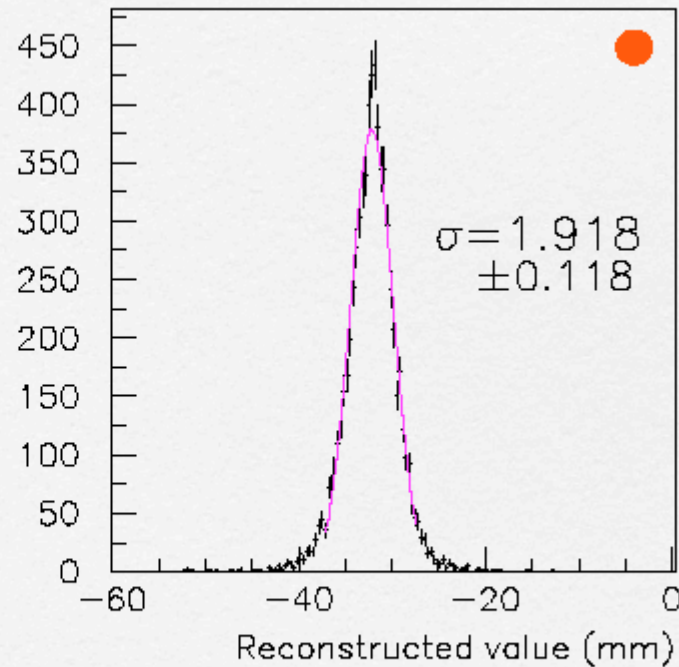
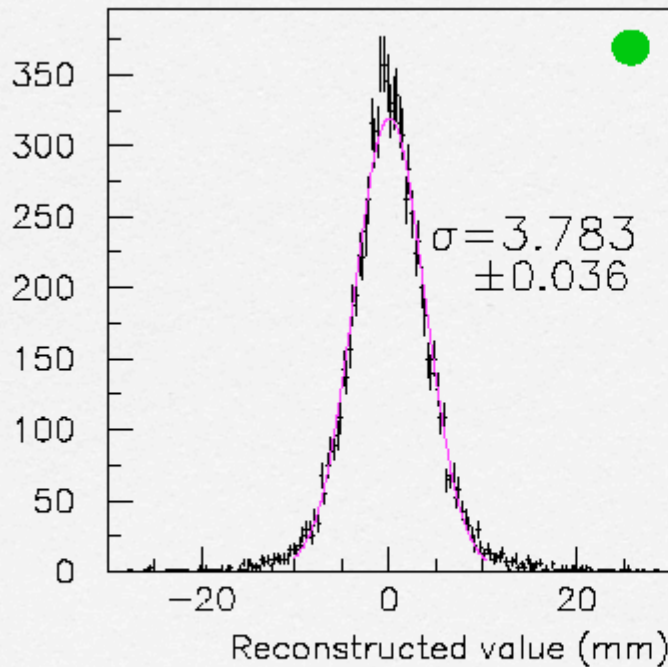
## TPCの構成要素

- ・ガス容器
- ・一様電場
- ・信号増幅
- ・読み出し電極  
(2次元分割)

# TXePET (光電子増倍管で覆われた液体キセノンTPC)



# Examples of Reconstruction



(40 MeV gamma beam w/ 1 mm collimator)

Table 1.5: Physical properties of noble liquids (adapted from Ref. (98)).

	LAr	LKr	LXe
Atomic Number $Z$	18	36	54
Atomic Weight $A$	39.95	83.8	131.3
Density (g/cc)	1.39	2.45	3.06
Melting Point $T_m$ (K)	83.8	115.8	161.4
Boiling Point $T_b$ (K)	87.3	119.8	165.1
Critical Temperature $T_c$ (K)	150.7	209.5	289.7
Critical Pressure $P_c$ (atm)	48.3	54.3	57.64
Critical Density (g/cc)	0.54	0.91	1.10
Volume Ratio ( $\rho_l/\rho_g$ )	784	641	519
Fano Factor	0.107	0.057	0.041
Drift Velocity (mm/ $\mu$ sec) @ 1(5) kV/cm	1.8(3.0)	2.4(4.0)	2.2(2.7)
Mobility (cm $V^{-1}s^{-1}$ )	525	1800	2000
Radiation Length (cm)	14.3	4.76	2.77
(dE/dx) (MeV/cm)	2.11	3.45	3.89
Liquid Heat Capacity (cal/g-mole/K)	10.05	10.7	10.65
W-value (eV) (ionization)	23.3	18.6	15.6
W-value (eV) (scintillation)	19.5	15.5	14.7
Wavelength of Scintillation Light (nm)	130	150	175
Decay const.			
fast (ns)	6.5	2	2
slow (ns)	1100	85	30
Refractive index @ 170 nm	–	1.41	1.60
Dielectric constant	1.51	1.66	1.95

## PET用シンチレータ比較

シンチレータ	Liq. Xe	Nal:TI	GSO	BGO	LSO	LGSO	LYSO	LaBr <sub>3</sub>
密度(g/cm <sup>3</sup> )	3.06	3.67	6.71	7.13	7.4	6.5-7.3	7.25	5.29
蛍光減衰時間(ns)	2, 30	230	30-60	300	42	40-100	41	16
蛍光出力(相対値)	80	100	20-24	10-12	40-80	40-80	80	130
発光波長 $\lambda_{em}$ (nm)	175	415	430	480	420	420	420	380
屈折率(at $\lambda_{em}$ )	1.60	1.85	1.85	2.15	1.82	1.82	1.81	1.9
放射線強度(gray)		10 <sup>3</sup>	>10 <sup>6</sup>	10 <sup>2-3</sup>	10 <sup>5</sup>			
吸収潮解性	なし	強い	なし	なし	なし	なし	なし	あり
放射性	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり	なし
融点(°C)	-111.6	651	1950	1050	2150	2100	2100	783
へき開	なし	なし	(100)面	なし	なし	(100)面	なし	なし
育成方法	—	BR	CZ	CZ, BR	CZ	CZ	CZ	BR

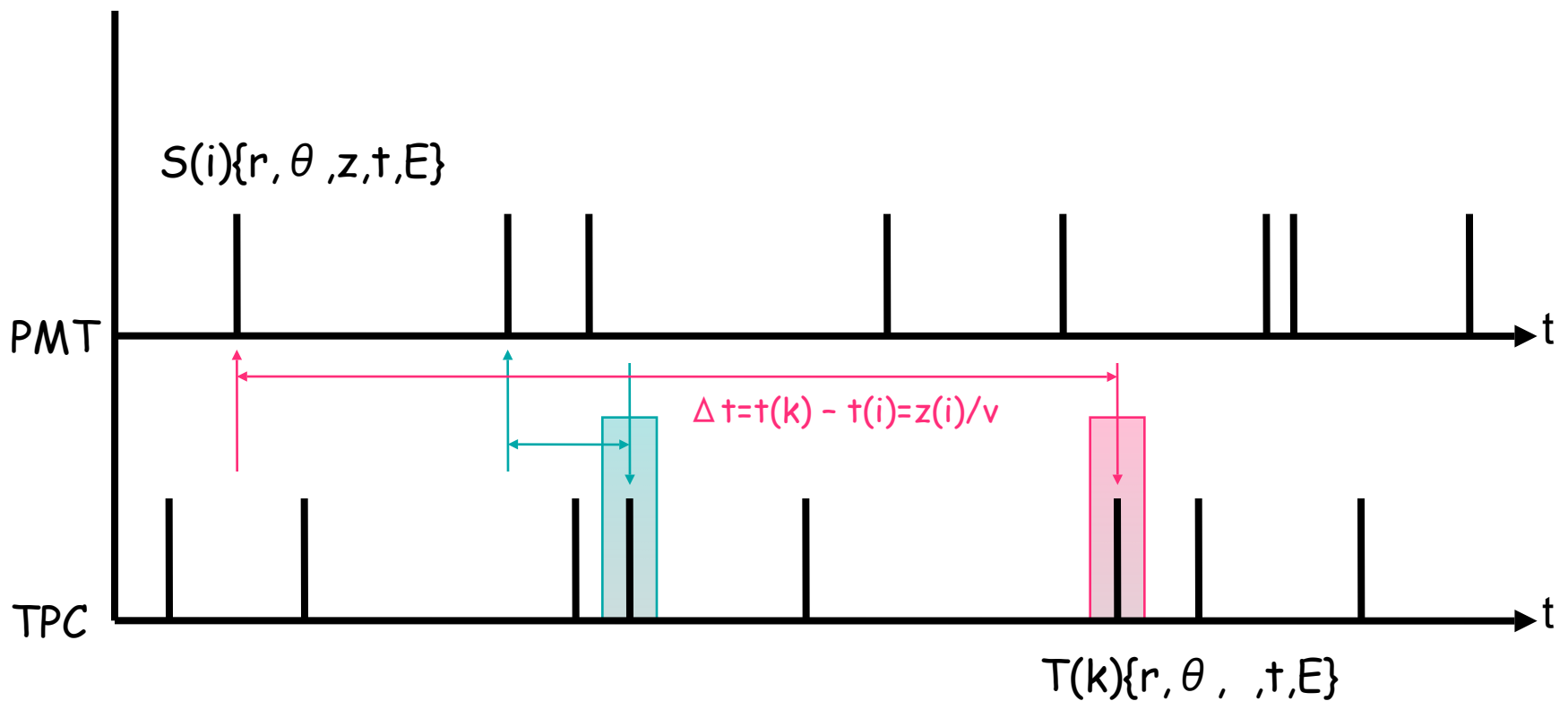
# Event Building (ASIC/FPGA/PC)

Scintillation (PMT)	Ionization (TPC)	Matching
<p>i. Digitization</p> <p>Base line subtraction</p> $P(ij)\{\theta, z, t, E\}$ <p>ii. Cluster search</p> $ t(ij) - t(ij_{\pm})  < \delta t$ $ \theta(ij) - \theta(ij_{\pm})  < \delta \theta$ $ z(ij) - z(ij_{\pm})  < \delta y$ <p>iii. Cluster values</p> $E(i) = \sum E(ij)$ $\theta(i) = \sum E(ij) \theta(ij) / \sum E(ij)$ $z(i) = \sum E(ij) z(ij) / \sum E(ij)$ $r(i) = f(\theta(ij), z(ij), E(ij))$	<p>1. Amplification</p> <p>2. Digitization</p> <p>Base line subtraction</p> $I(kl)\{r, \theta, t, E\}$ <p>3. Cluster search</p> $ t(kl) - t(kl_{\pm})  < \delta t$ $ \theta(kl) - \theta(kl_{\pm})  < \delta \theta$ $ r(kl) - r(kl_{\pm})  < \delta r$ <p>4. Cluster values (not z)</p> $E(k) = \sum E(kl)$ $\theta(k) = \sum E(kl) \theta(kl) / \sum E(kl)$ $r(k) = \sum E(kl) r(kl) / \sum E(kl)$	<p>5. Matching with</p> $S(i)\{r, \theta, z, t, E\}$ $ E(i) - E(k)  < \delta E$ $ r(i) - r(k)  < \delta r$ $ \theta(i) - \theta(k)  < \delta \theta$ $z(k) = v(t(k) - t(i))$ $ z(i) - z(k)  < \delta z$ $T(k)\{r, \theta, z, t, E\}$ <p>6. Individual photon values</p> $G(m)\{r(k), \theta(k), z(k), t(i), E(i) \text{ or } E(k)\}$ <p>7. Pair matching</p> $ t(m) - t(n)  < \delta t$ <p>8. Event</p> $H(a)\{G(m), G(n)\}$ <div style="border: 1px solid black; background-color: #FFC0CB; padding: 5px; display: inline-block; margin-top: 10px;">Imaging</div>



# Matching between PMT and TPC

$v=2.2 \text{ mm}/\mu\text{sec}$



Additional requirement:  $S(i)\{r, \theta, E\} \approx T(k)\{r, \theta, E\}$

# PETの開発戦略

- A) 解像度の向上
- B) 感度の向上
- C) 雑音の除去

## 結晶系PETの開発戦略

- 0) 多光量、高速、非潮解性結晶の開発
  - 1) 結晶サイズの細分化
  - 2) 径方向位置情報(DOI)による画像歪の解消
    - ・ 結晶の径方向分割(多層化)
  - 3) パッキング率の改善
  - 4) TOF による偽線源位置の排除
  - 5) 多チャンネル高速読み出し回路の開発
  - 6) 画像処理プログラムの開発

## TXePETの開発戦略

- 0) 高エネルギー実験技術の応用
  - 1) 液体キセノンTPCによる511keV光子の三次元位置測定(電離電子)
    - ・ DOIを含め1mm以下の精度
  - 2) 蛍光の分布測定による反応の三次元位置推定と事象発生時間の決定(蛍光)
  - 3) 体軸方向のドリフト
    - ・ 一様電場の形成が容易
    - ・ 周方向にシームレス
    - ・ 体軸方向に広いカヴァレッジ
    - ・ MRIとの併用に有利
  - 4) TOF 等による偽線源位置の排除
  - 5) 多チャンネル高速読み出し回路の開発
  - 6) 画像処理プログラムの開発

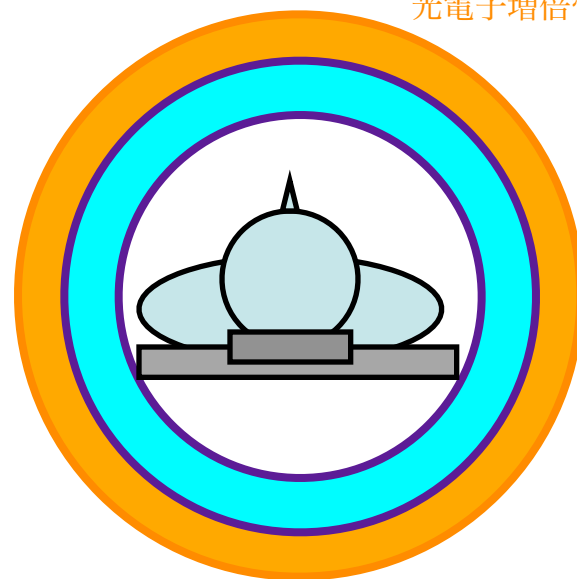
# 想定される実用機(TXePET)

光電子増倍管

ホールボディ

液体キセノンの体積: 140 ℓ

内径 88 cm (クライオスタット内径 80 cm)  
外形 106 cm (DOI 9 cm) (93%ガンマ線検出)  
長さ 48 cm (最大ドリフト長 104 μsec)



## 蛍光測定 (35,00 photons for 511keV)

光電子増倍管:  $8 \times 112 \times 2 = 1792$ 本 (1インチ)

位置分解能(FWHM): 1 cm

時間分解能(FWHM): 0.5 nsec

同時計測時間(FWHM): 10 nsec

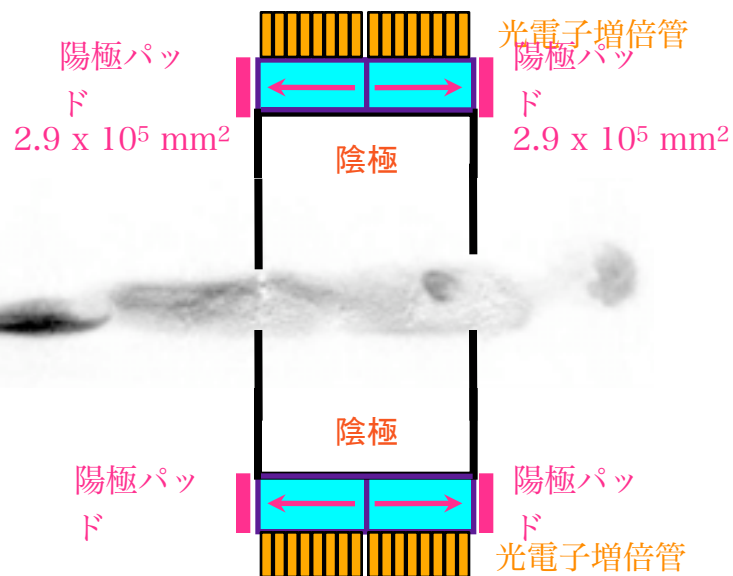
## 電離電子測定 (33,000 ion pairs for 511keV)

TPC: 印加電圧 48kV

最大ドリフト時間: 110 μsec

位置分解能(FWHM): 0.5 mm

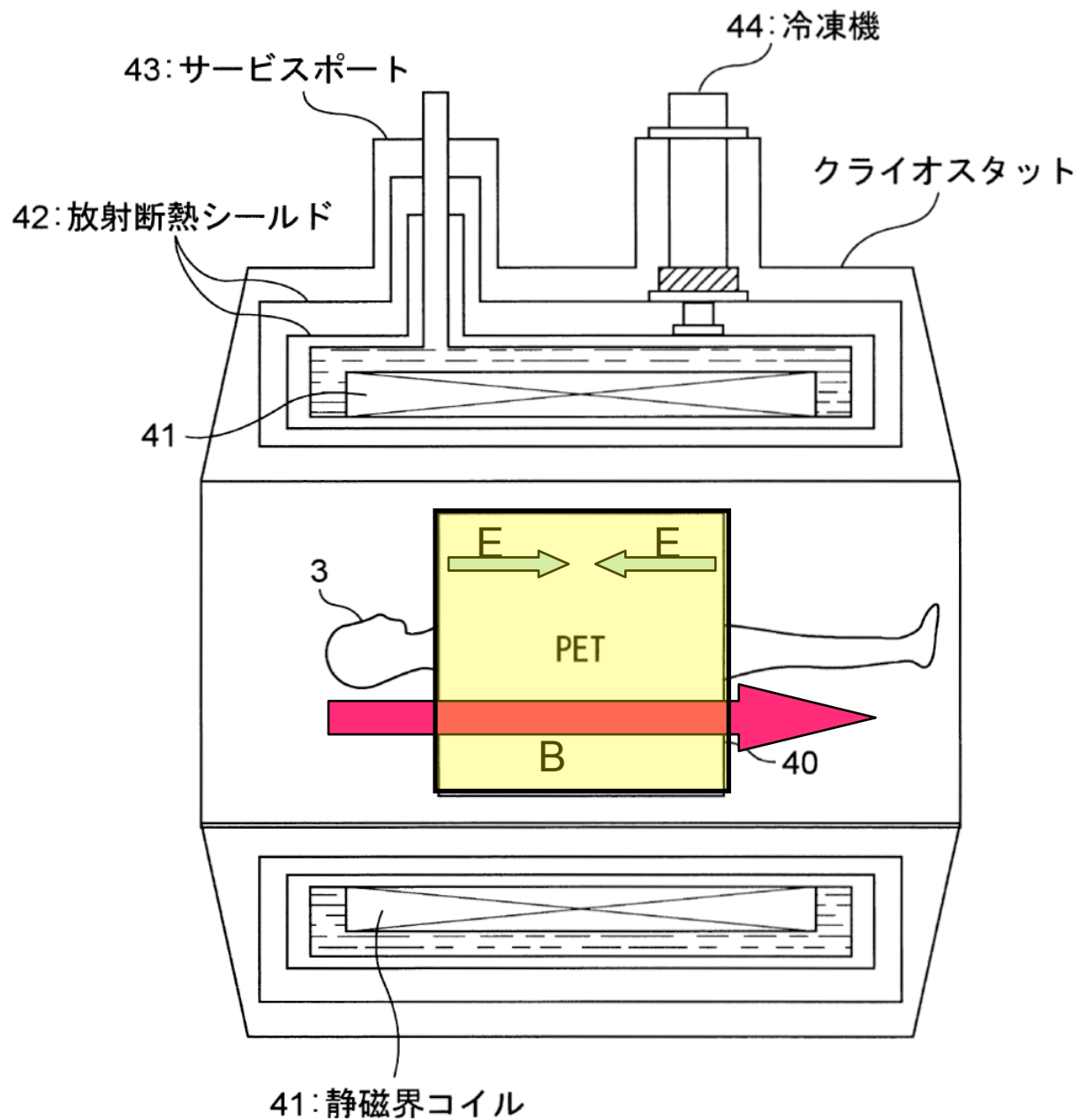
エネルギー分解能(FWHM): 14%



# TXePETの特徴

- 確立された技術の応用(高エネルギー物理学実験)
- 液体キセノンTPCを主体とした測定器
  - 高い3次元位置精度
- 測定器媒体が液体である
  - 形状の自由度が大きい
  - 不感領域の極小化が容易
  - 媒体の支持も容易。
- 蛍光の測定
  - 時間スタンプ
  - 高速計数(大まかな位置情報)
- 体軸方向(z)へのドリフト
  - 一様電場が容易
  - 高感度
    - 不感領域の極小化
    - 大立体角
  - MRIとの共用
- バックグラウンドの除去
  - コンプトン・スペクトロメータ
  - TOF-PET

# MRI/PET



# 開発プロジェクトの現状と予定

- H18年度グループ発足(KEK,NIRS)
- H19年度 KEK素粒子原子核研究所測定器開発室認定プロジェクト
  - 開発費
  - 実験室(8月末入居予定)
- グループ拡大(佐賀大学、横浜国大)
- 実験準備中
  - 低温設備の整備
  - 読み出しエレクトロニクスの開発整備(KEKエレクトロニクス・グループ)
  - プロト・プロトタイプ的设计、発注
- 基本性能の測定(H19. 9-H19. 12)
- プロトタイプ的设计、発注(H20.4)
- H20年度大型プロトタイプでデモンストレーション
- H21-22年度 1号機

# プロジェクト・メンバー

- 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
  - 田内利明、田中秀治、春山富義、幅淳二、真木晶弘
- 放射線医学総合研究所 (NIRS)
  - 熊田雅之、富谷武浩、寅松千枝
- 佐賀大学
  - 杉山晃、東貴俊
- 横浜国立大学
  - 中村正吾

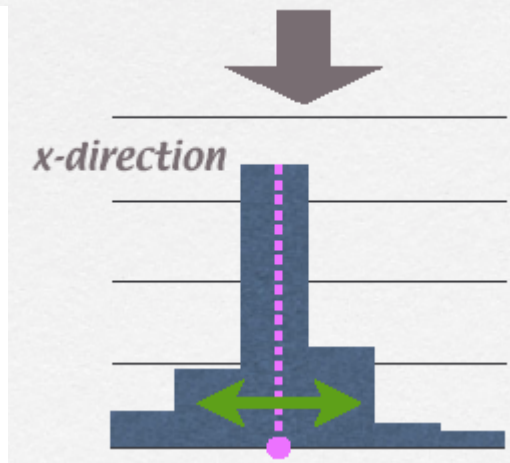
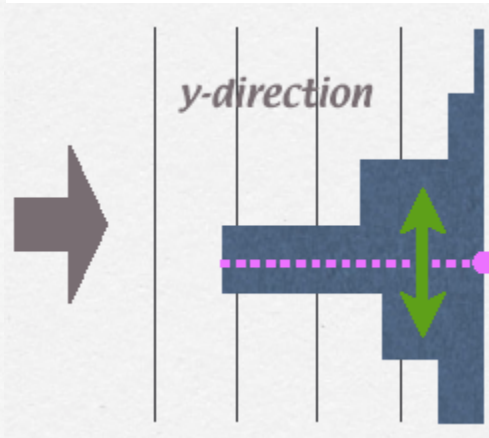
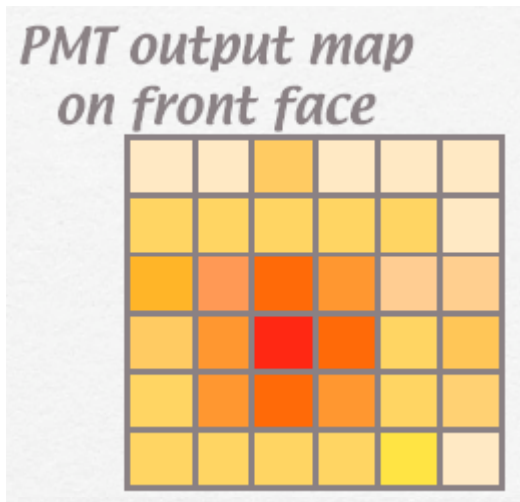




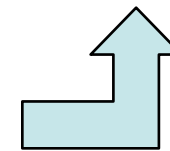
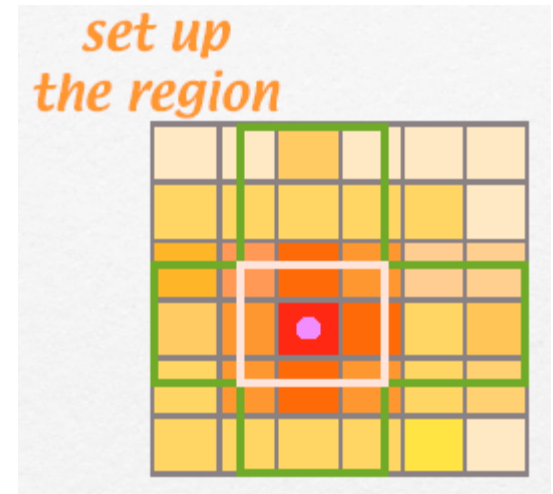


# Position Reconstruction

- Localized Weight Method



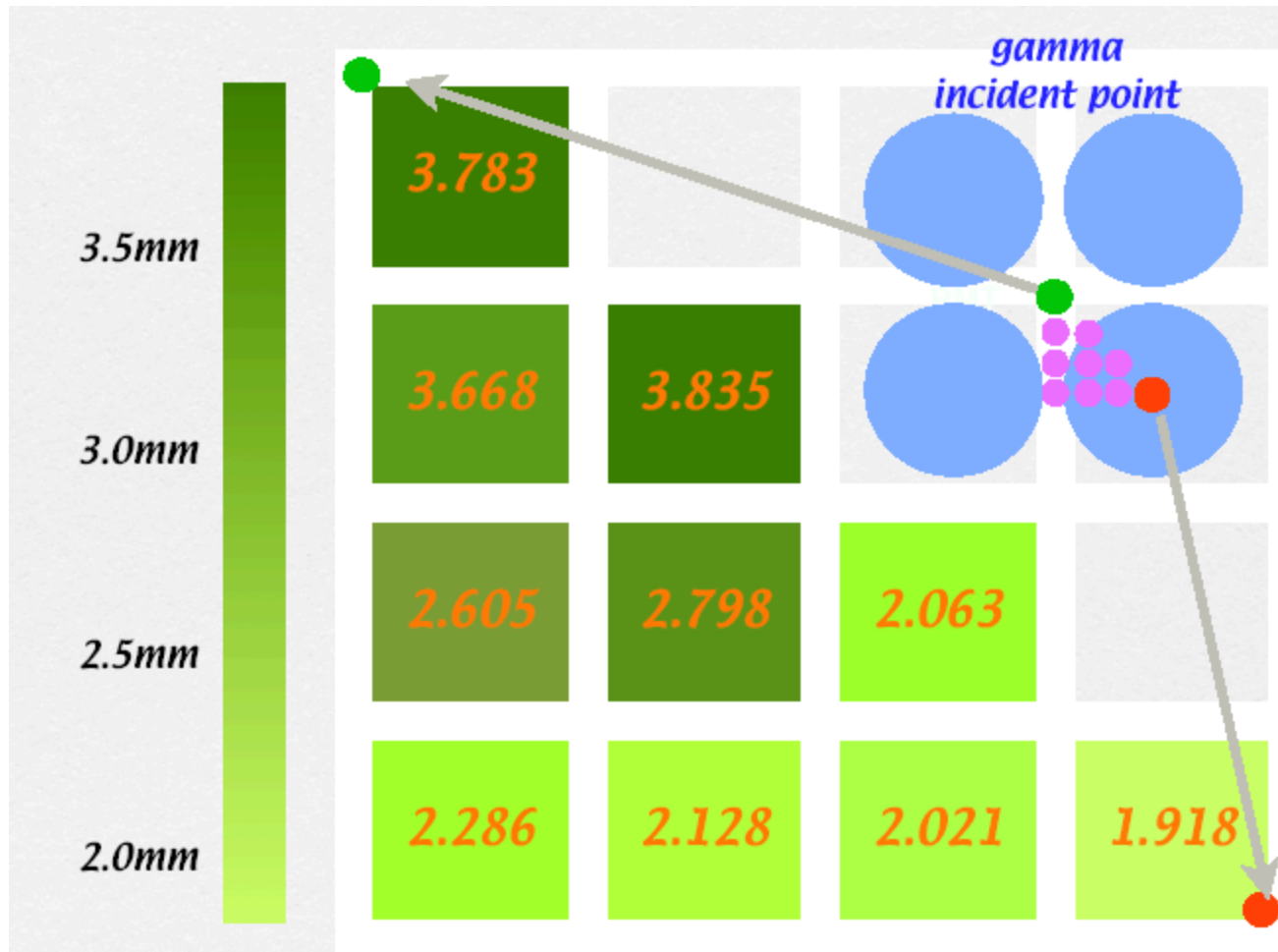
- Projection to x and y directions.
- Peak point and distribution spread



- Position reconstruction using the selected PMT

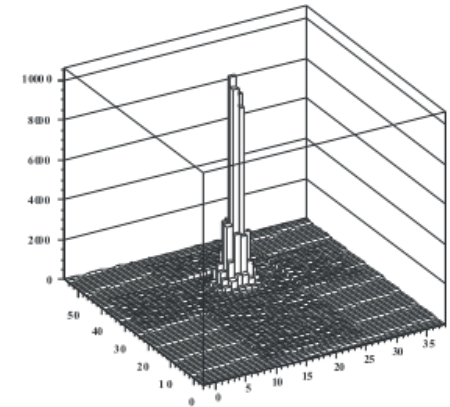
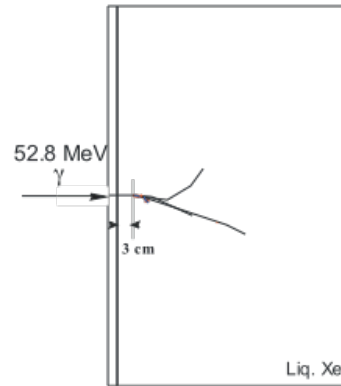
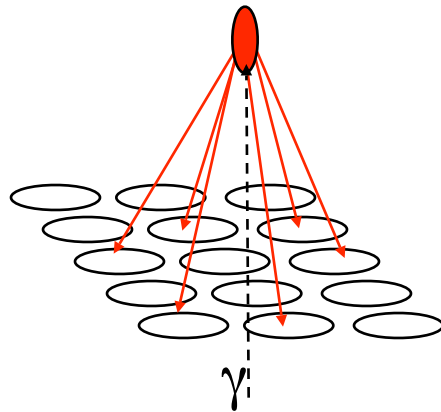
$$X_{reconst.} = \frac{\sum_i w_i Q_i x_i}{\sum_i w_i Q_i}$$

# Position Reconstruction Resolution

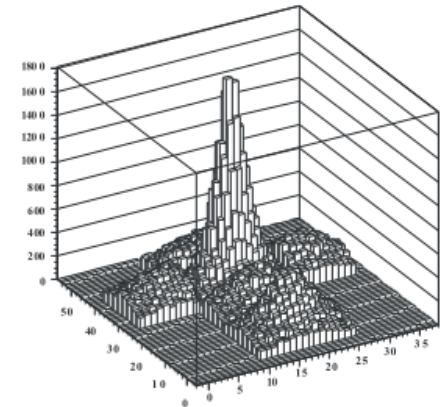
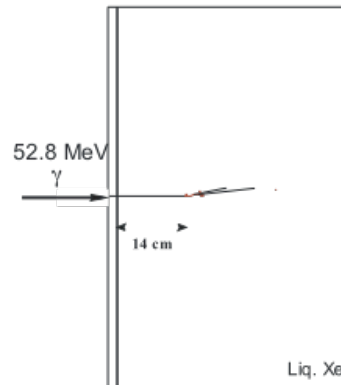


# Reconstruction of the event depth

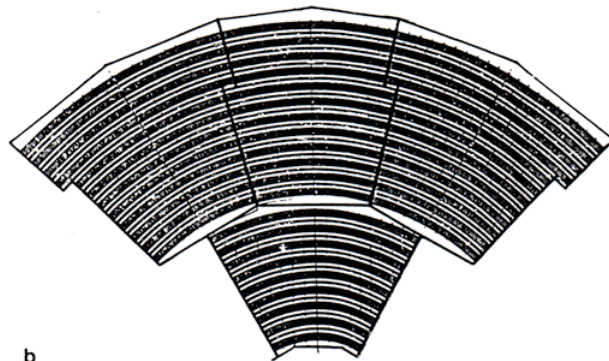
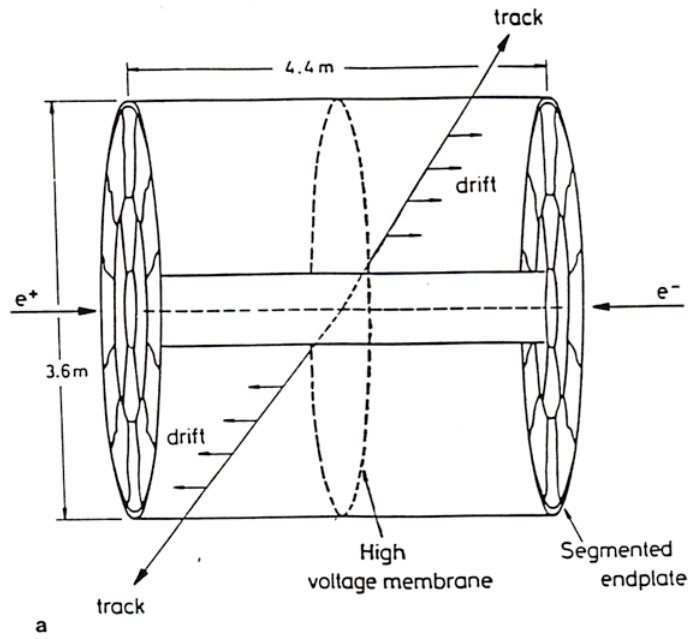
- Using event broadness on the inner face
- Necessary to achieve good timing resolution



(a)



(b)



**Fig. 1 a, b.** Schematics of the ALEPH TPC **a** and of the end-cap geometry **b** [10]

# TXePET :分割の無い液体キセノンTPC

液体Xe : 140 ℓ ,88cm内径,48cm FOV,9cm DOI (93% $\gamma$ 線検出)

光電子増倍管:  $8 \times 112 \times 2 = 1792$ 本    TPC : 電場 48kV/24cm

位置分解能(FWHM) = 2cm

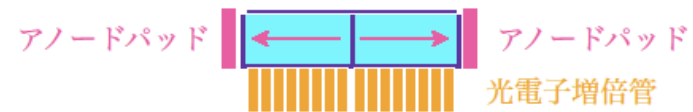
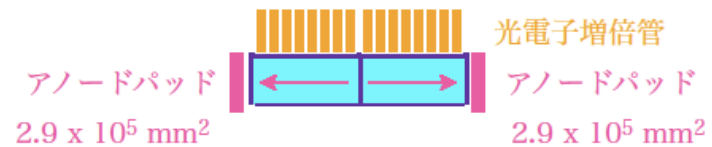
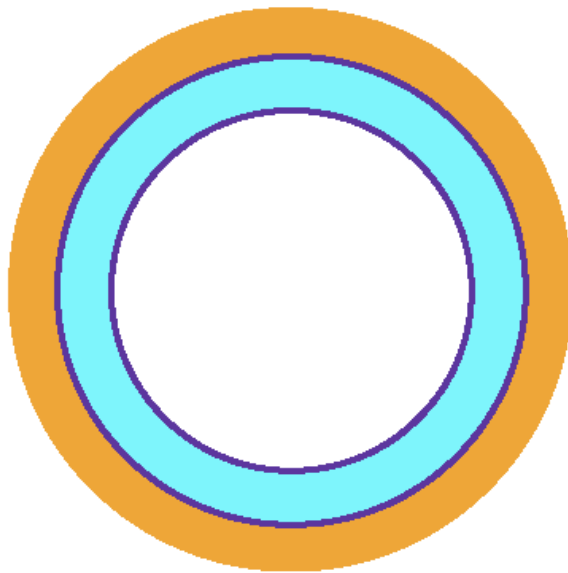
同時計測時間 = 10 nsec

TPCへのタイムスタンプ

ドリフト時間 : 104  $\mu$ sec/ $\pm 24$ cm

(ドリフト速度 : 2.3mm/ $\mu$ sec)

不感時間のない読み出し



# TXePET:分割の無い液体キセノンTPC

