

# DCBA実験と将来計画(MTD実験)

2014年8月23日

角野秀一  
首都大学東京理工学研究科  
他 DCBA実験グループ

地下素核研究 研究会  
大阪大学豊中キャンパスホール  
2014年 8月23日

# 世界の二重ベータ崩壊実験

## Scintillation/Calorimetry

ionization

COBRA ( $^{130}\text{Te}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ , etc.)

Majorana ( $^{76}\text{Ge}$ )

GERDA ( $^{76}\text{Ge}$ )

scintillation

CANDLES ( $^{48}\text{Ca}$ )

MOON ( $^{100}\text{Mo}$ )

KamLAND-Zen ( $^{136}\text{Xe}$ )

SNO+ ( $^{150}\text{Nd}$ )

bolometry

CUORE ( $^{130}\text{Te}$ )

Ionization  
+scintillation

EXO ( $^{136}\text{Xe}$ )

NEXT ( $^{136}\text{Xe}$ )

## Combination

NEMO3 ( $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ , etc.)

Super NEMO ( $^{82}\text{Se}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ , etc.)

## Tracking

(運動量再構成)

DCBA / MTD

( $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ , etc.)

# 運動量再構成の利点と欠点

## 利点:

- (ガンマ線などの)中性のバックグラウンドに対して不感
- 他の手法と比較して、多くの情報が得られる:
  - ・2つのベータ線それぞれの4元運動量と電荷
  - ・崩壊点の位置情報

- ・ 高いバックグラウンド除去能力
- ・ もし $0\nu\beta\beta$ が見つかった場合:  
新物理モデルを制限するために必要な情報  
(単独 $\beta$ 線のエネルギー分布や $\beta$ 線間の角相関)を提供

## 欠点:

より良いエネルギー分解能のためには:  
検出器内の物質量は**少なく**



相反する2つの要求

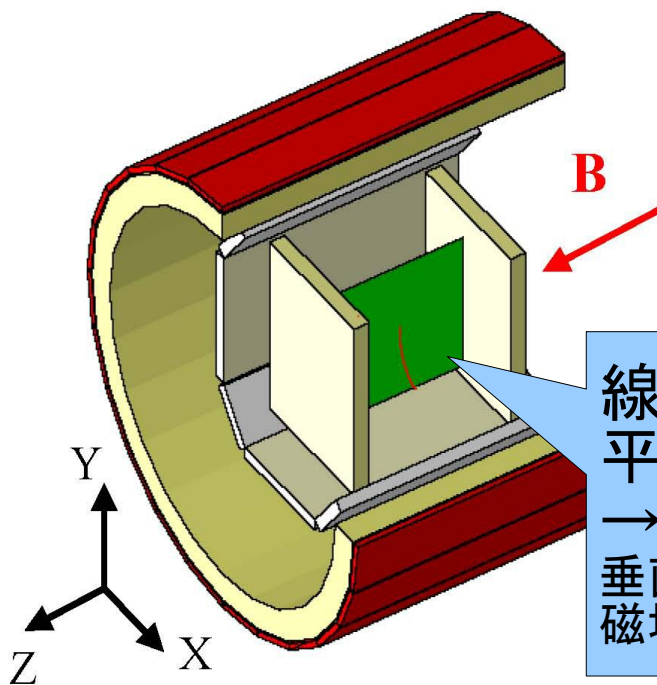
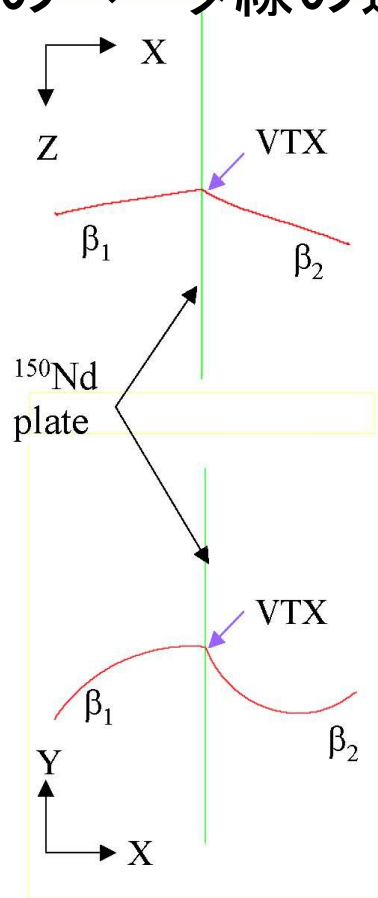
より良い統計精度を得るためには:  
検出器内の線源の量を**多く**

多くの線源を搭載するのは容易でない。

# DCBA実験の原理

- 飛跡検出器内部に線源板をもつ  
線源:  $^{100}\text{Mo}$  (将来的には  $^{150}\text{Nd}$ )
- 飛跡検出器に一様磁場を印加  
→ 2つのベータ線は、飛跡検出器内でらせん運動
- 2つのベータ線の運動量を再構成し、それらのエネルギーを計算

DCBA:  
Drift Chamber Beta-ray Analyzer



線源板を磁場に対して  
平行に設置  
→ 線源板に対して  
垂直に放出されるベータ線が  
磁場に対して大きな横運動量を持つ。



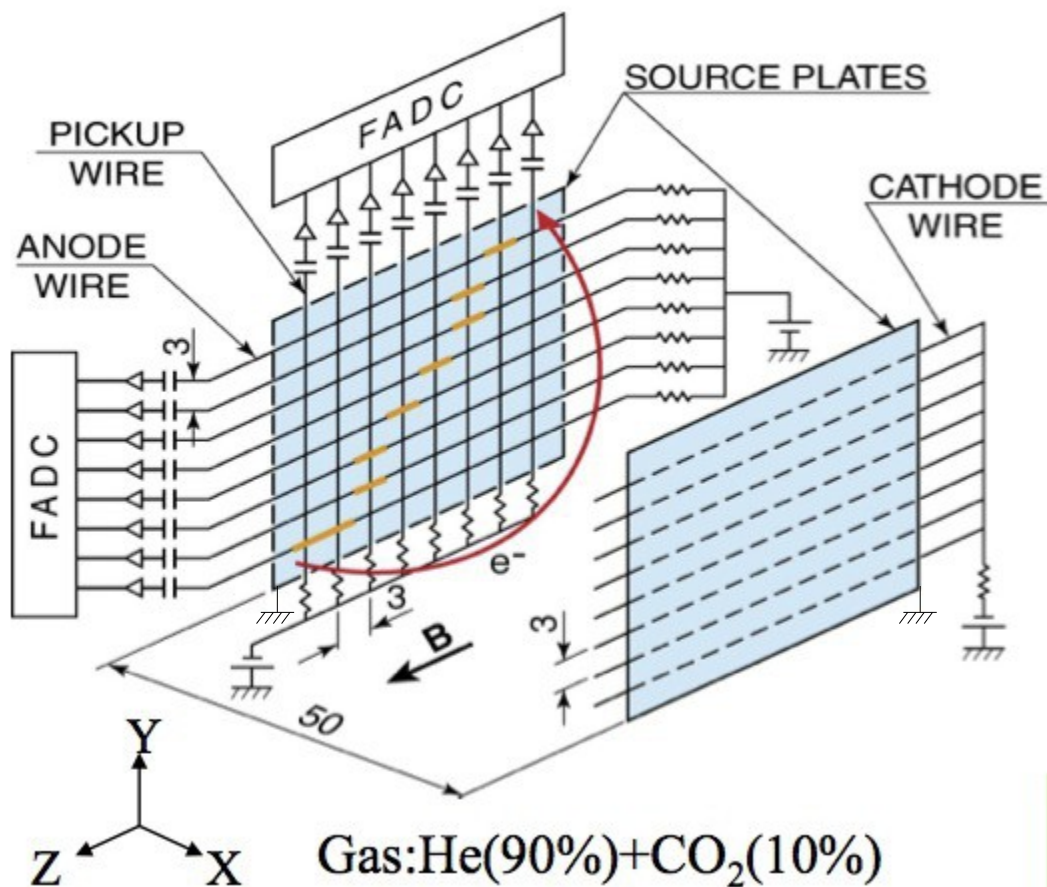
# DCBA: 飛跡再構成手法

飛跡位置の再構成:

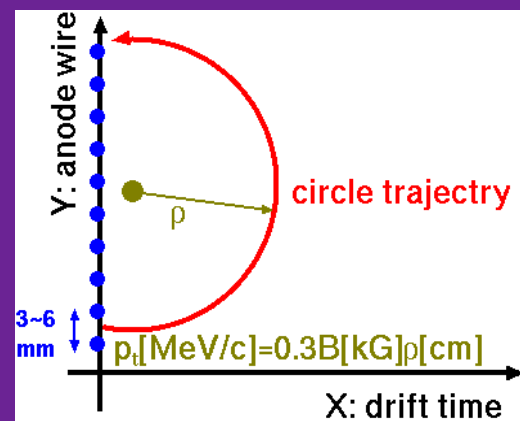
X: ドリフト時間

Y: アノードワイヤーのヒット位置

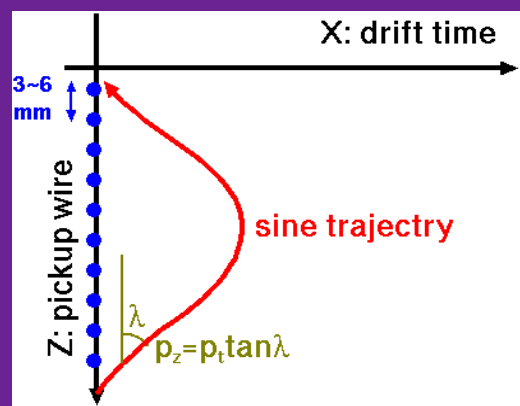
Z: ピックアップワイヤーのヒット位置



運動量の再構成:



$p_t$



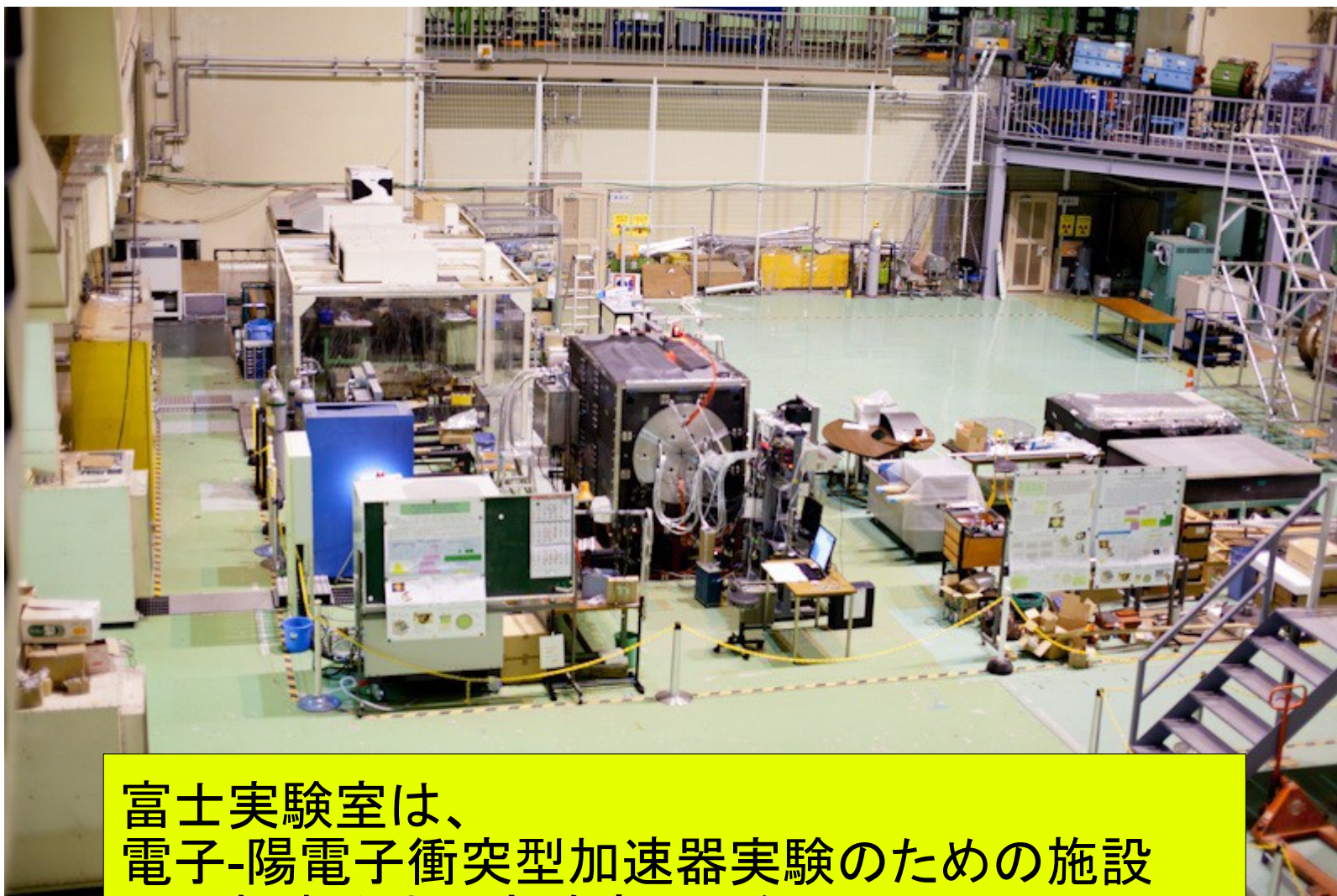
$p_z$

運動エネルギーの計算

$$\begin{aligned}
 T &= \sqrt{p_t^2 + p_z^2 + m_e^2} - m_e \\
 &= \sqrt{(0.3B\rho)^2 (1 + \tan^2 \lambda) + m_e^2} - m_e \\
 &= \sqrt{(0.3B\rho)^2 / \cos^2 \lambda + m_e^2} - m_e
 \end{aligned}$$

# DCBA 実験

DCBA実験はKEKの富士実験室で行われている



富士実験室は、  
電子-陽電子衝突型加速器実験のための施設  
→いわゆる地下実験室ではない。



# 現在走っている実験: DCBA-T2.5

2005 DCBA

2007 DCBA-T2

2011 DCBA-T2.5

現在

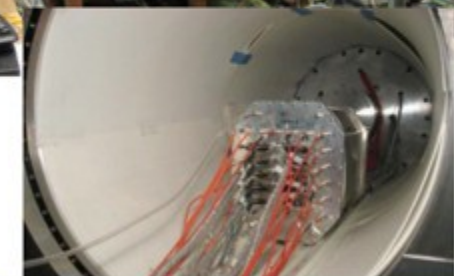
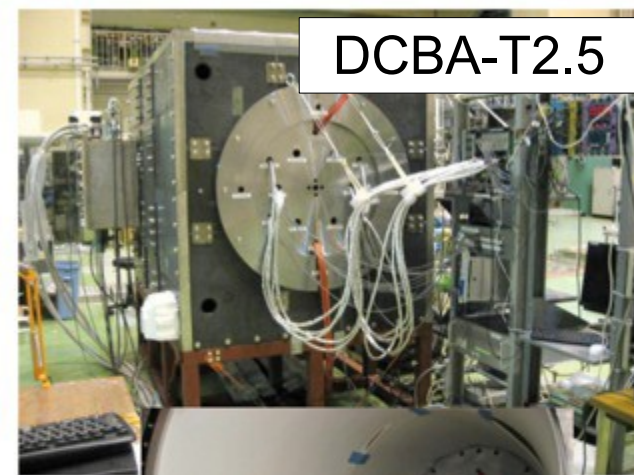
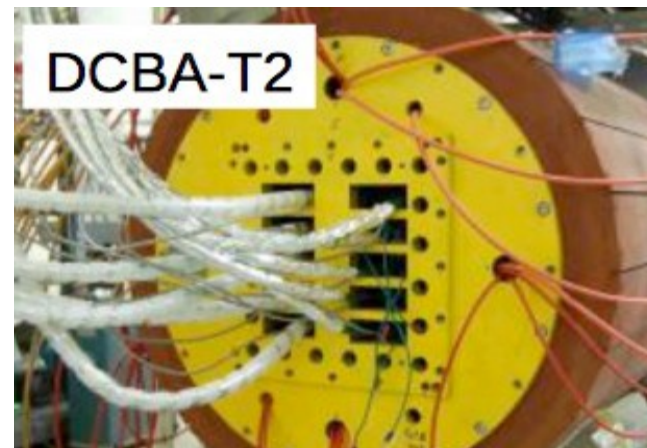
2014 DCTA-T3

2017 MTD(仮称)

実験原理  
(飛跡検出を用いた手法)  
の実証  
-  $2v\beta\beta$  事象の測定

MTD実験に向けた  
プロトタイプ  
-  $2v\beta\beta$  事象の精密測定

ニュートリノレス  
二重ベータ崩壊  
の探索

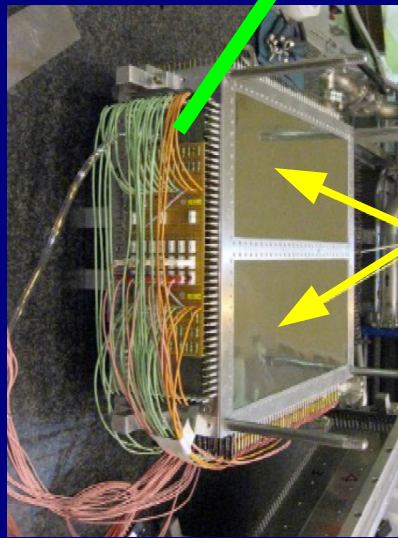
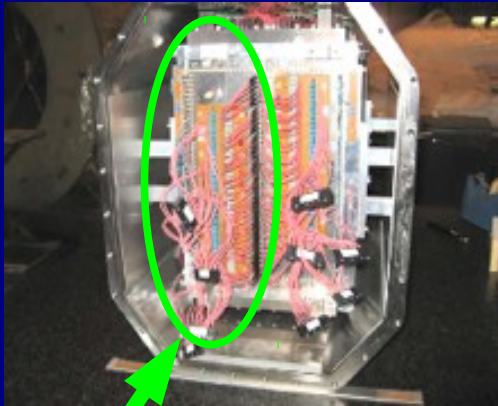


DCBA-T2 Chamber installed into the DCBA-T3 SC-Magnet

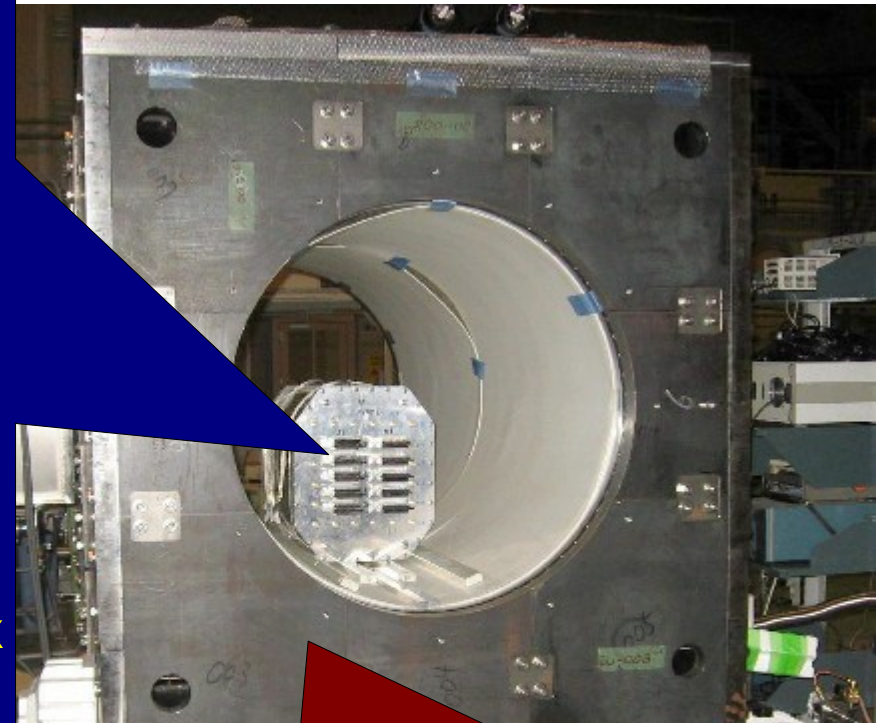
# DCBA-T2.5

DCBA-T2用飛跡検出器と、DCBA-T3用電磁石を用いた実験

## DCBA T2 用飛跡検出器



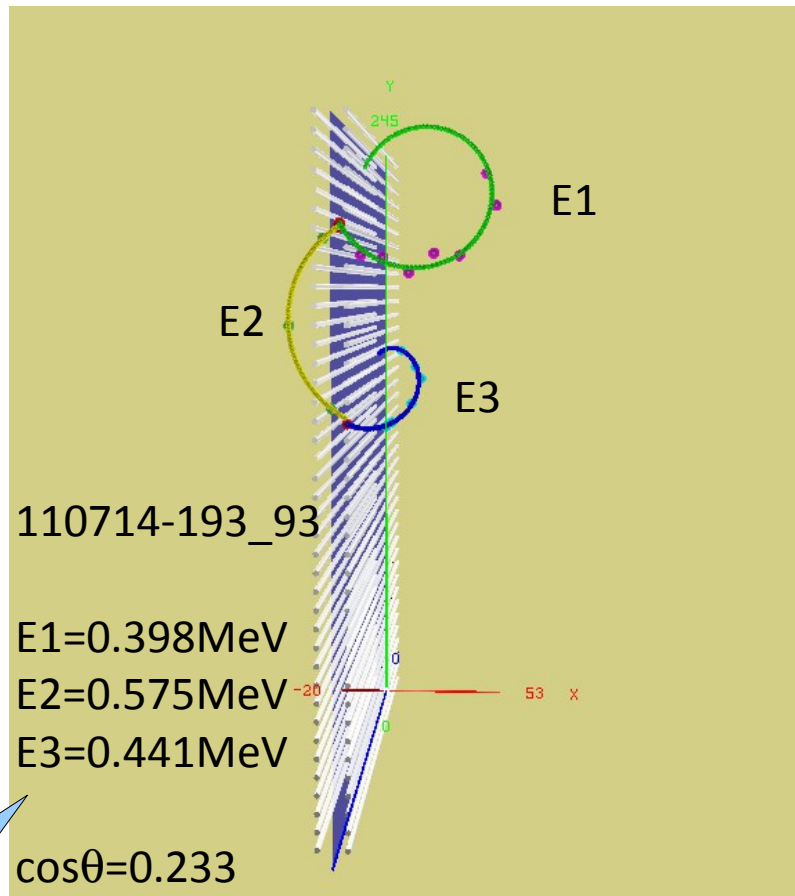
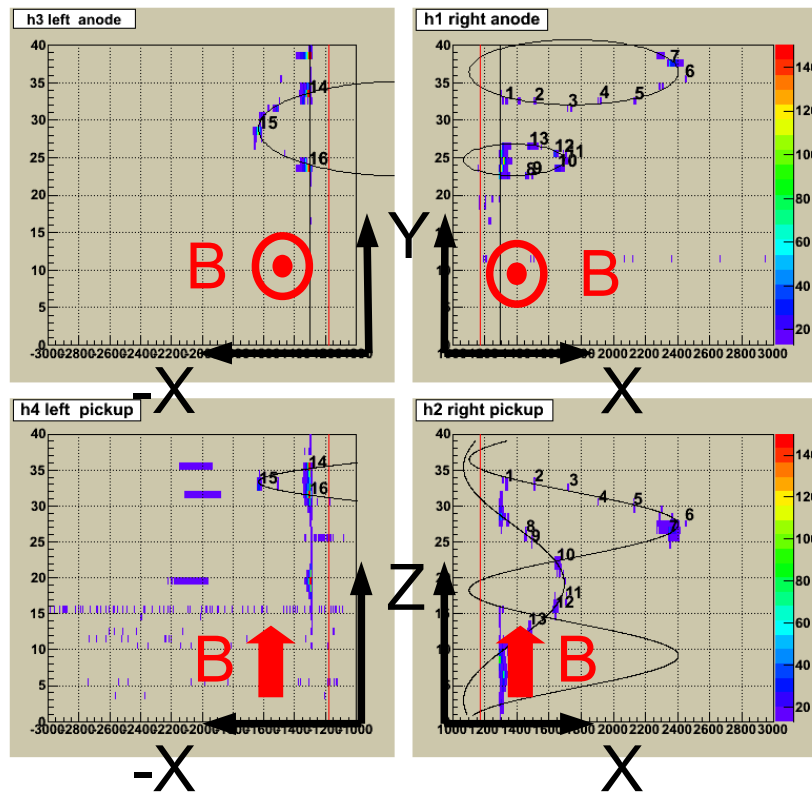
天然モリブデン  
線源板:  
・280mm x 130mm x  
50 $\mu$ m  
・45mg/cm<sup>2</sup>  
・質量 30g  
・<sup>100</sup>Mo:  
線源板に9.6%含有  
(0.03 mol)



DCBA-T3 用電磁石:  
・超伝導ソレノイド  
→24 時間の無人運転が可能に  
・磁場: ~0.6-0.8kGauss for T2.5



# 典型的な二重ベータ崩壊事象候補



自由に回転できる3次元的な表示  
→視覚的に理解しやすい表示

↓  
事象のより正しい理解が可能。

Vertex point

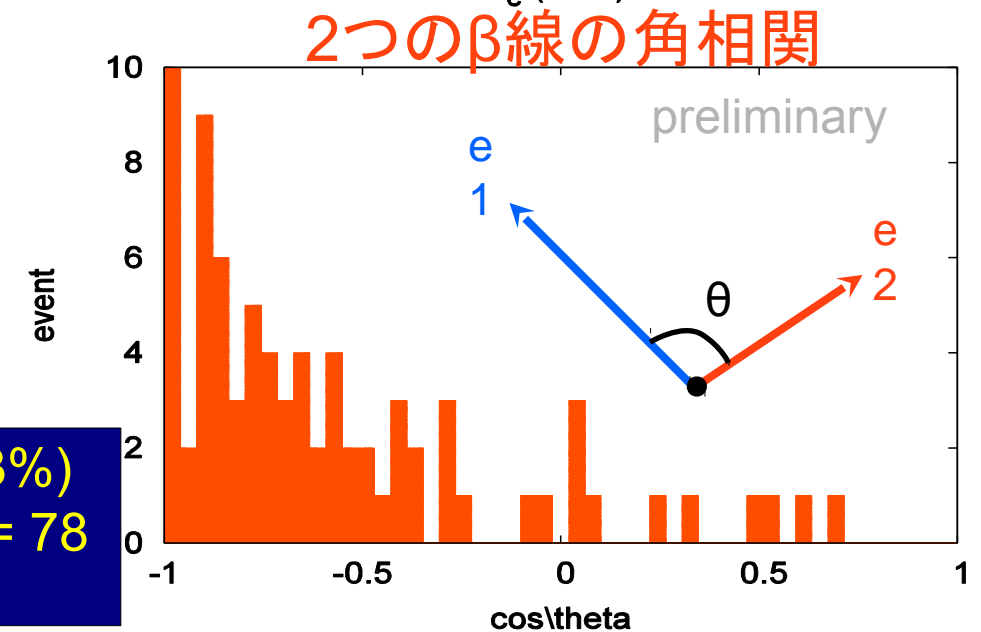
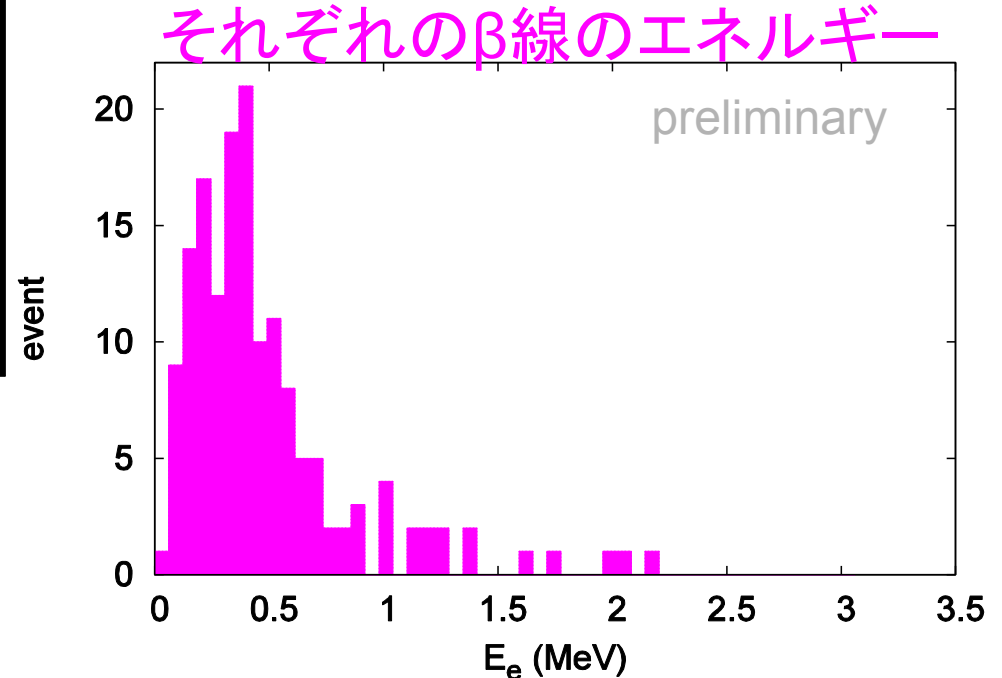
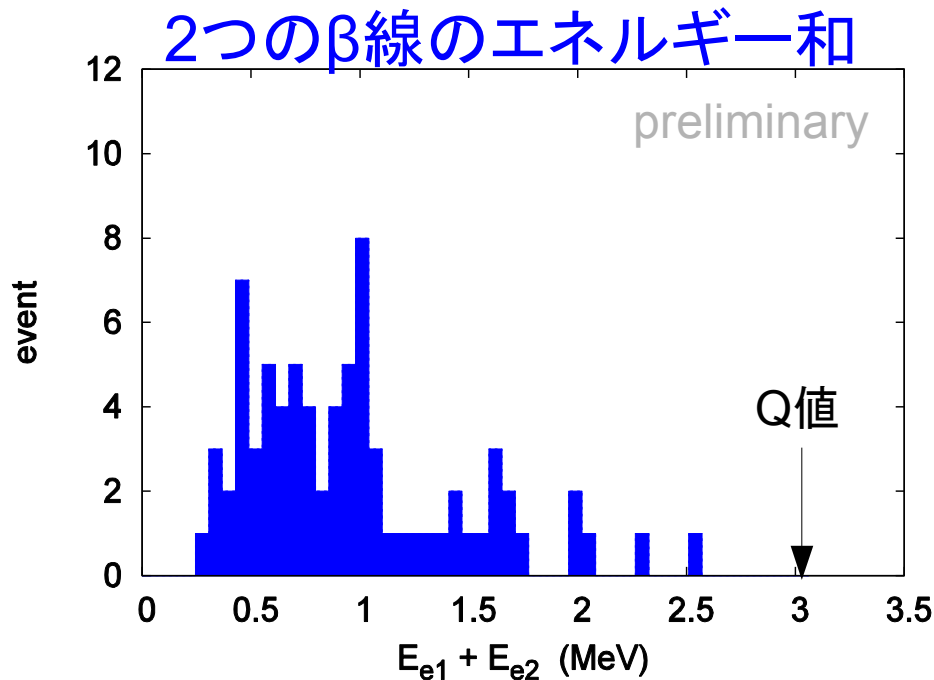
	E1	E2
Y	206.5mm	205.5mm
Z	210.7mm	213.3mm



# DCBA-T2+T2.5 のデータ解析の現状

DCBA/MTD実験は

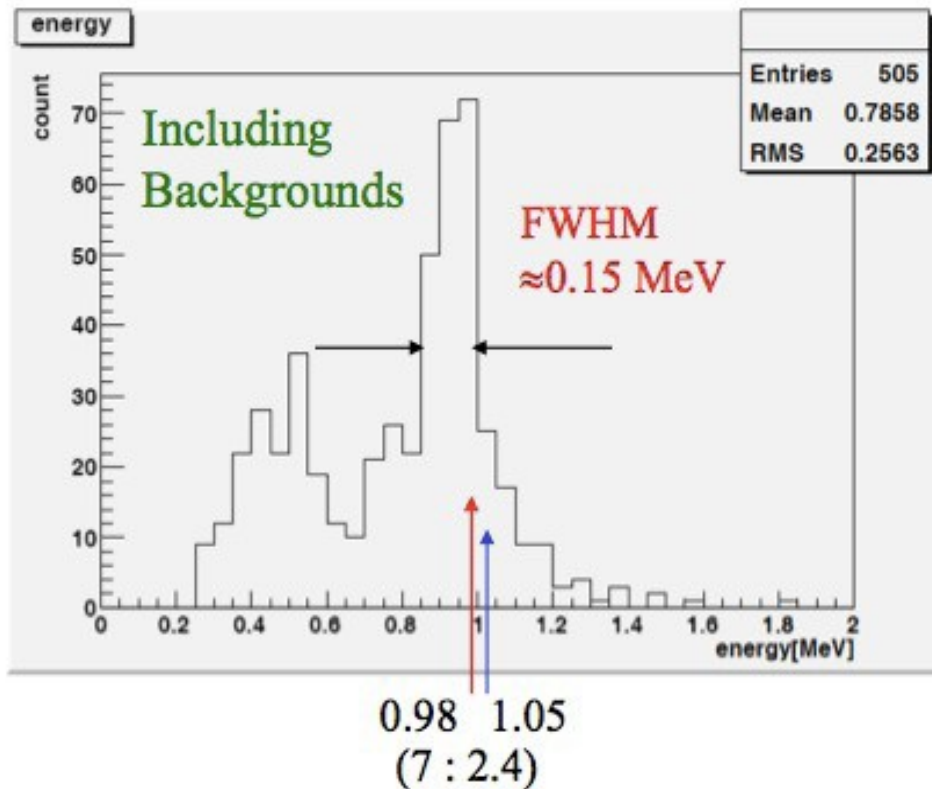
- ・ 2つのβ線のエネルギー和( $E_{\beta 1} + E_{\beta 2}$ )
- に加え以下の2つの物理量を測定可能:
- ・ それぞれのβ線のエネルギー分布 ( $E_{\beta}$ )
- ・ 2つのβ線の角相関( $\cos \theta_{12}$ )



T2.5解析事象数:950,100(取得事象数の13%)  
2 $\nu\beta\beta$ 信号候補数:57 +21(T2の信号候補) = 78  
さらなる解析を進行中

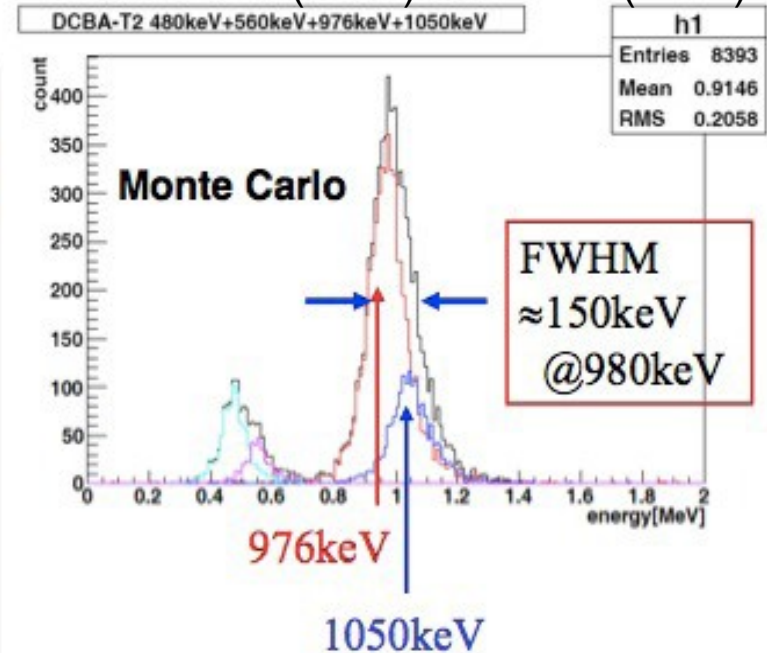
# DCBA-T2 (および T2.5)の エネルギー分解能

Energy spectra of internal conversion  
electrons from  $^{207}\text{Bi}$



Electron energy:

0.48 MeV (1.5%) 0.56 MeV (0.6%),  
0.98 MeV (7.0%) 1.05 MeV (2.4%)



Chamber conditions  
He(90%)+CO<sub>2</sub>(10%) 1atm  
B=0.8 kG  
Wire pitch=6 mm

エネルギー分解能:  $\sim 0.15$  MeV (FWHM)  
→ エネルギー分解能の向上と、線源の量の増大を目指して  
DCBA-T3 を開発



# DCBA実験の高度化: DCBA-T3

2005 DCBA

2007 DCBA-T2

2011 DCBA-T2.5

現在

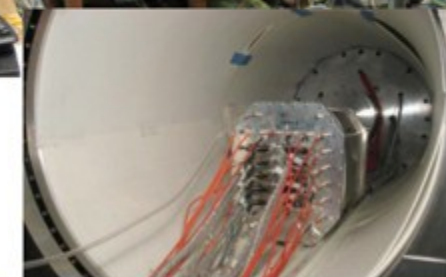
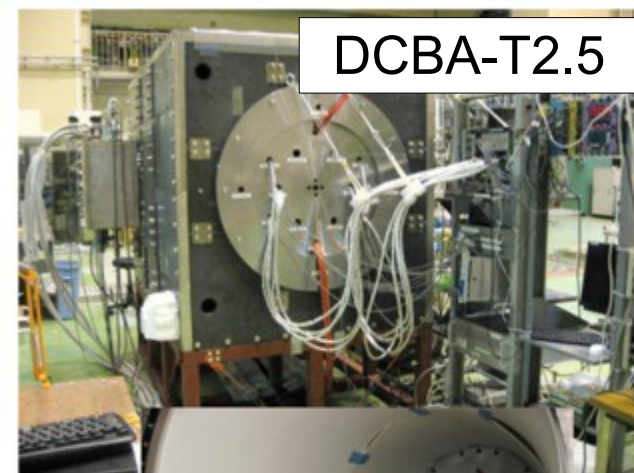
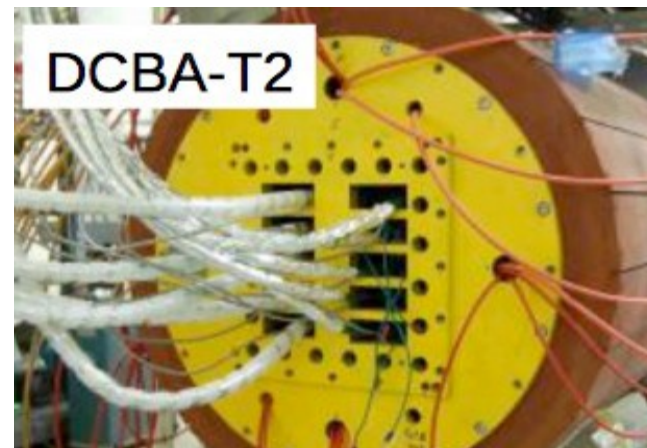
2014 DCBA-T3

2017 MTD(仮称)

実験原理  
(飛跡検出を用いた手法)  
の実証  
-  $2\sigma$  事象の測定

MTD実験に向けた  
プロトタイプ  
-  $2\sigma$  事象の精密測定

ニュートリノレス  
二重ベータ崩壊  
の探索



DCBA-T2 Chamber installed into the DCBA-T3 SC-Magnet

# DCBA実験の高度化: DCBA-T3

## 概要

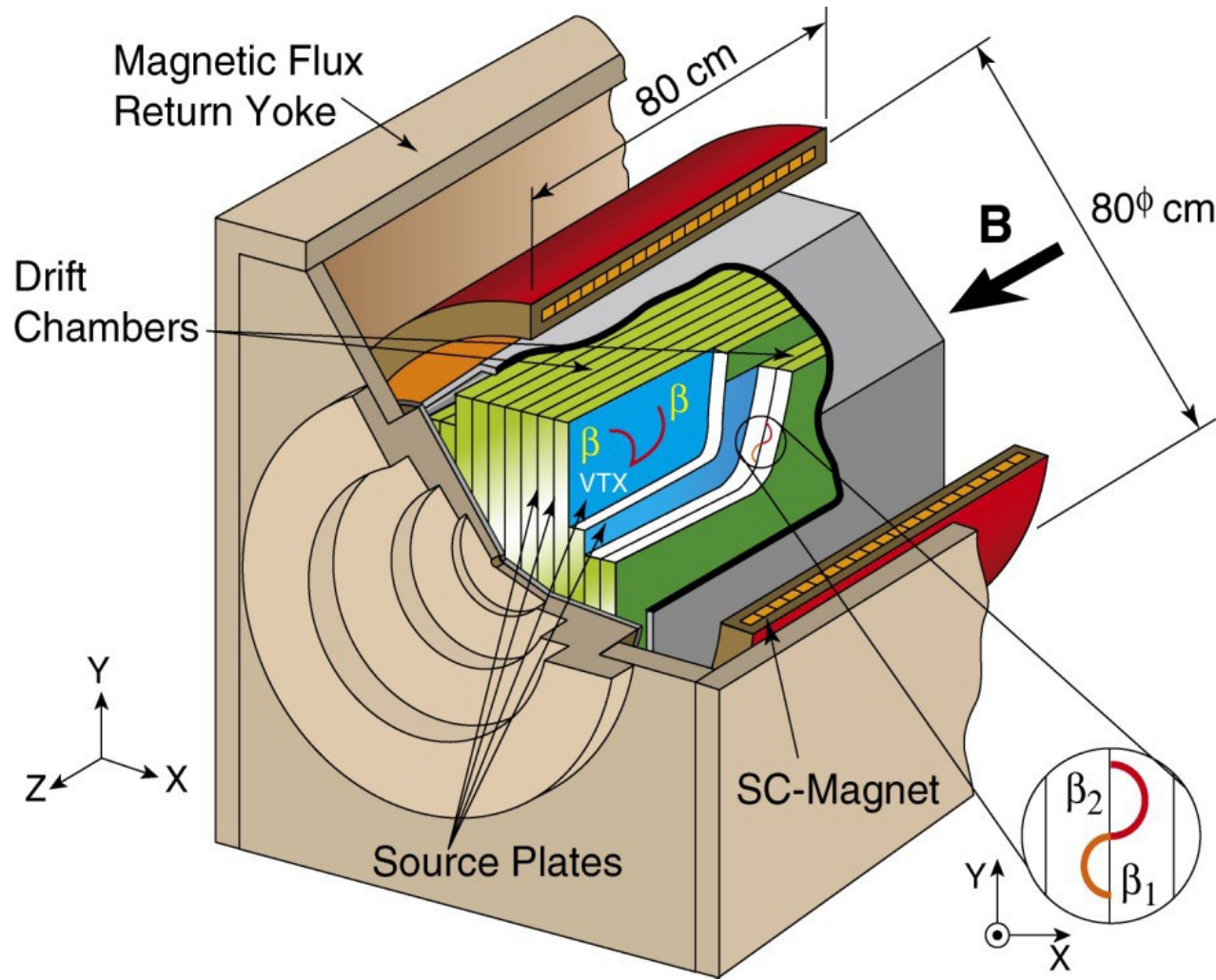
磁場の増強: 0.8kG  $\rightarrow$  3kG

$\beta$ 線の螺旋の曲率半径の減少  
(=より短い飛跡)

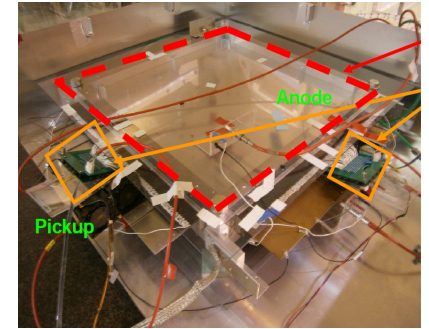
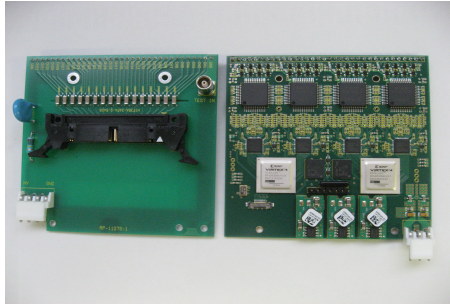
1. エネルギー分解能の向上
2. チャンバー厚の減少  
 $\rightarrow$ 線源板とチェンバーの多層化

## 開発項目

- ・ワイヤーピッチ3mmのチェンバー  
( $\Leftrightarrow$ 現在のT2.5は6mm)
- ・読み出しエレクトロニクス
  1. プリアンプとFADCの一体化
  2. 多チャンネル化に伴う  
DAQシステムの改良



# DCBA-T3 の予定



H26年度

読み出しの開発

チェンバーの開発

H27年度

データ取得  
- 線源板1枚+チャンバー2台

チェンバーと読み出し  
の量産  
- 厚さの異なる線源板を作成

H28年度

データ取得  
- 線源板5枚+チャンバー6台

異なる厚さの線源板  
→ エネルギー分解能と  
バックグラウンドの理解

H29年度

- チェンバーと線源板の改良



# 将来計画: MTD実験

2005 DCBA

2007 DCBA-T2

2011 DCBA-T2.5

現在

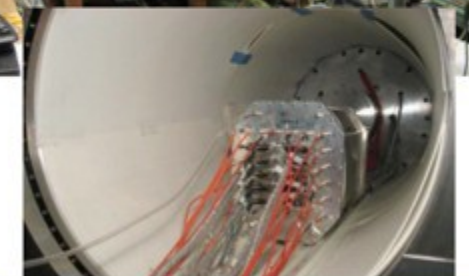
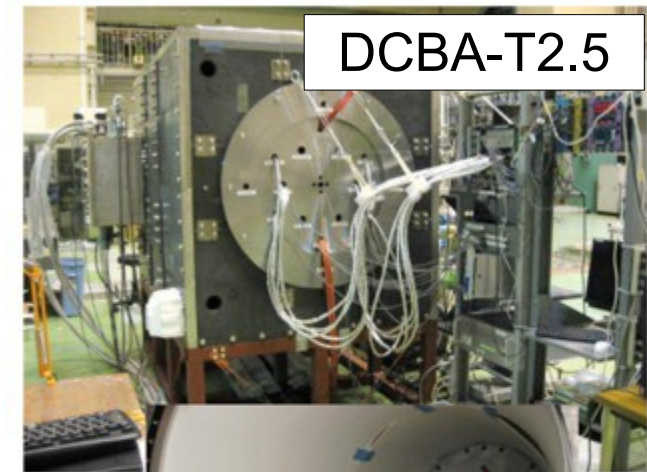
2014 DCTA-T3

2017 MTD(仮称)

実験原理  
(飛跡検出を用いた手法)  
の実証  
-  $2v\beta\beta$  事象の測定

MTD実験に向けた  
プロトタイプ  
-  $2v\beta\beta$  事象の精密測定

ニュートリノレス  
二重ベータ崩壊  
の探索



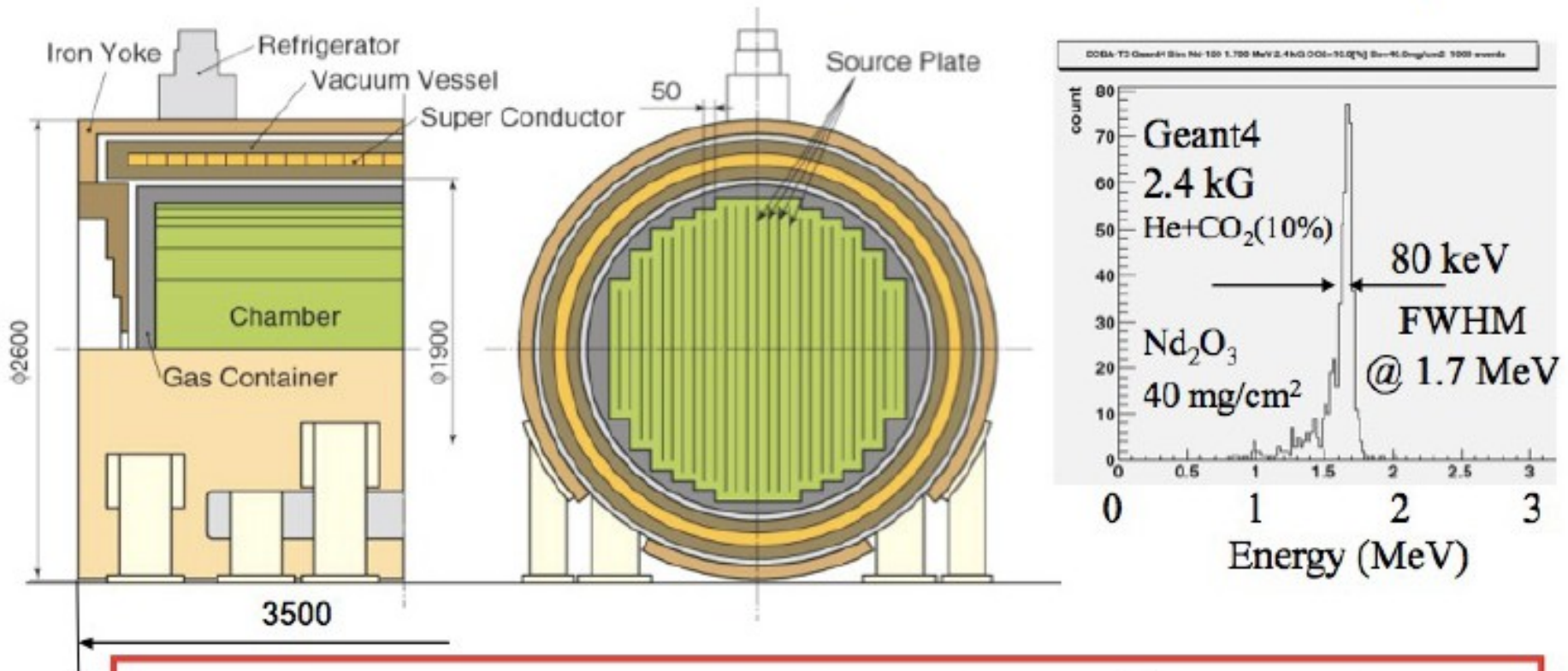


# MTD実験の概要

MTD: Magnetic Tracking Detector (仮称)

Chamber cell : the same as DCBA-T3, Source plate: 80 m<sup>2</sup>/module

Thickness: 40 mg/cm<sup>2</sup>, Source weight: 32 kg/module 27 source plates



Expected Energy Resolution

$$\frac{\text{FWHM}(E_{sum}) = \sqrt{2} \times 80 \text{keV}}{Q_{\text{Nd-150}}(3370 \text{keV})} \approx 3.4\%$$

# ニュートリノレス2重ベータ崩壊 に対する感度

1年間のMTD実験で到達できるニュートリノの有効質量

	線源板に塗布するNd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の厚さ	
	15mg/cm <sup>2</sup>	40mg/cm <sup>2</sup>
天然ネオジウム( <sup>150</sup> Nd 5.6%)	0.8eV	0.5eV
濃縮ネオジウム( <sup>150</sup> Nd 60%)	0.2eV	0.1eV

デフォルトでは 40mg/cm<sup>2</sup> の厚さを採用

必要に応じて台数を増加(最大10台程度)

# まとめ

DCBA実験は、飛跡検出器を用いたユニークな二重ベータ崩壊実験

- 2つのベータ線の運動量と崩壊点位置を再構成  
→ より少ないバックグラウンドの影響下で、より多くの情報を提供

DCBA-T2.5 実験が稼働中:

- $^{100}\text{Mo}$ を使用  $2\nu\beta\beta$ 候補事象は1日当り約1事象

DCBA-T3 実験装置を開発中:

- $^{150}\text{Nd}$ を使用
- ワイヤー間隔3mmの新型ドリフトチェンバーで  
100keV(FWHM)以下のエネルギー分解能を目指す

次世代の計画 MTD:

- $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ 等 を用いてニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索

backup



# DCBA実験の歩みと、将来計画MTD

2005 DCBA

2007 DCBA-T2

2011 DCBA-T2.5

現在

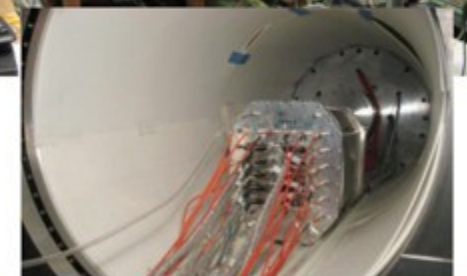
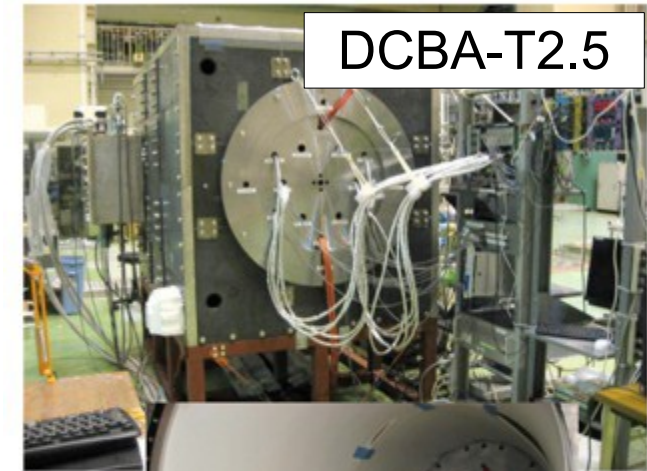
2014 DCTA-T3

2017 MTD(仮称)

実験原理  
(飛跡検出を用いた手法)  
の実証  
-  $2v\beta\beta$  事象の測定

MTD実験に向けた  
プロトタイプ  
-  $2v\beta\beta$  事象の精密測定

ニュートリノレス  
二重ベータ崩壊  
の探索



DCBA-T2 Chamber installed into the DCBA-T3 SC-Magnet

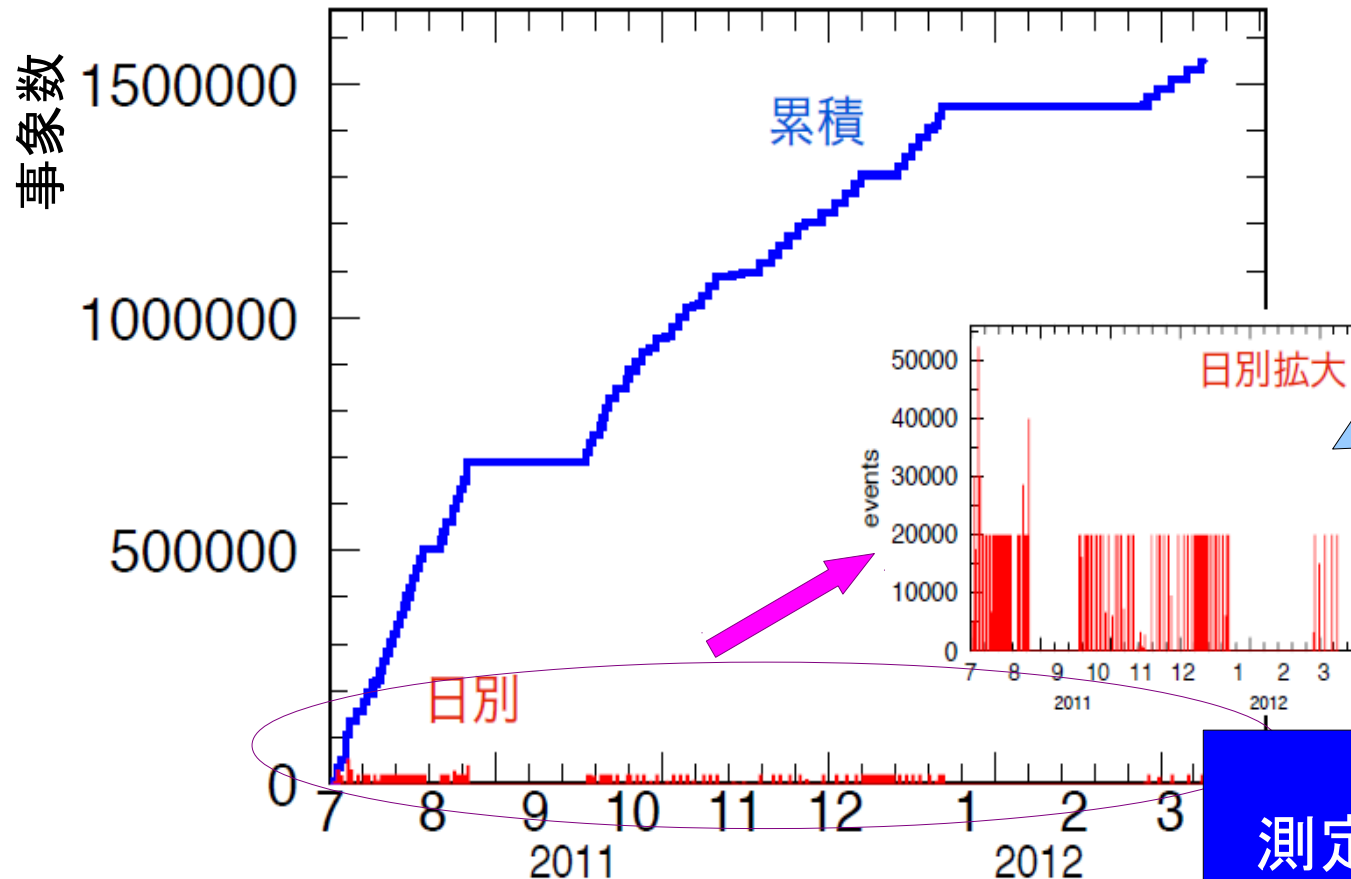
# DCBA-T2.5 のデータ取得

2011年7月よりデータ取得を開始

2011年7月～2012年9月: 0.8kGの磁場で運転

2012年9月～現在: 0.6kGの磁場で運転

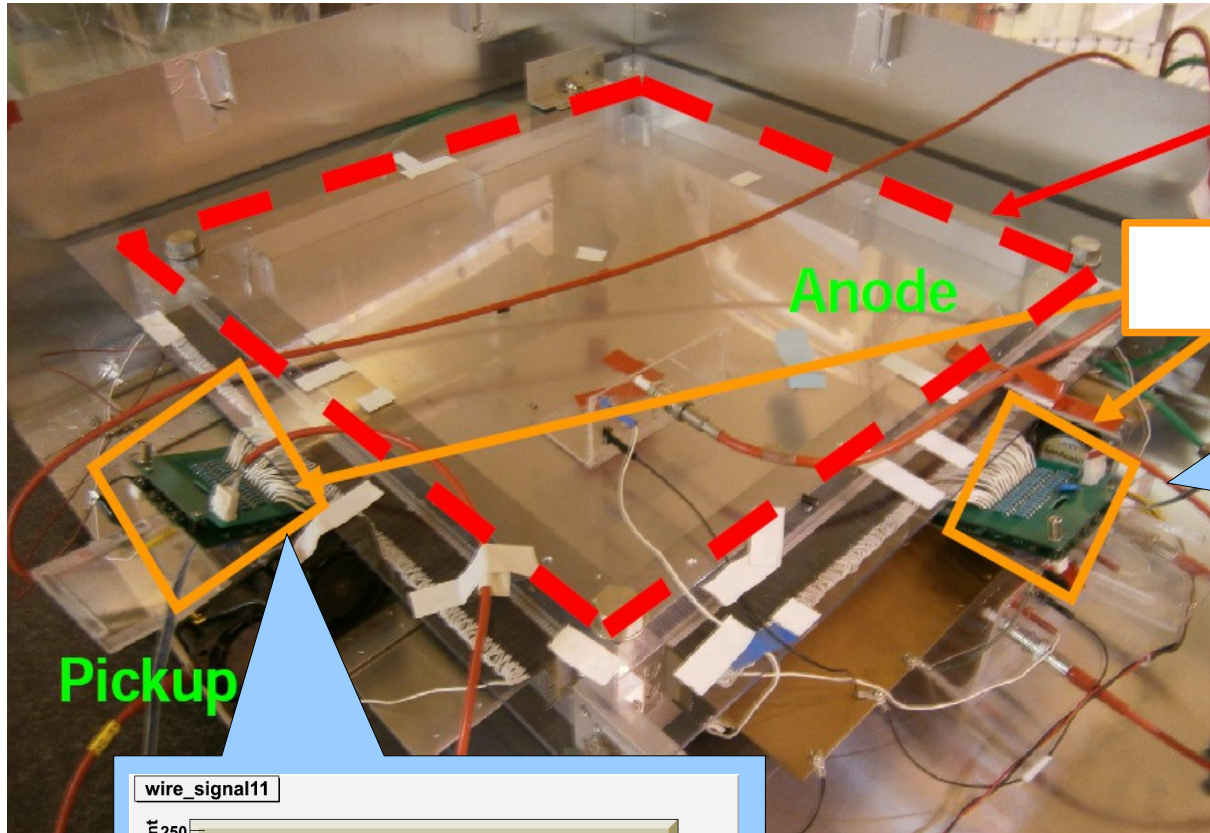
## 実験開始後6ヶ月のデータ取得の様子



- ・1日当たり1万事象程度を取得
- ほとんどは宇宙線バックグラウンド
- $2\nu\beta\beta$  信号事象候補は1日当たり1事象程度

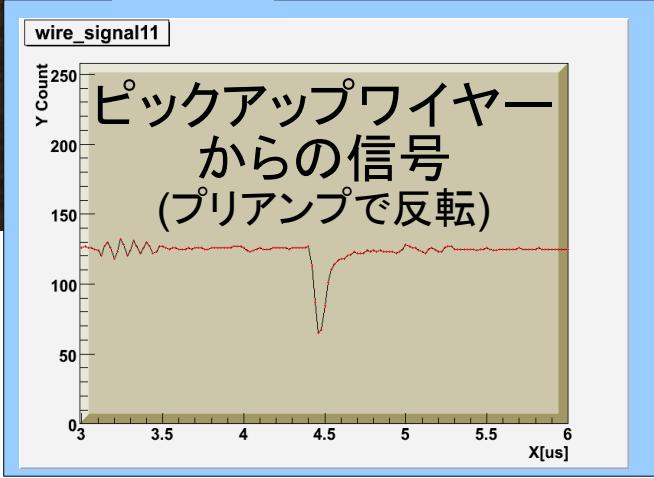
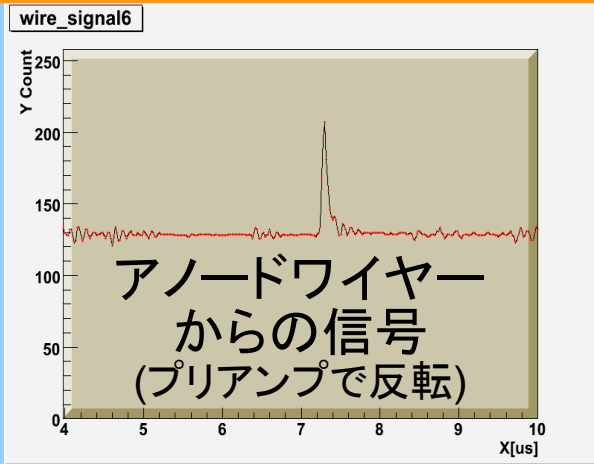
現在までに  
測定時間: 約10,600時間  
取得事象数: 3,665,300

# DCBA-T3用飛跡検出器と読み出し



T3用飛跡検出器

T3用プリアンプ & FADC



宇宙線を用いて動作試験  
→ 1. FADCによる信号を確認  
2. 複数ワイヤーの信号検出による飛跡再構成までには、もう一歩  
現在後段部のエレキについても開発中



# DCBA実験の歩みと、将来計画MTD

2005 DCBA

- ・6 mm ピッチワイヤー (xy)
- ・電荷分割法によるz方向の読み出し

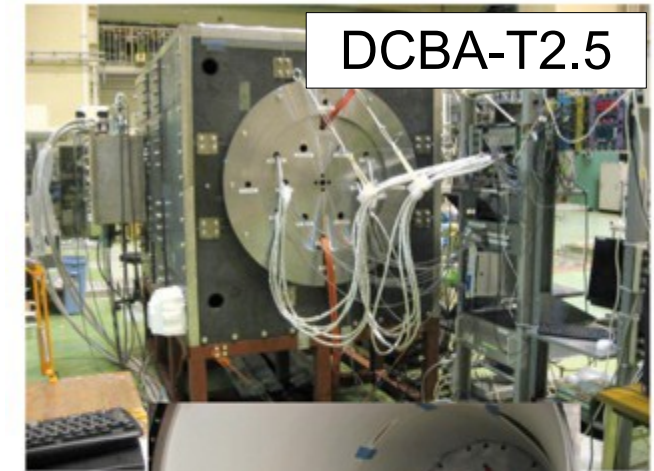
2007 DCBA-T2

- ・6 mm ピッチのワイヤー (xy + xz)
- ・ $^{100}\text{Mo}$  線源 (天然モリブデン 30g)
- ・0.6 - 0.8 kG の磁場
- ・常伝導電磁石
- シフト制の平日1日9時間の運転



2011 DCBA-T2.5

- ・DCBA-T2と同じ飛跡検出器を使用
- ・0.6 - 0.8 kG の磁場
- ・超伝導電磁石
- 24時間の無人運転



現在

2014 DCTA-T3

- ・3 mm ピッチのワイヤー (xy + xz)\*8
- ・ $^{150}\text{Nd}$  (5.6% in natural  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ )
- ・最大 3 kGの磁場

2017 MTD(仮称)

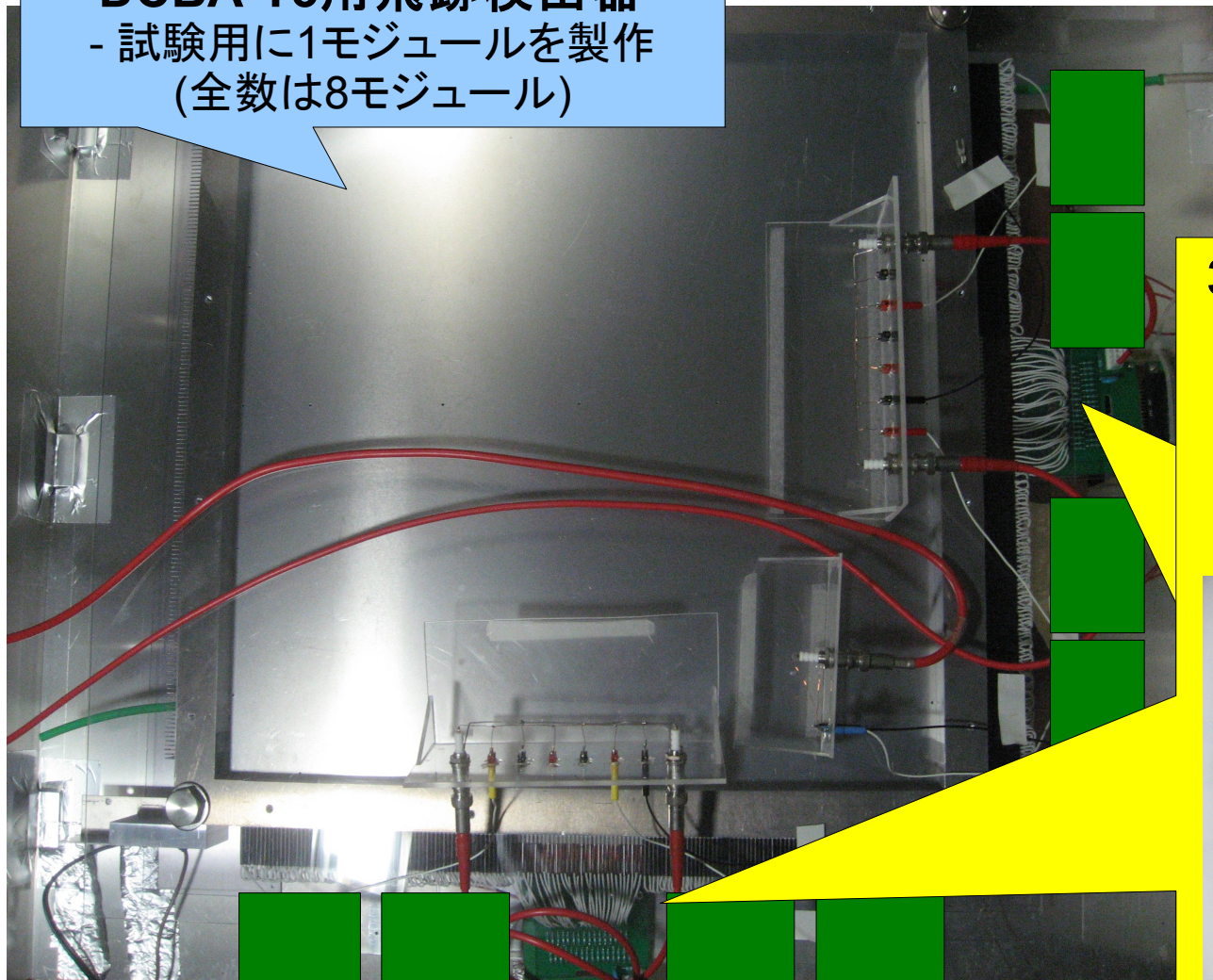
- ・装置の大型化
- ・数10kgの線源を搭載
- ・ $^{82}\text{Se}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ (できれば濃縮),  $^{100}\text{Mo}$
- ・複数台(10台程度)製作

DCBA-T2 Chamber installed into the DCBA-T3 SC-Magnet

# DCBA-T3 用飛跡検出器と読み出し

## DCBA-T3用飛跡検出器

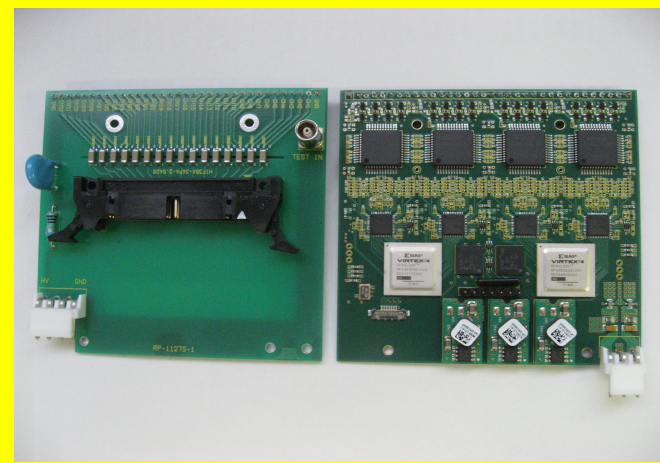
- 試験用に1モジュールを製作  
(全数は8モジュール)



	T2	T3
ワイヤー数	40	160
ワイヤー間隔	6mm	3mm

## 32ch プリアンプ & FADC

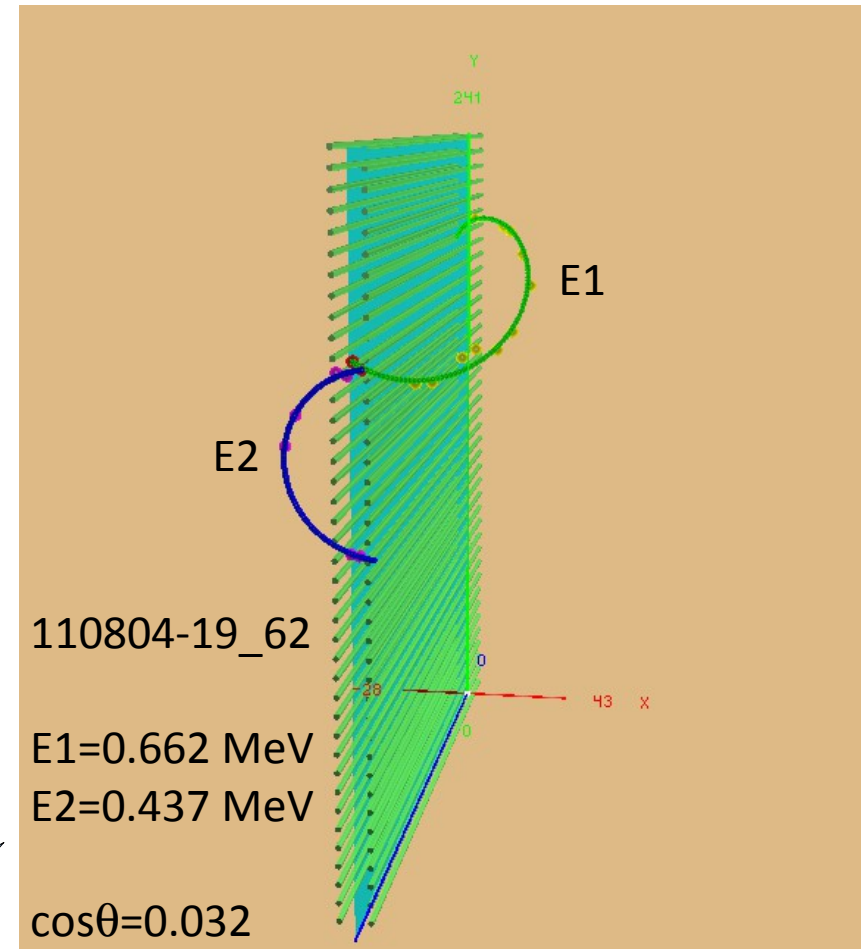
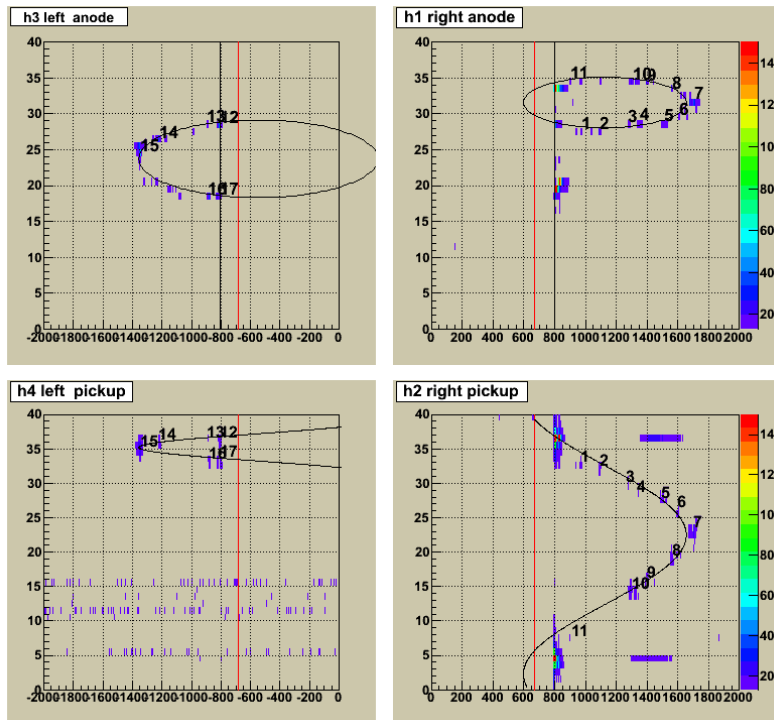
- チェンバー当たり  
5個(anode)+5個(pickup)
- 伝送線上でのノイズを  
避けるために  
チェンバーの直後でA/D変換



ワイヤー間隔の微細化(6mm→3mm)により  
エネルギー分解能の向上(<100keV(FWHM))を狙う



# 背景事象との区別が難しいもの



2本のトラックの飛跡は  
信号に近い(逆S字)が  
崩壊点のずれが大きい。  
→二重コンプトン散乱?

崩壊点再構成精度の理解が必要

Vertex point	
	E1      E2
Y	178.7mm    174.3mm
Z	235.3mm    221.9mm

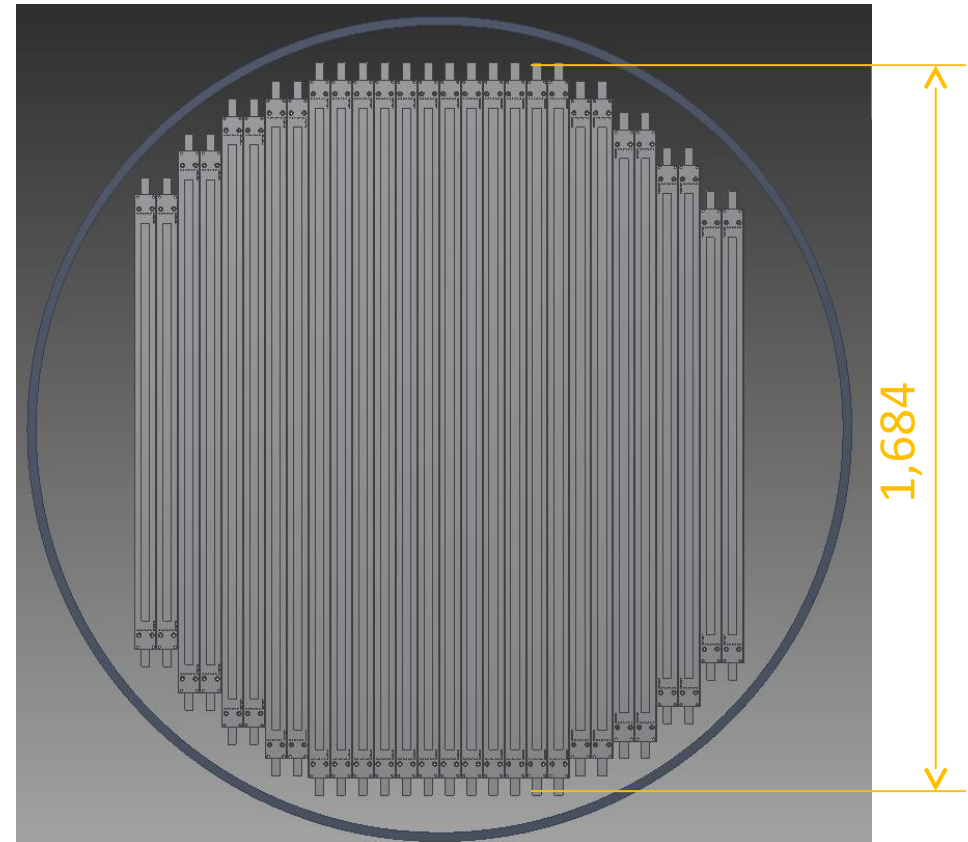
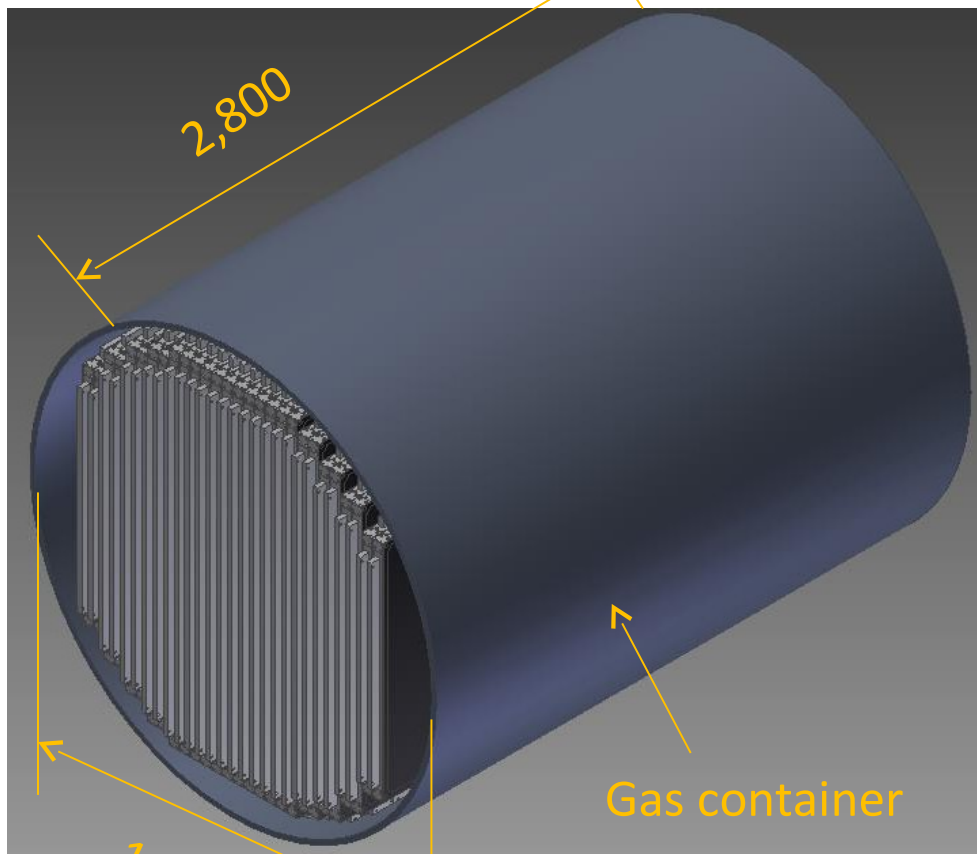


# MTD実験に向けたR&D

1. 実験装置の基本的性能→ DCBA-T3実験(小型機)で実証
2. 大型化に伴う構造上の問題点→試作機を製作し確認



MTD実験装置の機械設計を開始

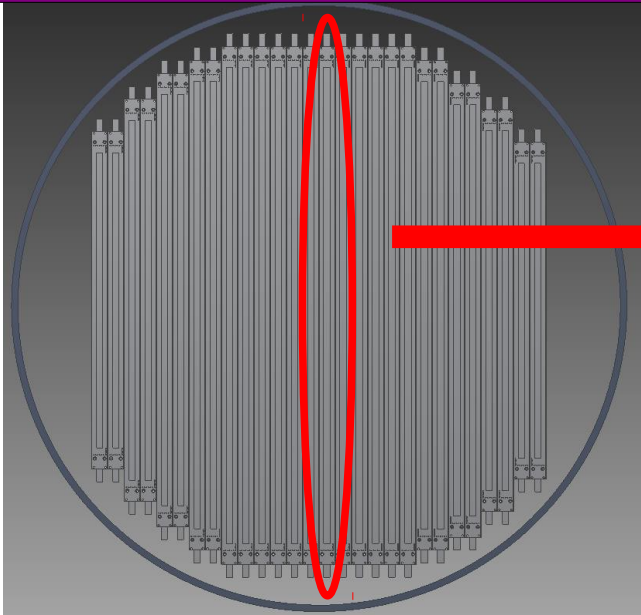


1,896

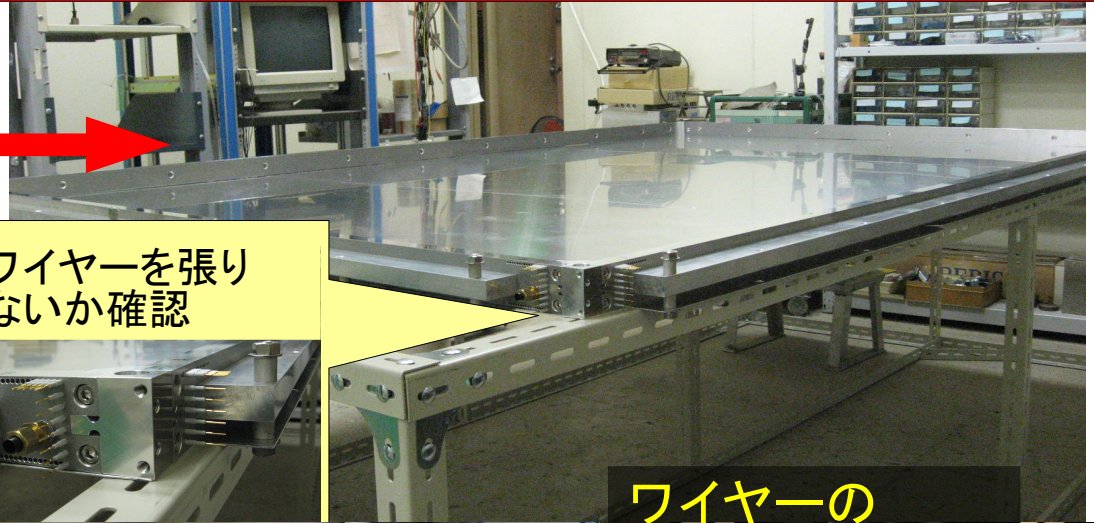
MTD用ドリフトチェンバーとガスコンテナの設計図

# MTD実験: R&Dの現状

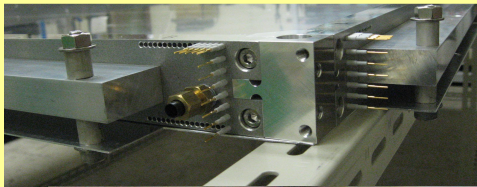
## MTD チェンバーの組立図



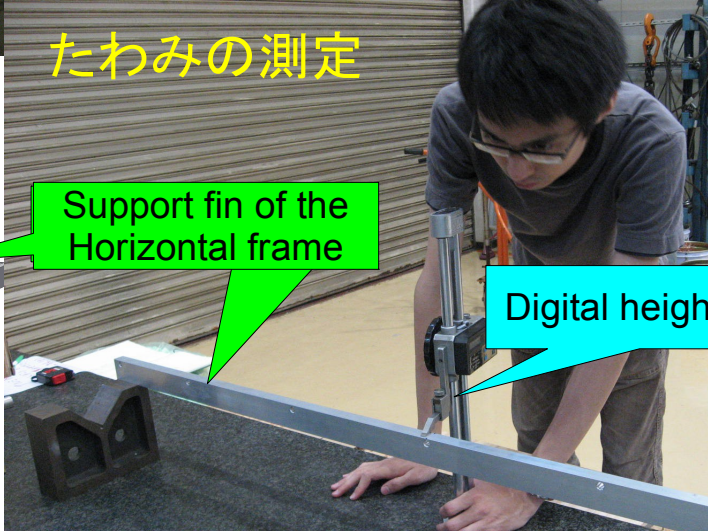
チェンバーの実寸大模型を一台製作  
→ チェンバーの大型化に伴う問題点を洗い出し



実際にワイヤーを張り  
問題がないか確認



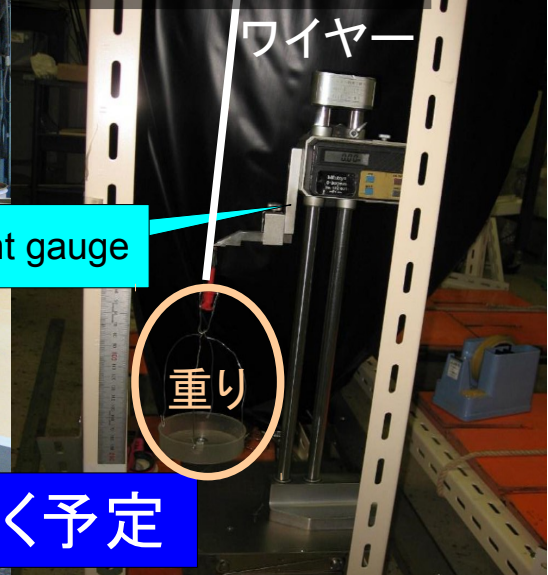
たわみの測定



Support fin of the  
Horizontal frame

Digital height gauge

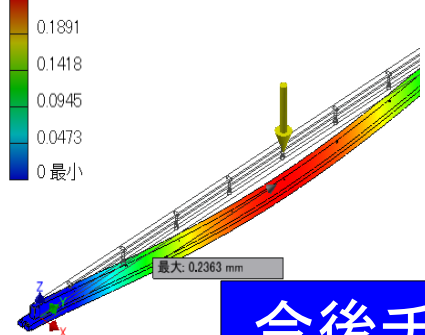
ワイヤーの  
塑性変形の測定



重り

## フレームのたわみ量を計算

タイプ: 変位  
単位: mm  
2013/08/30, 13:49:13  
0.2363 最大



今後チャンバーを多層にする方法も検討していく予定

# $^{100}\text{Mo}$ 二重ベータ崩壊の半減期

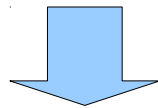
$$T_{\frac{1}{2}} = \ln 2 \cdot \varepsilon \cdot N_{^{100}\text{Mo}} \cdot T_{\text{obs}} / N_{\text{events}}$$

$\varepsilon$ : 検出効率 = 0.0928

$N_{^{100}\text{Mo}}$ :  $^{100}\text{Mo}$ の原子数 =  $2.25 \times 10^{22}$ 個

$T_{\text{obs}}$ : 測定時間 =  $6.83 \times 10^6$  秒

$N_{\text{events}}$ : イベント数 = 78



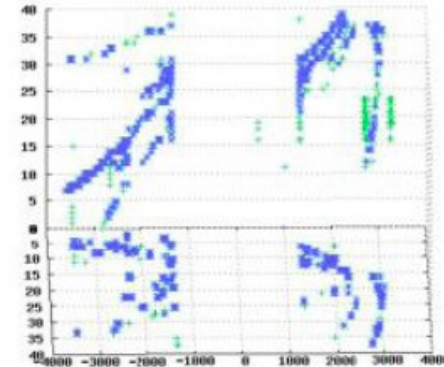
$$T_{\frac{1}{2}} = 4.0 \times 10^{18} \text{ 年}$$

今後バックグラウンドの評価および検出効率の評価が必要



# 解析の手順

- 1) XY平面の波高分布から、XY面投影図作成  
XZ平面の波高分布から、XZ面投影図作成



- 2) 投影図からeyeスキャン

バックグラウンドデータの除去と候補イベントの選別

(A) 荒スキャン (主に宇宙線イベントの除去)

↓ 10000 events  $\Rightarrow$  500 events

(DCBA-T2.5のトリガーレート $\sim$ 10000 events/day)

(B) 二重ベータイベントの選別

500 events  $\Rightarrow$  50 events

- 3) 三次元解析によるベータ線飛跡の再構成

(C) 崩壊点、エネルギーの評価

(D) 偽二重ベータイベントの除去

50 events  $\Rightarrow$   $\sim$  1 event

