



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}Te , ^{116}Cd , etc.)

Majorana (^{76}Ge)

GERDA (^{76}Ge)

scintillation

CANDLES (^{48}Ca)

MOON (^{100}Mo)

KamLAND-Zen (^{136}Xe)

SNO+ (^{150}Nd)

bolometry

CUORE (^{130}Te)

Ionization
+scintillation

EXO (^{136}Xe)

NEXT (^{136}Xe)

Combination

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

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

Tracking

(運動量再構成)

DCBA / MTD

(^{100}Mo , ^{82}Se , ^{150}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 β 線のエネルギー分布や β 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**

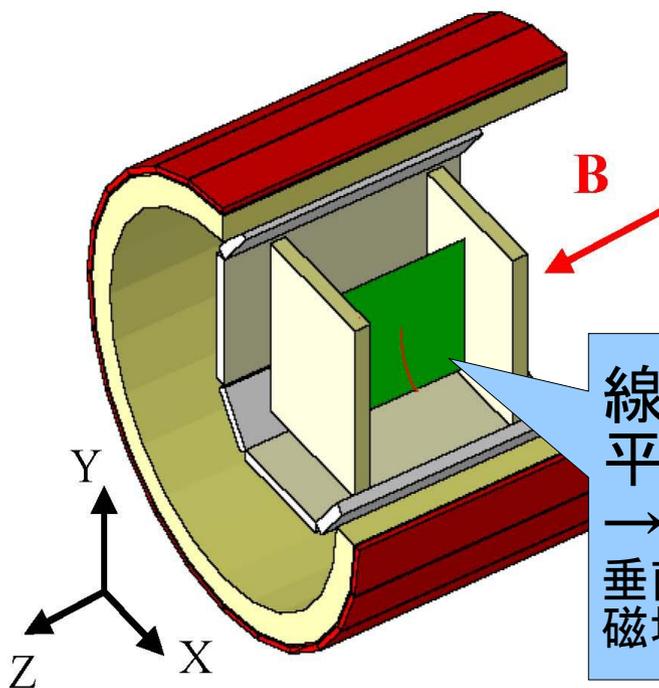
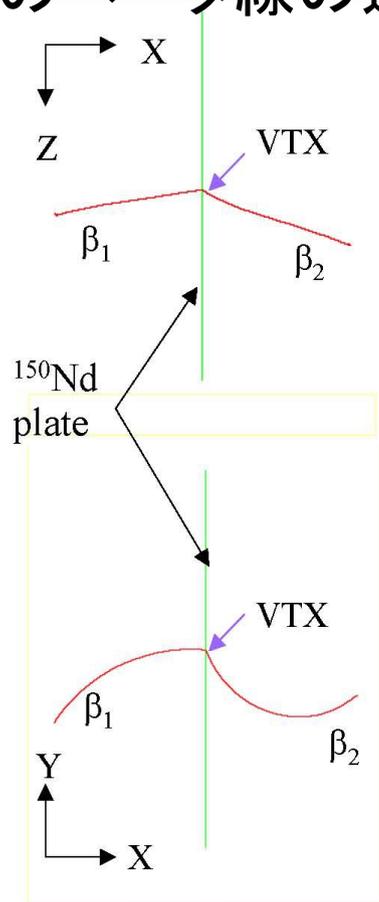


多くの線源を搭載するのは容易でない。

DCBA実験の原理

- 飛跡検出器内部に線源板をもつ
線源: ^{100}Mo (将来的には ^{150}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。

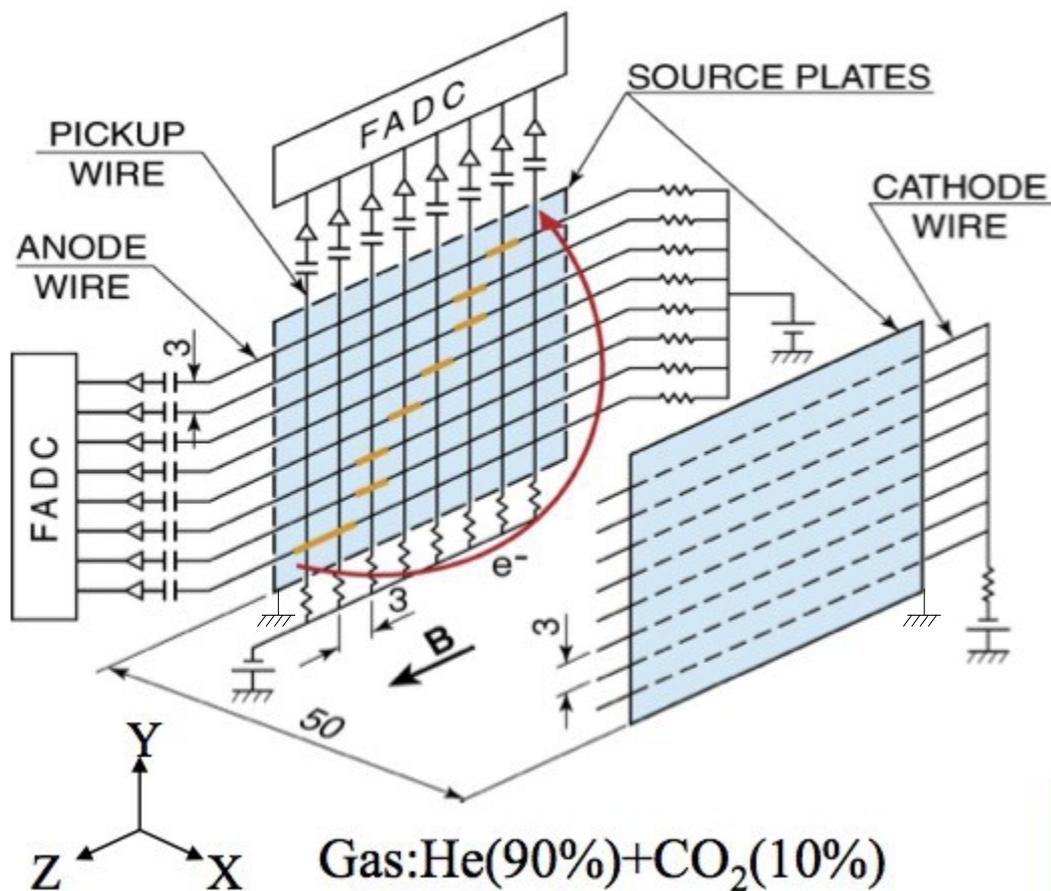
DCBA: 飛跡再構成手法

飛跡位置の再構成:

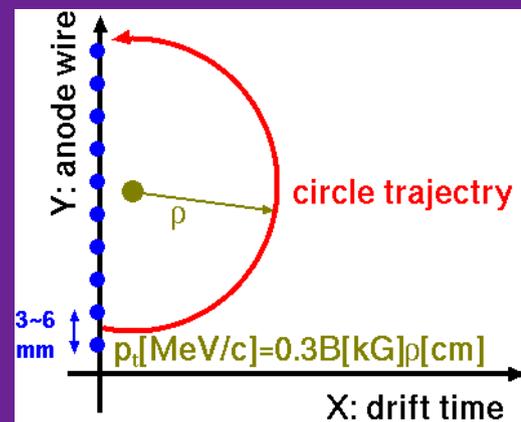
X: ドリフト時間

Y: アノードワイヤーのヒット位置

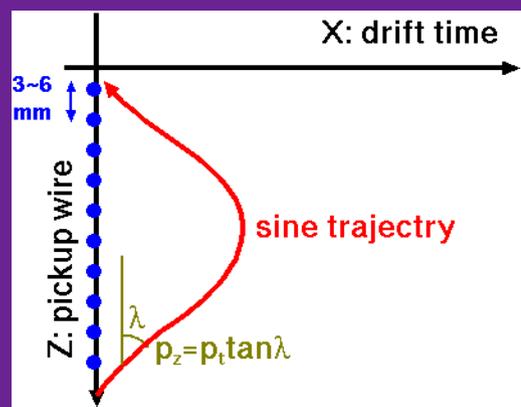
Z: ピックアップワイヤーのヒット位置



運動量の再構成:



p_t



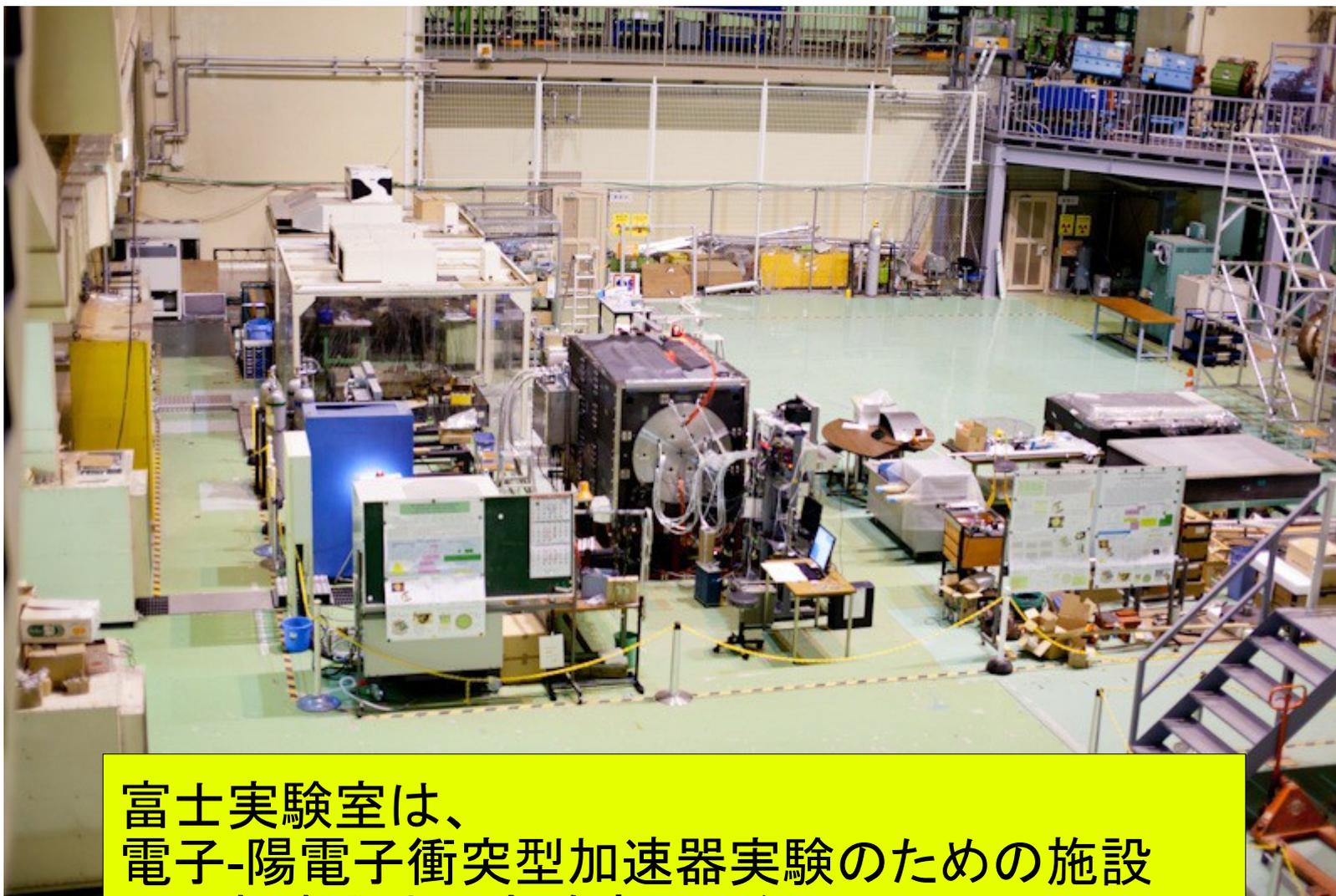
p_z

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

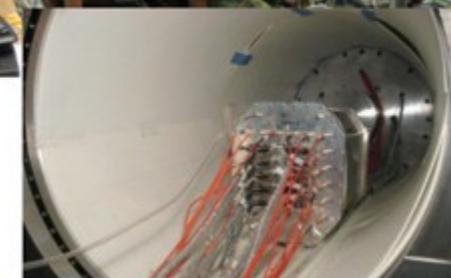
2014 DCTA-T3

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

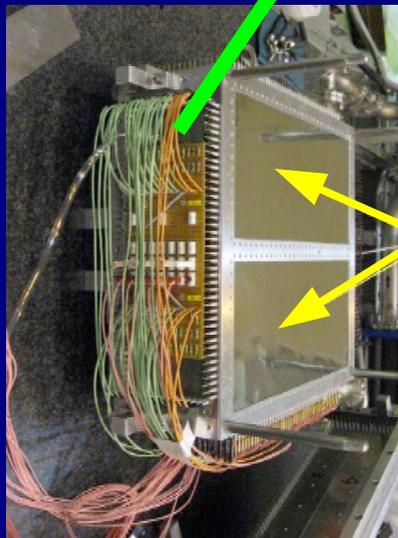
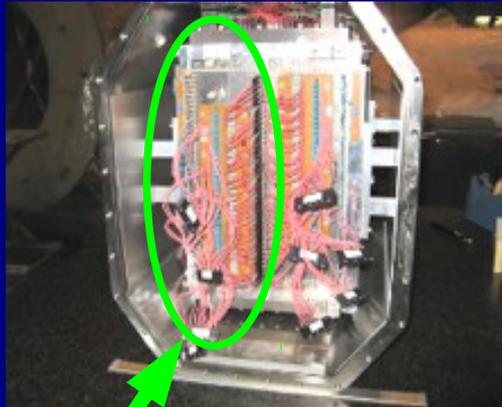


DCBA-T2 Chamber installed into the DCBA-T3 SC-Magnet

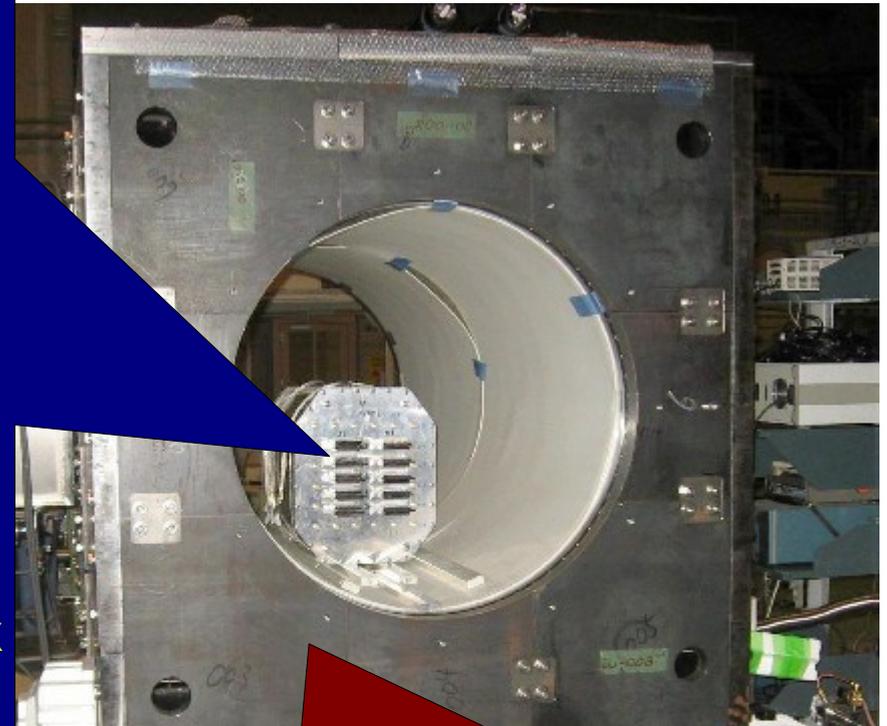
DCBA-T2.5

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

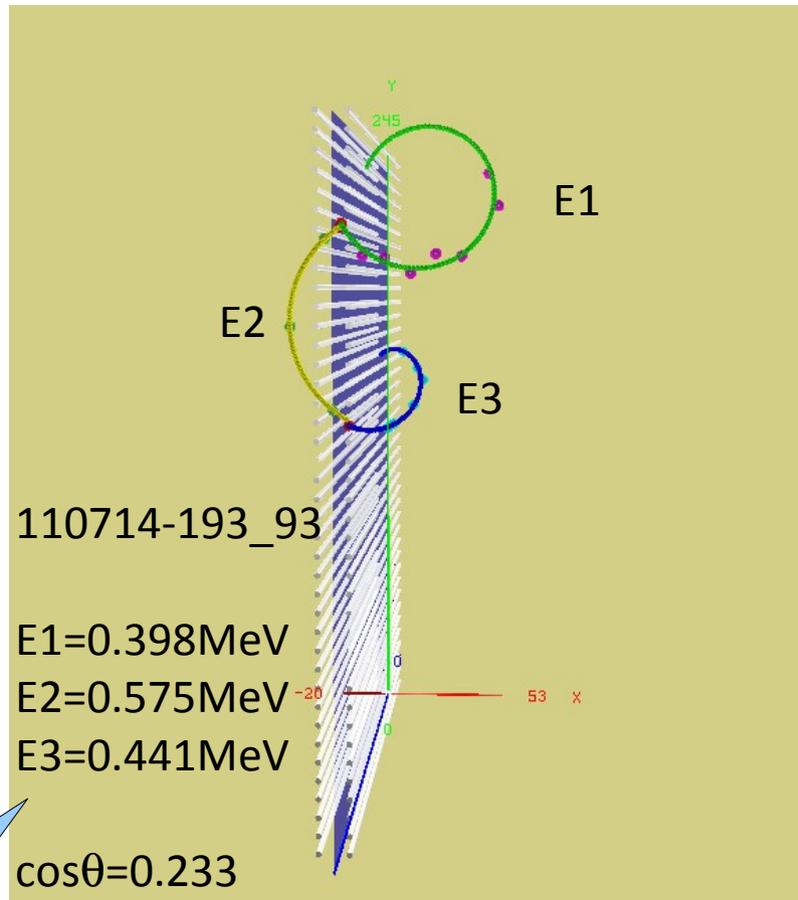
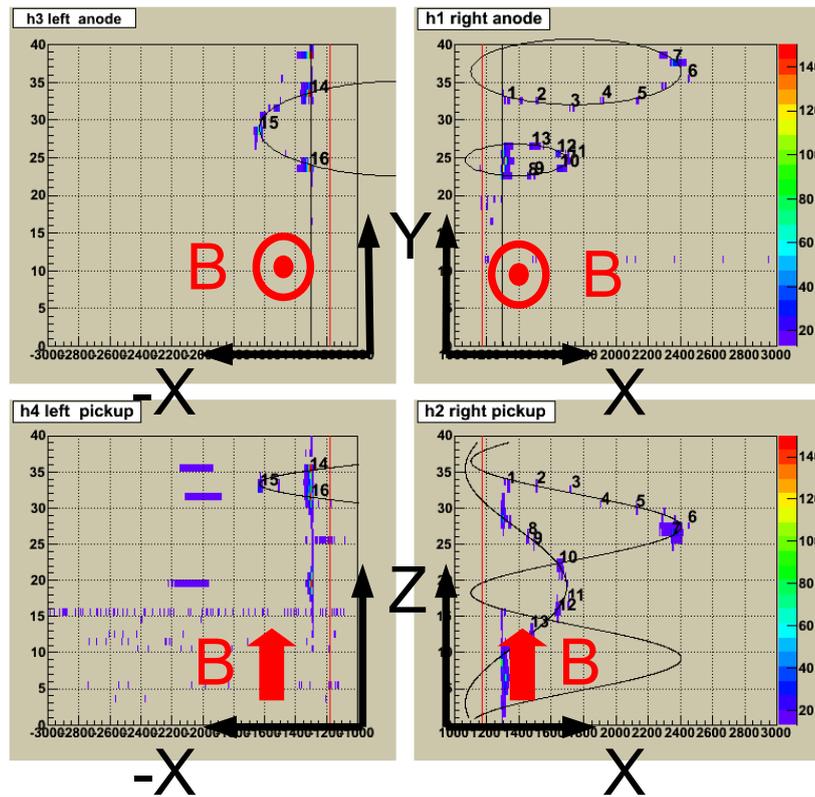


天然モリブデン
線源板:
・280mm x 130mm x
50 μ m
・45mg/cm²
・質量 30g
・¹⁰⁰Mo:
線源板に9.6%含有
(0.03 mol)



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



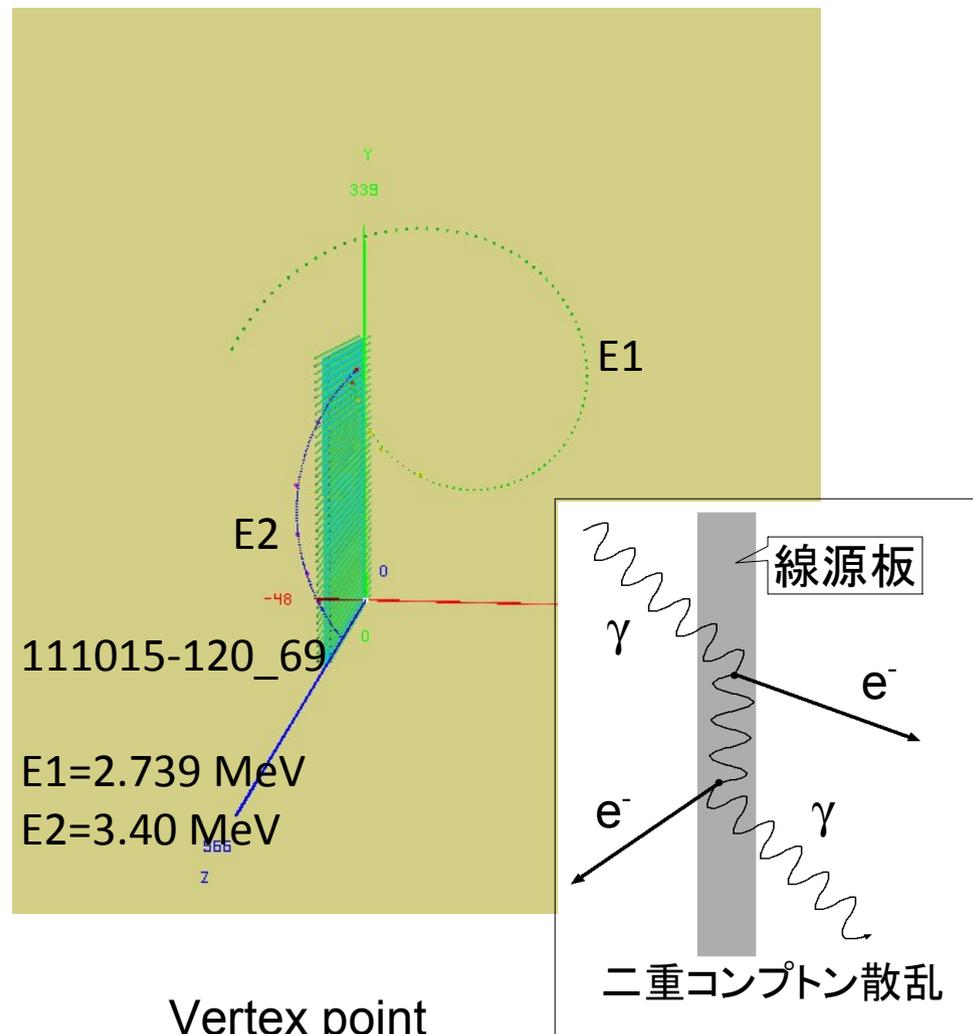
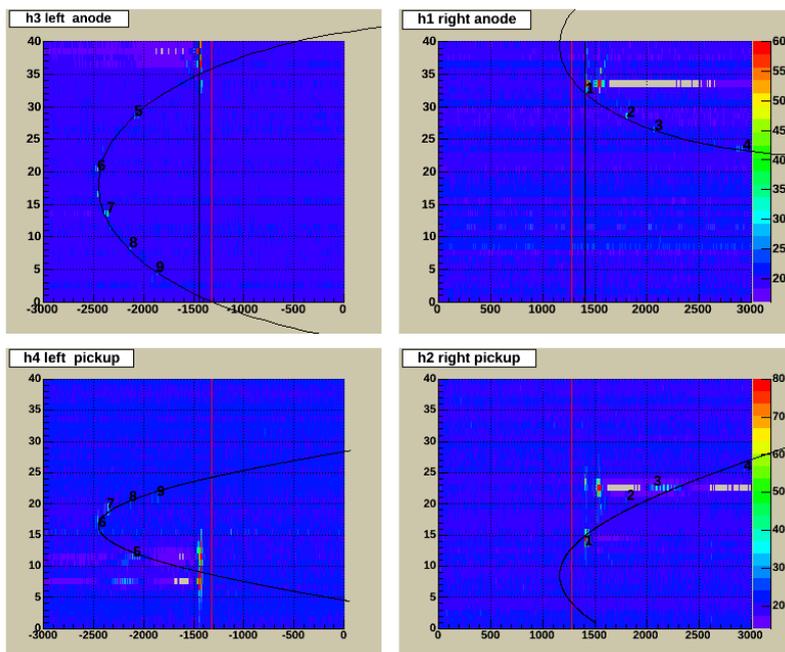
自由に回転できる3次元的な表示
→視覚的に理解しやすい表示

↓
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

主な背景事象



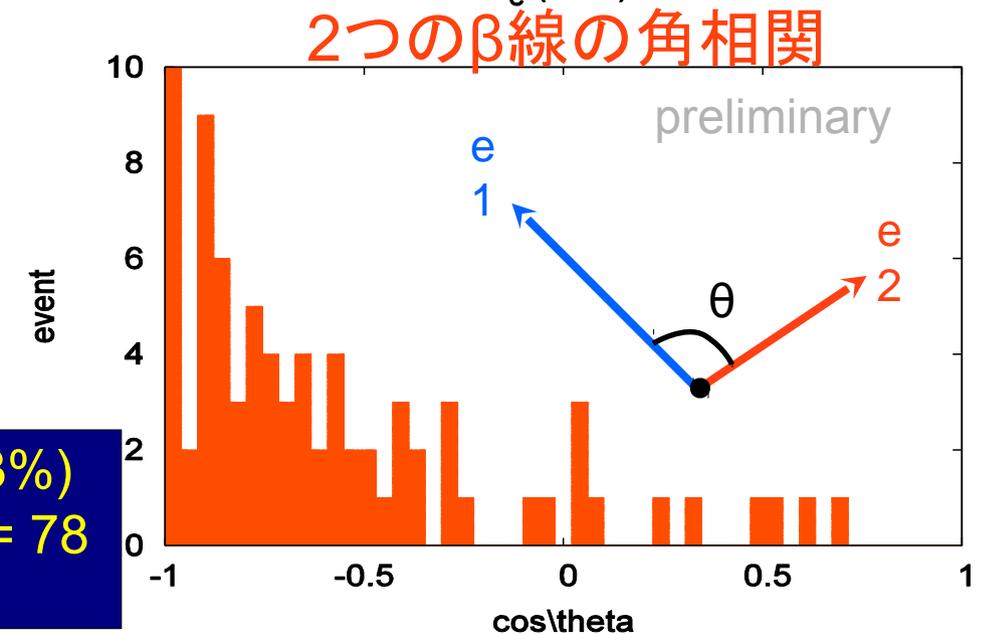
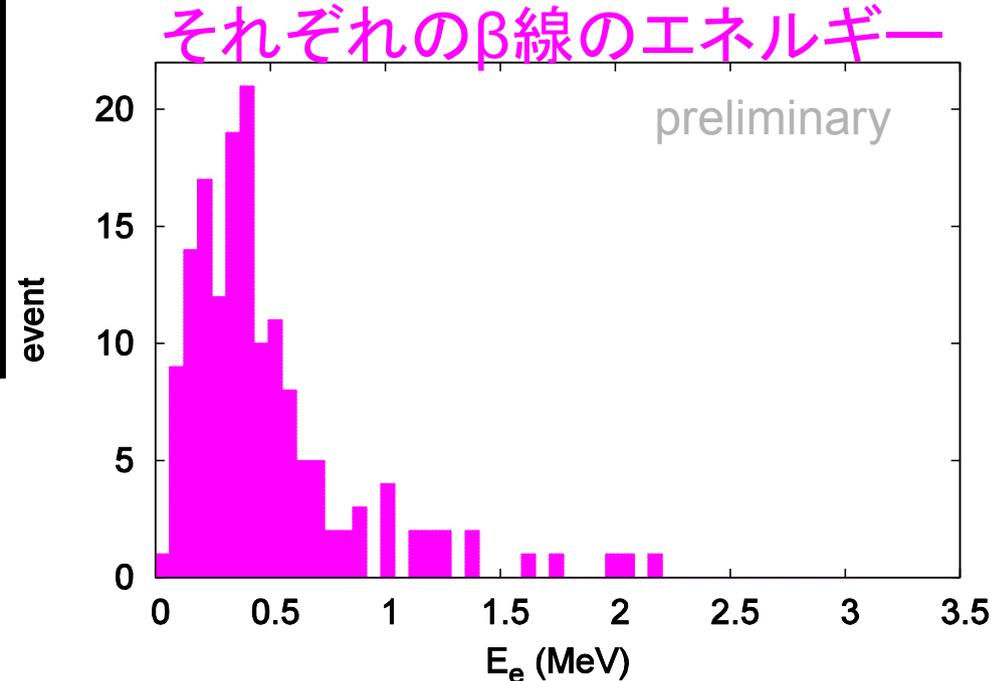
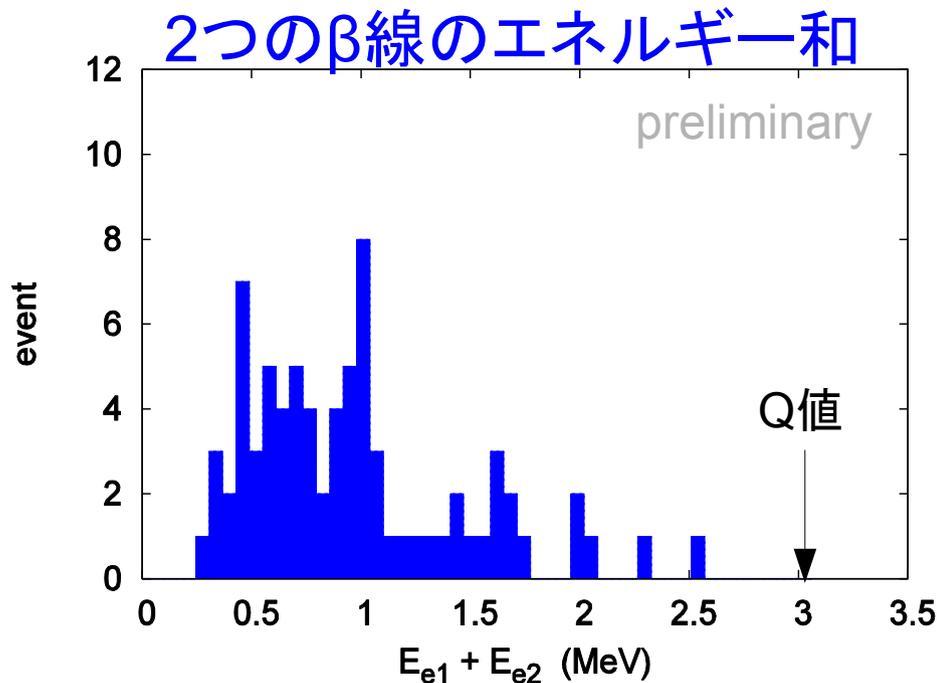
二重コンプトン散乱例

1. エネルギーが大きすぎる。
($^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$ のQ値: 3.0MeV)
2. 崩壊点がずれている。

DCBA-T2+T2.5 のデータ解析の現状

DCBA/MTD実験は

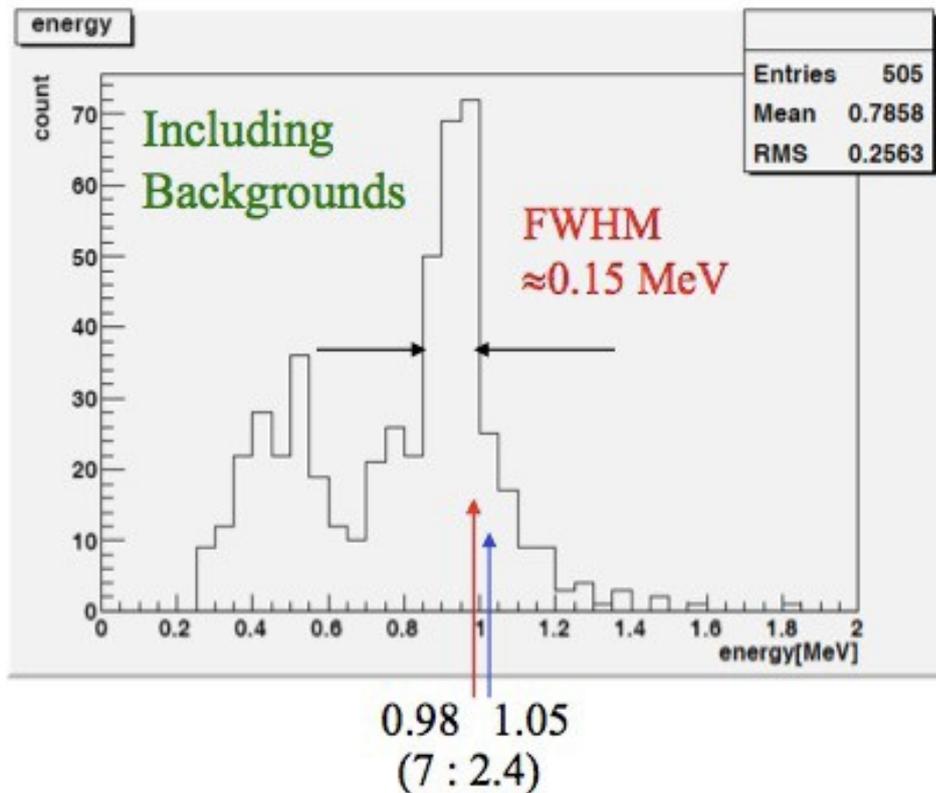
- ・ 2つのβ線のエネルギー和($E_{\beta 1} + E_{\beta 2}$)
- に加え以下の2つの物理量を測定可能:
- ・ それぞれのβ線のエネルギー分布 (E_{β})
- ・ 2つのβ線の角相関($\cos \theta_{12}$)



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

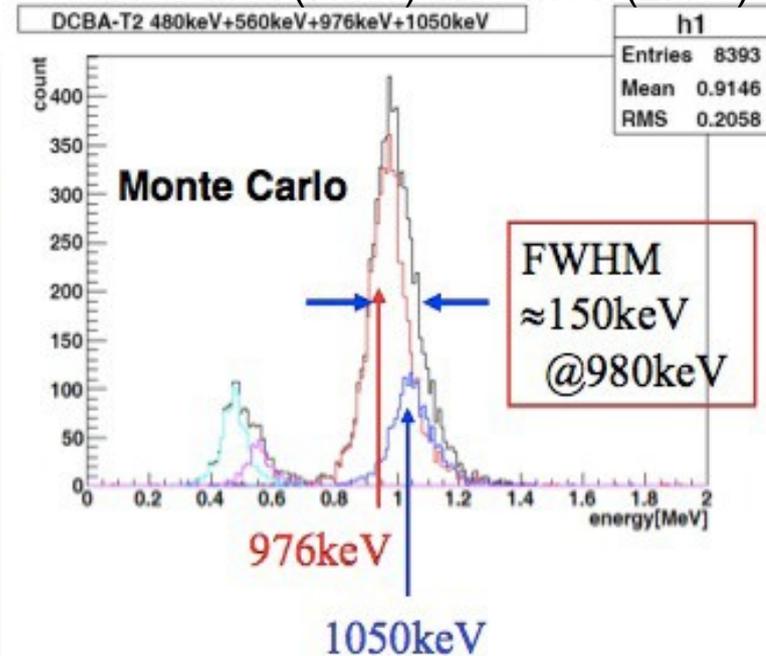
DCBA-T2 (および T2.5)の エネルギー分解能

Energy spectra of internal conversion
electrons from ^{207}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%)+CO₂(10%) 1atm
B=0.8 kG
Wire pitch=6 mm

エネルギー分解能: ~ 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

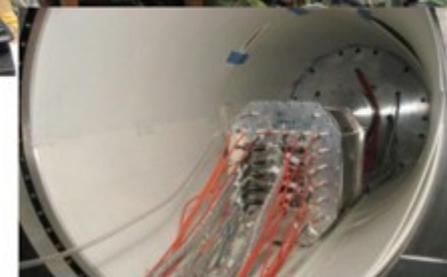
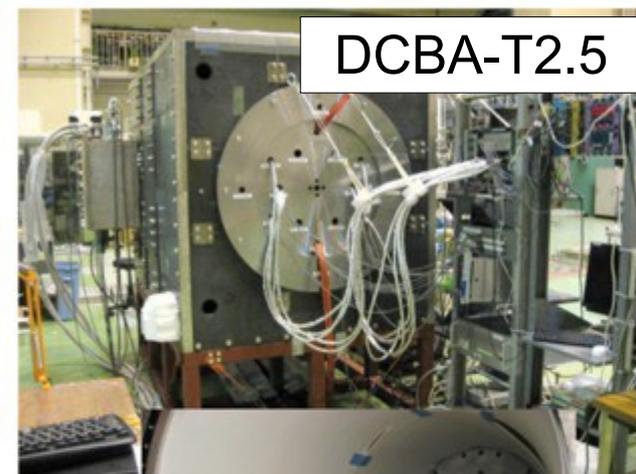
2014 DCBA-T3

2017 MTD(仮称)

実験原理
(飛跡検出を用いた手法)
の実証
- 2σ 事象の測定

MTD実験に向けた
プロトタイプ
- 2σ 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

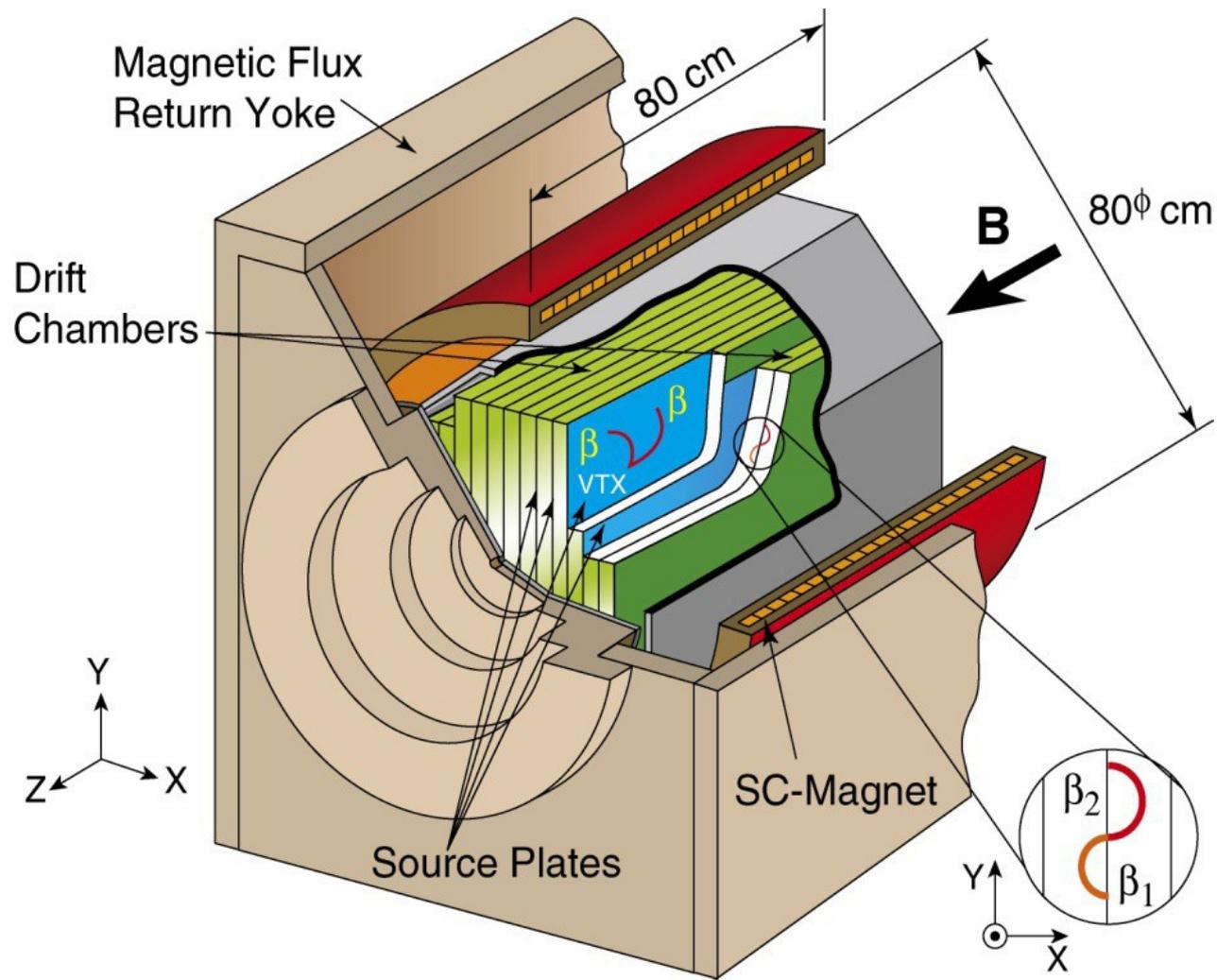
磁場の増強: 0.8kG \rightarrow 3kG

β 線の螺旋の曲率半径の減少
(=より短い飛跡)

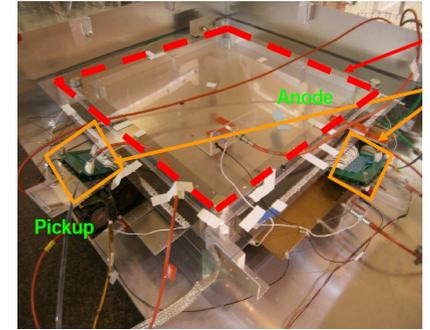
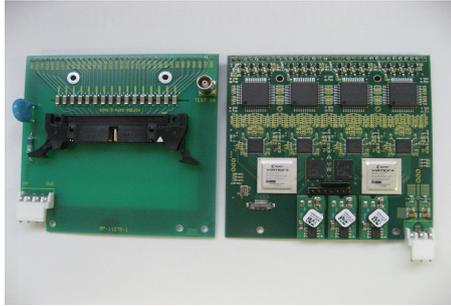
1. エネルギー分解能の向上
2. チャンバー厚の減少
 \rightarrow 線源板とチェンバーの多層化

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

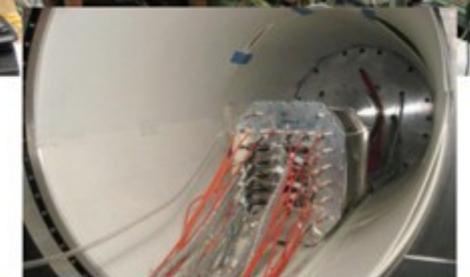
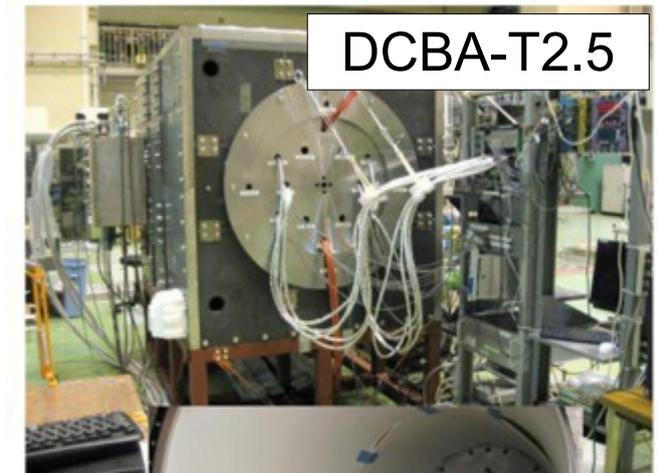
2014 DCTA-T3

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

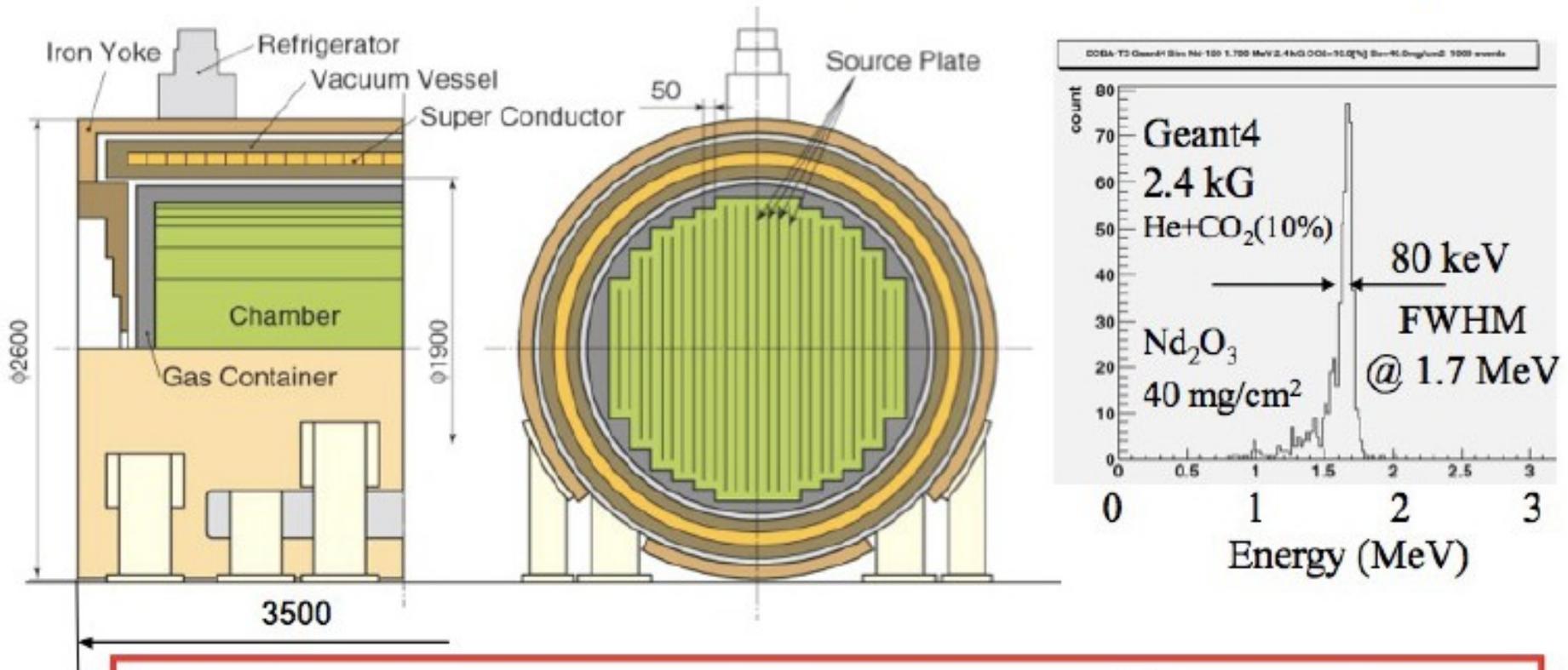


MTD実験の概要

MTD: Magnetic Tracking Detector (仮称)

Chamber cell : the same as DCBA-T3, Source plate: 80 m²/module

Thickness: 40 mg/cm², 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 ₂ O ₃ の厚さ	
	15mg/cm ²	40mg/cm ²
天然ネオジウム(¹⁵⁰ Nd 5.6%)	0.8eV	0.5eV
濃縮ネオジウム(¹⁵⁰ Nd 60%)	0.2eV	0.1eV

デフォルトでは 40mg/cm² 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}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}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}Nd , ^{82}Se , ^{100}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

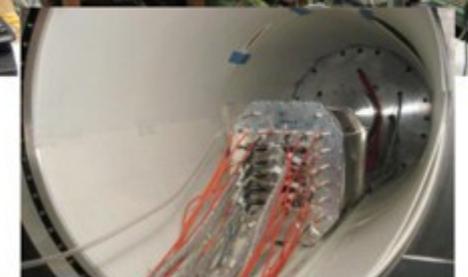
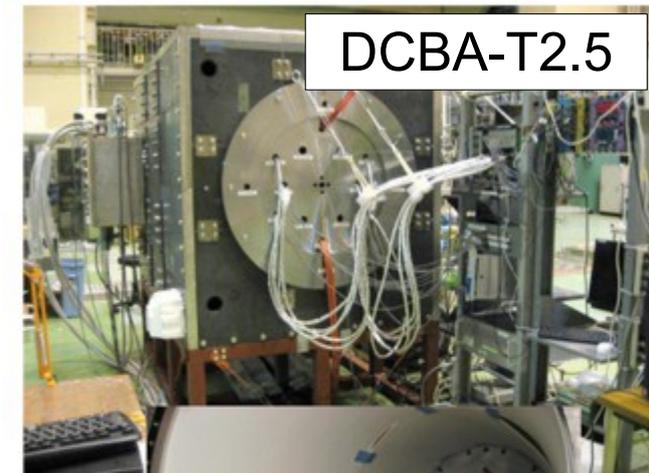
2014 DCTA-T3

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

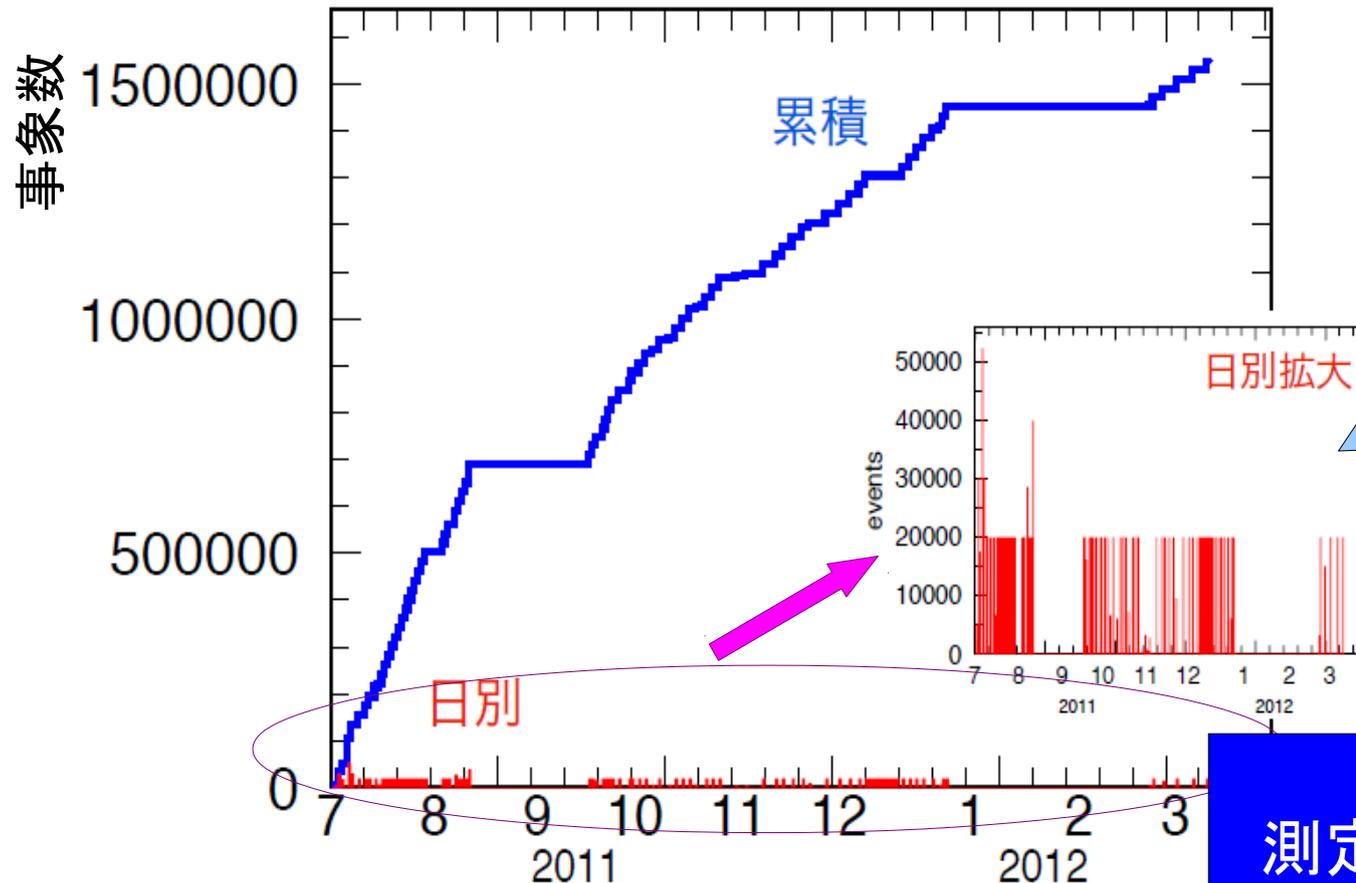
DCBA-T2.5 のデータ取得

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

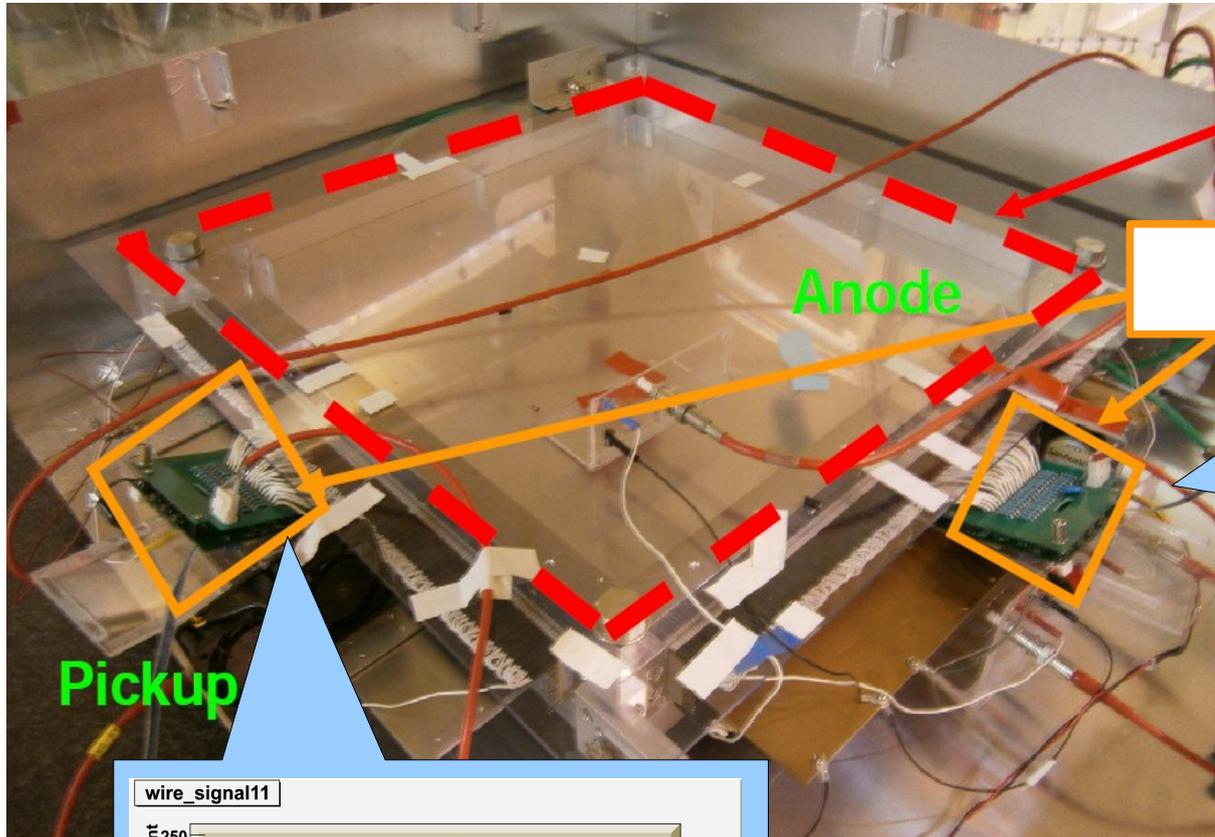
実験開始後6ヶ月のデータ取得の様子



・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

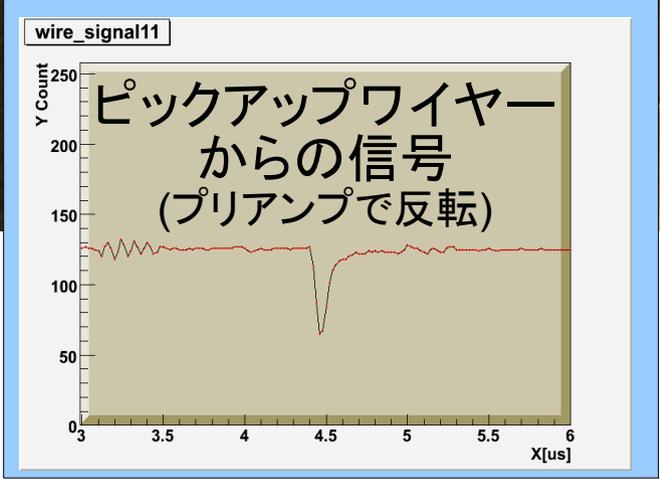
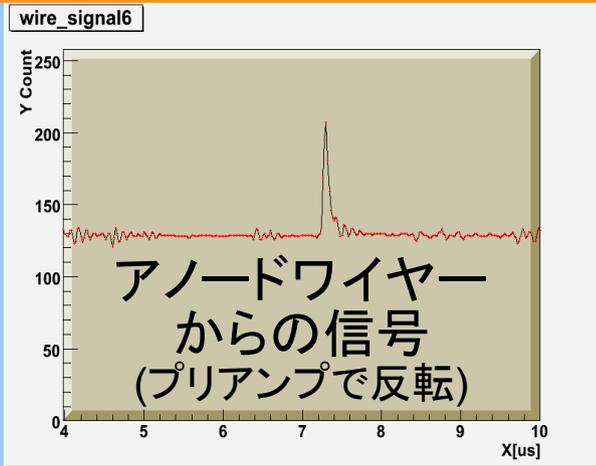
現在までに
測定時間: 約10,600時間
取得事象数: 3,665,300

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

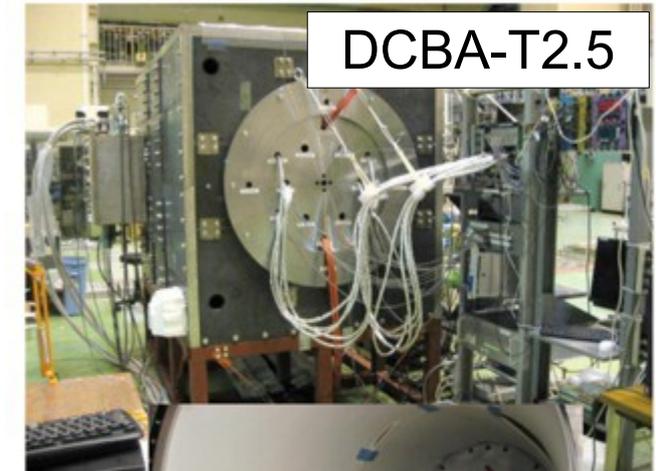
2007 DCBA-T2

- ・6 mm ピッチのワイヤー (xy + xz)
- ・ ^{100}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}Nd (5.6% in natural Nd_2O_3)
- ・最大 3 kGの磁場

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

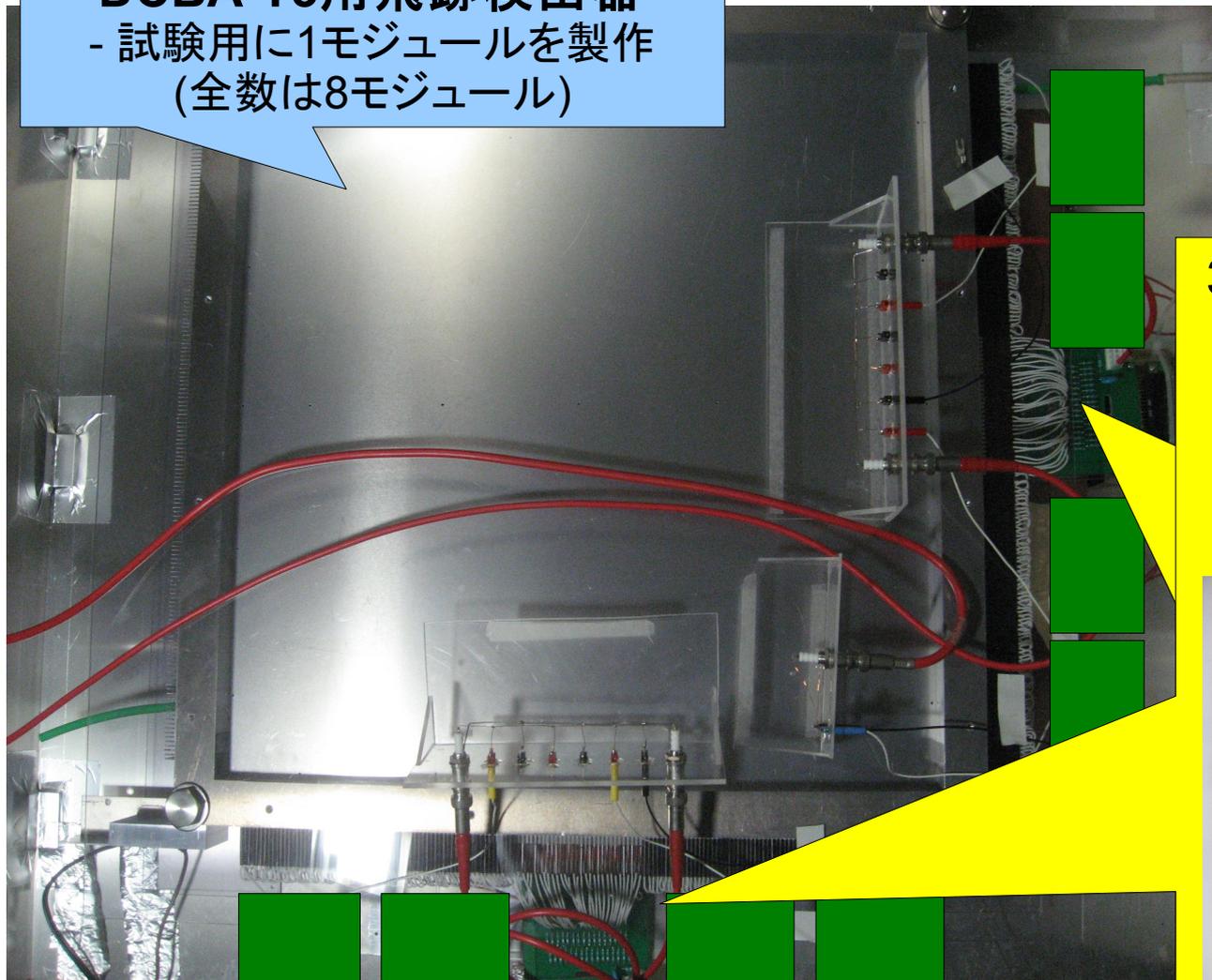
2017 MTD(仮称)

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

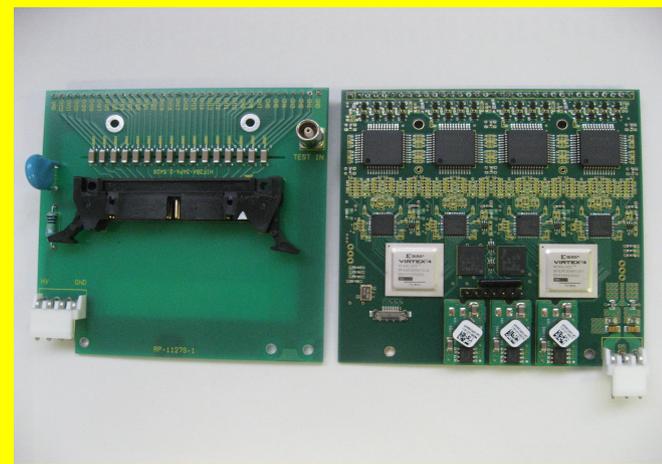
- 試験用に1モジュールを製作
(全数は8モジュール)



	T2	T3
ワイヤー数	40	160
ワイヤー間隔	6mm	3mm

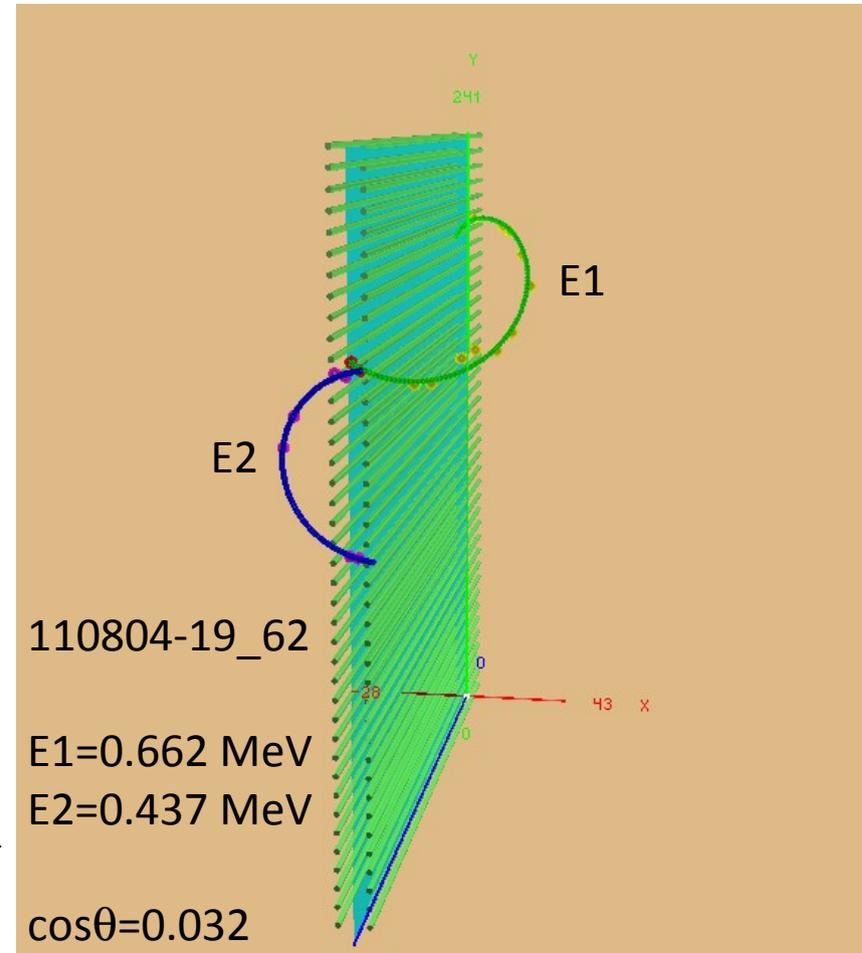
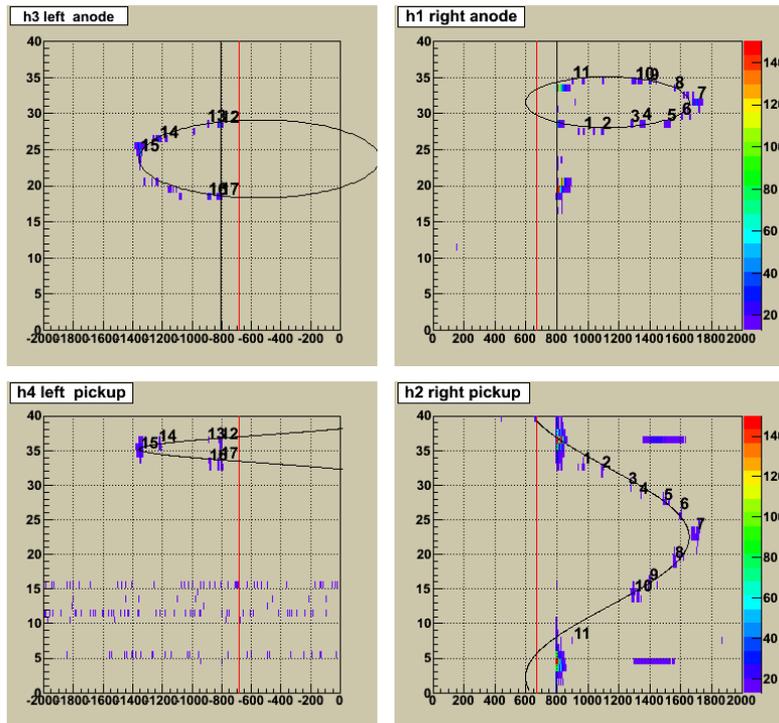
32ch プリアンプ & FADC

- 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?

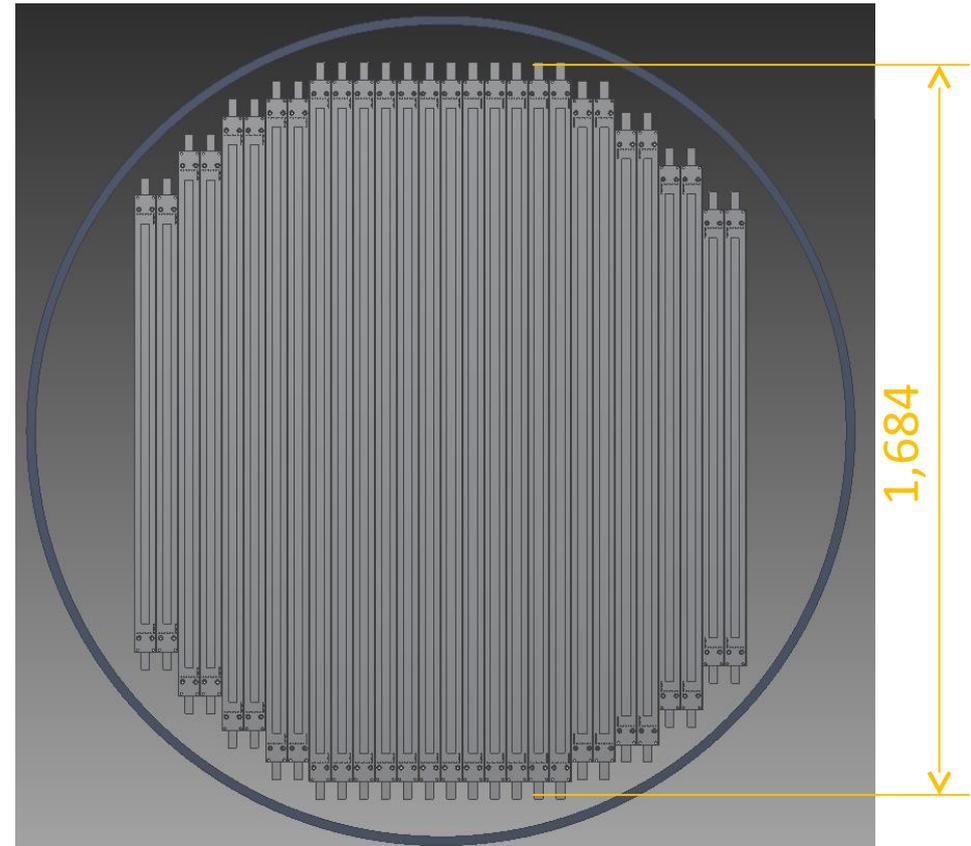
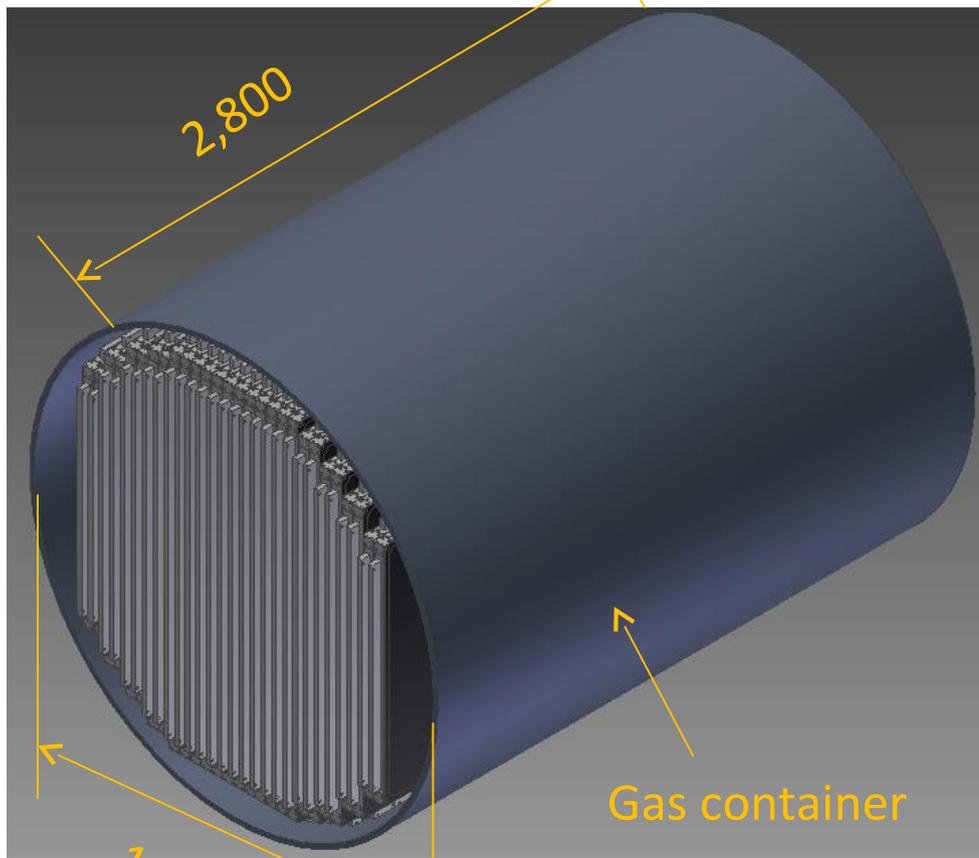
崩壊点再構成精度の理解が必要

	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

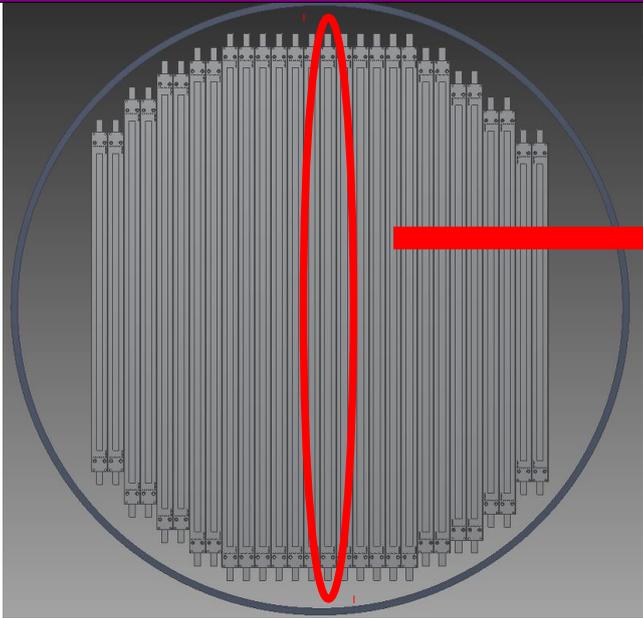
MTD実験装置の機械設計を開始



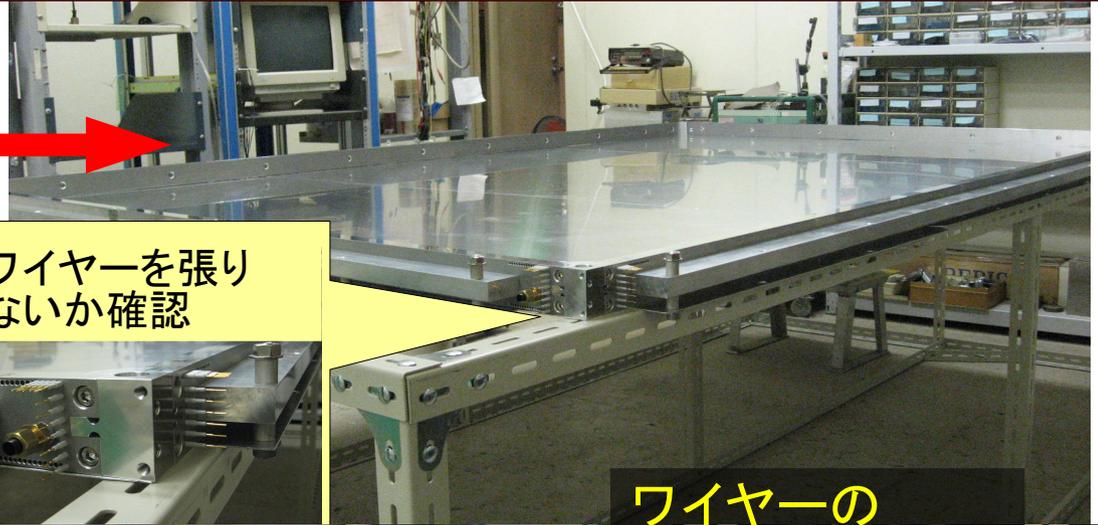
MTD用ドリフトチェンバーとガスコンテナの設計図

MTD実験: R&Dの現状

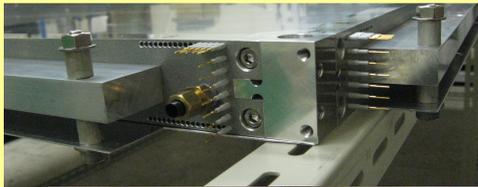
MTD チェンバーの組立図



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



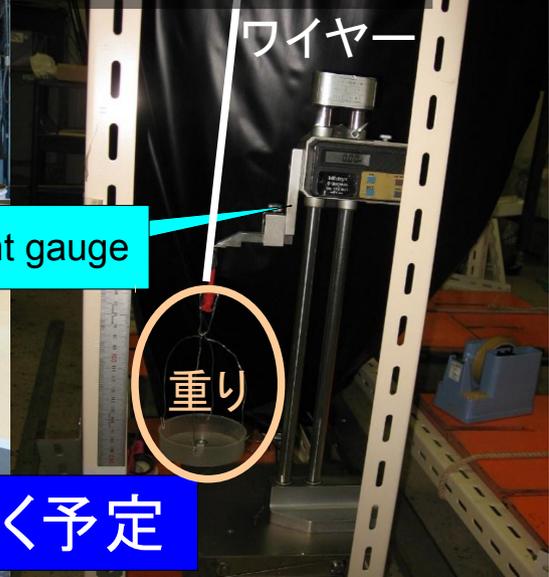
たわみの測定



Support fin of the
Horizontal frame

Digital height gauge

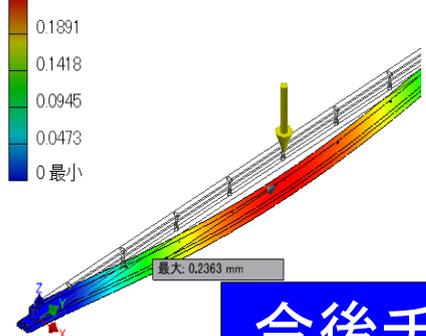
ワイヤーの
塑性変形の測定



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}Mo 二重ベータ崩壊の半減期

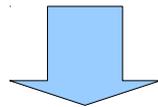
$$T_{\frac{1}{2}} = \ln 2 \cdot \varepsilon \cdot N_{^{100}\text{Mo}} \cdot T_{\text{obs}} / N_{\text{events}}$$

ε : 検出効率 = 0.0928

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

T_{obs} : 測定時間 = 6.83×10^6 秒

N_{events} : イベント数 = 78

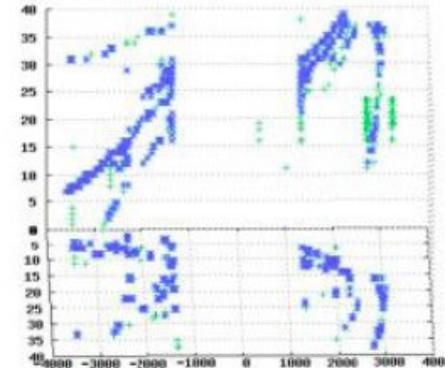


$$T_{\frac{1}{2}} = 4.0 \times 10^{18} \text{ 年}$$

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

