

二重ベータ崩壊実験の国際情勢

吉田 齊

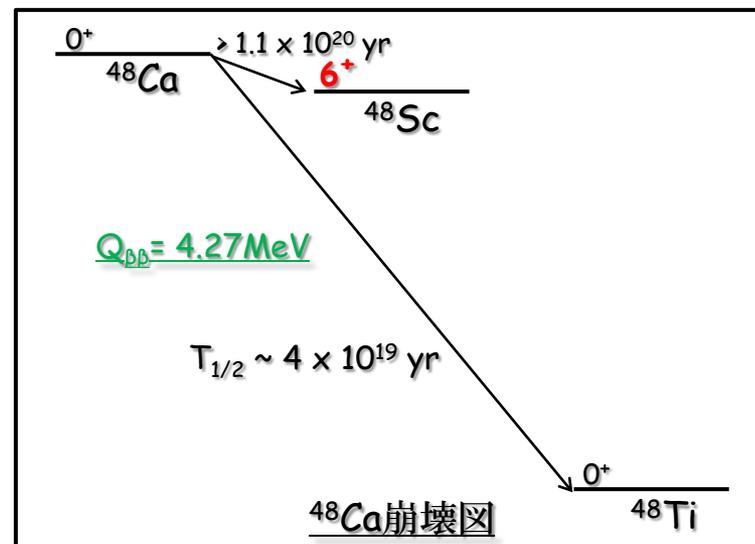
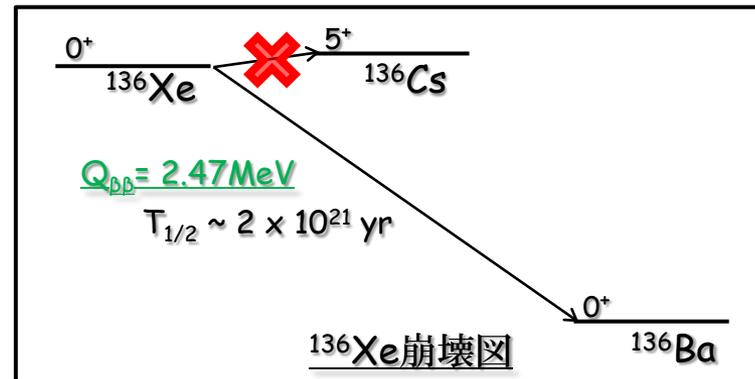
大阪大学大学院理学研究科

**極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会
2013年4月23日、24日 @ 富山**

二重ベータ崩壊

- β 崩壊がエネルギー的に禁止されている、もしくはスピン遷移則で強く抑制される \rightarrow 二重ベータ崩壊($\beta\beta$)崩壊
 - $\beta\beta$ 崩壊核種は多くある
 - TableはQ値の2 MeV以上の核種

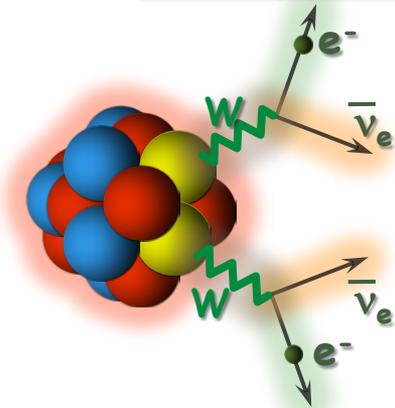
核種	Q値 (MeV)	存在比 (%)
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4.271	0.187
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	2.040	7.8
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	2.995	9.6
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	3.350	2.8
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	3.034	11.8
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2.802	7.5
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2.228	5.64
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2.533	34.5
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2.479	8.9
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	3.367	5.6



二重ベータ崩壊

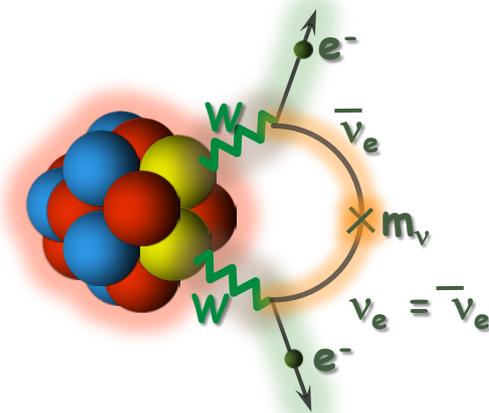
● 崩壊モード:

① $2\nu\beta\beta$ 崩壊 : $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$



- 標準理論の枠内
- 既に10以上のIsotopeで観測
 - ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{136}Xe , etc
- 半減期 ; $10^{18} \sim 10^{21}$ yr

② $0\nu\beta\beta$ decay : $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$

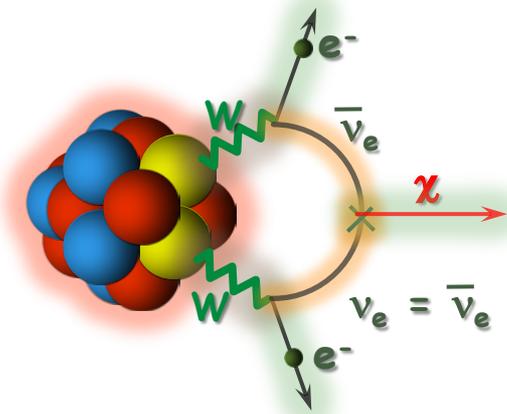


- 標準理論を越えるProcess
 - レプトン数非保存
 - ニュートリノ有限質量
 - マヨラナニュートリノ
- まだ観測されていない!
- 半減期 ; $T_{1/2} \geq 10^{26}$ yr

二重ベータ崩壊

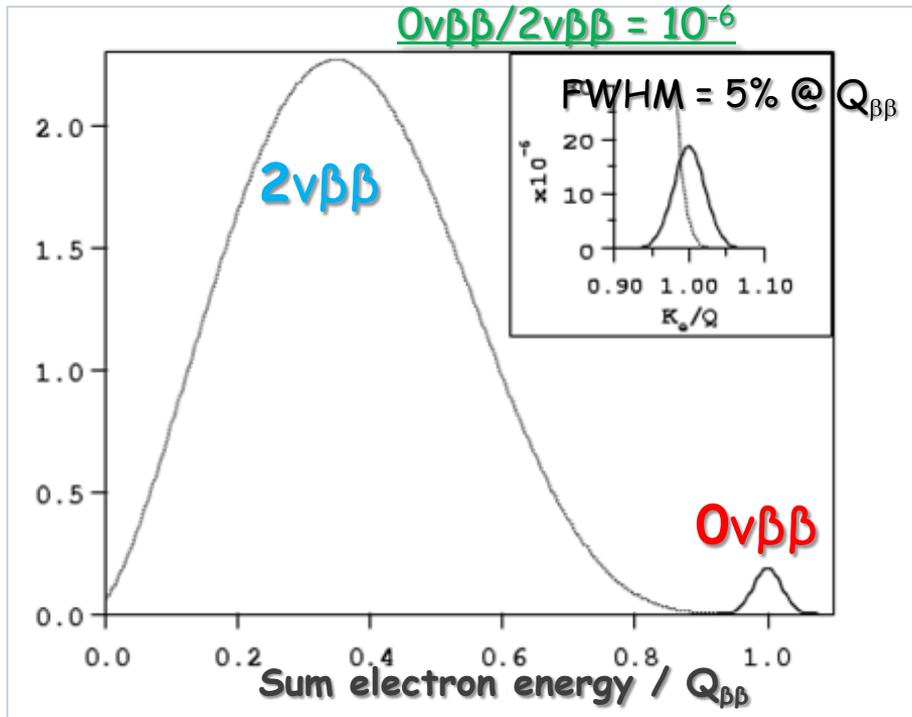
● 崩壊モード:

③ $0\nu\beta\beta \chi$ decay : $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- + \chi$



- Majoron (軽い中性ボソン)の放出Process
- 標準理論を越えるProcess
 - レプトン数非保存
 - マヨラナニュートリノ

$0\nu\beta\beta$ 崩壊の検出方法



S.R.Elliot and P.Vogel, Ann. Rev.Nucl.Part.Sci.52(2002)115.

- $2\nu\beta\beta$ decay:
 - $Q_{\beta\beta}$ 値をEnd pointに連続成分

- $0\nu\beta\beta$ decay :
 - $Q_{\beta\beta}$ 値にピーク

Calorimetric法

その他にも...

- 2本のElectron ; Tracking
- 娘核種が生成 ; Tagging

- Spectroscopic に $0\nu\beta\beta$ と $2\nu\beta\beta$ を分離
- 他に必要なことは...

$0\nu\beta\beta$ 観測の意義

● $0\nu\beta\beta$ の発見

- レプトン数非保存過程
 - ニュートリノ = マヨラナ粒子
 - 重いニュートリノを自然に導入可能
 - → シーソー機構により、微小なニュートリノ質量を説明可能
 - 重いニュートリノの崩壊
 - ← CPの破れを要求 (レプトジェネシスシナリオ)
- 物質優勢の宇宙

● ニュートリノ質量の絶対値

$$\tau_{0\nu}^{-1} = G_{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M_{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2 \quad \text{質量項の場合}$$

- 有効マヨラナ質量 $\langle m_\nu \rangle = |\sum U_{ei}^2 m_i|$
- 質量階層型の決定

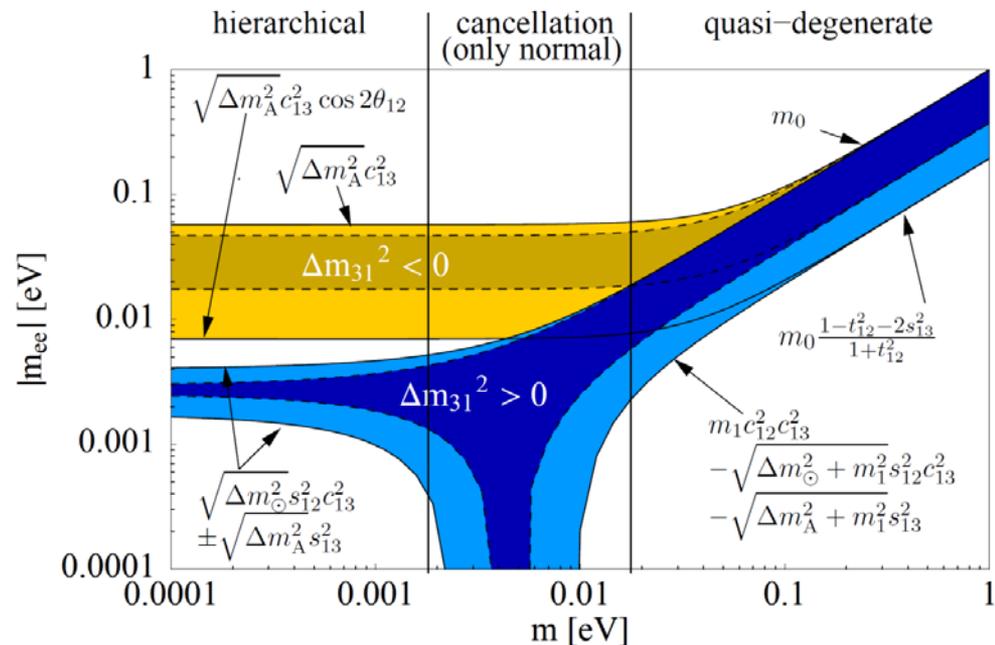
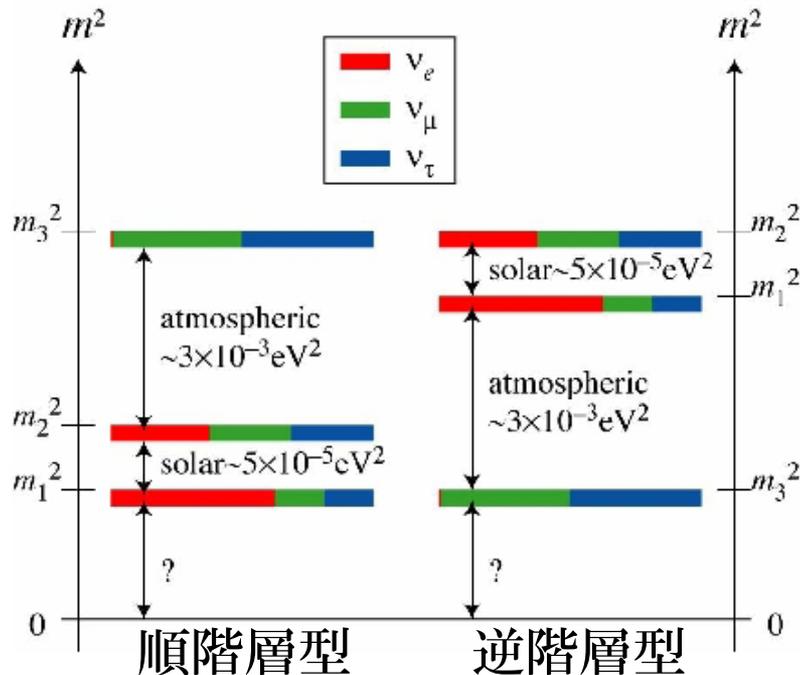
ニュートリノ質量階層性

- 有効マヨラナ質量と質量階層性

$$|\langle m_\nu \rangle| = \left| \sum U_{e_i}^2 m_i \right| = \left| \cos^2 \theta_{13} (m_1 \cos^2 \theta_{12} + m_2 e^{2i\alpha} \sin^2 \theta_{12}) + m_3 e^{2i\beta} \sin^2 \theta_{13} \right|$$

$$\langle m_{ee} \rangle^{\text{nor}} = \left| m_1 c_{12}^2 c_{13}^2 + \sqrt{m_1^2 + \Delta m_\odot^2} s_{12}^2 c_{13}^2 e^{2i\alpha} + \sqrt{m_1^2 + \Delta m_A^2} s_{13}^2 e^{2i\beta} \right|$$

$$\langle m_{ee} \rangle^{\text{inv}} = \left| \sqrt{m_3^2 + \Delta m_A^2} c_{12}^2 c_{13}^2 + \sqrt{m_3^2 + \Delta m_\odot^2 + \Delta m_A^2} s_{12}^2 c_{13}^2 e^{2i\alpha} + m_3 s_{13}^2 e^{2i\beta} \right|$$



Oscillation Parameters

- ニュートリノ振動実験の結果

arXiv:1205.4018v4 [hep-ph] 24 Oct., 2012

Global status of neutrino oscillation parameters after Neutrino-2012

D. V. Forero, M. Tórtola, and J. W. F. Valle

parameter	best fit	1σ range	2σ range	3σ range
Δm_{21}^2 [10^{-5}eV^2]	7.62	7.43–7.81	7.27–8.01	7.12–8.20
$ \Delta m_{31}^2 $ [10^{-3}eV^2]	2.55	2.46 – 2.61	2.38 – 2.68	2.31 – 2.74
	2.43	2.37 – 2.50	2.29 – 2.58	2.21 – 2.64
$\sin^2 \theta_{12}$	0.320	0.303–0.336	0.29–0.35	0.27–0.37
$\sin^2 \theta_{23}$	0.613 (0.427) ^a	0.400–0.461 & 0.573–0.635	0.38–0.66	0.36–0.68
	0.600	0.569–0.626	0.39–0.65	0.37–0.67
$\sin^2 \theta_{13}$	0.0246	0.0218–0.0275	0.019–0.030	0.017–0.033
	0.0250	0.0223–0.0276	0.020–0.030	
δ	0.80π	$0 - 2\pi$	$0 - 2\pi$	$0 - 2\pi$
	-0.03π			

Δm_{13}^2 , $\sin^2\theta_{23}$, $\sin^2\theta_{13}$, δ は上段の数字が順階層、下段が逆階層

ニュートリノ振動実験からの予測

● 階層構造

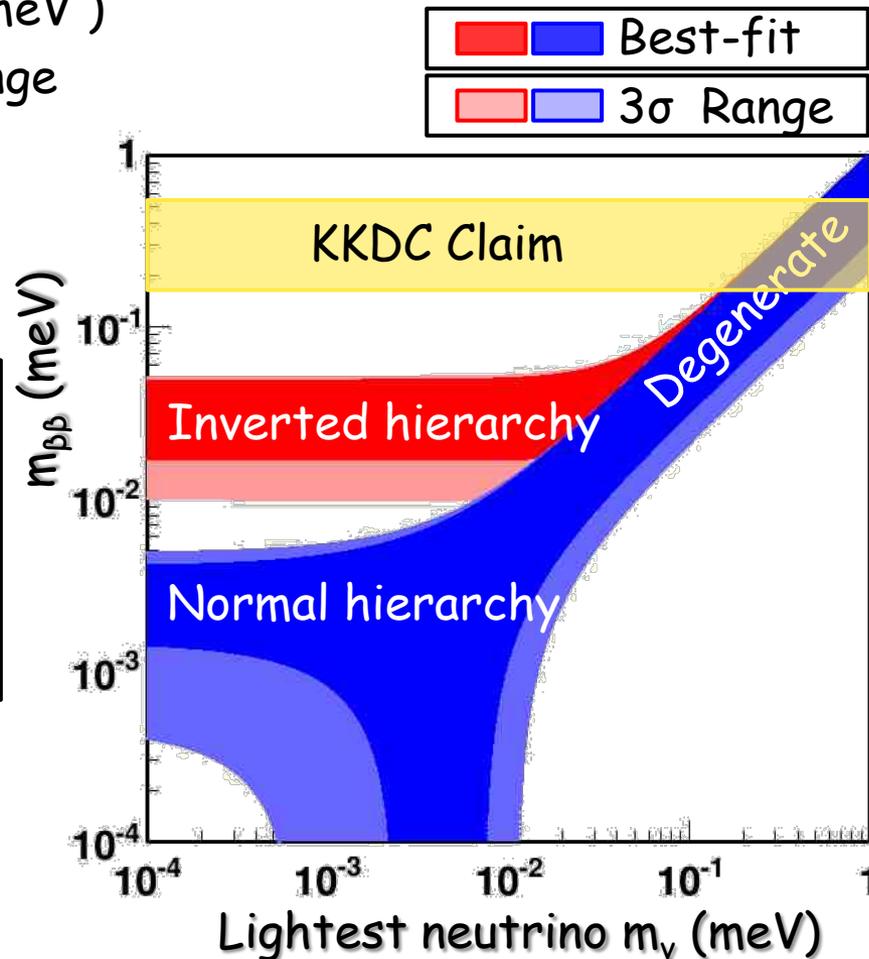
● 逆階層： **17 - 48 meV** (10 - 51 meV)

● 順階層： **< 3.9 meV** (< 4.8 meV)

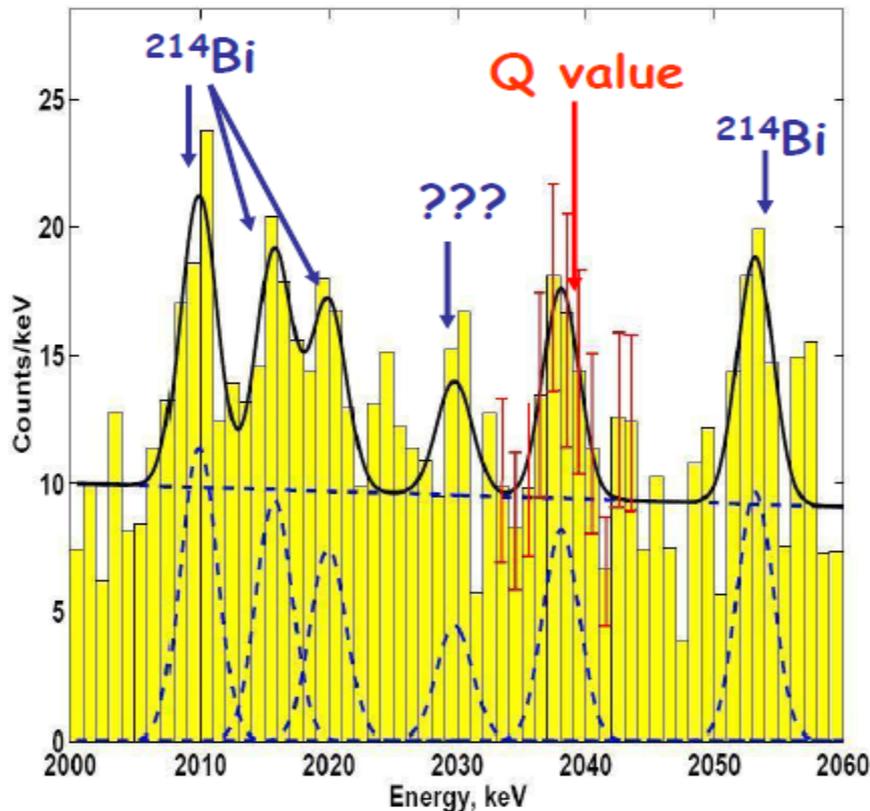
※()内は 3σ range

● KKDC Claim → 次のスライド

- 第1 Step：KKDC Claimの検証
- 第2 Step：逆階層領域での探索
- 第3 Step：順階層領域へ



KKDC Claim



- Heidelberg-Moscow experiment
 - ~ 11 kg of enriched ^{76}Ge

- エネルギースペクトルFit
 - 6 x ガウス関数 + Linear BG

- **Q値(2.039 MeV)にExcess有**
 - 28.75 ± 6.86 counts

- Claimed significance ; 4.2σ
→ 6σ with PSD解析

- Results
 - $T_{1/2} = 2.23^{+0.44}_{-0.31} \times 10^{24}$ year
 - $\langle mv \rangle = 0.32 \pm 0.03$ eV

- バックグラウンド 候補
 - For ex., $^{206,207}\text{Pb}(n,\gamma)$

Published by part of collaboration members
H.V.Klapdor-Kleingrothaus, et al.,
Mod. Phys. Lett. A21(2006) 1547

→ KamLAND-Zen & EXO combined results almost excluded (97.5% C.L.) !

Requirements for $0\nu\beta\beta$ Experiment

- 崩壊核の選択 → $0\nu\beta\beta$ 崩壊率を大きく

$$T_{0\nu}^{-1} = G_{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M_{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2 \quad \text{(Mass term)}$$

- Phase space, 各行列要素

検出器側では、感度は Backgroundがある と一般的に

$$\langle m_\nu \rangle \propto T_{0\nu}^{-1/2} \propto (N_{BG} \cdot \Delta E / M \cdot T_{live})^{1/4}$$

- 大容積 ($M \sim \text{Large}$)
 - 自然存在比/濃縮
- 低Background ($N_{BG} \sim \text{Small}$)
 - 高純度材料 → 検出器、遮蔽、地下実験室
 - Large $Q_{\beta\beta}$
 - $2\nu\beta\beta$ の影響に関しては
 - エネルギー分解能 (ΔE ; Good)、小さい $2\nu\beta\beta$ 崩壊率
- その他にも... ($T_{live} \sim \text{Long}$)
 - オペレーション容易

β核種の選択

● Phase Space Factor

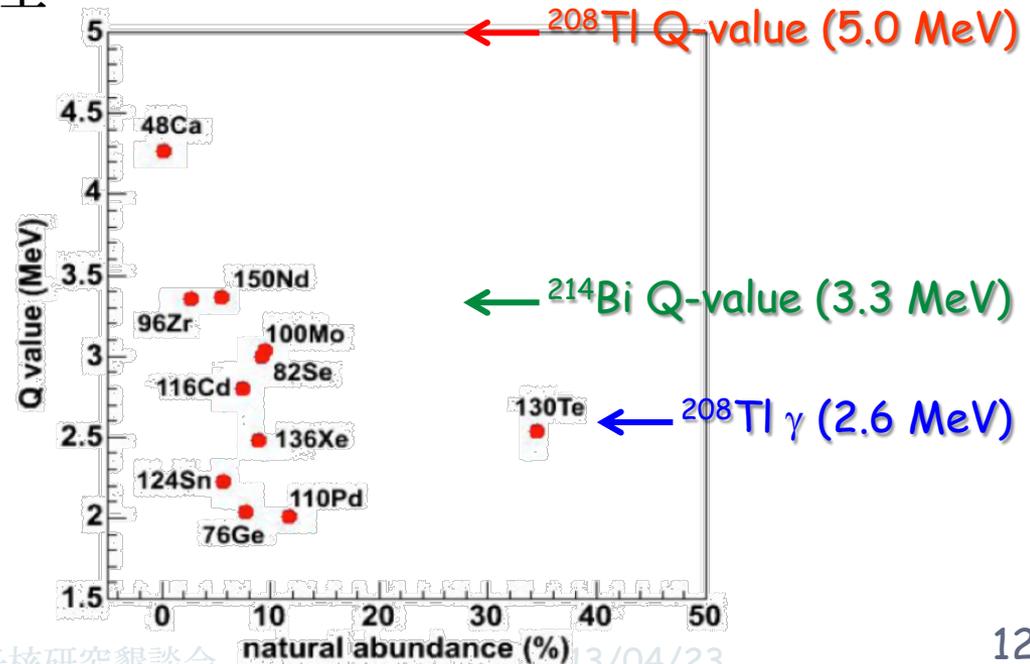
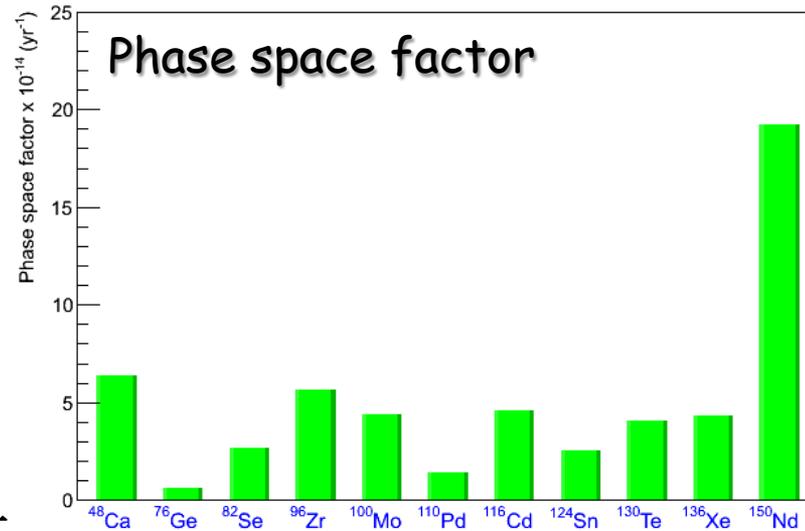
- Q値、原子核半径
- ^{150}Nd ~ Large

● Q値

- 自然界のBackground源
- 2.6, 3.3MeVとの差
- ^{48}Ca , ^{150}Nd , ^{96}Zr 3.3MeV以上

● 自然存在比/濃縮

- 濃縮の可否、難易度
- ^{130}Te ; ~ 34%
- ^{136}Xe ; 濃縮容易
- ^{100}Mo , ^{82}Se , ^{76}Ge , ^{116}Cd ;
濃縮OK

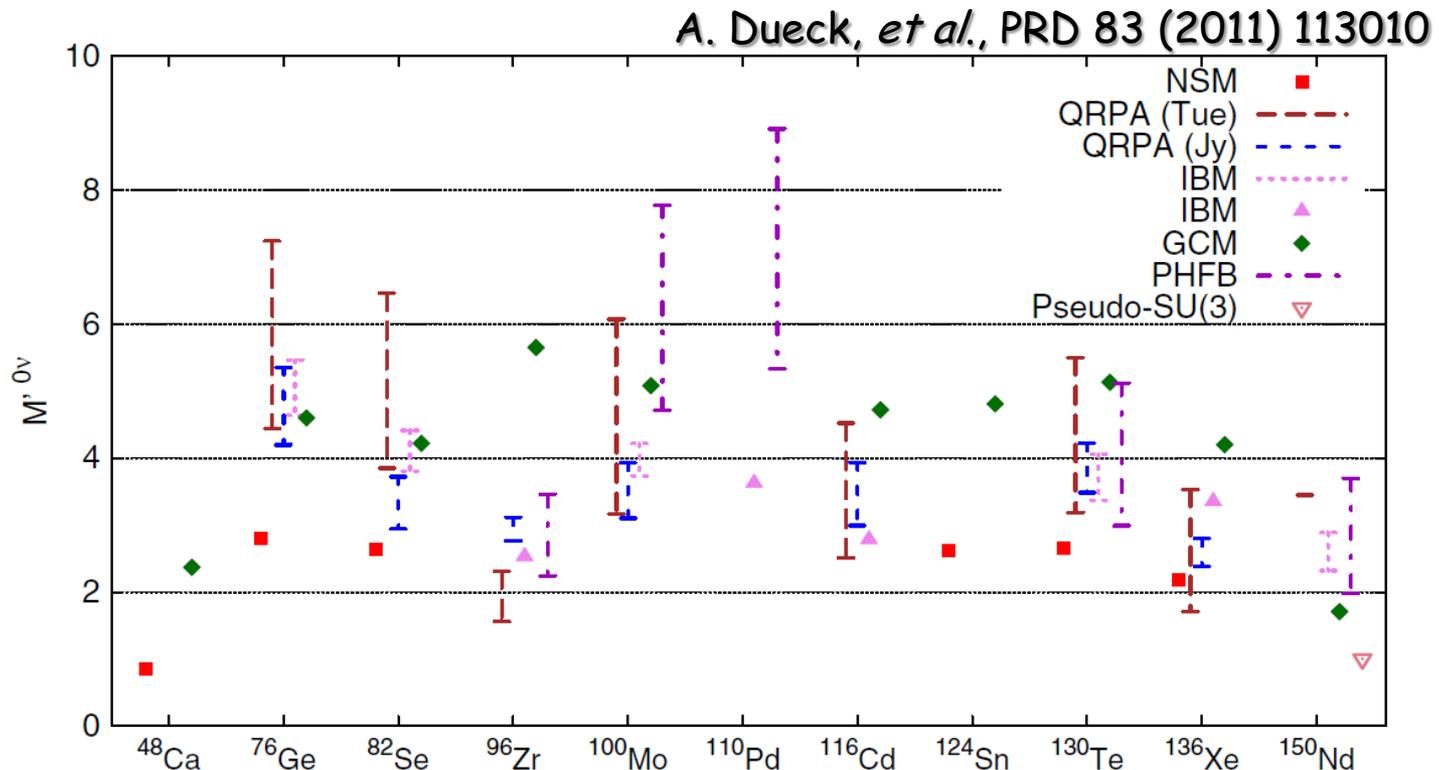


核行列要素 (NME)

● 理論的なモデル計算

- 不定性 : ~ a few 倍
- モデル依存
- $2\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期測定 → モデル計算の妥当性をチェック？

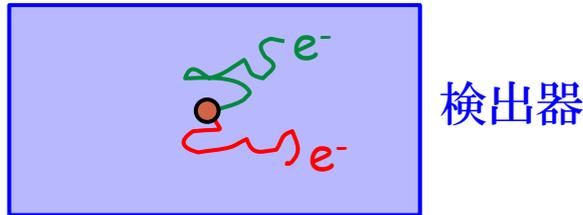
→ 複数の核種で測定することが重要！



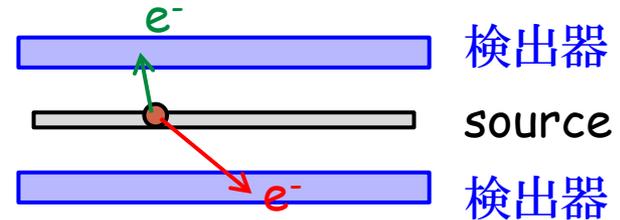
個々の実験計画

Types of Detectors

- 検出器技術が多様化 → 大雑把に分類すると



Source \equiv Detector
(Calorimetric)



Source \neq Detector
(Tracking)

- 利点
 - 大容積
(~ 1 ton程度までScale up容易)
 - 高検出効率
 - エネルギー分解能が良い
 - Gas/LXeなどは事象解析
- 欠点
 - 検出器になる核種に限られる

- 利点
 - 2本のTrackの同定が可能
(BG除去能が高い)
 - 同検出器で別の核種が測定可
 - エネルギー・角相関を測定
→ Mechanism解明
- 欠点
 - 大型化が難しい

世界中の実験プロジェクト

● Source = Detector (Calorimetric)

Ionization

GERDA (^{76}Ge)
MAJORANA (^{76}Ge)

+ Tracking

COBRA (^{116}Cd)

Bolometers

CUORE (^{130}Te)
LUCIFER (^{82}Se)
 ZnMoO_4 (^{100}Mo)
AMoRE (^{100}Mo)

Scintillator

KamLAND-Zen (^{136}Xe)
SNO+ (^{150}Nd)
CANDLES (^{48}Ca)

Liquid Xe

XMASS (^{136}Xe)

+ Tracking

EXO (^{136}Xe)

● Source \neq Detector (Tracking)

Super-NEMO (^{82}Se)
MOON (^{100}Mo)

Tracking +
Calorimeter

DCBA(MTD) (^{150}Nd)
NEXT (^{136}Xe)

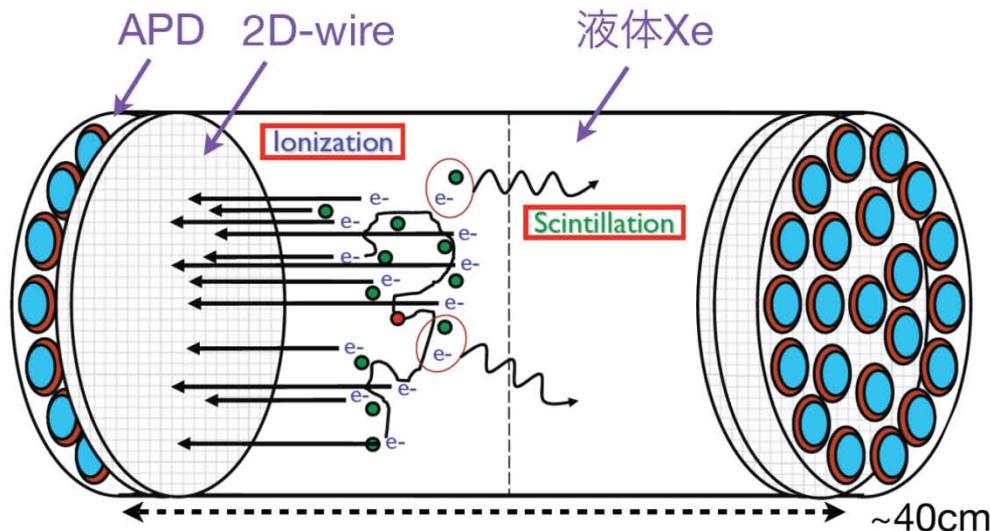
Tracking

EXO実験

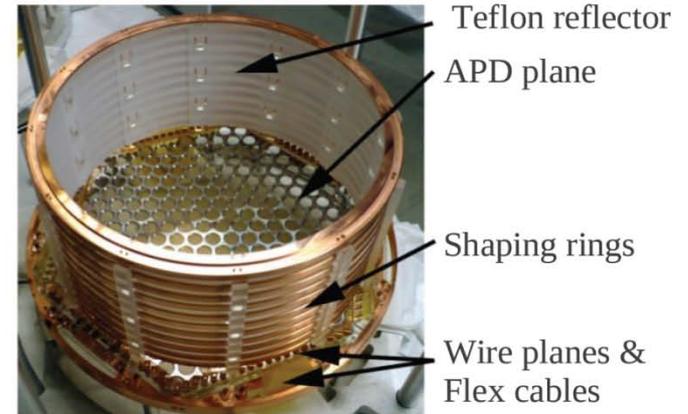
- Enriched Xeon Observatory -

EXO-200検出器

- 場所: WIPP (~1600 m.w.e)
- ターゲット: 175kgの液体Xe (80.6%が ^{136}Xe , Q値 = 2458 keV)
- 検出器: TPC (Time Projection Chamber) + LAAPD (Large Area Avalanche Photodiodes)
- 目標レート: 40 counts/2year (Q値付近 $\pm 2\sigma$, 液体Xe 140 kg)



検出器の写真



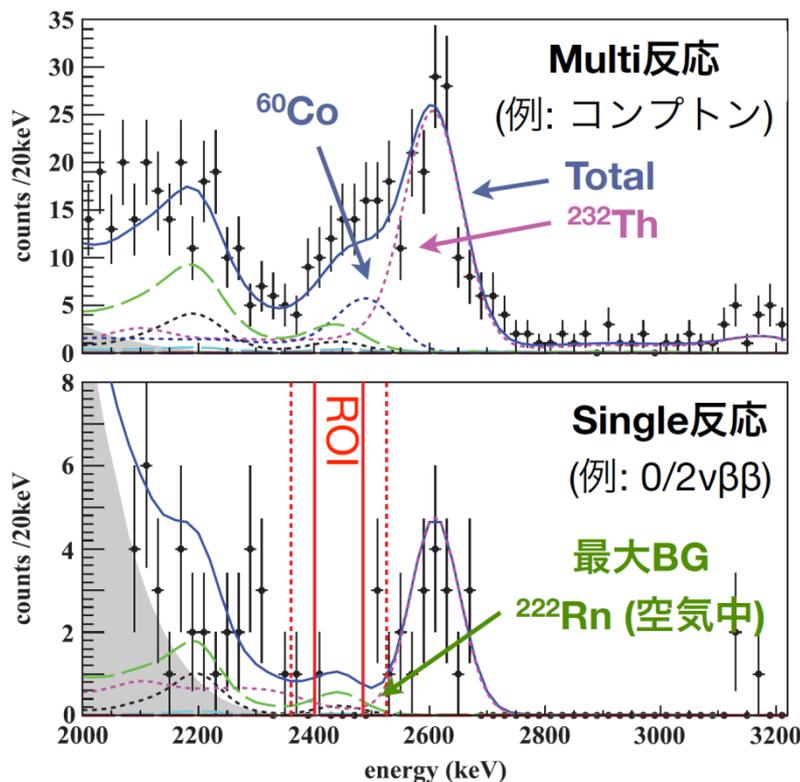
- 検出原理 (2種類の検出器によるSignal / BG区別)
 - Ionizationで生成したe-を観測 (TPC): → Single / Multi反応を区別
 - シンチレーション光観測 (APD) → Energy測定、 α 粒子の区別

First Result of EXO-200

- 2011年11月: ^{136}Ge $2\nu\beta\beta$ の半減期測定 (Ackerman et al. PRL107, 212501)
 - $T_{1/2} = (2.11 \pm 0.04 \text{ stat.} \pm 0.21 \text{ syst.}) \times 10^{21} \text{ year}$
- 2012年7月: $0\nu\beta\beta$ 測定 (M. Auger et al., PRL109, 032505)
 - $T^{0\nu\beta\beta} > 1.6 \times 10^{25} \text{ year (90\% C.L.)}$, $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 140\text{-}380 \text{ meV (90\% C.L.)}$

^{136}Xe 付近のエネルギースペクトル

- Live time: 120.7 days
- Active ^{136}Xe mass: 79.4 kg
- Exposure: 26.2 kg·yr
(ref. 89.5 for KamLAND-Zen)



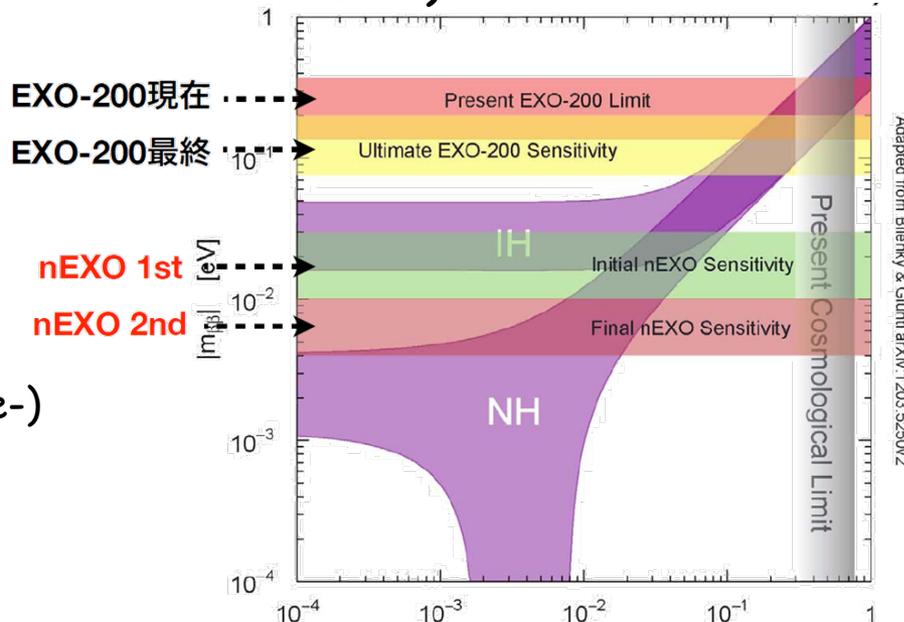
	Expected events from fit			
	$\pm 1 \sigma$		$\pm 2 \sigma$	
^{222}Rn in cryostat air-gap	1.9	± 0.2	2.9	± 0.3
^{238}U in LXe Vessel	0.9	± 0.2	1.3	± 0.3
^{232}Th in LXe Vessel	0.9	± 0.1	2.9	± 0.3
^{214}Bi on Cathode	0.2	± 0.01	0.3	± 0.02
All Others	~ 0.2		~ 0.2	
Total	4.1	± 0.3	7.5	± 0.5
Observed	1		5	
Background index b ($\text{kg}^{-1}\text{yr}^{-1}\text{keV}^{-1}$)	$1.5 \cdot 10^{-3} \pm 0.1$		$1.4 \cdot 10^{-3} \pm 0.1$	

観測レート: **60 counts/2year** (ほぼ目標達成)

今後の予定

- 2013年3月時点で、3倍のデータセットが利用可 (約1年分)
- Rn BG抑制 (鉛-Cryostat間パーシ)、FV最適化・エレキアップデート
- 測定期間: ~2015,6年 (4年の測定で < 75-200 meV)

- 次期計画: nEXO (next) @ SNO-Lab
- (アイディア段階、時期未定)
- 目標感度: ~10 meV
 - 1st: 液体Xe 5トン
TPC (基本的にEXO-200と同じ構造)
 - 2nd: Baタギング ($^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}^{++} + 2e^-$)
→ **BGフリー測定**



Adapted from Blenky & Giunti arXiv:1203.5250v2

Type	Fiducial	Livetime	$T_{1/2}$ [year]	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ [meV]	Comment
EXO-200 最終感度	0.1 ton	4 year	5.5×10^{25}	< 75-200	Rn除去 解析update
nEXO第1段階	4.5	10	2.5×10^{27}	< 11-30	EXO-200大型化
nEXO第2段階	4.5	10	2.2×10^{28}	< 4-10	BGフリー

CUORE実験

Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

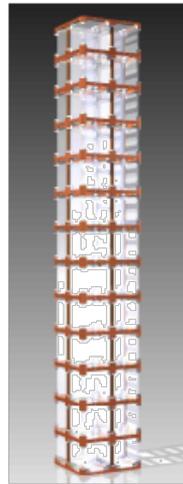
CUORE

- Site : GranSasso (Italy)
- Target : 741 kg TeO_2 (~206 kg ^{130}Te) 結晶988個
 - Natural Abundance 34 %, $Q_{\beta\beta}$ 値 = 2528 keV
- 検出器 : Bolometer ← 高分解能

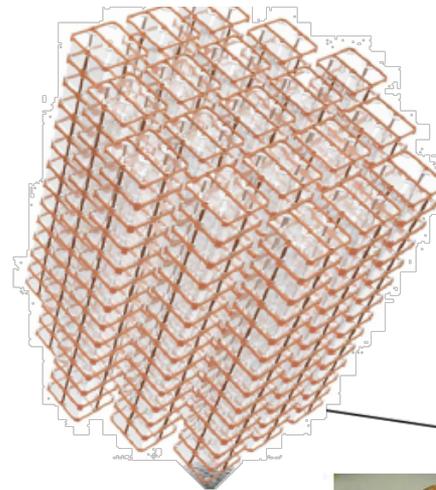
	Cuoricino	CUORE-0	CUORE
^{130}Te mass (kg)	11	11	206
Background (c/keV/kg/y) @ 2528 keV	0.17	0.05	0.01
E resolution (keV) FWHM @ 2615 keV	7	5-6	5
$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ (meV) @ 90% C.L.	300-710	200-500	40-90



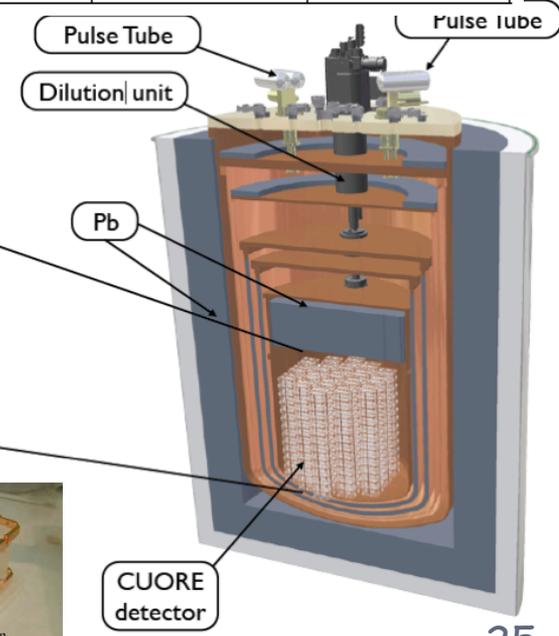
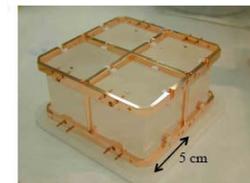
Cuoricino
2003-2008
11 kg ^{130}Te



CUORE-0
2012-2014
11 kg ^{130}Te



CUORE
2013-2018
206 kg ^{130}Te



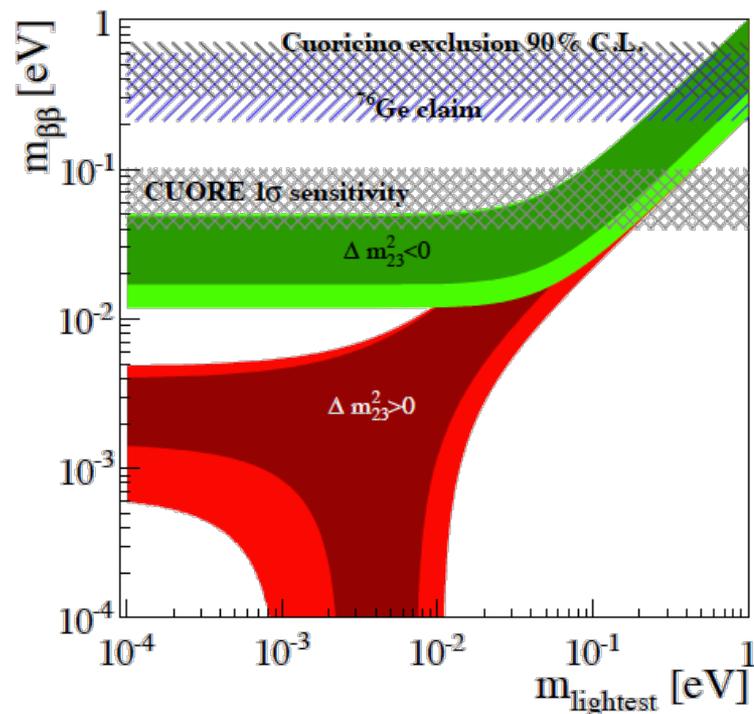
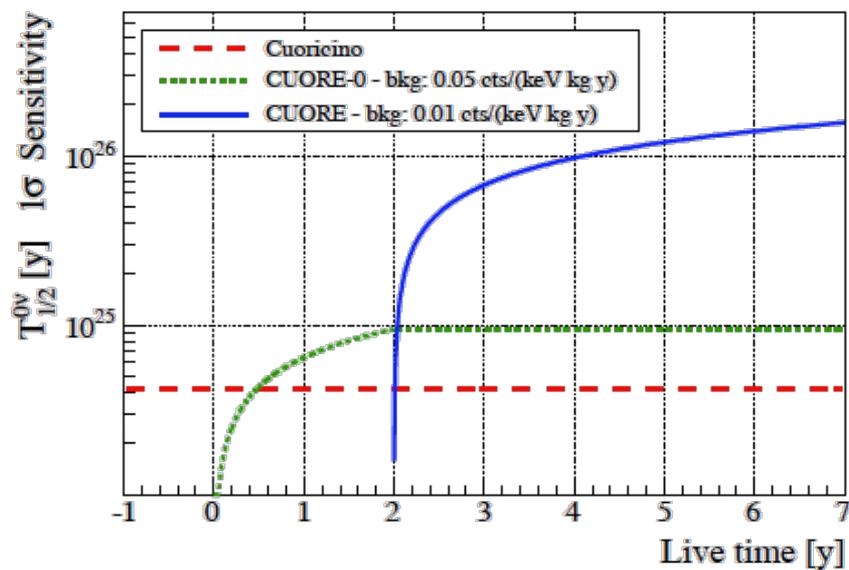
Current Status of CUORE

- Cuoritino 40kg (2003-2008)
 - $T_{1/2} \geq 2.8 \times 10^{24} \text{ y}$
- CUORE-0 (2012年 8月~)
 - CUOREのアセンブルラインで最初のタワー
 - Cuoritino cryostatを用いた独立の実験
 - $\Delta E(@2615\text{keV}) = 5.3\text{keV}$ (FWHM)
- CUORE 741kg (2014~)
 - 2013年2月にTowerアセンブリがスタート

<u>Schedule</u>	
Crystal	2012/12
Thermistors	2013/03
Cleaned Cu parts	2013/12
Cryogenic	2013/12
Tower Assembly	2014/04
Detector insertion	2014/07
Cool Down	2014/11

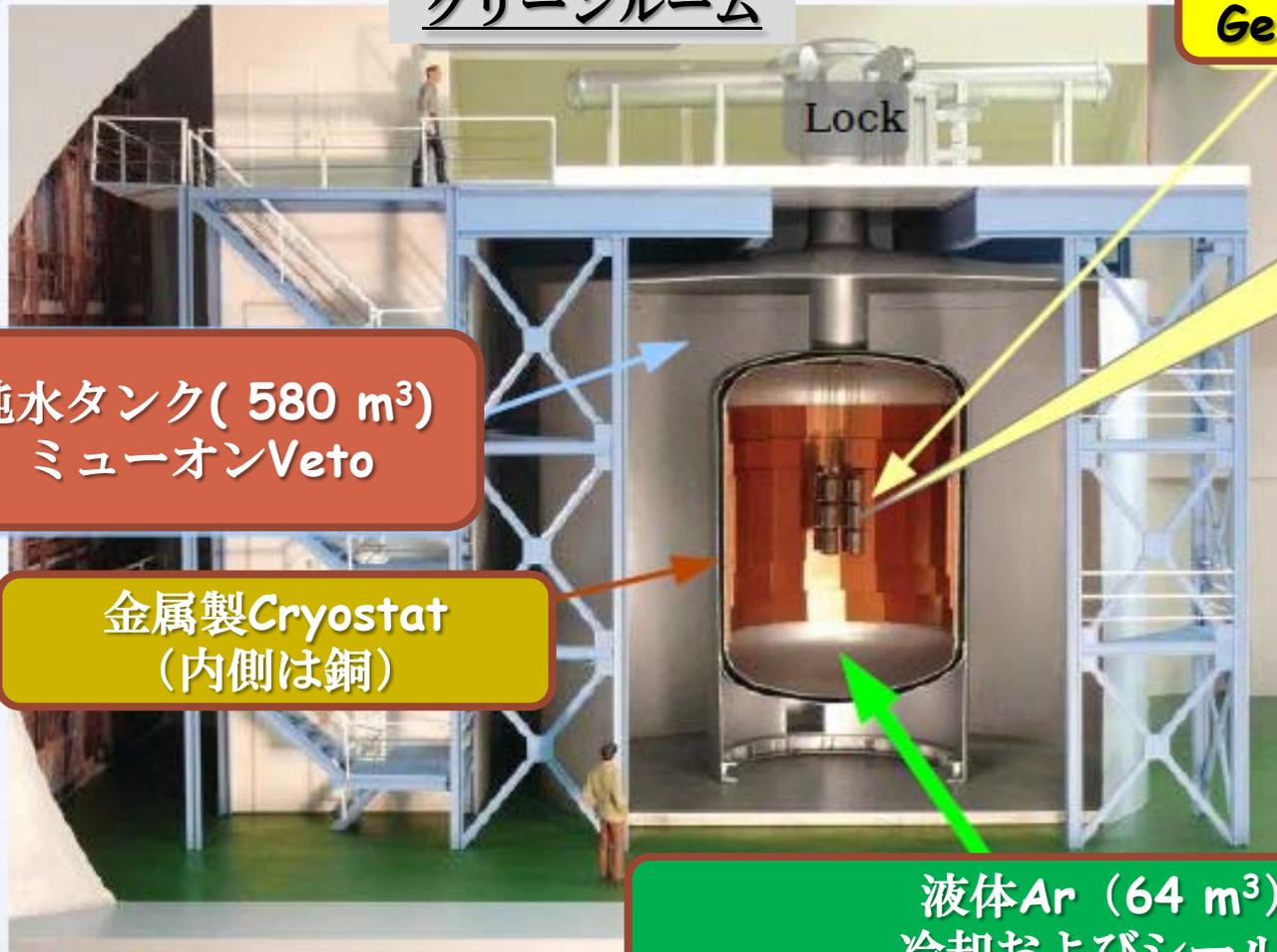
Sensitivity

- KKDC Claim \rightarrow ^{130}Te case ; $T_{1/2} = (0.49 - 1.0) \times 10^{25}$ 年
- CUORE-0 ; Single tower
 - 2年の測定で $T_{1/2} \sim 10^{25}$ 年 ; KKDC領域の検証可能
- CUORE
 - 2年で $\sim 10^{26}$ 年の感度到達
 - 最終感度 $T_{1/2} = 1.6 \times 10^{26}$ 年 \rightarrow $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 41 - 95$ meV



GERDA実験

GERDA実験



クリーンルーム

Phase I 用
Ge検出器アレイ



1個当たり
0.98 ~ 2.9 kg

純水タンク (580 m³)
ミュオンVeto

金属製Cryostat
(内側は銅)

液体Ar (64 m³)
冷却およびシールド

- Phase I : 18 kgの⁷⁶Ge検出器 (~86% : HDM/IGEXから)
- Phase II: 新たに20 kgのGe検出器を加える

GERDA Current Status

☆ $2\nu\beta\beta$ 測定

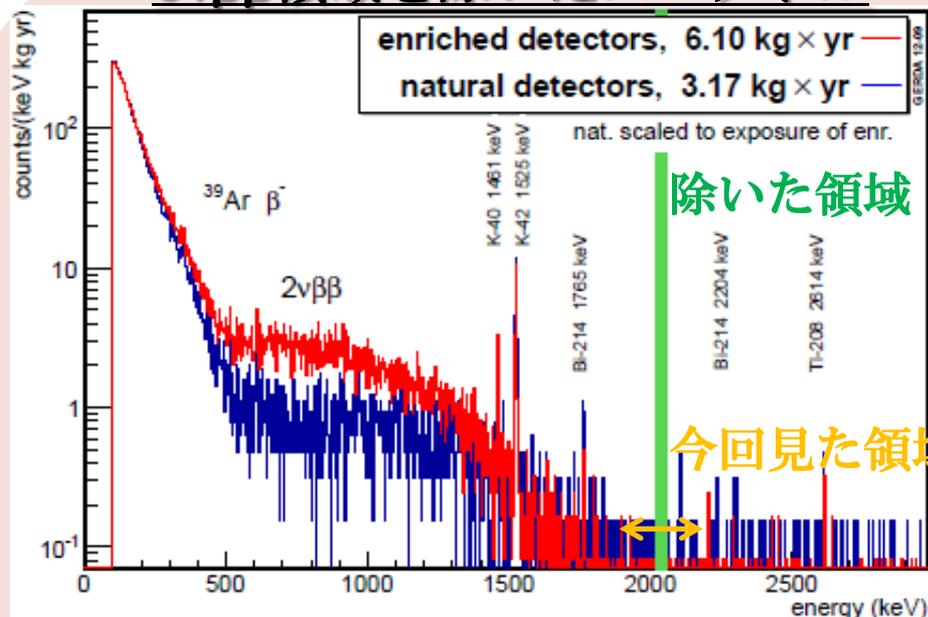
6個の濃縮Ge検出器で126 days
(5.04 kg*yr exposure)

$$T_{1/2} = (1.84^{+0.14}_{-0.10}) \times 10^{21} \text{ yr}$$

(Stat. + Syst. errors)

HDMと一致

$0\nu\beta\beta$ 領域を除いたスペクトル



★ $0\nu\beta\beta$ 探索 November 2011 ~ May 2012

- Exposure : 6.10 kg*yr (^{76}Ge 検出器) + 3.17 kg*yr (nat. Ge検出器)
- Background : $(2.0^{+0.6}_{-0.4}) \times 10^{-2} \text{ cts}/(\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{yr})$
- (濃縮Ge検出器で $Q_{\beta\beta}$ 値 $\pm 100 \text{ keV}$ 、 $Q_{\beta\beta}$ 値 $\pm 20 \text{ keV}$ を除いた領域)
- 20 kg*yearの測定を行った場合、GERDA実験の期待される測定感度は

$$T_{1/2} > 1.9 \times 10^{25} \text{ 年 (90\% C.L.)}$$

※ m_ν 換算で230-390 meV

GERDA Sensitivity & Schedule

Phase I: ● reach sensitivity of $T_{1/2} = 2 \cdot 10^{25}$ yr at 90% C.L.

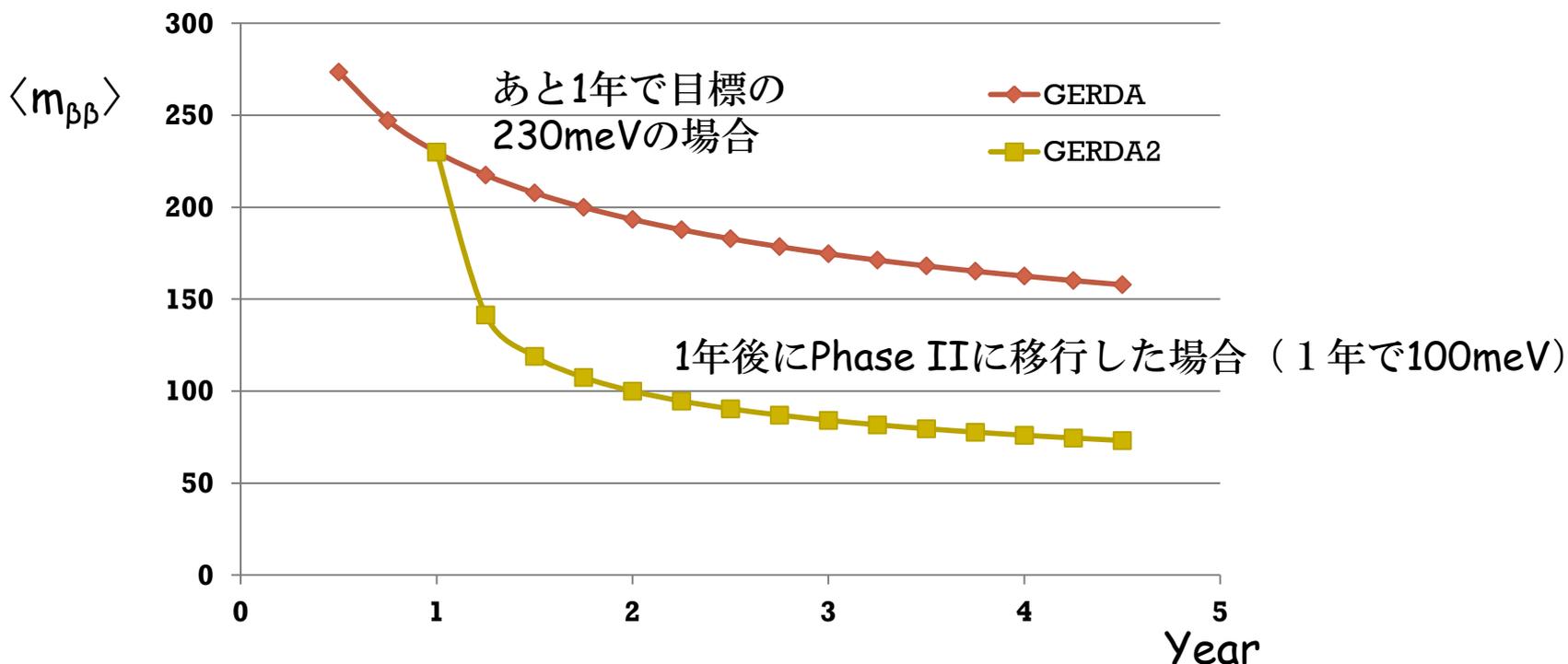
● $\langle m_{\beta\beta} \rangle \leq 0.23-0.39$ eV

● → **check claim!**

Phase II: ● reach background of 10^{-3} cts/(keV·kg·yr)

● Exposure of 100 kg·yr → $T_{1/2} > 1.35 \cdot 10^{26}$ yr

● $\langle m_{\beta\beta} \rangle \leq 0.09-0.15$ eV



※2011年終わりに測定開始し、今もPhase Iデータをとり続けている

MAJORANA実験



MAJORANA

^{76}Ge offers an excellent combination of capabilities & sensitivities.
(Excellent energy resolution, intrinsically clean detectors, commercial technologies, best $0\nu\beta\beta$ sensitivity to date)

- 40-kg of Ge detectors

- Up to 30-kg of 86% enriched ^{76}Ge crystals required for science and background goals
- Examine detector technology options
focus on point-contact detectors for DEMONSTRATOR

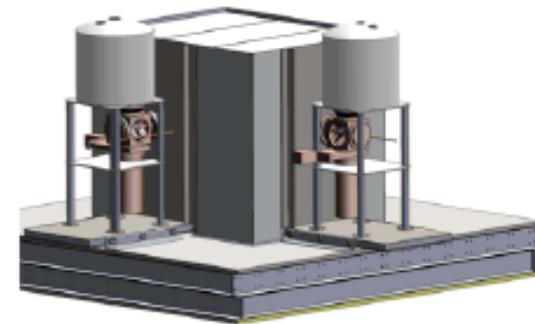
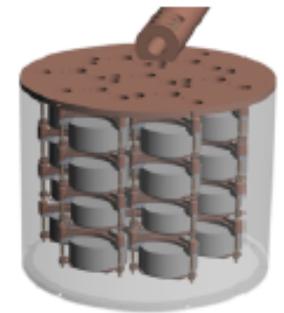
- Low-background Cryostats & Shield

- ultra-clean, electroformed Cu
- naturally scalable
- Compact low-background passive Cu and Pb shield with active muon veto

- Agreement to locate at 4850' level at Sanford Lab

- Background Goal in the $0\nu\beta\beta$ peak ROI(4 keV at 2039 keV)

~ 3 count/ROI/t-y (after analysis cuts) (scales to 1 count/ROI/t-y for tonne expt.)



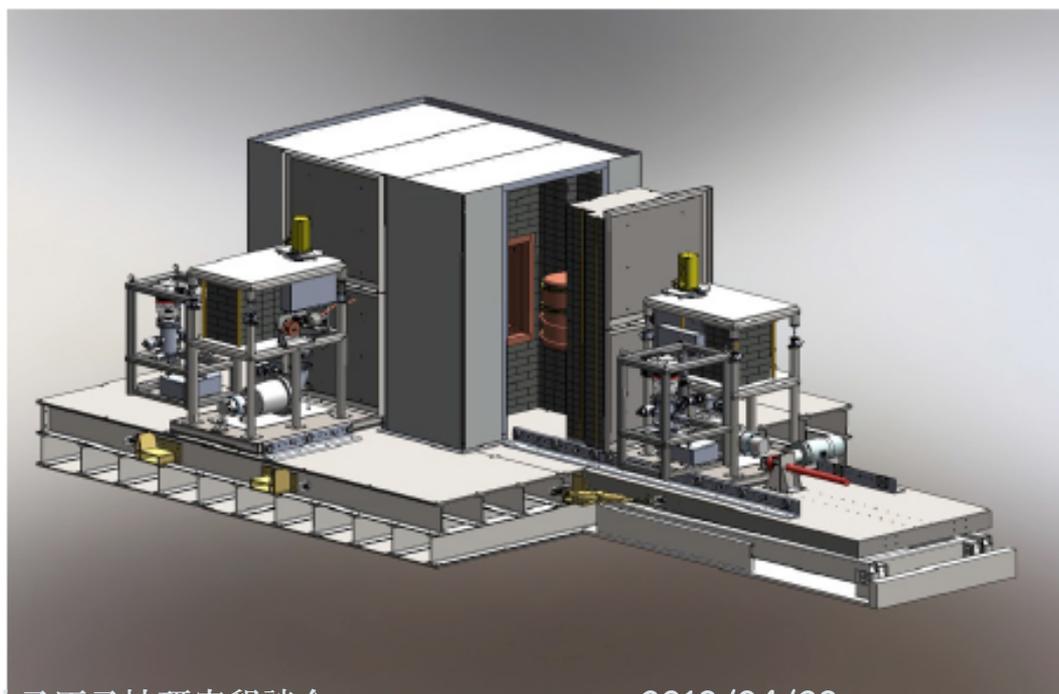
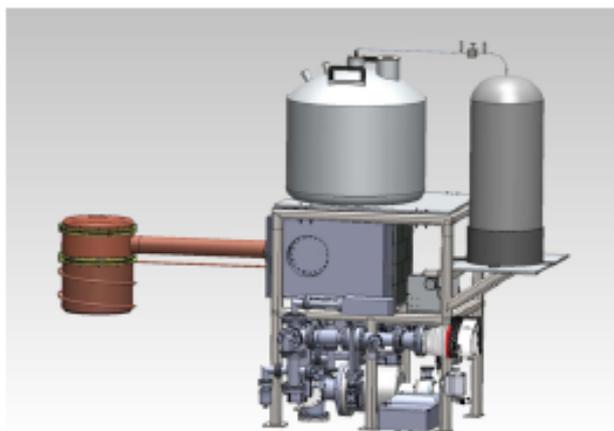
NEUTRINO2012の二重ベータ将来計画レビュートークより



MAJORANA

Three Phases

- Prototype cryostat (2 strings, ^{nat}Ge) (End 2012)
 - 1st order of ^{enr}Ge (20 kg) **on hand**. 2nd order in process. Refinement/processing facility in Oak Ridge (via NSF) has completed testing with ^{nat}Ge .
- Cryostat 1 (3 strings ^{enr}Ge & 4 strings ^{nat}Ge) (Fall 2013)
- Cryostat 2 (up to 7 strings ^{enr}Ge) (Fall 2014)

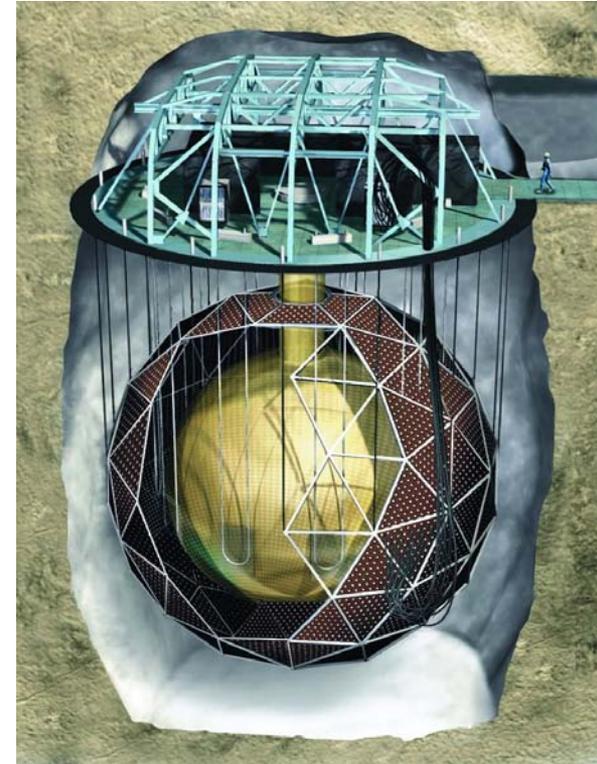


SNO+

SNO+実験概要

- SNO-Lab. @カナダサドバリー
 - 地下2000 m 世界最深のニュートリノ検出器
- 液体シンチレータ (LS) 実験
- 旧SNO実験の亚克力容器、PMTを再利用し、中身を重水 (D₂O) からLSに入れ替え
- Light yield ; 50倍以上
 - 低エネルギーに特化した物理実験が可能

SNO+実験概念図

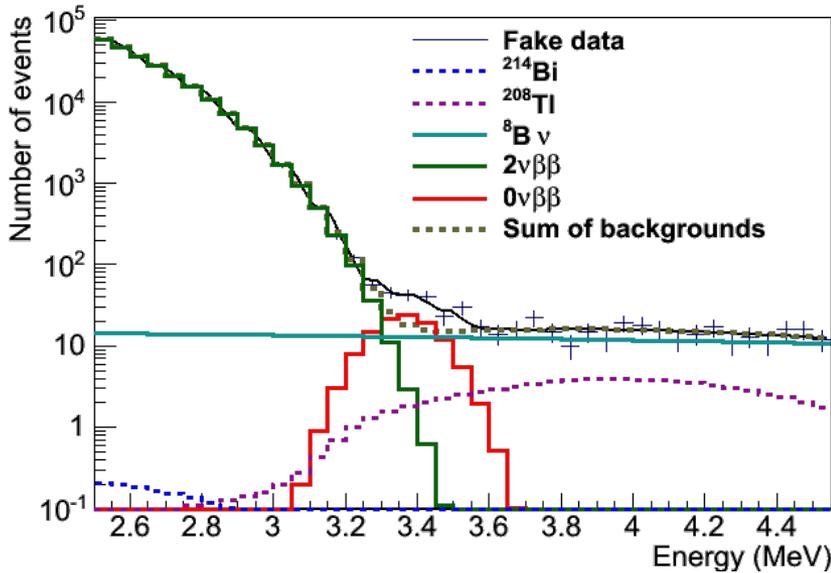


直径12 mの亚克力容器
 PMT 9500本
 水シールド 1700 ton
 (Total 7000 ton)

	Borexino	KamLAND	SNO+
体積 (ton)	300	1,000	780
深さ (m)	1350 m	1000 m	2000 m
ミューオン Rate (/day)	~4,000	30,000	70
Photo Coverage	30	34	54

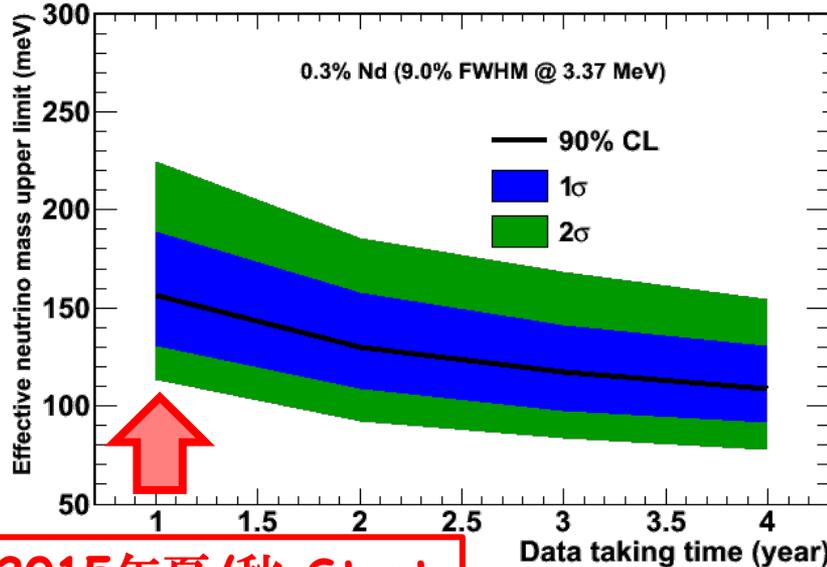
太陽ニュートリノ観測 (CNO, pep)
 二重ベータ探索 (¹⁵⁰Nd / ¹³⁰Te)

Sensitivity of SNO+



シミュレーション条件

NME : IBM-2
 $\langle m_\nu \rangle$: 320 meV
 400 p.e./MeV (6.5% @Q値)
 BGレベル : Borexinoレベル
 Livetime : 3年で80%の効率
 ^{150}Nd mass : 44 kg (質量比0.1%)
 ただし有効体積は半分

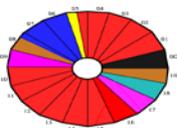


2015年夏/秋 Start

1年後の到達感度
 約150 meV (90% C.L.)

※現在検出器に純水を導入中
 シンチレータに入れ替え、Isotope
 を溶かすのは**2014年夏/秋**

Super-NEMO実験



From NEMO 3 to SuperNEMO

$$T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > \ln 2 \times \frac{N_A}{A} \times \frac{M \times \epsilon \times T_{\text{obs}}}{N_{90}}$$

NEMO-3

SuperNEMO

^{100}Mo	isotope	^{82}Se (baseline) or ^{150}Nd or ^{48}Ca
7 kg	isotope mass M	100-200 kg
8 %	efficiency ϵ	~ 30 %
$^{208}\text{Tl}: < 20 \mu\text{Bq/kg}$ $^{214}\text{Bi}: < 300 \mu\text{Bq/kg}$	internal contaminations ^{208}Tl and ^{214}Bi in the $\beta\beta$ foil	$^{208}\text{Tl} < 2 \mu\text{Bq/kg}$ if ^{82}Se : $^{214}\text{Bi} < 10 \mu\text{Bq/kg}$
8% @ 3MeV	energy resolution (FWHM)	4% @ 3 MeV

$$T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 2 \times 10^{24} \text{ y}$$

$$\langle m_\nu \rangle < 0.3 - 1.3 \text{ eV}$$

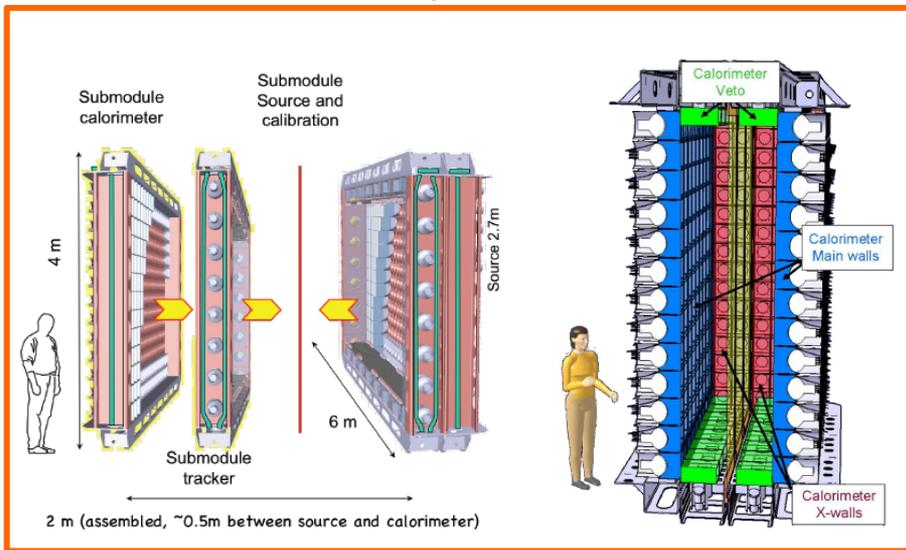
$$T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 1 \times 10^{26} \text{ y}$$

$$\langle m_\nu \rangle < 40 - 100 \text{ meV}$$

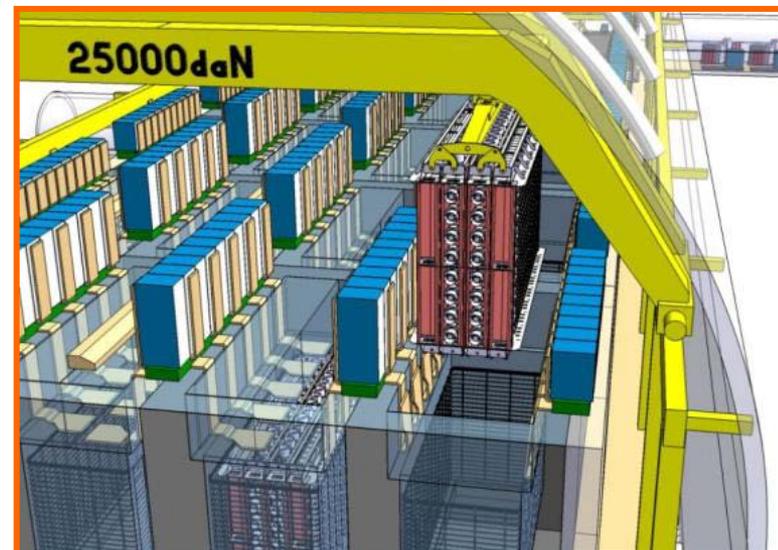
SuperNEMO



A module



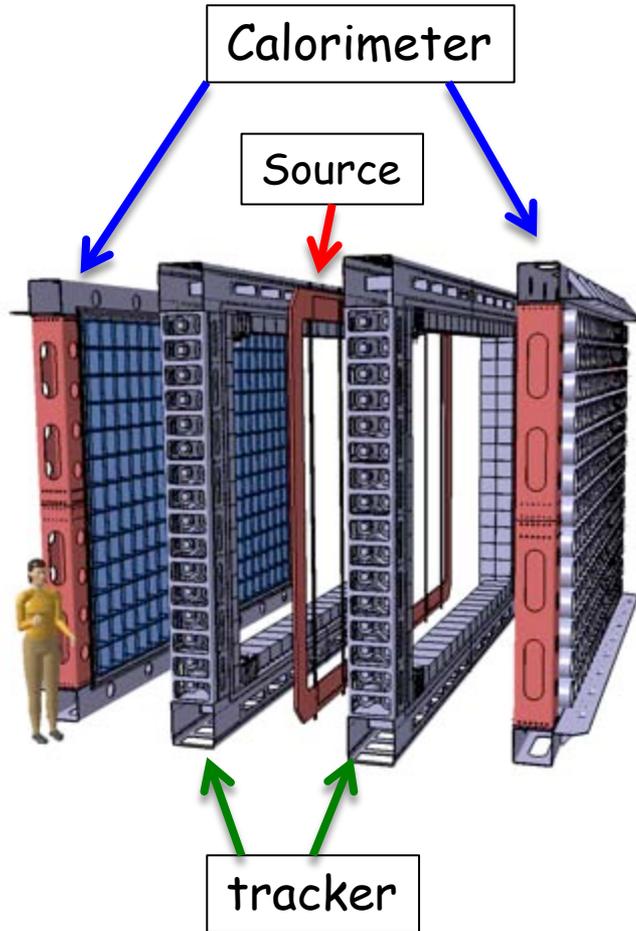
20 modules



	Demonstrator module	20 Modules
Source : ^{82}Se	7 kg	100 kg
Drift chambers for tracking	2 0000	40 000
Electron calorimeter	500	10 000
γ veto (up and down)	100	2 000
$T_{1/2}$ sensitivity	$6.6 \cdot 10^{24}$ y (No background)	$1 \cdot 10^{26}$ y
$\langle m_{\nu} \rangle$ sensitivity	200 – 400 meV	40 – 100 meV

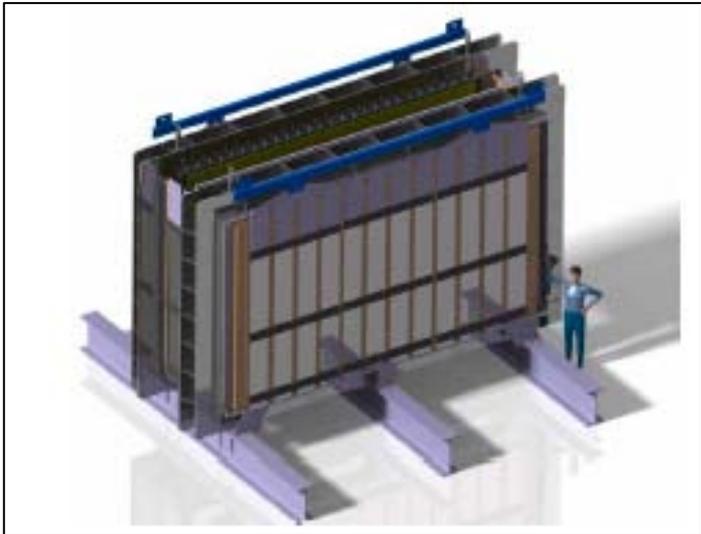
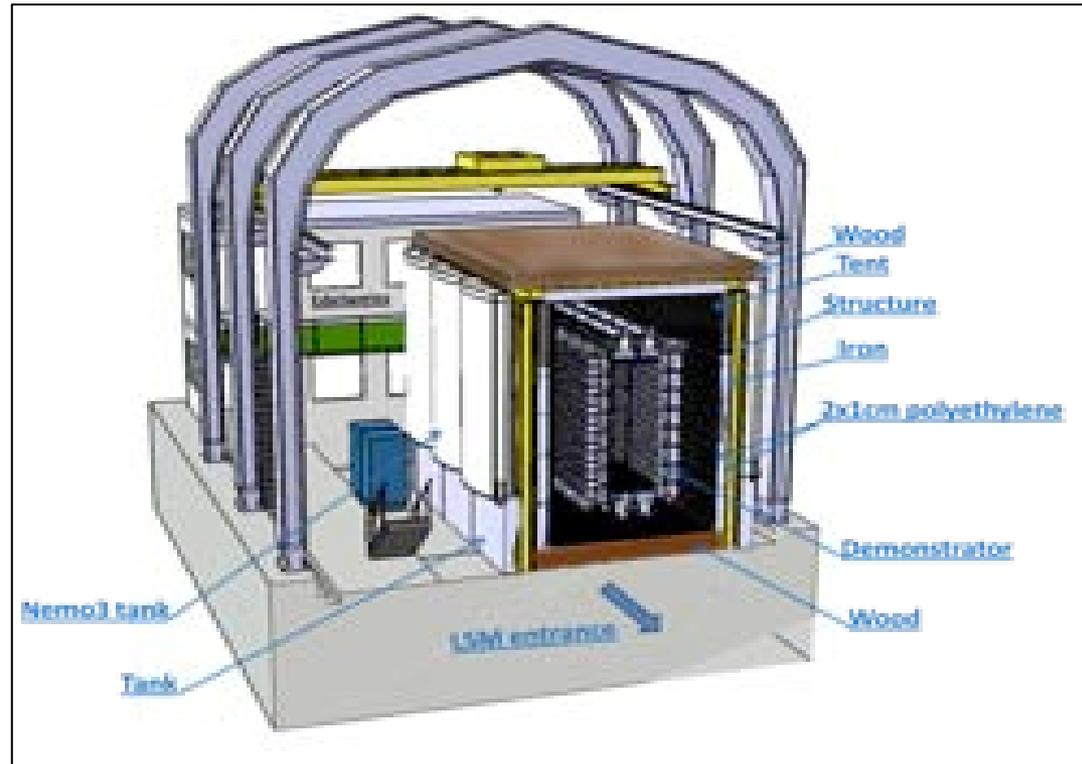
Demonstrator module(7 kg) under construction

Demonstrator Design



- Ultra low background detector
- Modular detector with 3 main components :
 - ❑ Central source foil frame : 7 kg of isotope
 - ❑ Tracking : 2 000 drift chambers
 - ❑ Calorimeter : 712 scintillators+ PMTs
- Shielded by iron (300 tons) and water
- Installed at Modane Underground Laboratory (4800 m.w.e.)

Demonstrator schedule @ Modane



- Beginning of installation @ LSM (end 2013)
- Commissioning 2014
- Data taking start (end 2014)

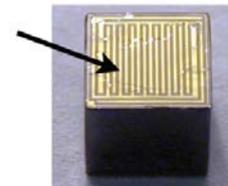
Another Projects

COBRA

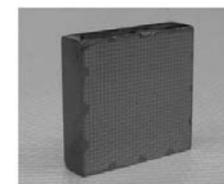
Cadmium Zinc Telluride 0-Neutrino Double-Beta Research Apparatus

- Site: Gran Sasso
- ターゲット: 主に ^{116}Cd ($Q_{\beta\beta} = 2809 \text{ keV}$)
- 検出器: CdZnTe半導体 Array
 - @ 室温 (source = detector)
 - CPG検出器 (Coplanar-grid detector, $< 2\%$ FWHM)
 - ピクセル検出器 ($< 1\%$ FWHM, 3D情報取得, PID)
- 最終目標値: $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 50 \text{ meV}$ ($T^{0\nu}_{1/2} > 10^{26} \text{ year}$)
 - ターゲット: ^{116}Ca 117kg (濃縮: 7.5% \rightarrow 90%)
 - BGLレート: $10^{-3} \text{ counts/keV/kg/year}$

グリッド



CPG検出器
(1cm^3)

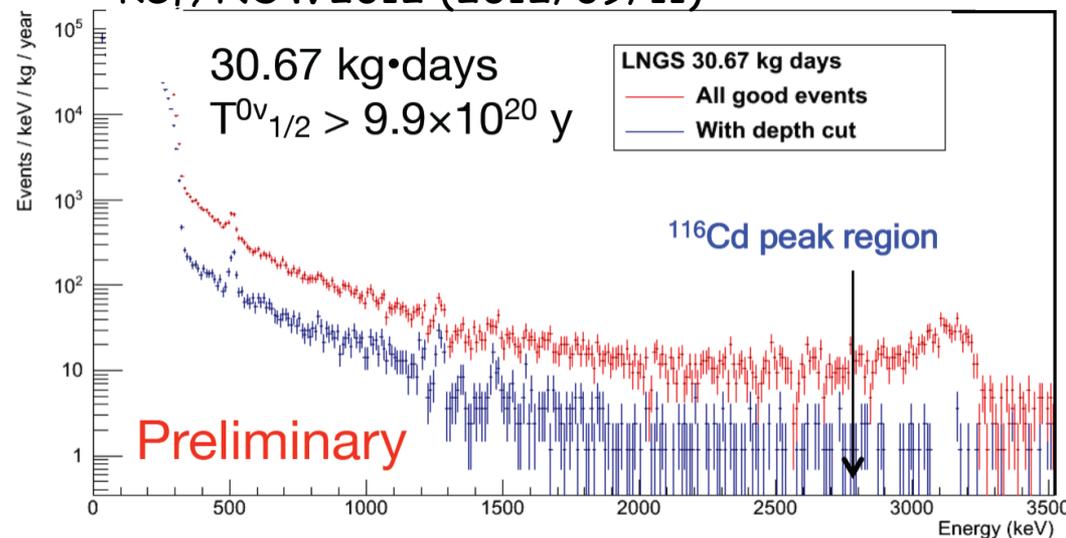


ピクセル
検出器

(読み出しが大変)

- 現状: 32個×プロトタイプ検出器
 - 分解能1.9%(FWHM@Q値)
- 今後: 2013年初期頃に64個にアップデート予定
([arXiv:1211.6604](https://arxiv.org/abs/1211.6604))

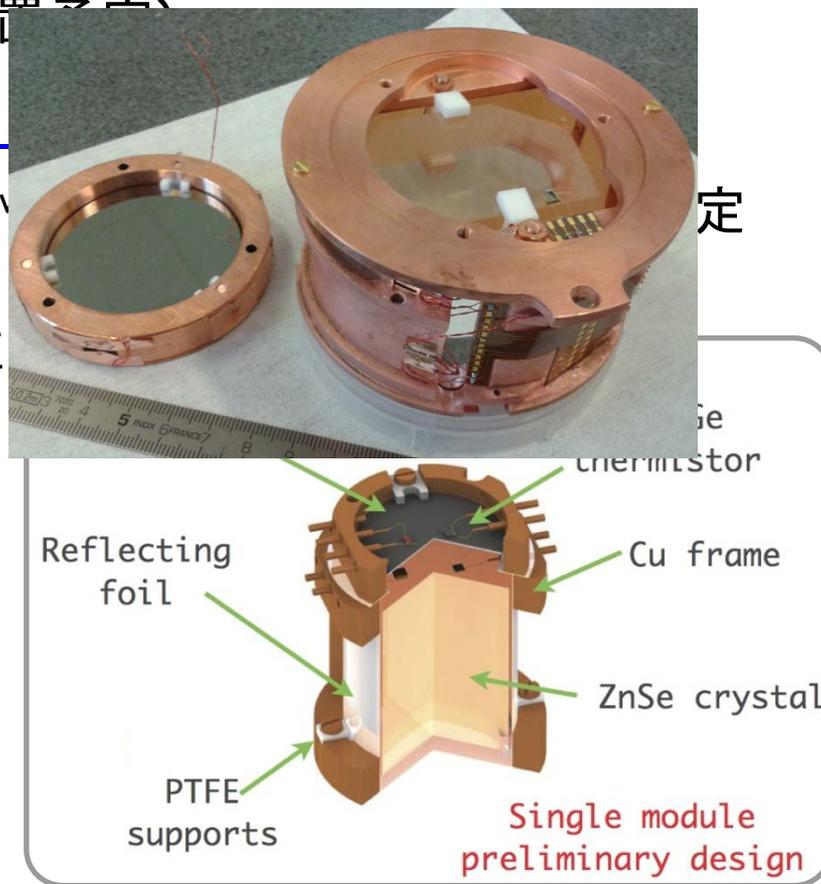
Ref; NOW2012 (2012/09/11)



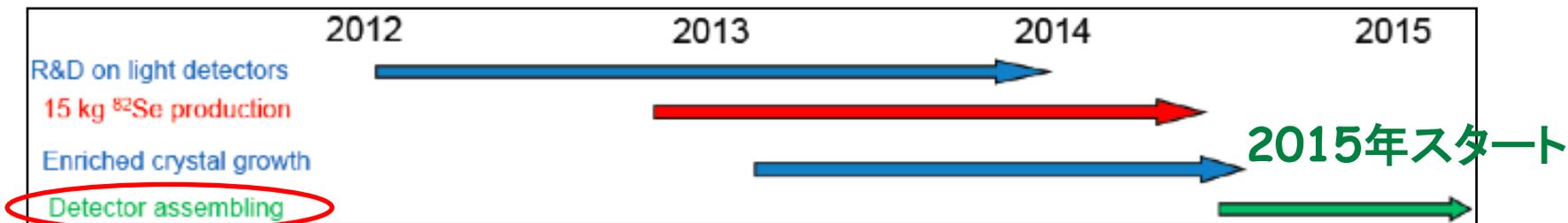
LUCIFER

Low - background Underground Cryogenics Installation For Elusive Rates

- **Site:** Gran Sasso (CUORE跡地に設置予定)
- **ターゲット:** ^{82}Se (Q値 = 2995 keV)
- **検出器:** ZnSeシンチレーションボロメータ
- **最終目標値:** $m_{\beta\beta} < 51-65 \text{ meV}$ ($T_{0\nu}^{\text{eff}} < 100 \text{ keV}$)
 - ターゲット: ^{82}Se 17.6 kg (95%濃縮)
 - 目標分解能: $\sim 10 \text{ keV FWHM @ Q値}$
 - BGLレート: $\sim 5 \times 10^{-3} / \text{keV/kg/year}$



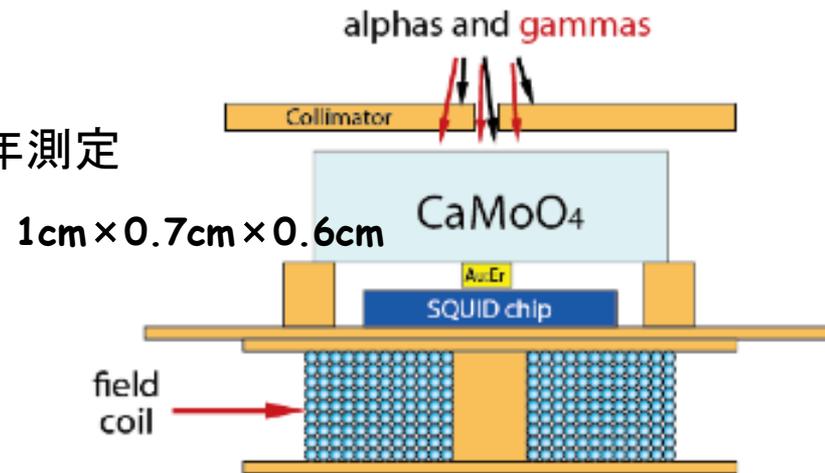
- **現状:** 結晶1個(431 g)のR&D
 - ▶ 分解能: 13 keV (FWHM)
 - ▶ PSD能力の評価
([arXiv:1303.4080](https://arxiv.org/abs/1303.4080))



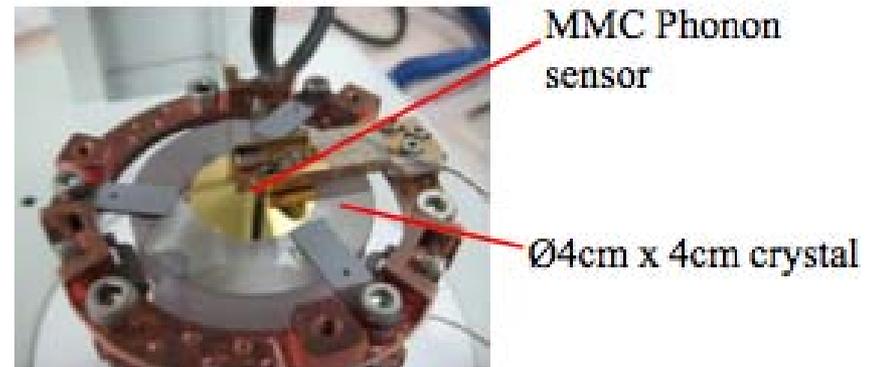
AMoRE

Advanced Mo based Rare process Experiment

- 場所: YangYang地下実験施設 (韓国, 地下700m)
- ターゲット: ^{100}Mo (Q値 = 3034 keV, 9.63%)
- 検出器: $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ 極低温シンチレーション検出器
- 第1段階(戦略):
 - 室温, 6kg結晶, 5% FWHM, 3年測定
- 第2段階(戦略):
 - 極低温, 100kg結晶, 15 keV FWHM, 5年測定
 - 最終目標値: $m_{\beta\beta} < 50 \text{ meV}$
($T^{0\nu}_{1/2} > 3 \times 10^{26} \text{ year}$)
 - ターゲット: $^{100}\text{Mo} \sim 50 \text{ kg}$

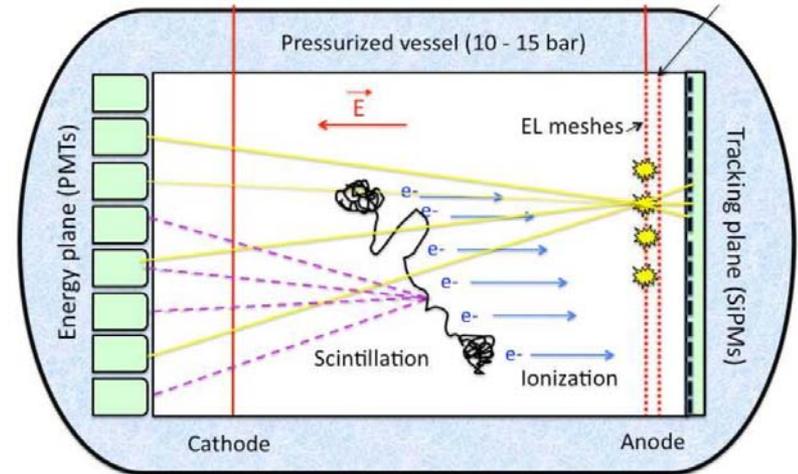


- 現状:
 - ▶ 2011年: R&D, BG study
 - ▶ 2012年: ロシア予算獲得 (9M\$, CaMoO_4 生産ライン), 第1段階
 - ▶ 資料: 2012年7月、[コラボレーションミーティングスライド](#)

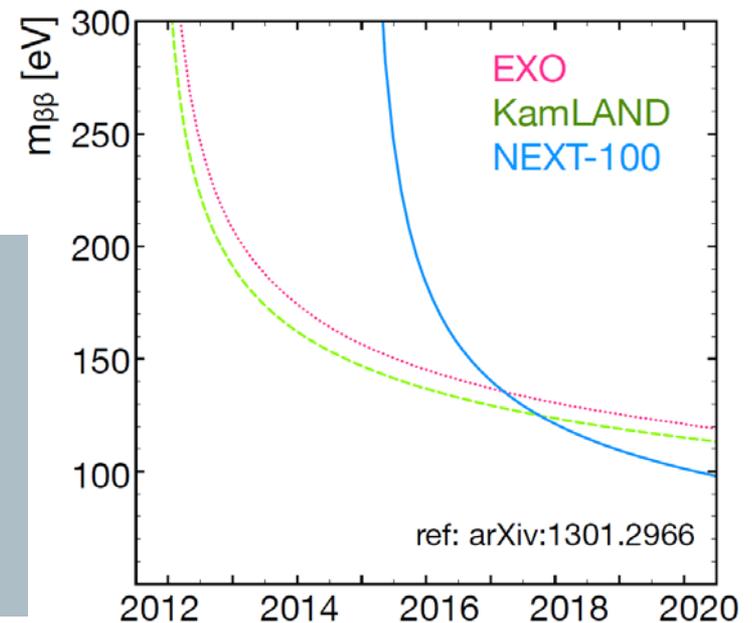


NEXT Neutrino Experiment with a Xenon Time-Projection Chamber

- 場所: Canfranc地下実験室 (2500 m.w.e., スペイン)
- ターゲット: ^{136}Xe (Q値 = 2458 keV)
- 検出器: 高圧ガスXe TPC (+ PMT)
- 最終目標値: $m_{\beta\beta} < 100 \text{ meV}$
- ($T^{0\nu}_{1/2} > 5.9 \times 10^{26} \text{ year}$), 測定5年
 - ターゲット: 100-150 kg (濃縮: ~91%)
 - 目標分解能: 1% FWHM @ Q値
 - BGLレート: $8 \times 10^{-4} / \text{keV}/\text{kg}/\text{year}$



- 現状/予定:
 - ▶ 2012年4月: TDR出版
 - ▶ 2013年: NEXT-100コミッションング
 - ▶ 2014年: データ取得開始
- ▶ 資料: [arXiv:1211.4838](https://arxiv.org/abs/1211.4838)



世界情勢のまとめ

各実験の数字をそのまま使う

Experiment	Start Date	Achieved Date	Sensitivity
GERDA-1	2011/11	2013/11	230 meV
GERDA-2	2013/11	2014/11	100 meV
SNO+	2014/7	2015/7	150 meV
CUORE-0	2012/8	2014/8	200 meV
CUORE	2014/11	2021/11	41 meV
EXO-200	2011/4	2012/4	140 meV
EXO-1000	-	-	11 meV
Super-NEMO	2014/12	2015/12	200 meV
KamLAND-1	2012/4	2013/01	160 meV
KamLAND-2	2014/1	2015/1	60 meV
KL-Zen2	2017/1	-	20 meV

まとめ

