

ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索 の現状と将来

吉田 齊

大阪大学大学院理学研究科

シンポジウム「地下実験による宇宙・素粒子・原子核研究」
日本物理学会2017年秋季大会
2017年9月12日 @ 宇都宮大学

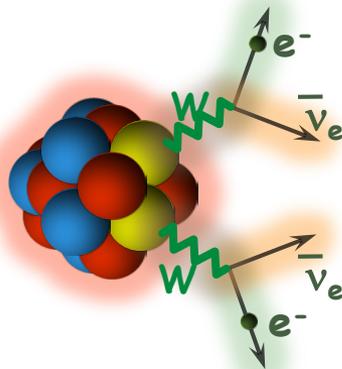
二重ベータ崩壊

- 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

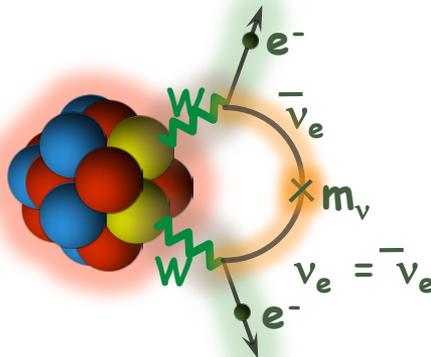
- 崩壊モード

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

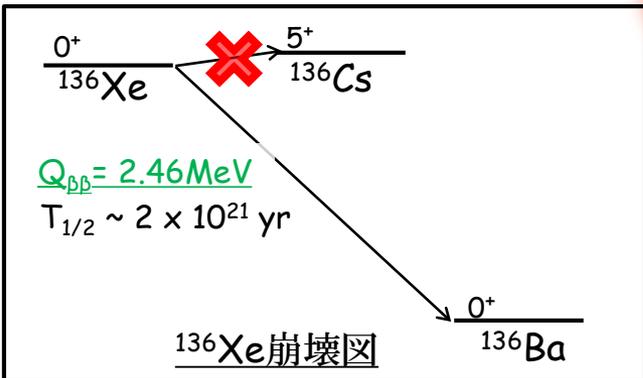


- 標準理論の枠内
- 既に10以上のIsotopeで観測
 - ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{136}Xe , etc
- 半減期 ; $10^{18} \sim 10^{21}$ yr

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



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



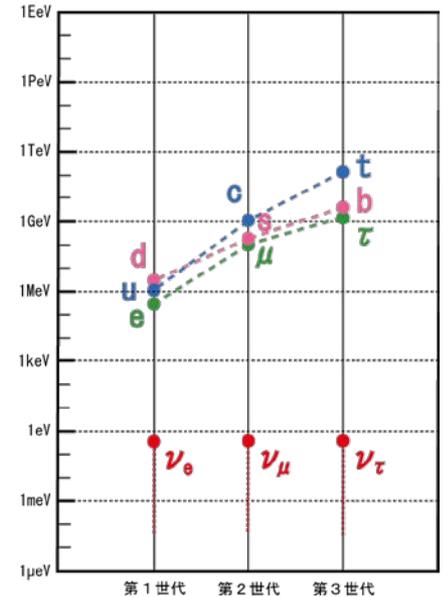
$0\nu\beta\beta$ 観測の意義

- $0\nu\beta\beta$ の発見が意味すること

- レプトン数非保存過程
 - 粒子数保存則の破れ

- ニュートリノ → マヨラナ粒子

- 重い(右巻き)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が可能
 - 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

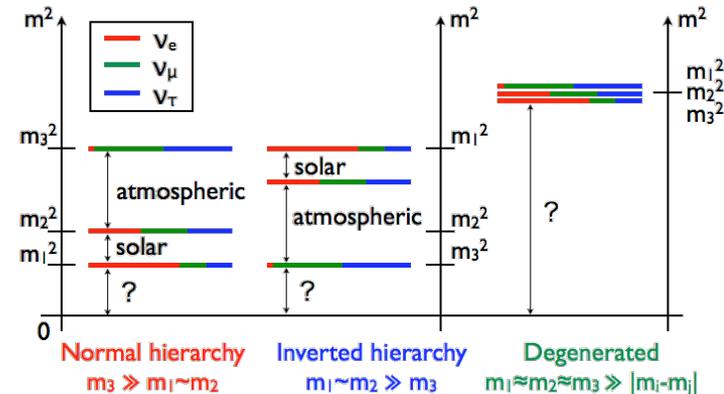


- ニュートリノ質量の絶対値(理論的不確かさはあるが)

- 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

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

質量項の場合



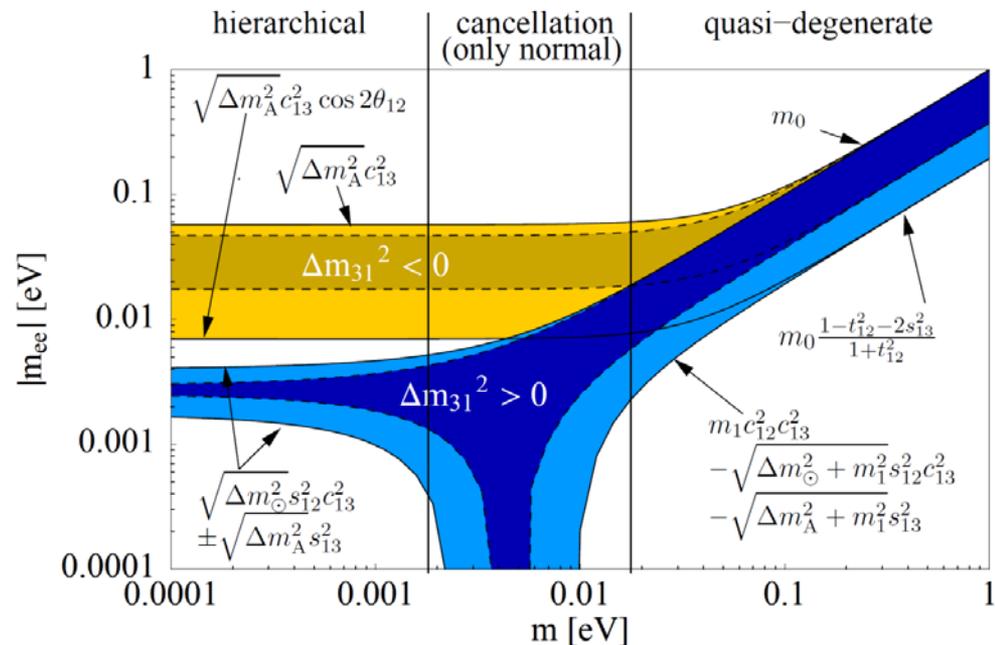
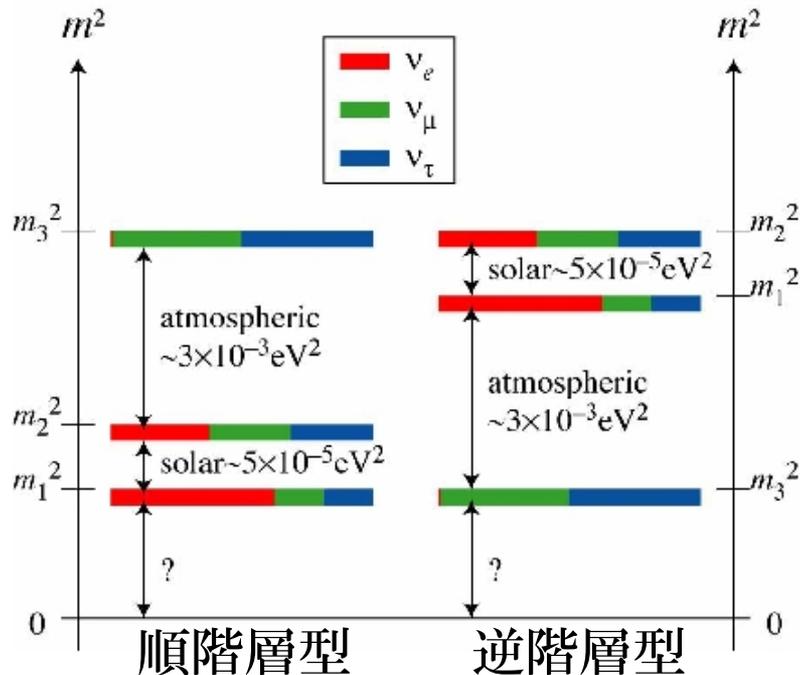
ニュートリノ振動と $0\nu\beta\beta$ 崩壊

- 有効マヨラナ質量と質量階層性

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

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

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

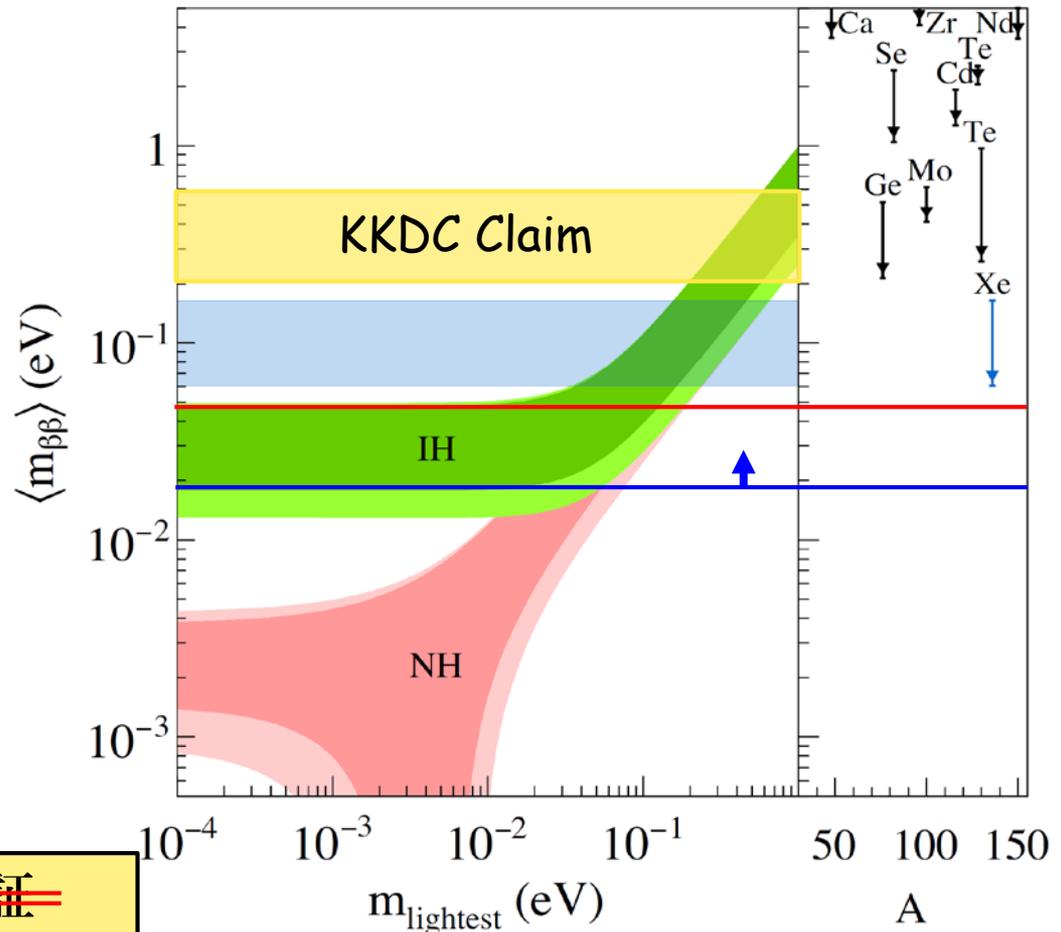
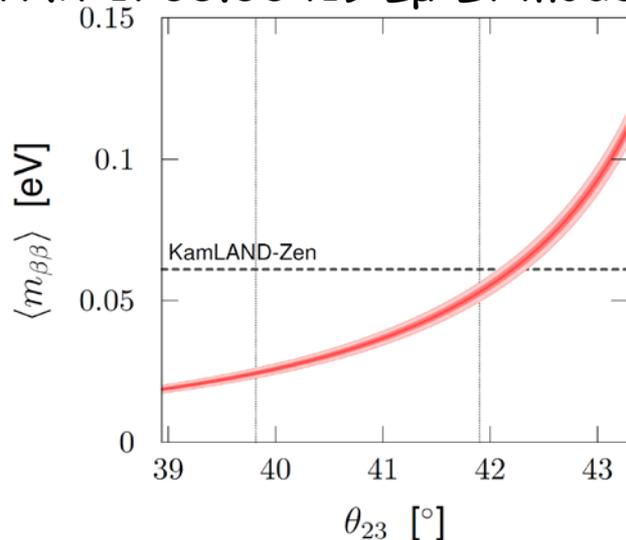


有効Majorana質量の予測

- 理論的道標

柳田予測 $\sim 49 \text{ meV}$
PRD86 013002 (2012)

Asai, Hamaguchi, $> 17 \text{ meV}$
arXiv:1705.00419 $L\mu$ - $L\tau$ model



- ~~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

$0\nu\beta\beta$ 実験の感度(核種)

- 崩壊核の選択

- → $0\nu\beta\beta$ 崩壊率を大きく

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

- 核種の特徴

- Q値
- Phase space
- 自然存在比(もしくは濃縮度)
- 核行列要素
- 価格

β核種の選択

● Phase Space Factor

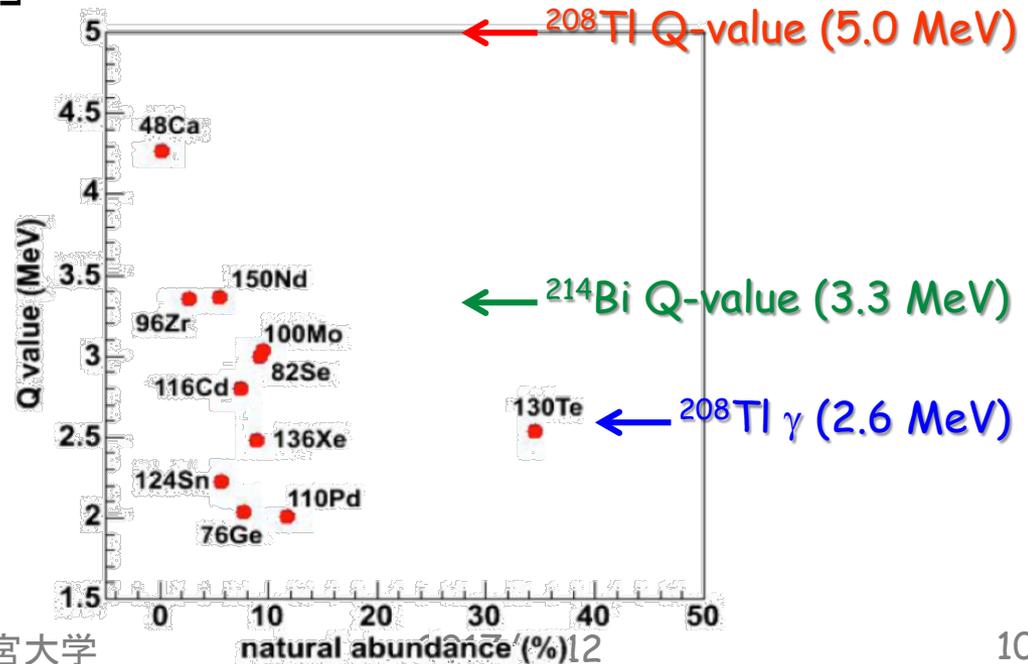
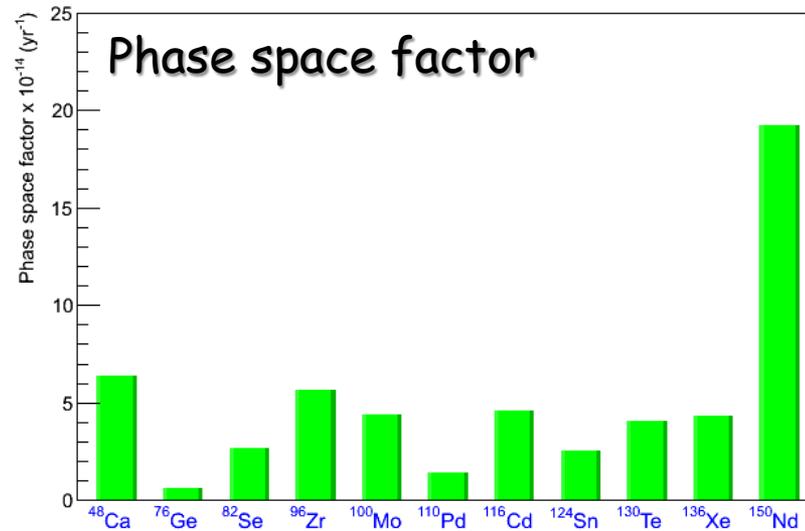
- Q値、原子核半径
- ^{150}Nd ~ Large

● 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)

● 崩壊核の選択 →

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

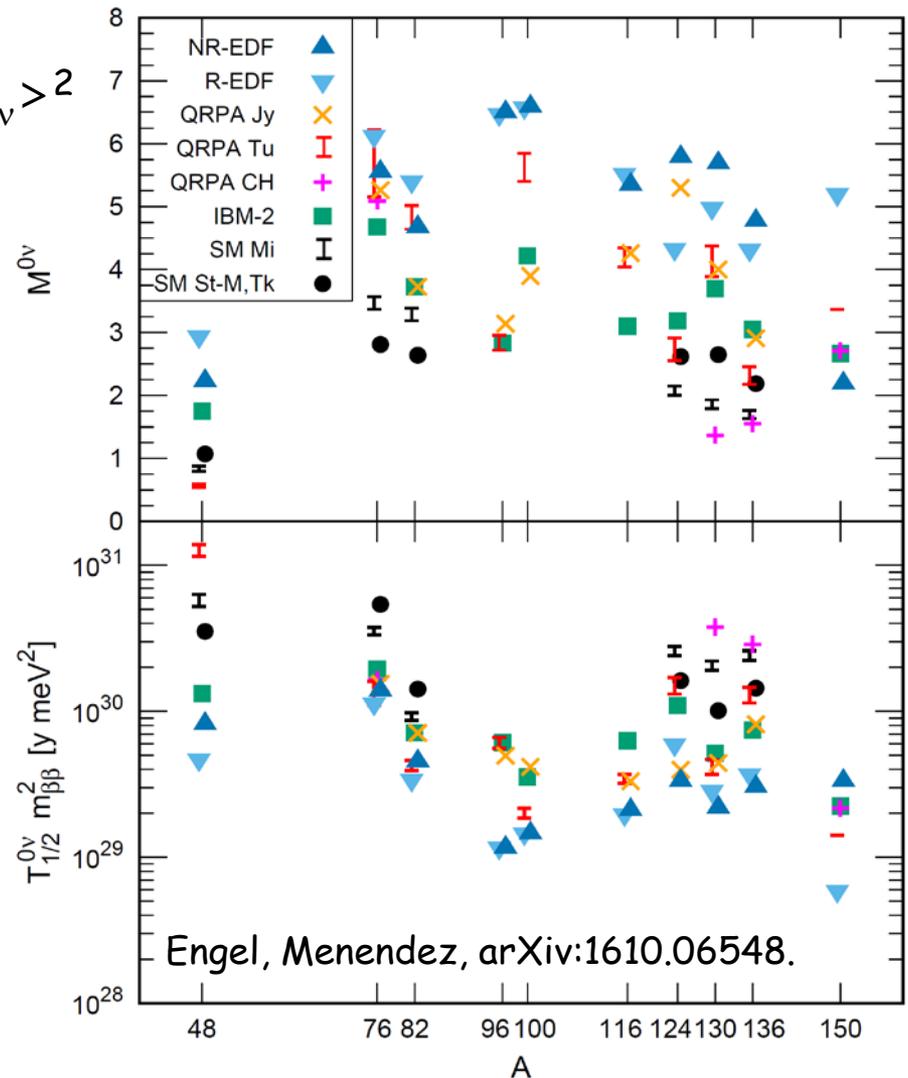
(Mass term)

- 核行列要素を大きく
- 不定性は小さく

● 理論的なモデル計算

- 不定性 ; ~ 数倍
 - モデル依存
- 実験的立場から見ると

→ 複数の核種で測定
することが重要!



ββ核種の選択(まとめ)

核種	Q値 (MeV)	(%)	Cost ※ (M\$/ton)	$T_{1/2}^{0\nu}$ ($\times 10^{25}$ yr)	実験計画
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4.263	0.187	1000 <	0.0058 (CANDLES)	CANDLES
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	2.039	7.6	~ 80	2.1 (GERDA)	GERDA, MAJORANA
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	2.998	8.7	~ 120	0.036 (NEMO-3)	Super-NEMO
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	3.356	2.8			ZICOS
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	3.034	9.6	~ 80	0.11 (NEMO-3)	AMoRE
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2.813	7.5	~ 180	0.017 (Solotovia)	COBRA,
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2.228	5.64	~ 300		
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2.527	34.5	20	0.40 (CUORE-0)	CUORE → CUPID, SNO+
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2.458	8.9	5 ~ 10	11 (KamLAND-Zen)	KamLAND-Zen, EXO(nEXO), NEXT, PANDAX-III, AXEL
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	3.371	5.6	300 <	0.0018 (NEMO)	DCBA(MTD)

※ A. Barabash, J of Phys. G: Nucl. Part. Phys. 39 085103 (2012) 参照

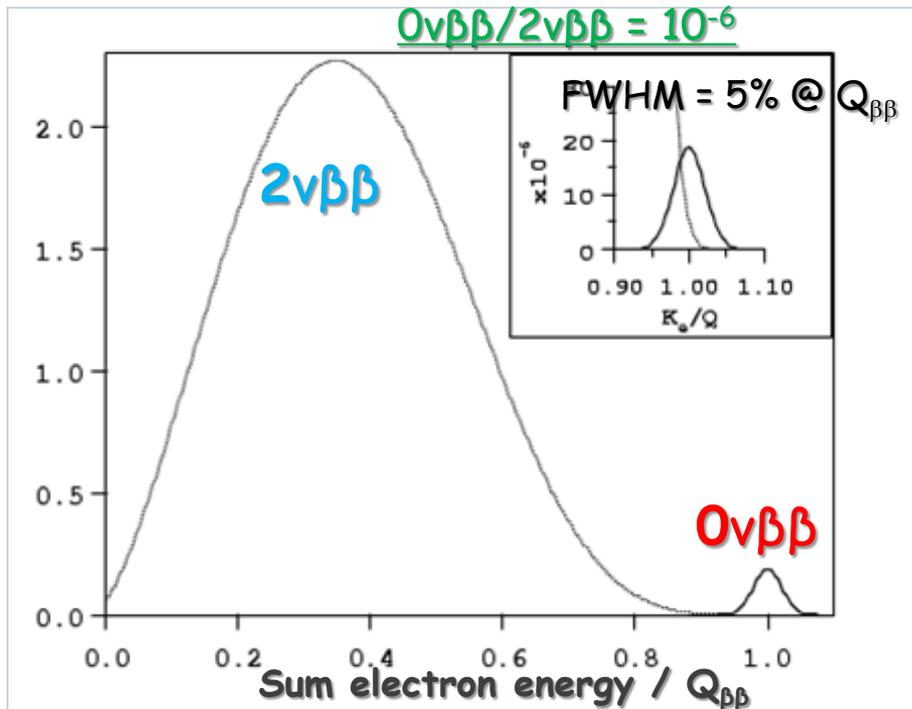
$0\nu\beta\beta$ 崩壊実験の感度(検出器)

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

$0\nu\beta\beta$ 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...

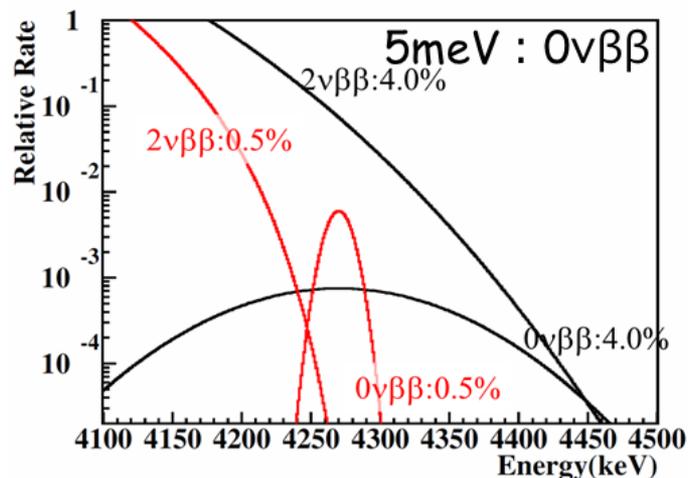
- 2本のElectron ; Tracking
- 娘核種が生成 ; Tagging

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

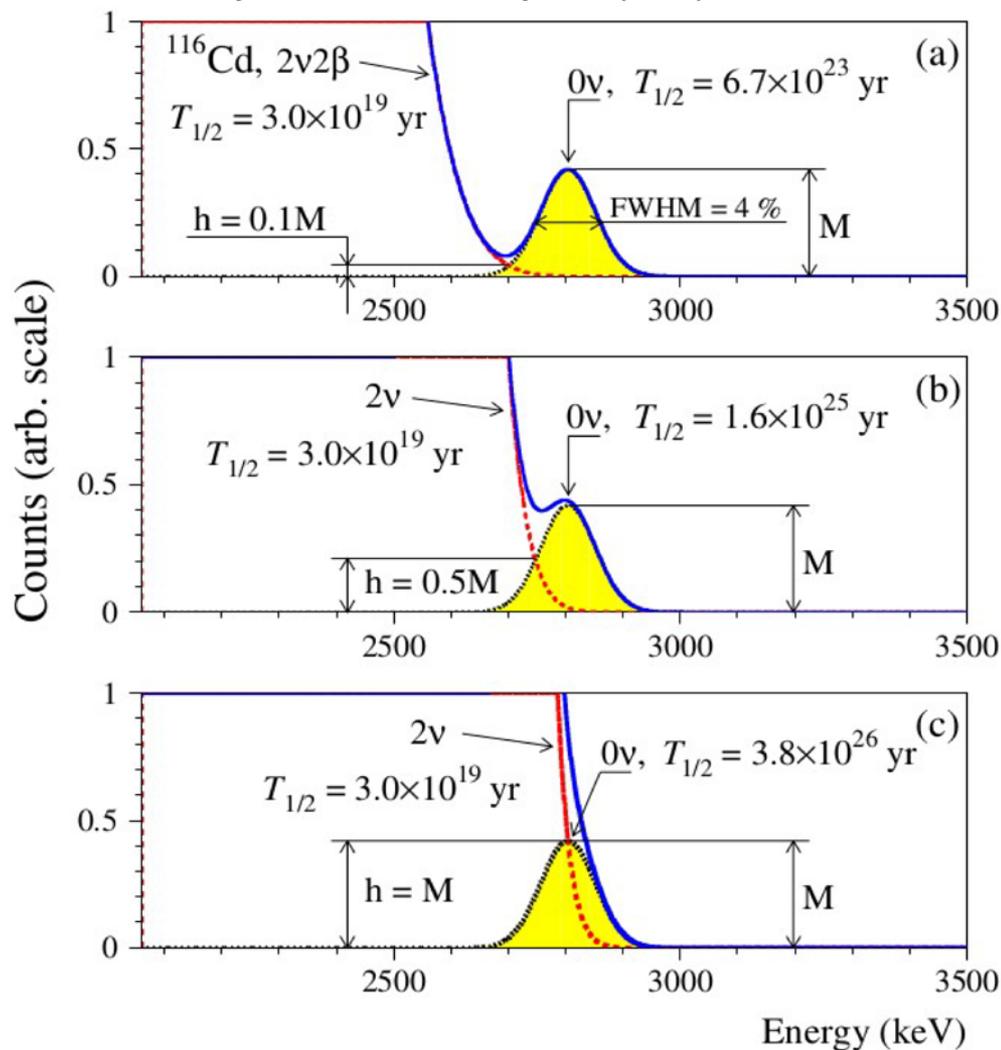
エネルギー分解能と $0\nu\beta\beta$ のBG

● 避けられないBG

- $2\nu\beta\beta$ のTail部分
- エネルギー分解能が重量



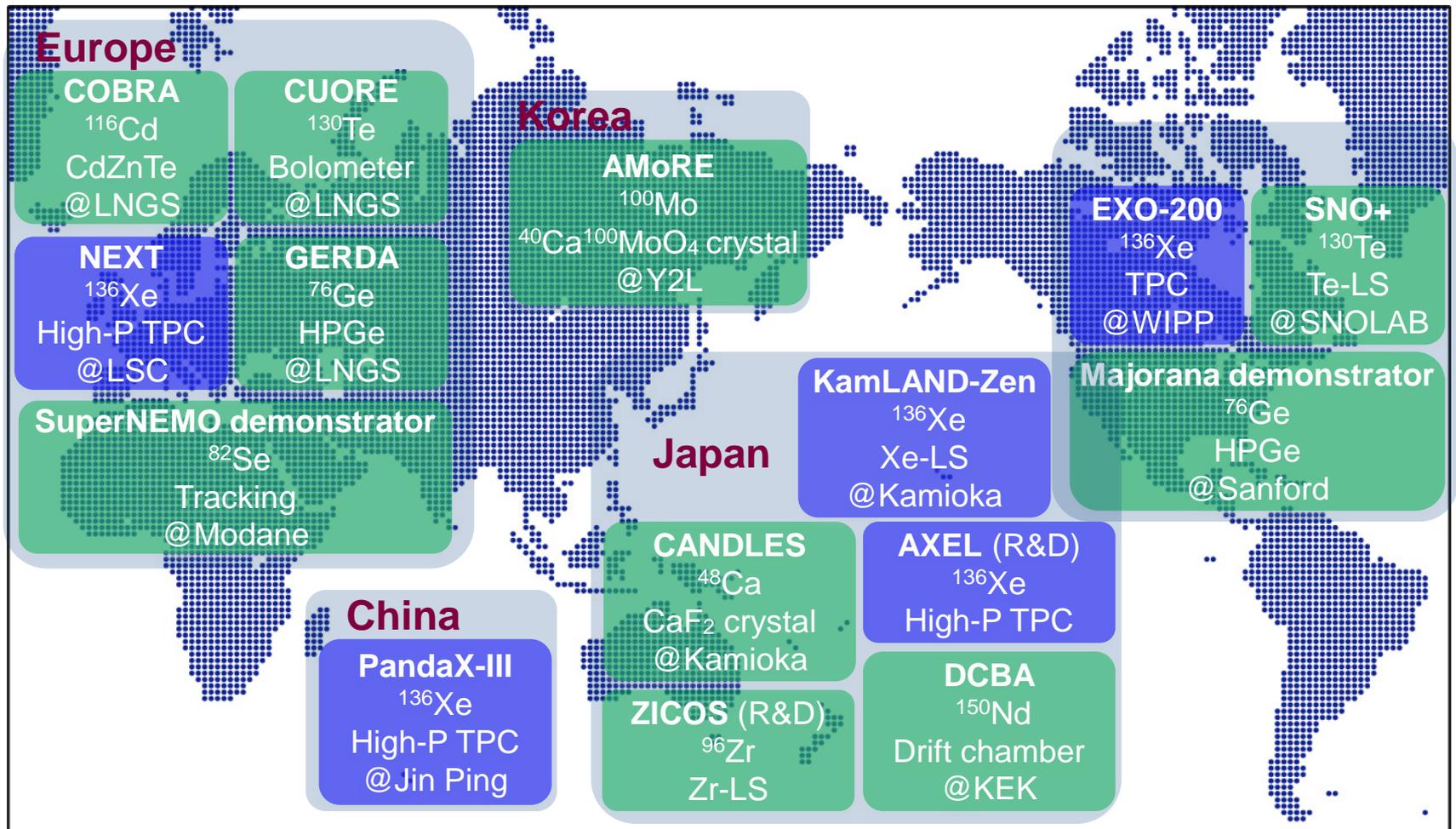
Zdesenko, Danevic, Tretyak
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 (2004) 971-981



現状と将来

個々の実験計画すべて細かく見ていく時間はない

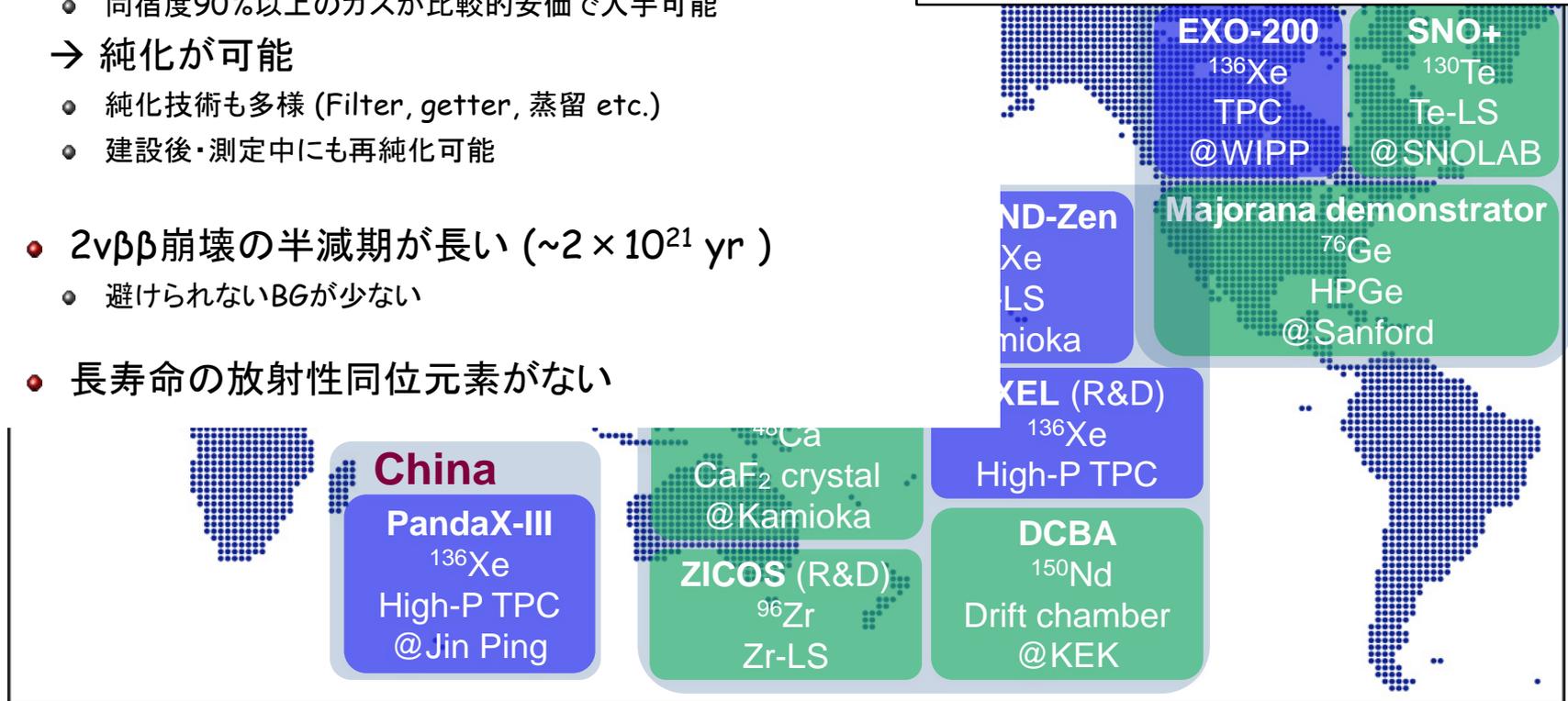
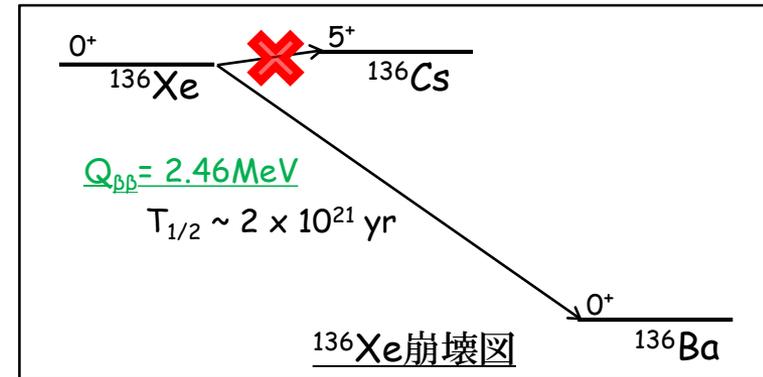
Experiments using ^{136}Xe



Experiments using ^{136}Xe

● ^{136}Xe の利点

- Q値 (2.46MeV)
 - ^{208}Tl γ 線エネルギー2.6MeVのComptonエッジとPeakの間
- 常温でガス
 - 同位体濃縮が容易
 - 同宿度90%以上のガスが比較的安価で入手可能
 - 純化が可能
 - 純化技術も多様 (Filter, getter, 蒸留 etc.)
 - 建設後・測定中にも再純化可能
- $2\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期が長い ($\sim 2 \times 10^{21}$ yr)
 - 避けられないBGが少ない
- 長寿命の放射性同位元素がない



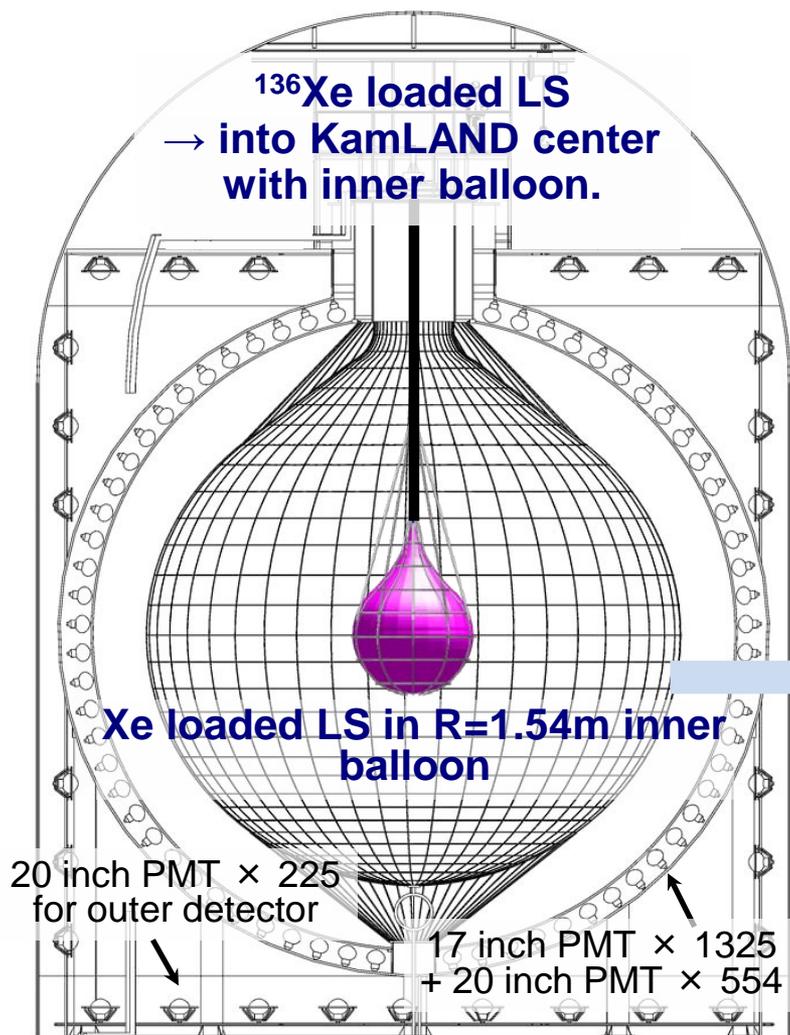
KamLAND-Zen実験



- ^{136}Xe を溶解した液体シンチレータ

稼働中高感度大型検出器の利用

- 迅速に実験開始
- (極低)BG、検出器性能が良く理解済
- 大型化(トンスケール)の可能性



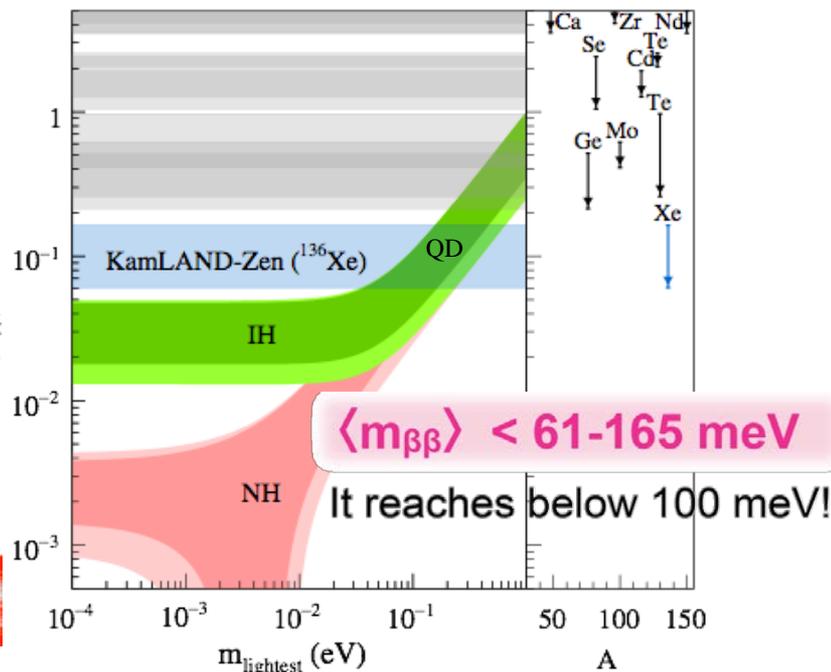
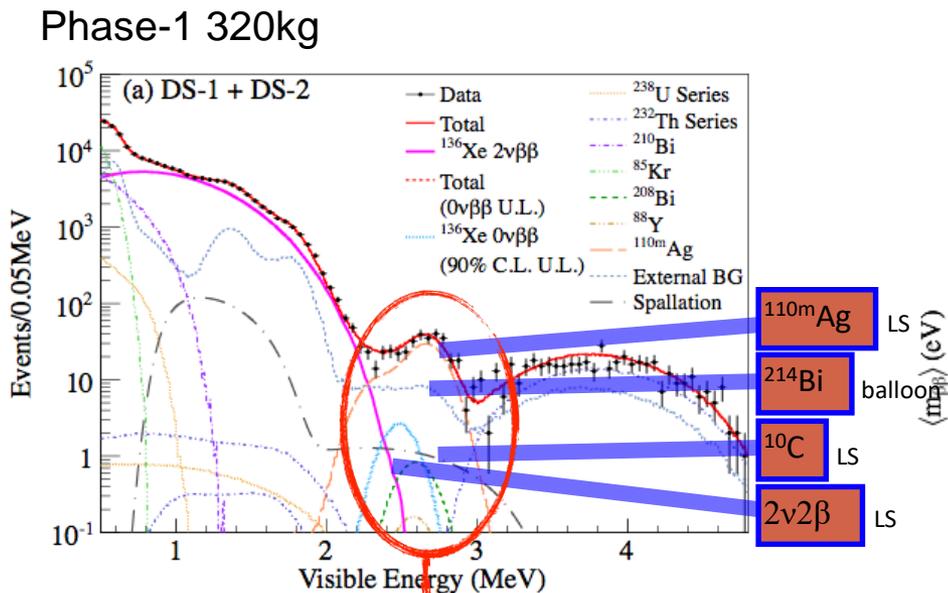
Made of 25-um-thick clean nylon by welding (no glue) at class-1 clean room



KamLAND-Zen実験

PRL117,082503(2016)

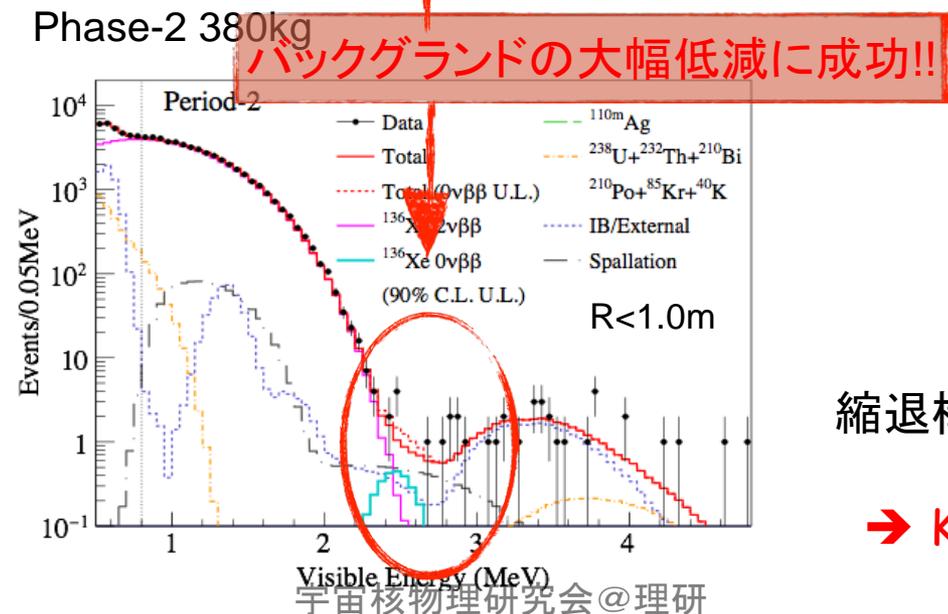
Featured in Physics



Combined result

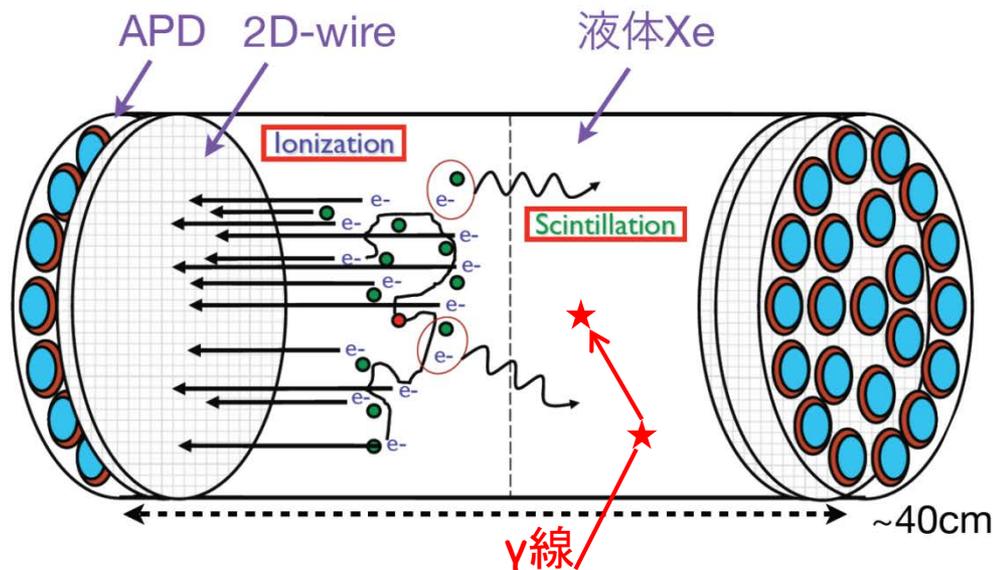
$T^{1/2} > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr (90\% C.L.)}$

Phase-1: $T^{1/2} > 1.9 \times 10^{25} \text{ yr}$
Phase-2: $T^{1/2} > 9.2 \times 10^{25} \text{ yr}$

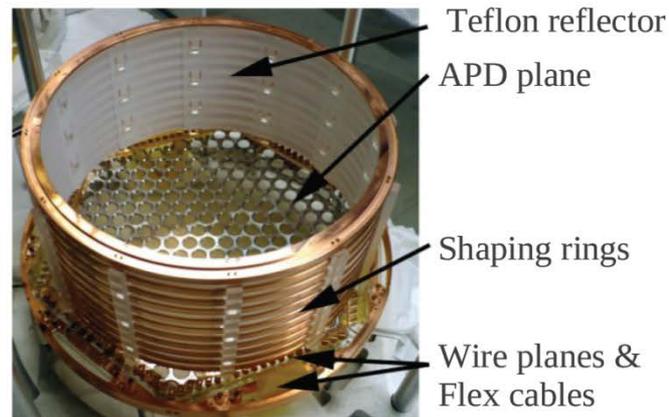


縮退構造(QD)を大幅に排除!
750kgへの増強も進行中
→ KamLAND2-Zen (1トン+光量増大)

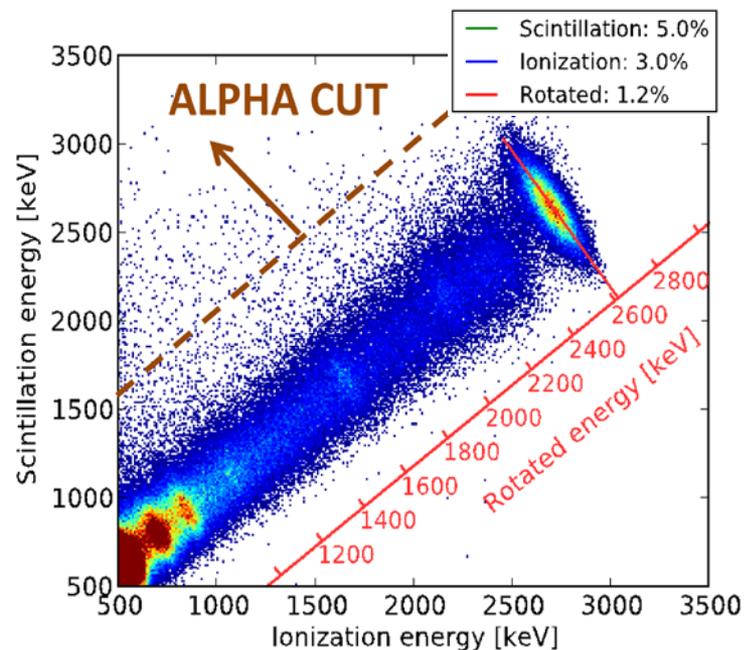
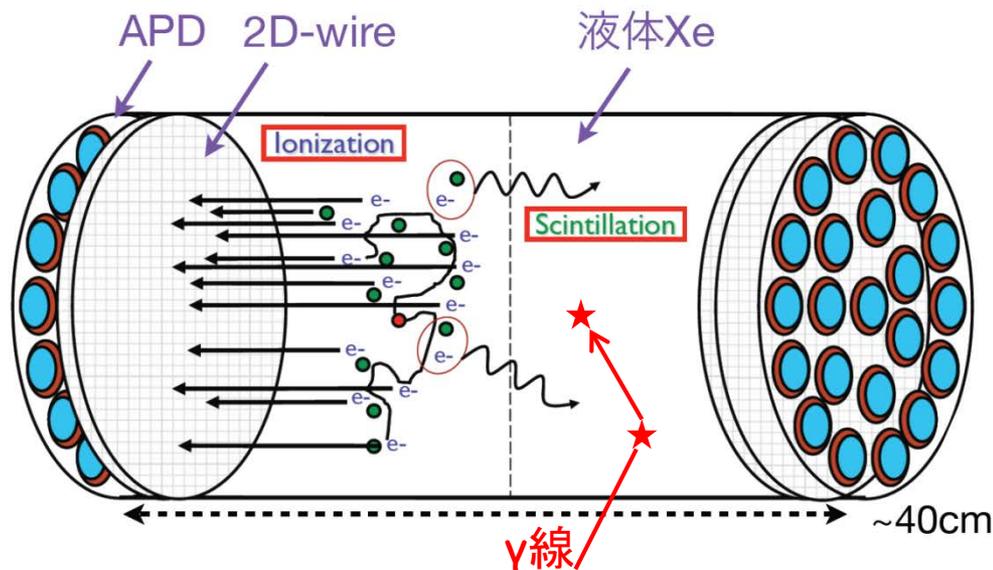
- Liquid Xe TPC : 175kgの液体 ^{136}Xe (80.6%濃縮)
- 検出原理 (2種類の検出器によるSignal / BG区別)
 - Ionizationで生成した e^- を観測 (TPC): → **Single / Multi反応を区別**
 - シンチレーション光観測 (LAAPD) → Energy測定、 α 粒子の区別



検出器の写真



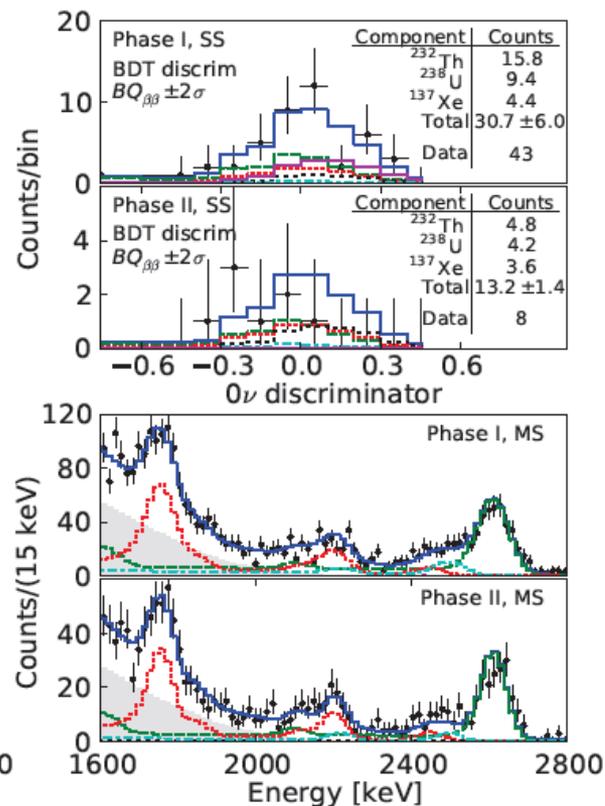
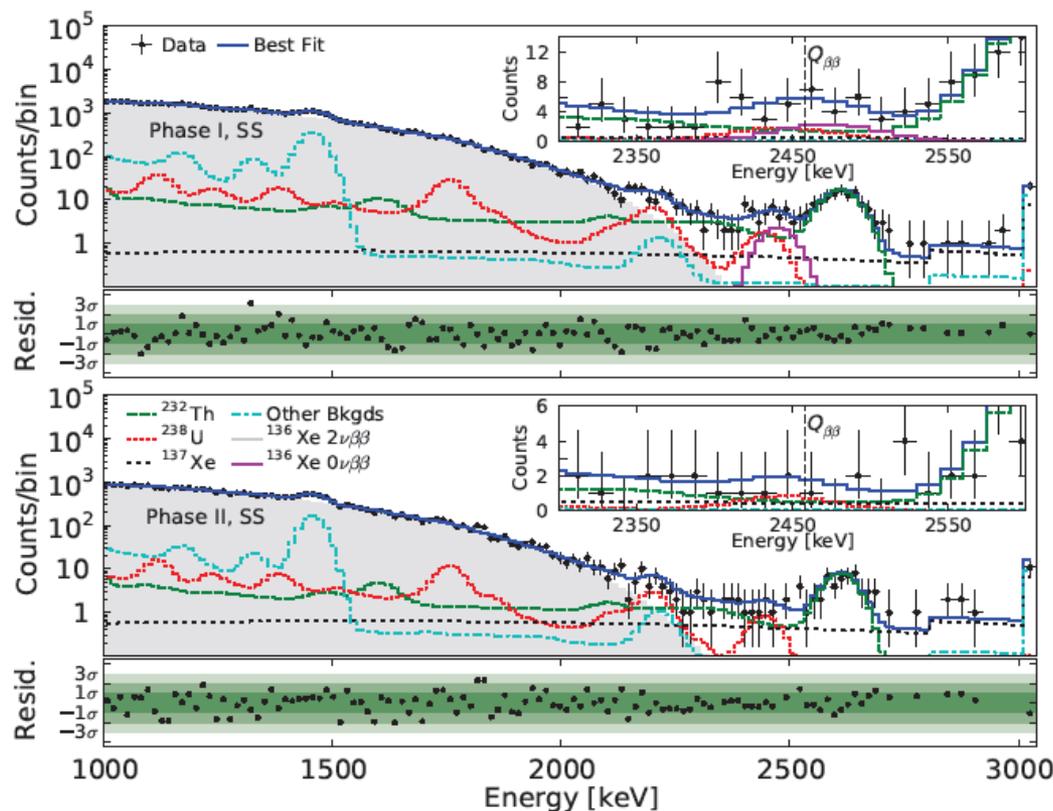
- Liquid Xe TPC : 175kgの液体 ^{136}Xe (80.6%濃縮)
- 検出原理 (2種類の検出器によるSignal / BG区別)
 - Ionizationで生成した e^- を観測 (TPC): → **Single / Multi反応を区別**
 - シンチレーション光観測 (LAAPD) → Energy測定、 α 粒子の区別



● 最近の結果

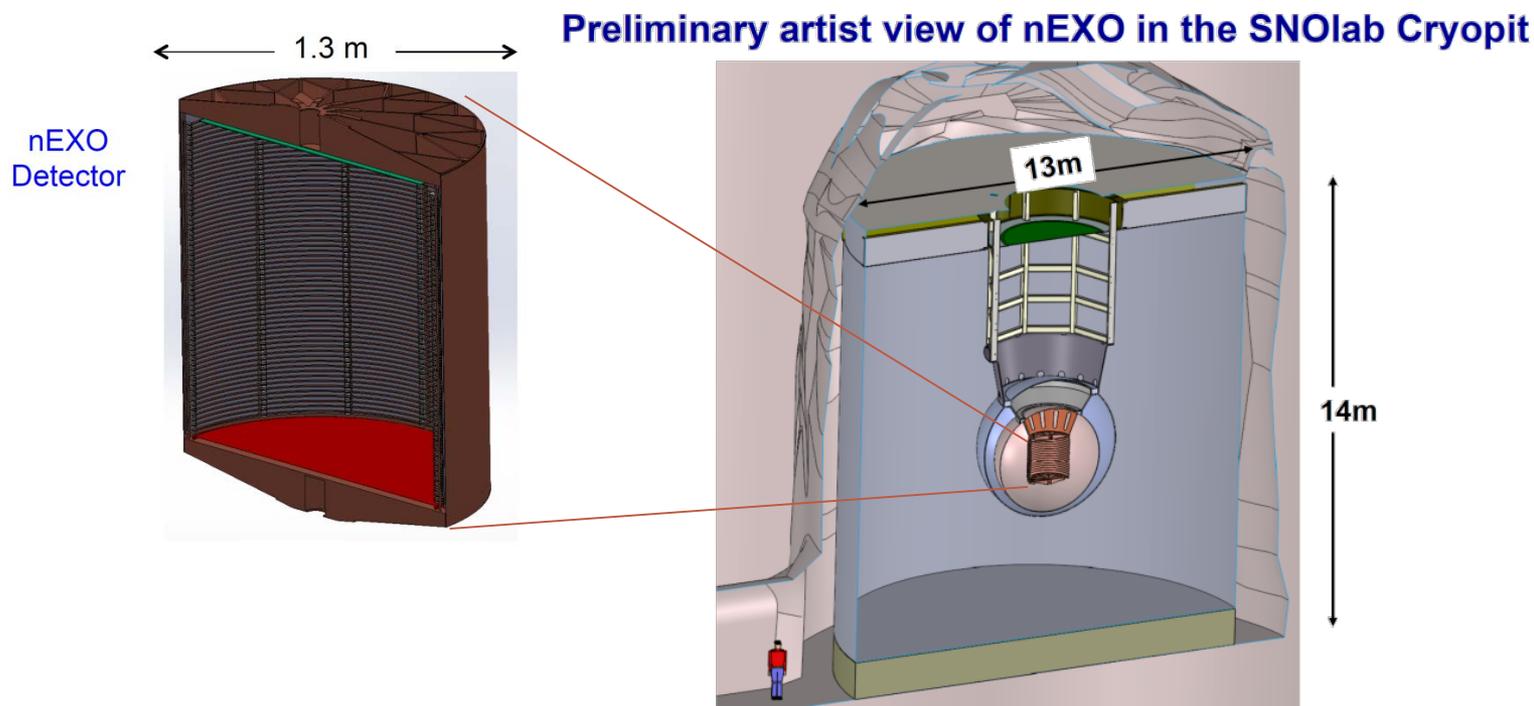
- Phase I + II (177.6 kg·yr exposure)
- $T_{1/2} > 1.8 \times 10^{25}$ yr (Sensitivity of 3.7×10^{25} yr)

arXiv:1707.08707



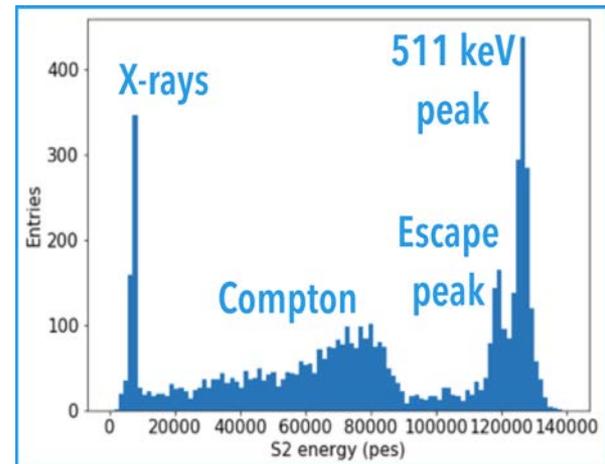
● 将来計画

- nEXO : ~ 5 トンの液体キセノン検出器.
- 4.7 tons of active $^{enr.}\text{Xe}$ (90% or higher), $< 1.0\%$ (σ/E) energy resolution.
- 目標感度 $\sim 10^{28}$ yrs (~ 20 meV)
- 更に将来は、 ^{137}Ba タギングを導入してBGフリーを目指す。

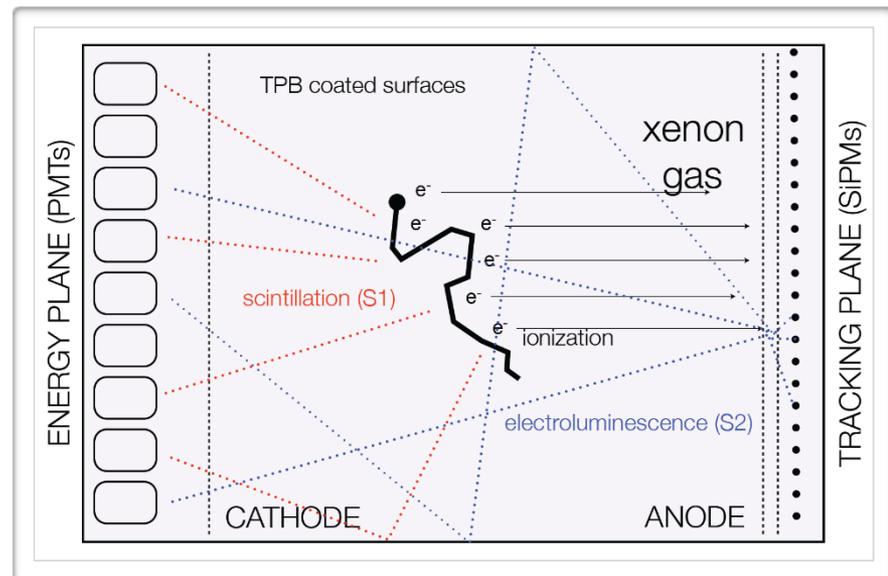
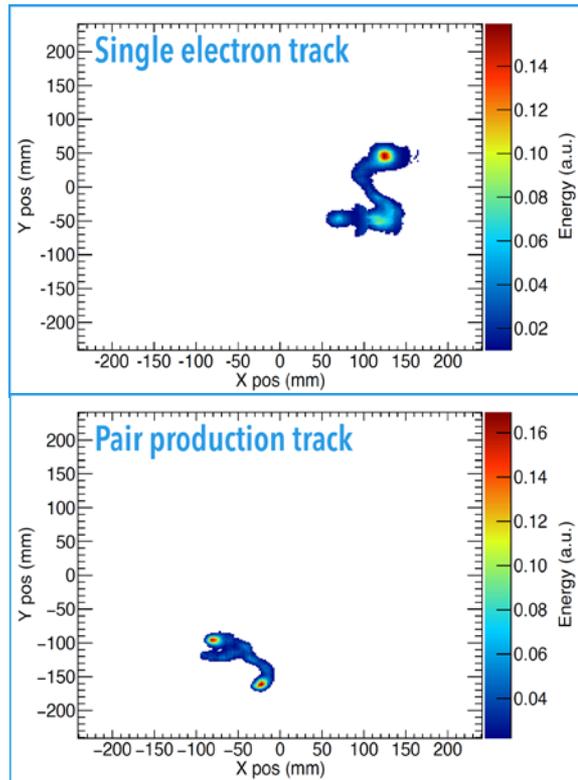


将来実験 High Pressure Xe TPC

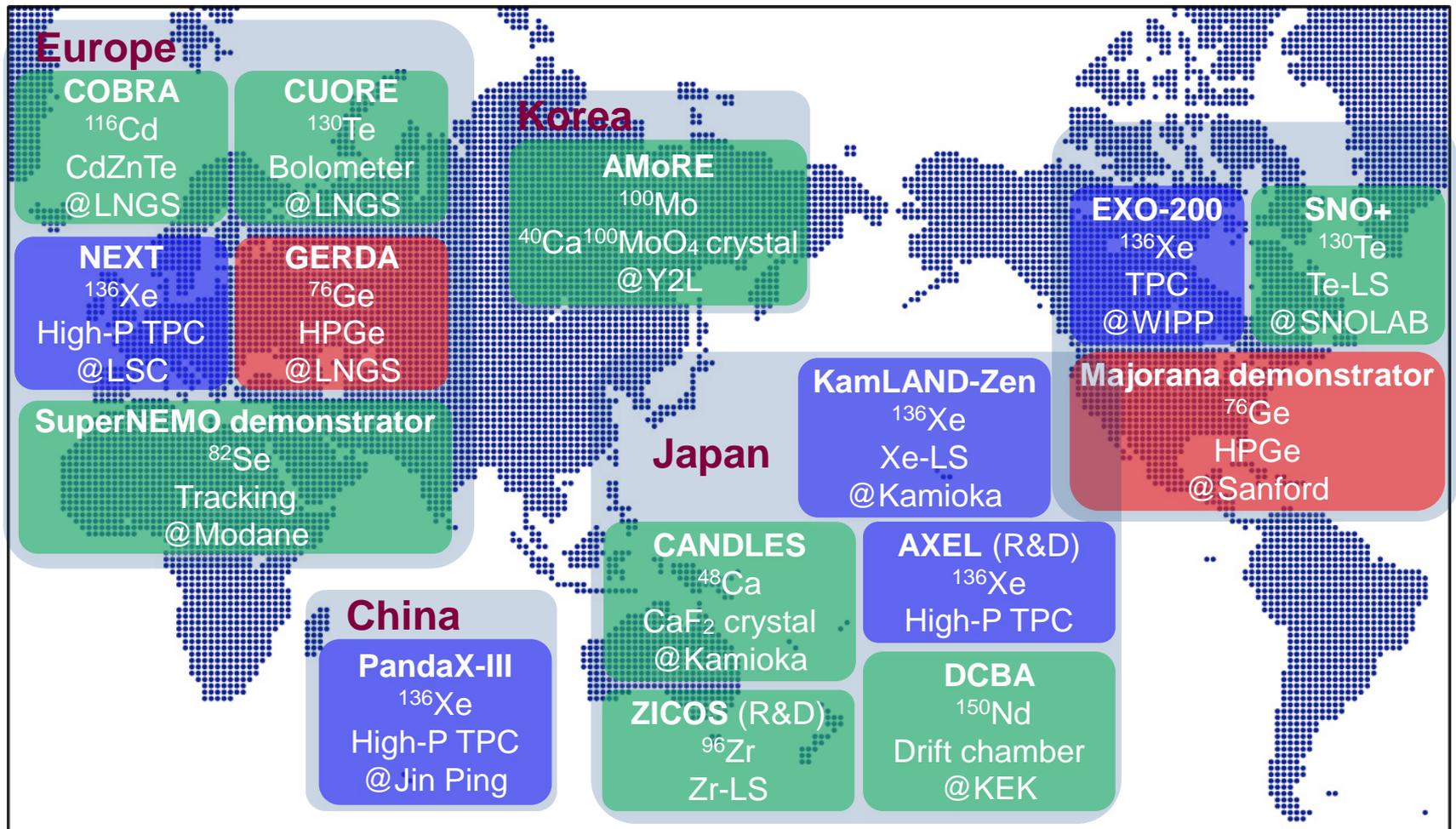
- NEXT (スペイン@Canfranc), AXEL (京都大)
 - 高圧(10 ~ 15 bar) ^{136}Xe ガスを使用したTPC
 - 電離電子 → Electroluminescence
 - 2次比例蛍光による高エネルギー分解能 (Intrinsic $\Delta E \sim 0.3\%$ @ $Q_{\beta\beta}$)
 - 3D-Tracking ; TopologyによるBG除去



Ander S ESTÉVEZ @TAUP2017, Sudbury



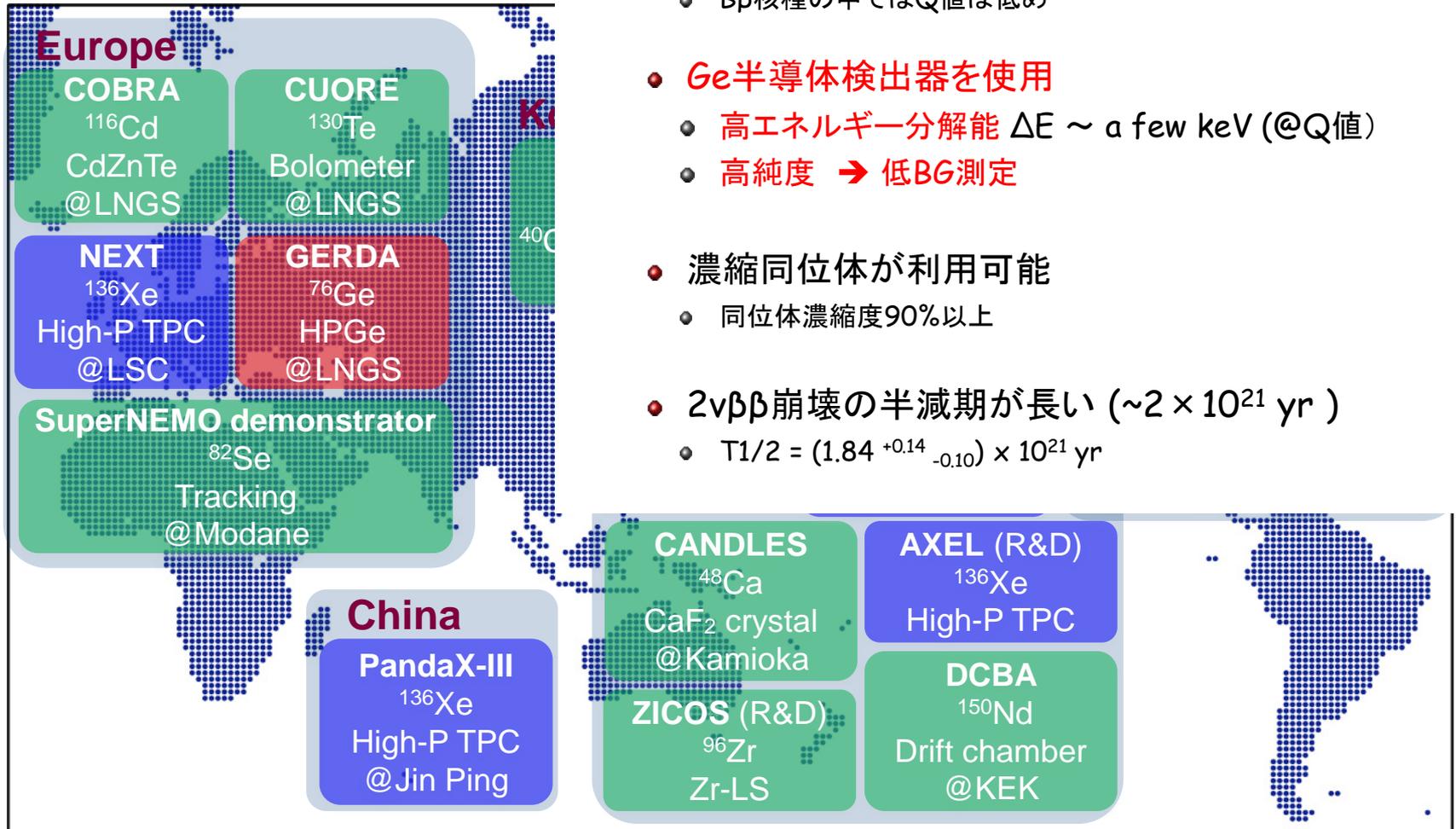
Experiments using ^{76}Ge



Experiments using ^{76}Ge

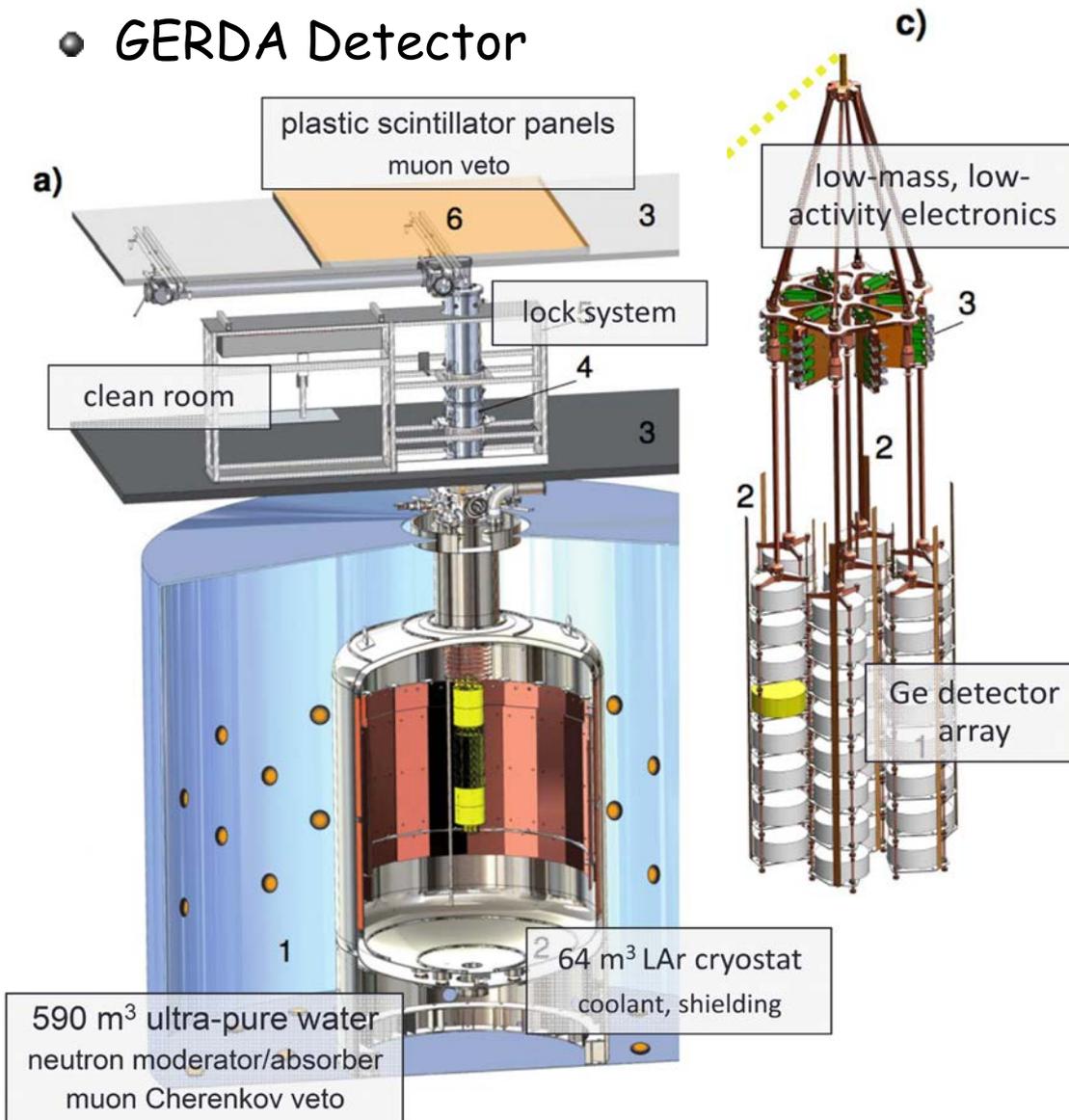
● ^{76}Ge 実験の特徴

- Q値 (2.039MeV)
 - $\beta\beta$ 核種の中ではQ値は低め
- **Ge半導体検出器を使用**
 - 高エネルギー分解能 $\Delta E \sim \text{a few keV}$ (@Q値)
 - 高純度 → 低BG測定
- 濃縮同位体が利用可能
 - 同位体濃縮度90%以上
- $2\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期が長い ($\sim 2 \times 10^{21}$ yr)
 - $T_{1/2} = (1.84^{+0.14}_{-0.10}) \times 10^{21}$ yr



GERDA実験

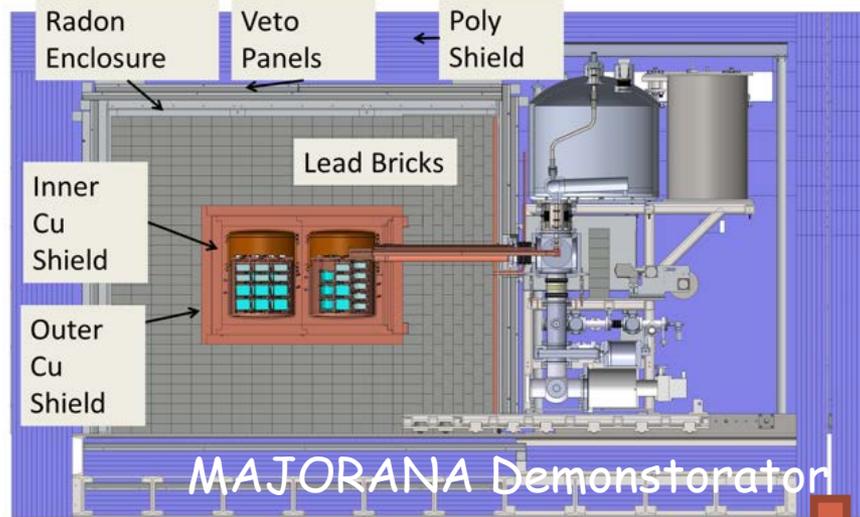
● GERDA Detector



Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2330
Nature 544 (2017) 47

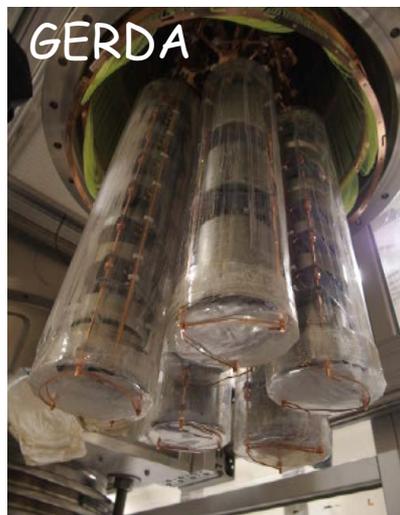
- Gran Sassoで実験中
- ${}^{enr}\text{Ge}$
 - Current setup : 36kg
- Active veto shield
 - 液体Ar中に設置

Ge実験の将来計画



MAJORANA Demonstrator

- Operating @Sanford Lab.
- 44.1 kg of Ge detectors
 - 29.7 kg of 88% enriched ^{76}Ge crystals
 - 14.4 kg of $^{\text{nat}}\text{Ge}$
 - Technology: P-type, point-contact.
- Compact Shield
 - low-background passive Cu and Pb shield



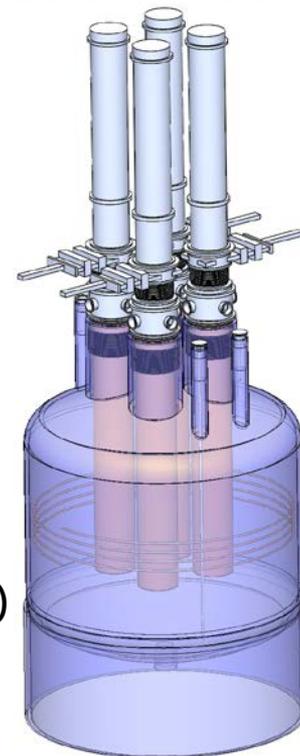
合流

LEGEND First phase:

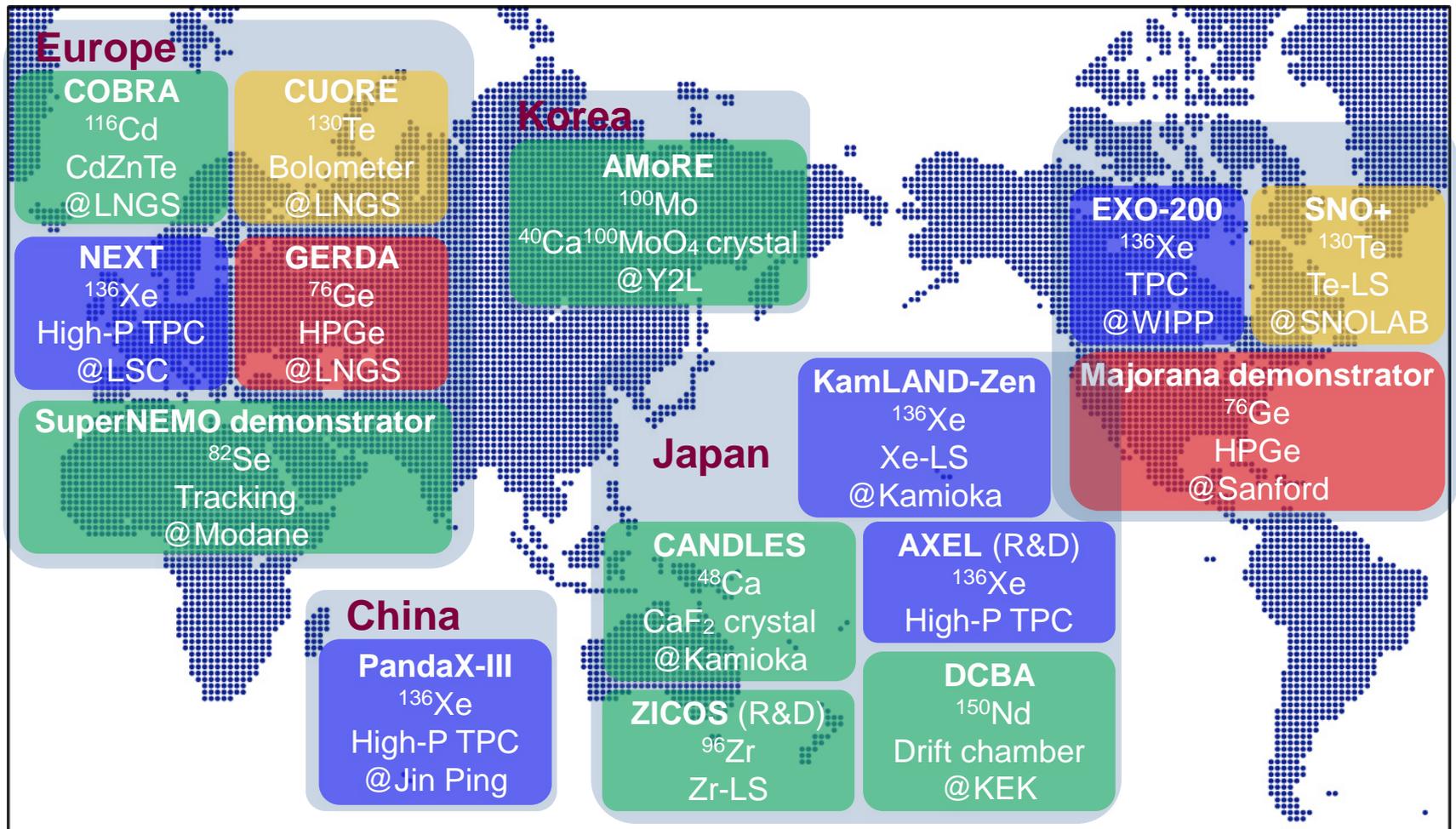
- (up to) 200 kg
- modification of existing GERDA@LNGS
- BG goal (x5 lower) = $0.6 \text{ c / (FWHM} \cdot \text{t} \cdot \text{yr)}$
- Start by 2021

Subsequent stages:

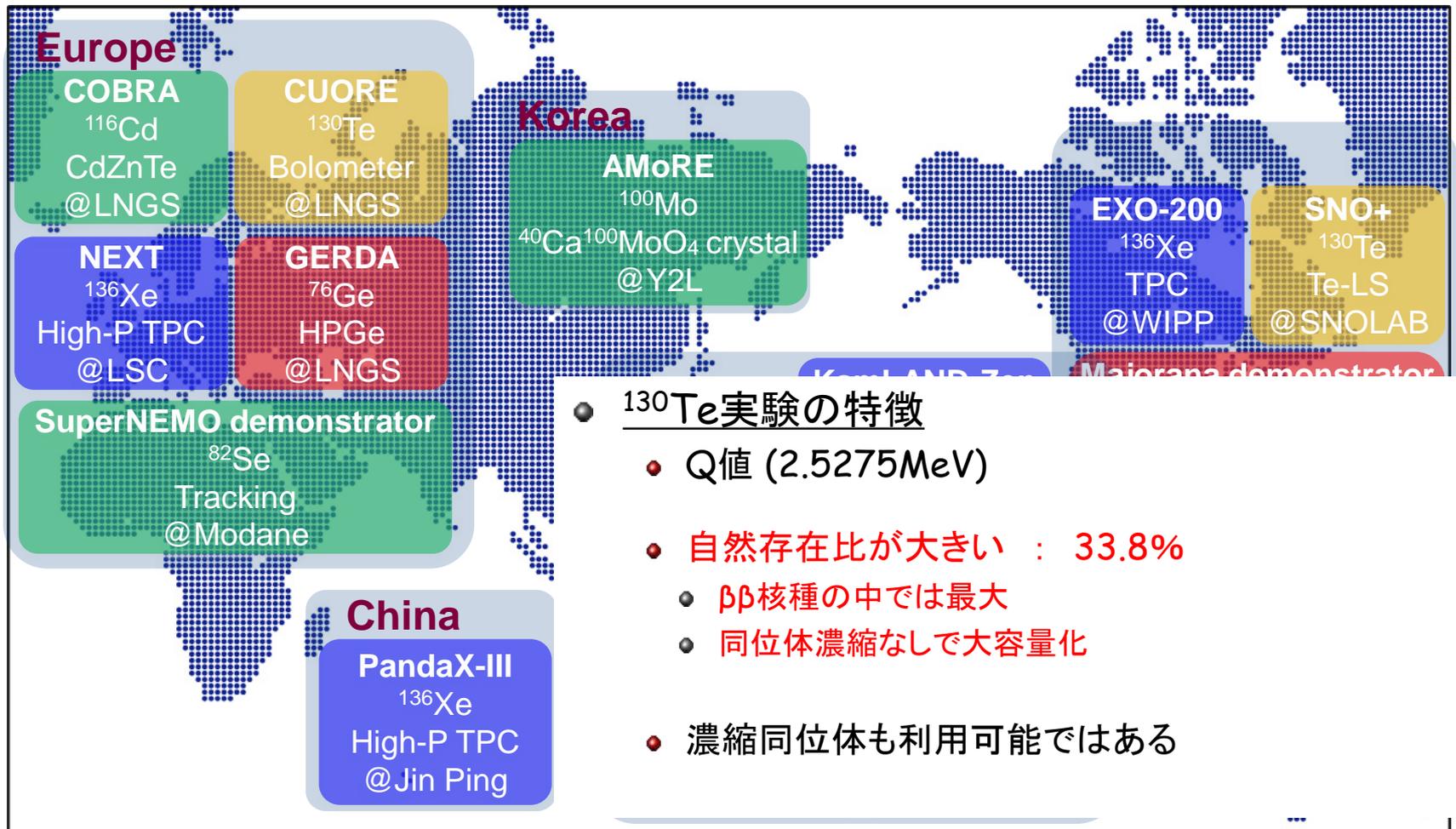
- 1000 kg (staged)
- BG: goal (x30 lower), $0.1 \text{ c / (FWHM} \cdot \text{t} \cdot \text{yr)}$
- Location: TBD



Experiments using ^{130}Te



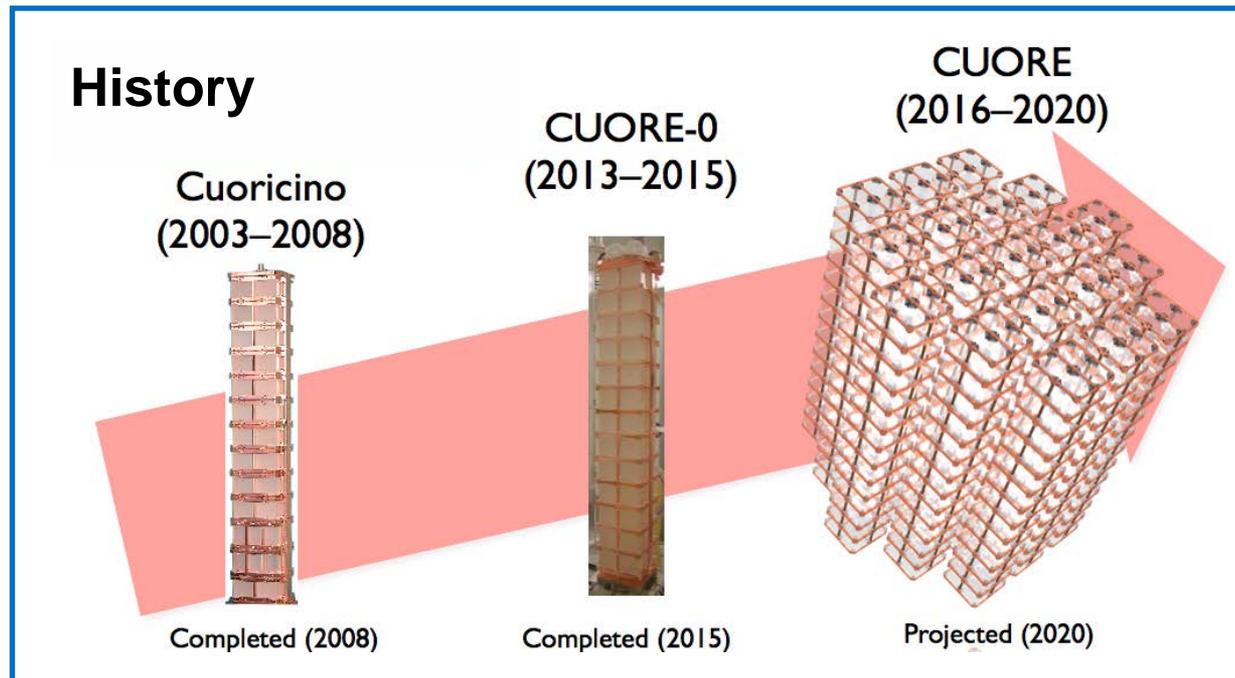
Experiments using ^{130}Te



CUORE実験

● CUORE検出器の概要

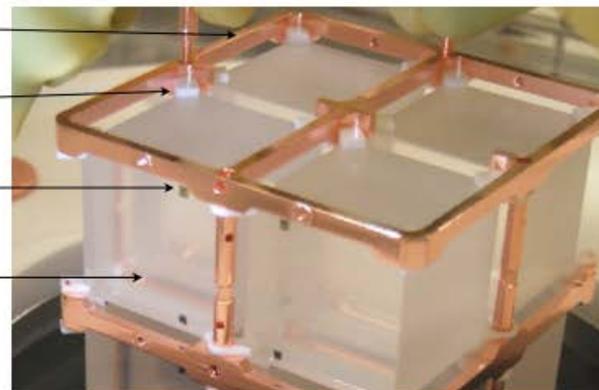
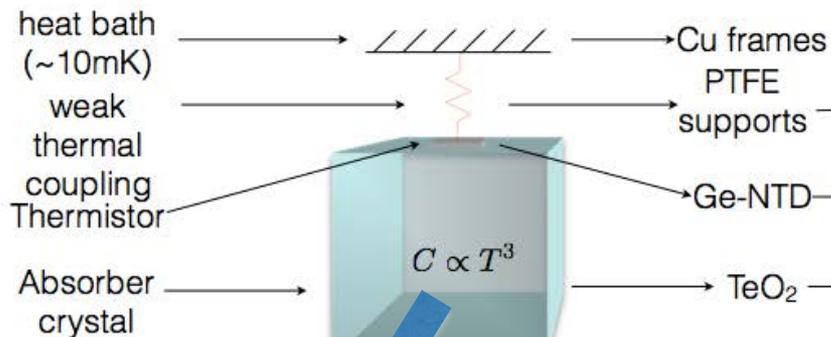
- TeO_2 結晶が988個：742 kg (206 kg of ^{130}Te)
- ~ 1 tonの結晶と遮蔽体(Pb)を極低温(~10 mK)に冷却 → 温度上昇を測定
- 検出器性能
 - $\Delta E = 5 \text{ keV FWHM}$ (平均 10 keV)



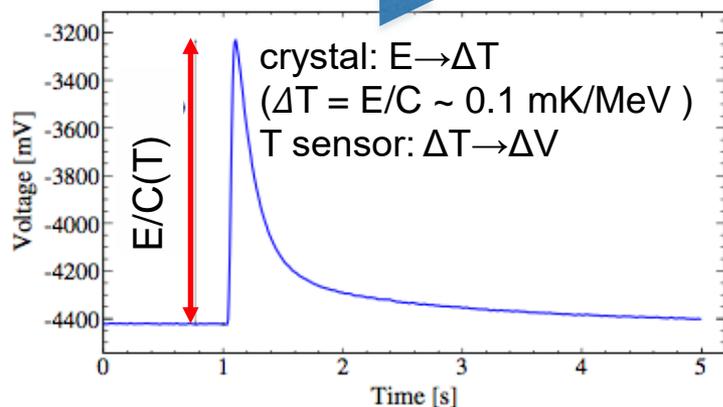
CUORE実験

● CUORE検出器の概要

- TeO_2 結晶が988個：742 kg (206 kg of ^{130}Te)
- ~ 1 tonの結晶と遮蔽体(Pb)を極低温(~10 mK)に冷却 → 温度上昇を測定
- 検出器性能
 - $\Delta E = 5 \text{ keV FWHM}$ (平均 10 keV)



Borometric計測



CUORE実験

● CUORE検出器の概要

- TeO₂結晶が988個：742 kg (206 kg of ¹³⁰Te)
- ~ 1 tonの結晶と遮蔽体(Pb)を極低温(~10 mK)に冷却 → 温度上昇を測定
- 検出器性能
 - $\Delta E = 5 \text{ keV FWHM}$ (平均 10 keV)
 - BG Rate : $10^{-2} \text{ c}/(\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{yr})$
- 予冷 (⁴He gas + PTR冷凍機5台) → ~4K
- 無冷媒式希釈冷凍機 (パワー：3 μW @ 10mK)
- 重量
 - 総重量(右図) ~30 tons
 - 4 K以下の総重量: ~15 tons
 - 50 mK以下の総重量: ~3 tons (Pb, Cu and TeO₂)
- CUORE projected sensitivity
 - $T_{1/2} > 9 \times 10^{25} \text{ yr}$ (5 years, 90% C.L.)



CUORE実験

● CUORE実験の現状

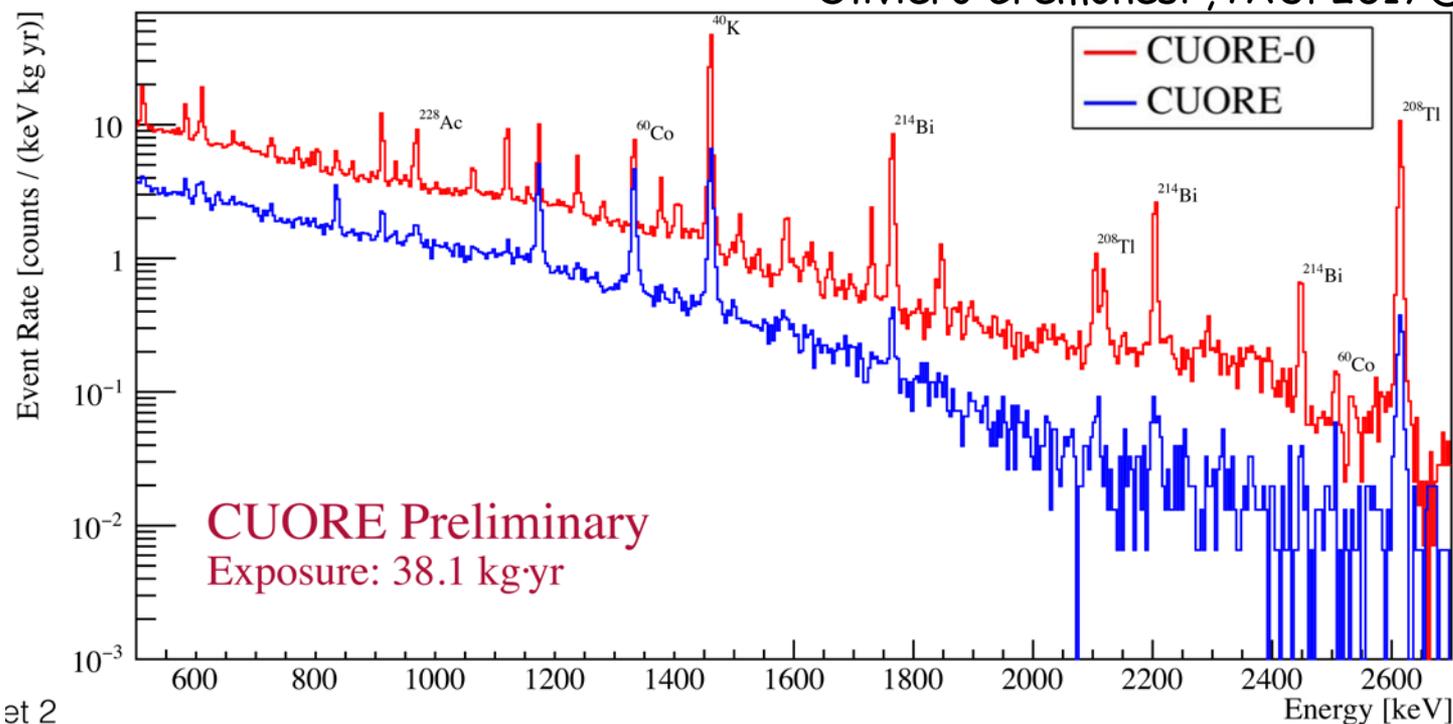
- 2016.8月末: 検出器Construction完了
- 2017.1.27: 検出器温度 ~ 7 mK到達 (← 2016.12.5 室温から冷却開始)
- 2017.4.14 Science operations開始
 - Dataset 2: 2回のCalibrationを挟んで3週間の物理Run (May 4 - June 11)
 - $^{nat}\text{TeO}_2$ exposure: 38.1 kg yr (^{130}Te exposure: 10.6 kg yr)
- 運転状況:
 - 運転温度: 15 mK
 - TeO₂結晶: 984/988が利用可能 (CUORE-0から大きく改善)

CUORE実験

● CUORE実験の現状

- 2016.8月末: 検出器Construction完了
- 2017.1.27: 検出器温度 ~ 7 mK到達 (← 2016.12.5 室温から冷却開始)
- 2017.4.14 Science operations開始
 - Dataset 2: 2回のCalibrationを挟んで3週間の物理Run (May 4 - June 11)
 - $^{nat}\text{TeO}_2$ exposure: 38.1 kg yr (^{130}Te exposure: 10.6 kg yr)

Oliviero Cremonesi ,TAUP2017@Sudbury



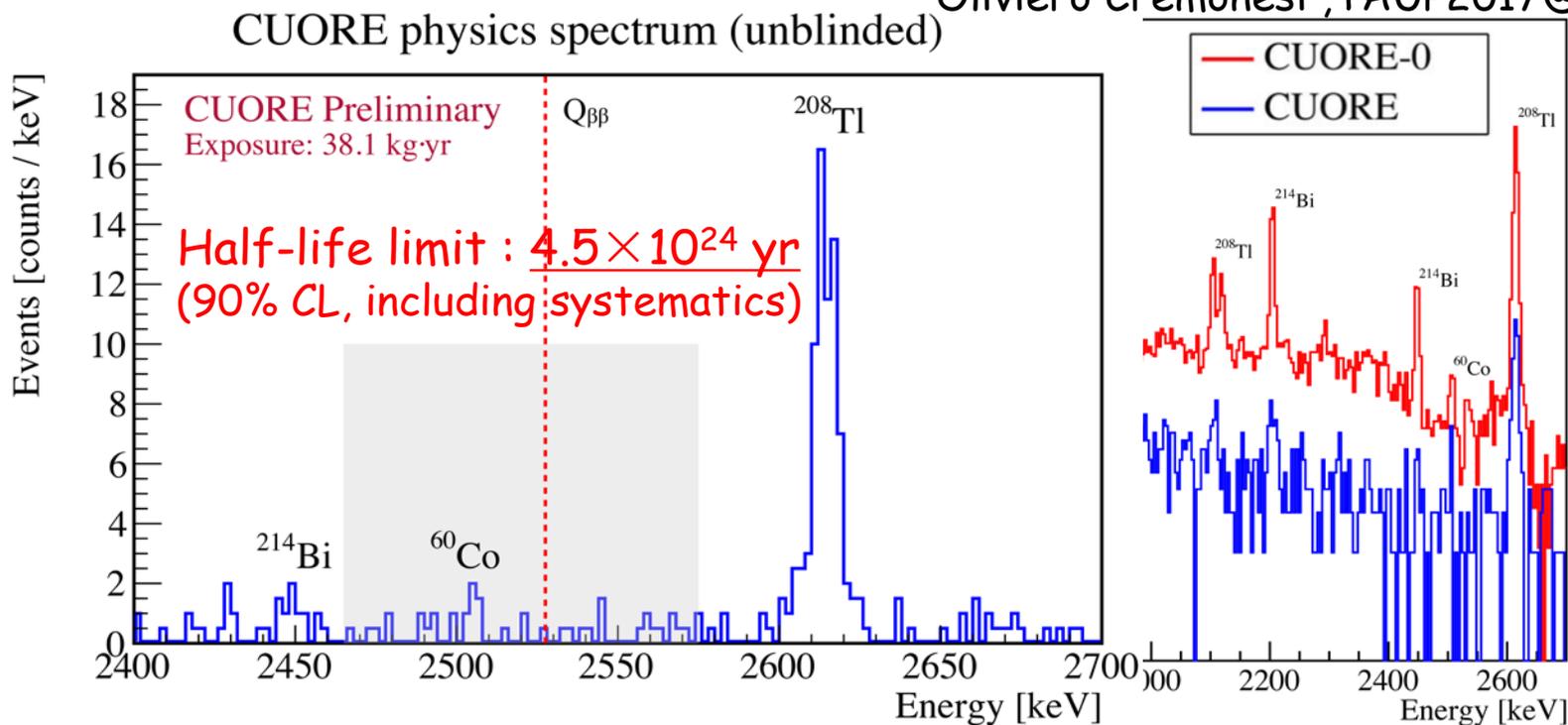
et 2

CUORE実験

● CUORE実験の現状

- 2016.8月末: 検出器Construction完了
- 2017.1.27: 検出器温度 ~ 7 mK到達 (← 2016.12.5 室温から冷却開始)
- 2017.4.14 Science operations開始
 - Dataset 2: 2回のCalibrationを挟んで3週間の物理Run (May 4 - June 11)
 - $^{nat}\text{TeO}_2$ exposure: 38.1 kg yr (^{130}Te exposure: 10.6 kg yr)

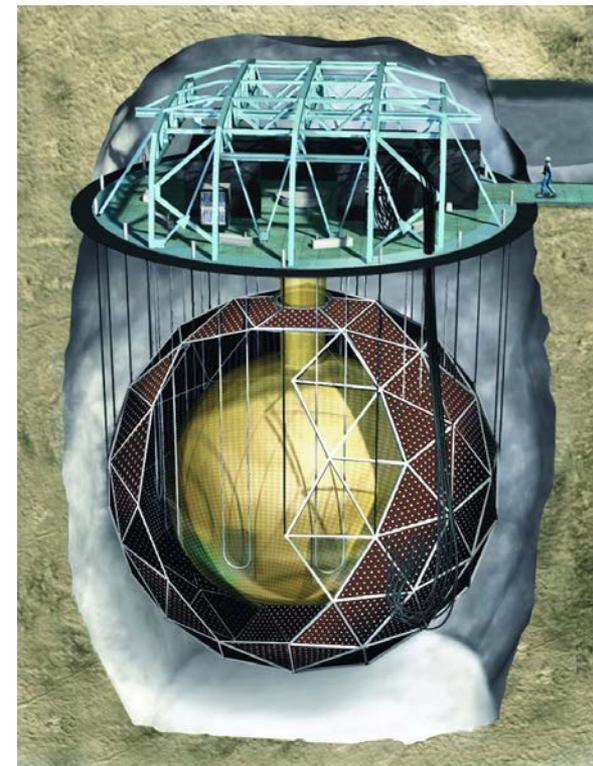
Oliviero Cremonesi, TAUP2017@Sudbury



SNO+実験

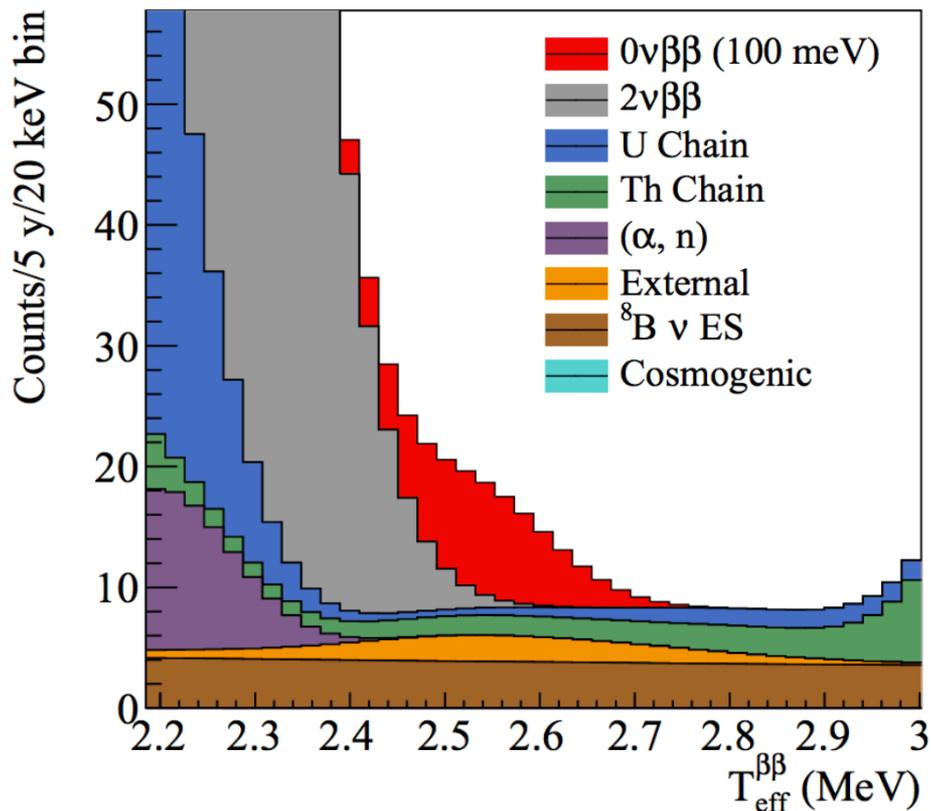
- SNO-Lab. @カナダサドバリー
 - 地下2000 m 世界最深のニュートリノ検出器
 - 宇宙線起因BGが極小 ($^{10,11}\text{C}$ など)
- **液体シンチレータ (LS) 実験**
 - SNO実験の亚克力容器、PMTを再利用
 - 光量 ; 50倍以上
 - 低エネルギーに特化した物理実験が可能
- **3.9トン $^{\text{nat}}\text{Te}$ 溶解LS**
 - 780トンLS (LAB+PPO+Te-ButaneDiol)
 - **0.5% loading \rightarrow 1300 kg ^{130}Te**
 - FV = 3.5 m (20%)
- SNO+の現状
 - LS製造・純化ラインはコミッショニング中
 - Telluriumプラント建設中
 - **$0\nu\beta\beta$ Phaseは2018年末に開始予定**
- SNO+目標感度
 - **2×10^{26} yr (after 5 year, 90% CL)**
 - **$m_{\beta\beta} \approx 40 - 90$ meV**

SNO+実験概念図



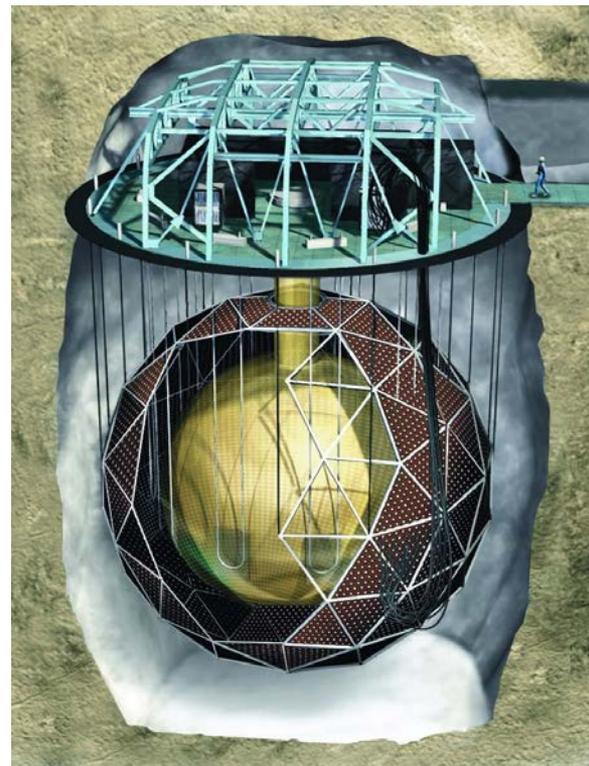
直径12 mの亚克力容器
PMT 9500本
水シールド 1700 ton

SNO+実験



- $0\nu\beta\beta$ Phaseは2018年末に開始予定
- SNO+目標感度
 - 2×10^{26} yr (after 5 year, 90% CL)
 - $m_{\beta\beta} \approx 40 - 90$ meV

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

Experiments using ^{48}Ca

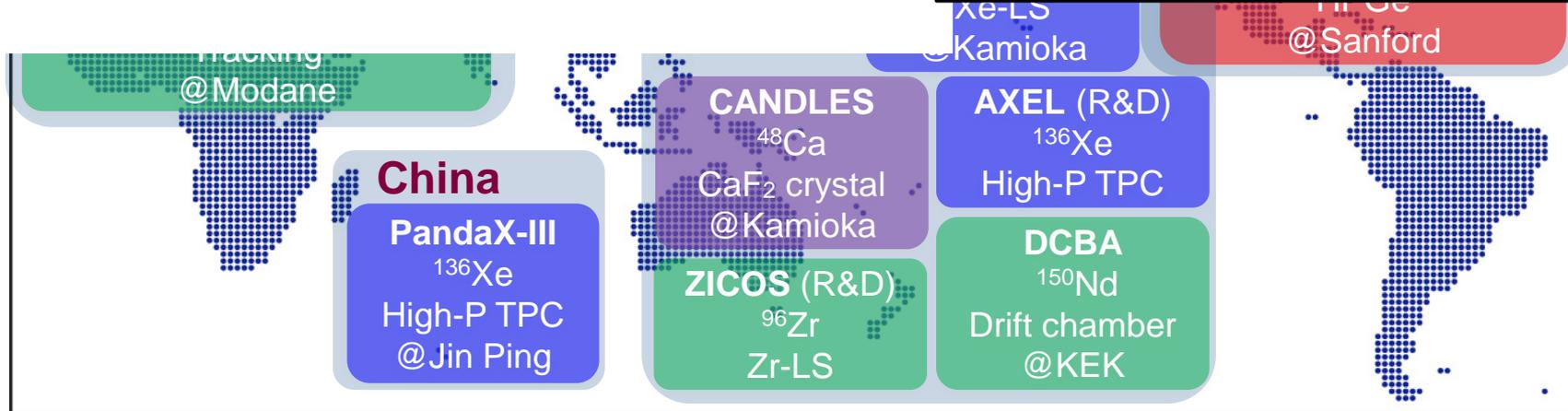
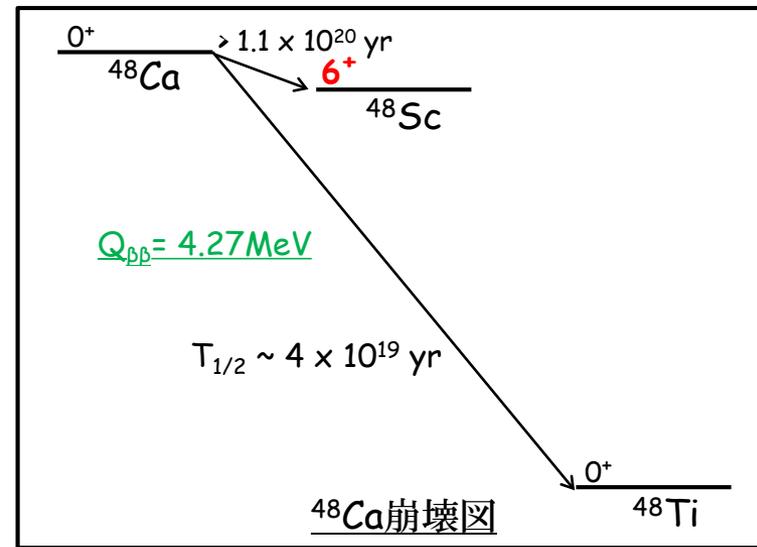
● ^{48}Ca 実験の特徴

● Q値 (4.263MeV)

- $\beta\beta$ 各種の中で最大
- Large phase space factor
- BG耐性が良い
 - γ -ray ; 2.6 MeV (^{208}Tl)
 - β -ray ; 3.3 MeV (^{214}Bi)

● 自然存在比が小さい:0.187%

- 濃縮同位体は極少量(Commercial)、超高価
- Ca原料は安価であるため、濃縮が可能になると飛躍的に感度向上



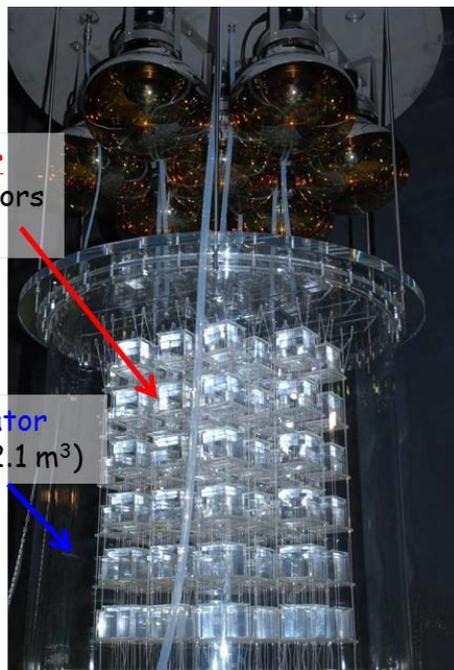
CANDLES Experiment

- CANDLES-III 検出器.を神岡地下にInstall、運転中

Highest Q-valued



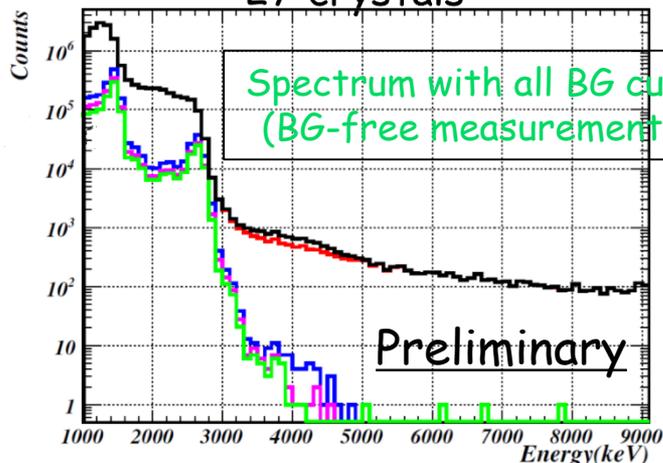
Main detector
CaF₂ scintillators
(305kg)



Liquid scintillator
acrylic tank (2.1 m³)

CANDLE III detector

Physics run in 2016 ~
Energy spectrum (131 days)
27 crystals



- CaF₂ モジュール

- CaF₂(Pure)結晶 96個; 305 kg
- 波長変換層; 280 nm → 420 nm
 - 厚み; 5 mm
 - Mineral Oil+bis-MSB (0.1 g/L)

4π Active shield

- 液体シンチレータ (LS)

- 直径1.37 m × 高さ1.4 m
- 容量: 2.1 m³ (1.65 ton)
- 成分
 - 溶媒; Mineral Oil(80%)+PC(20%)
 - 溶質; PPO (1.0g/L) + bis-MSB (0.1g/L)

- PMTs + ライトパイプ

- 13 inch (側面); × 48本
- 20 inch (上下面); × 14本
- 反射Film: 反射効率 ~93%

- Toward "Background Free Measurement"

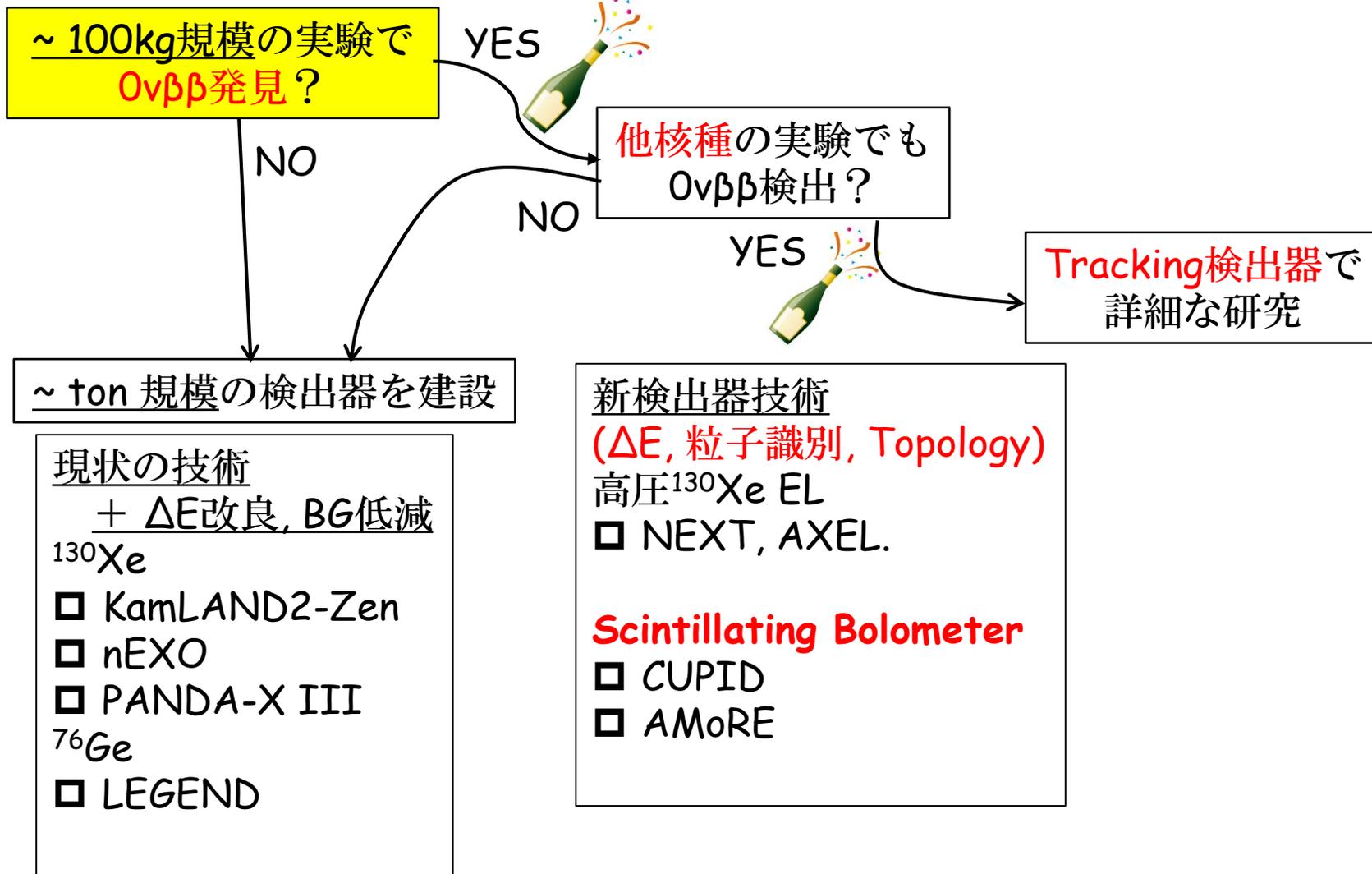
- Designed the shields → finished the construction.
 - Lead Bricks (10 ~ 12 cm thick)
 - Boron loaded sheet
- Number of BG after shield installation estimated
 - Rock : 0.34±0.14 event/year
 - Tank : 0.4±0.2 event/year

Installed in 2016

将来

同様に、個々の実験計画すべて細かく見ていく時間はない

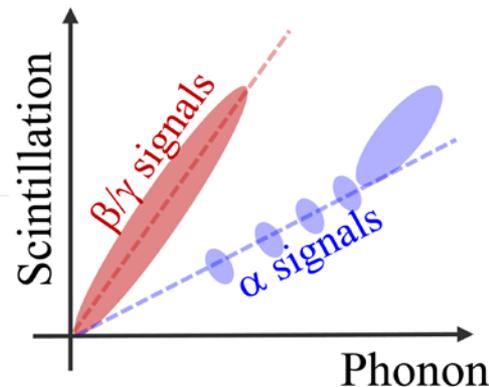
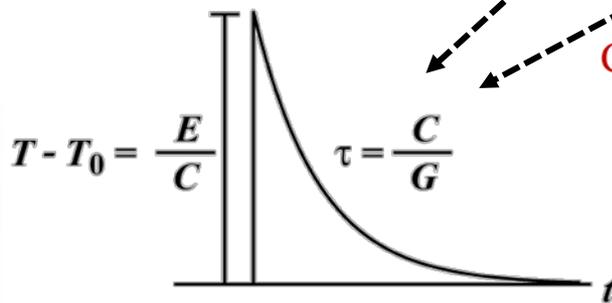
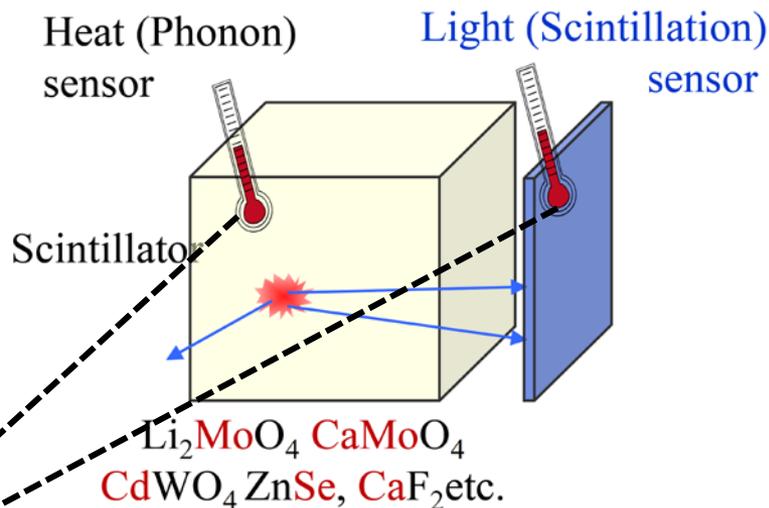
$0\nu\beta\beta$ 探索: 今後の戦略



Scintillating Bolometerの原理

● Scintillating Bolometerの原理

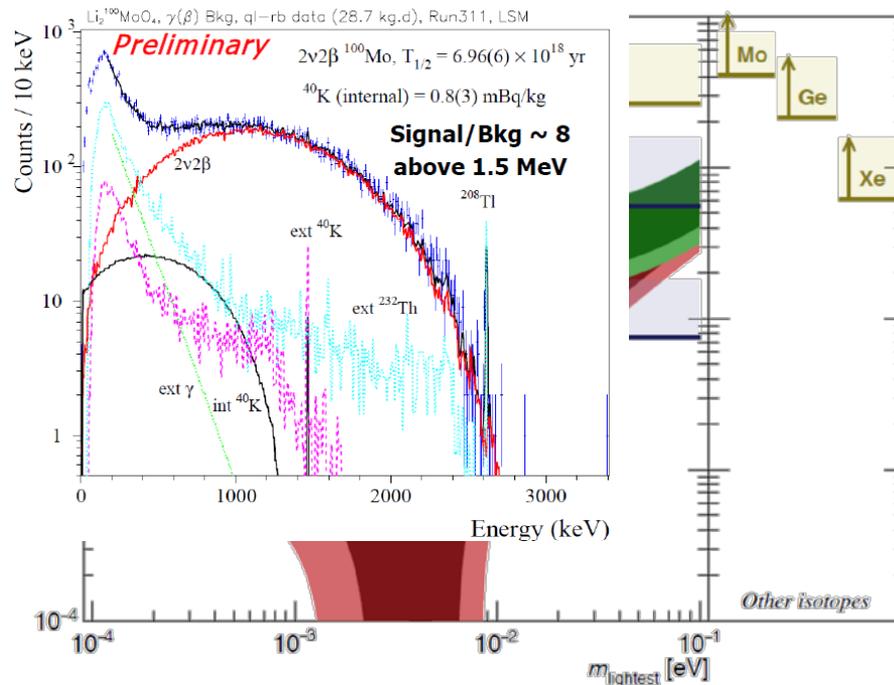
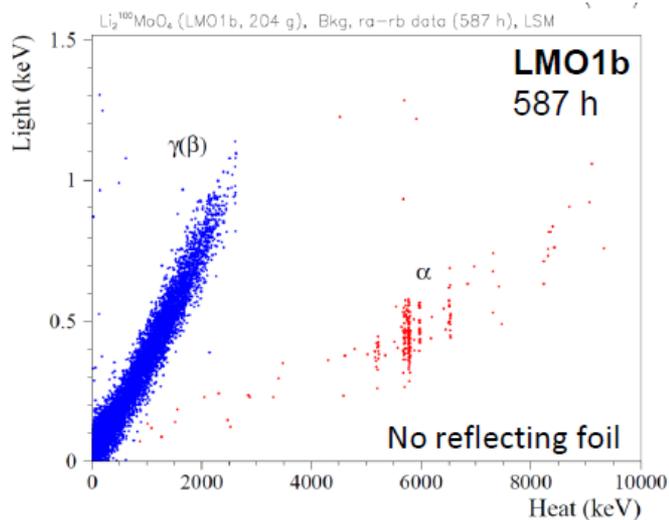
- 熱量に加え、蛍光量も同時に測定することで、蛍光のα線クエンチング効果を用いたα/β粒子識別を行う
- Phonon → 高エネルギー分解能
- Sensor(Thermistor)の選択
 - Thermistors (NTD-Ge)
 - TES (Transition Edge Sensor)
 - MMC (Metallic Magnetic Calorimeter)
 - KID (Kinetic Inductance Device)
 - etc.



CUORE Upgrade : CUPID

● CUORE検出器を改良

- Option1: Scintillating-Bolometer (Zn^{82}Se / $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$)
- Option2: TeO_2 + Light-detector (PI by Cherenkov photon)



● 現在R&Dの最中

- 2018年末までにtonスケールの検出器の可否を検証

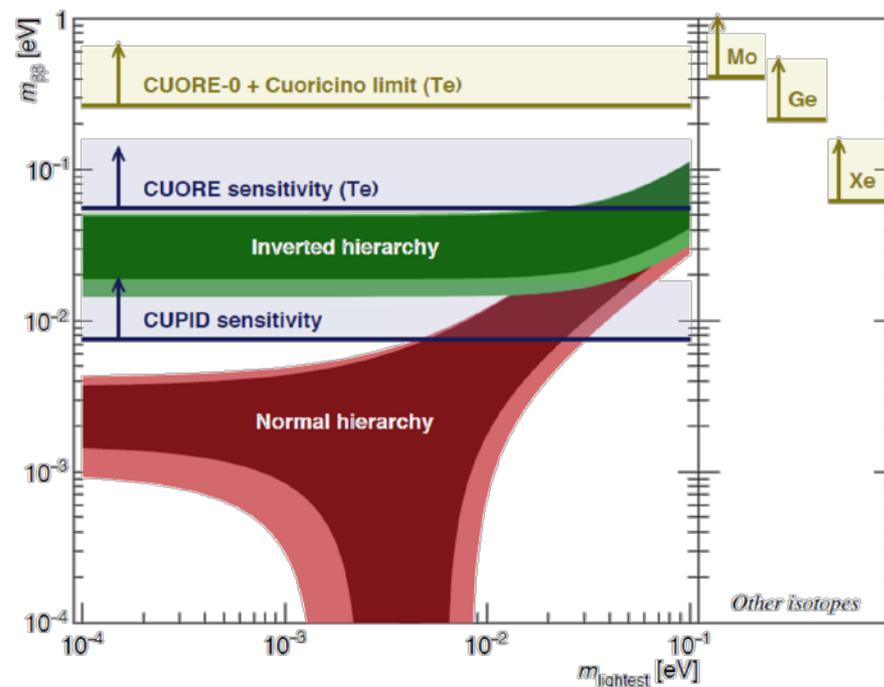
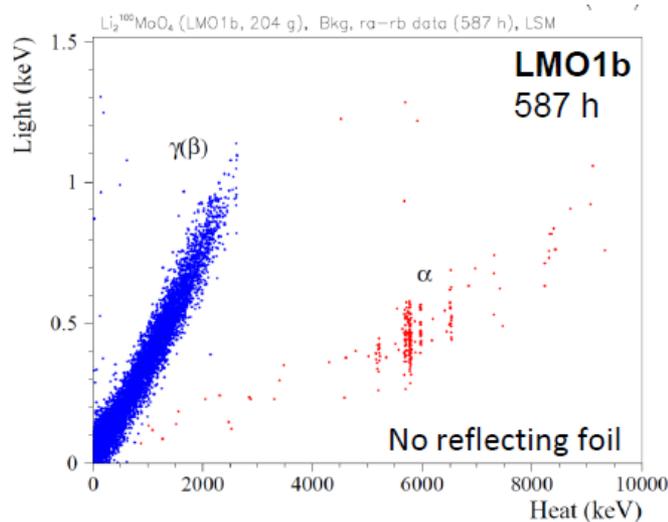
● CUORE終了後にStart (2023年)

- 最終感度 → $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 10\text{--}15$ meV

CUORE Upgrade : CUPID

● CUORE検出器を改良

- Option1: Scintillating-Bolometer (Zn^{82}Se / $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$)
- Option2: TeO_2 + Light-detector (PI by Cherenkov photon)



● 現在R&Dの最中

- 2018年末までにtonスケールの検出器の可否を検証

● CUORE終了後にStart (2023年)

- 最終感度 → $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 10\text{--}15$ meV

AMoRE Advanced Mo based Rare process Experiment

- Site: YangYang地下実験施設 (韓国, 地下700m)
- $\beta\beta$ Isotope: ^{100}Mo (Q値 = 3034 keV, 9.63%)
 - 有望核種の一つ
 - 濃縮同位体も利用可
- 検出器: $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ Scinti-Bolometer検出器
 - ^{40}Ca 高騰 → Another Crystal ?



- Phononセンサー: MMC 高エネルギー一分解能

AMoRE-Polot -2017

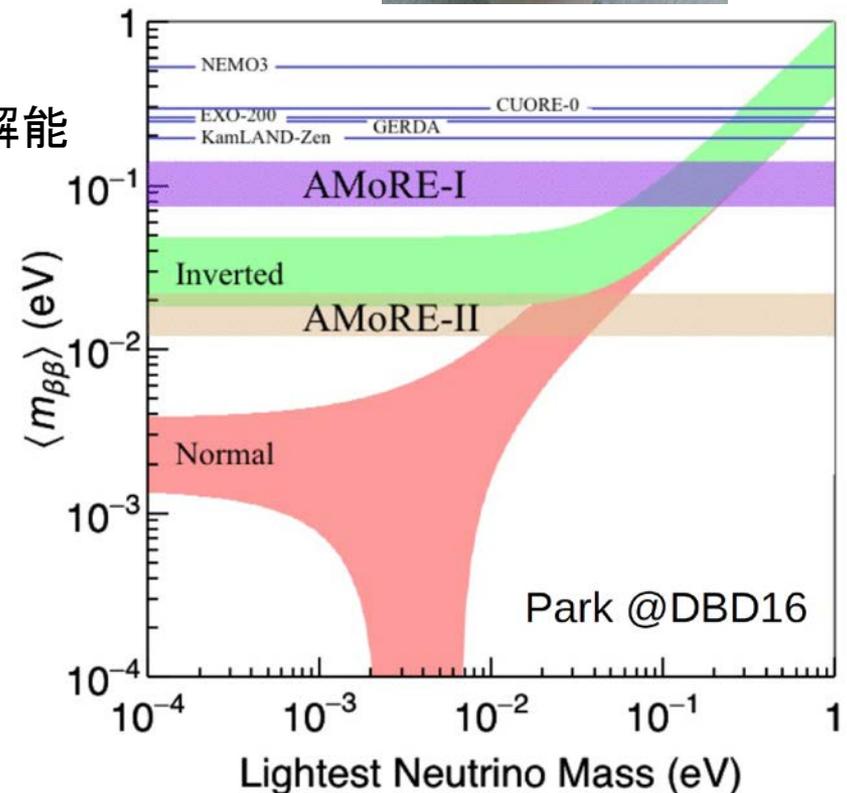
- 1.5kg, $T^{0\nu}_{1/2} > 3 \times 10^{24}$ year,
- $m_{\beta\beta} < 300\sim 900$ meV

AMoRE-I 2017-2019

- 5kg, 10^{-3} cts/(keV·kg·y), 70-140meV

AMoRE-II 2020-2025@新実験室

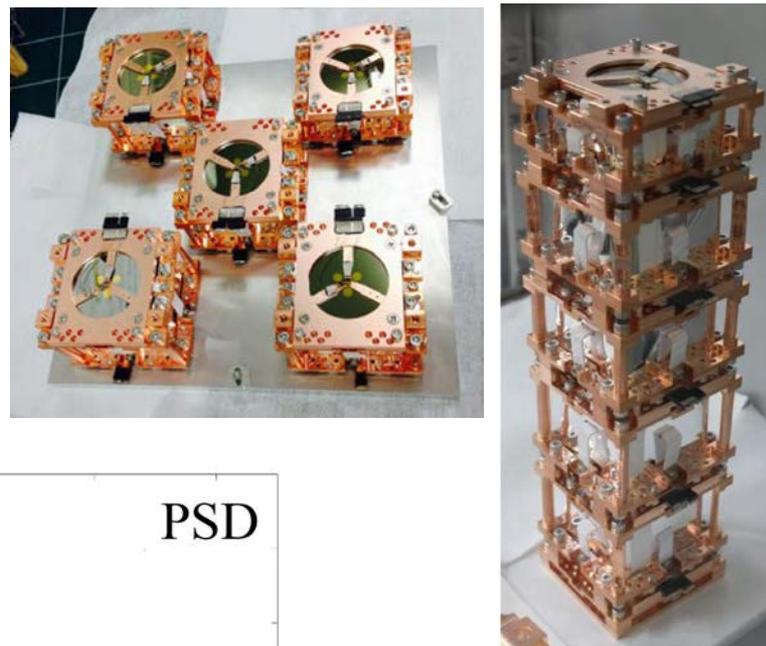
- 200kg, BG= 10^{-4} cts/(keV·kg·y)
- 最終目標値: $m_{\beta\beta} < 12\sim 20$ meV
($T^{0\nu}_{1/2} > 1.1 \times 10^{27}$ year)



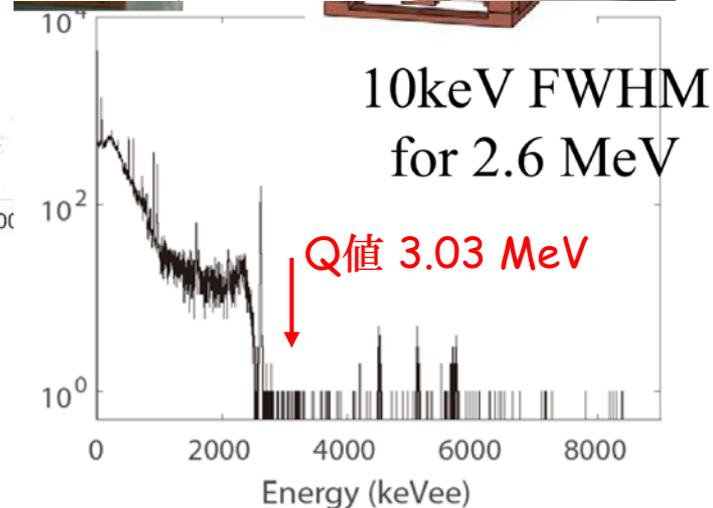
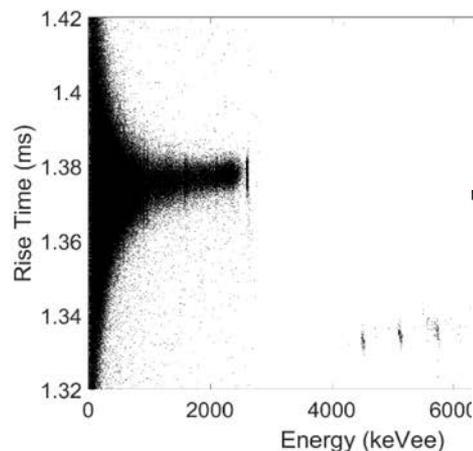
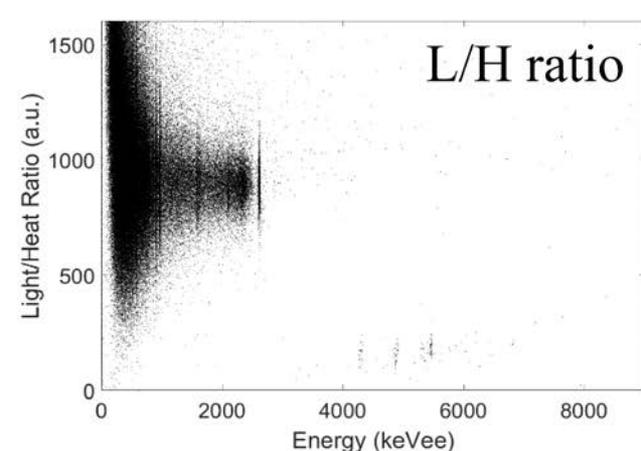
AMoRE実験

● AMoRE実験の現状

- AMoRE Pilot (5 crystal)
- YangYang地下実験室にInstall、運転中.
- Total mass ~ 1.8 kg



Yong-Ham Kim, LTD-17@Kurume



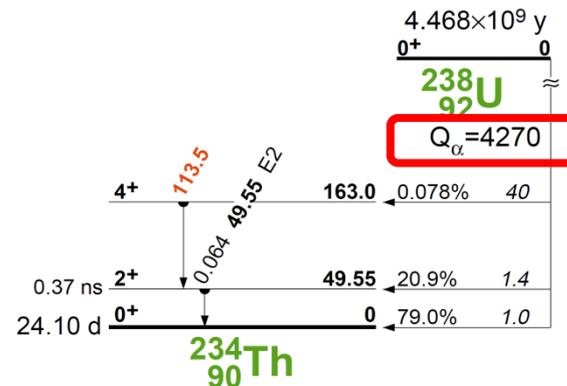
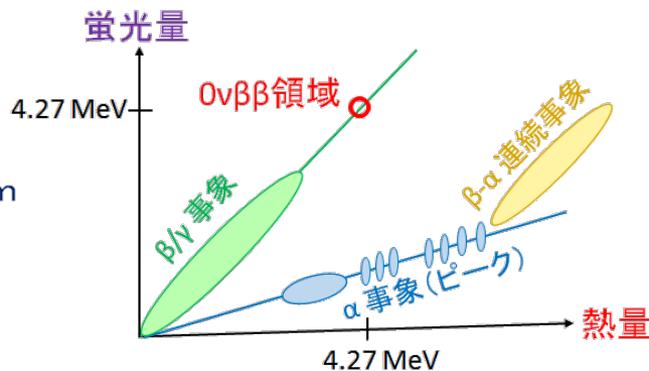
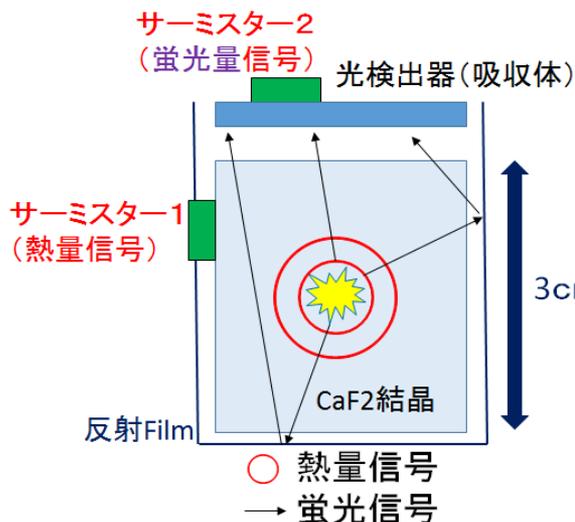
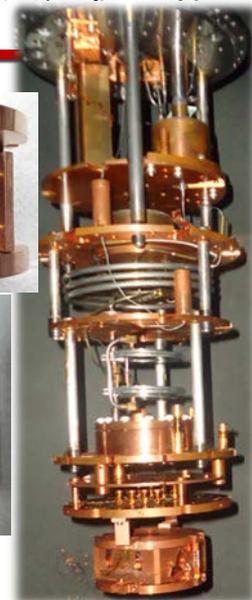
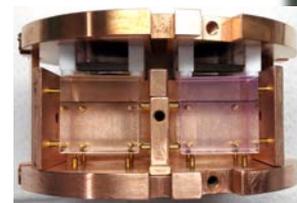
Particle ID : 高分離能

Heat/Lightに加えて、PSDでの分離も可能

CANDLES将来計画

CaF₂熱量蛍光検出器

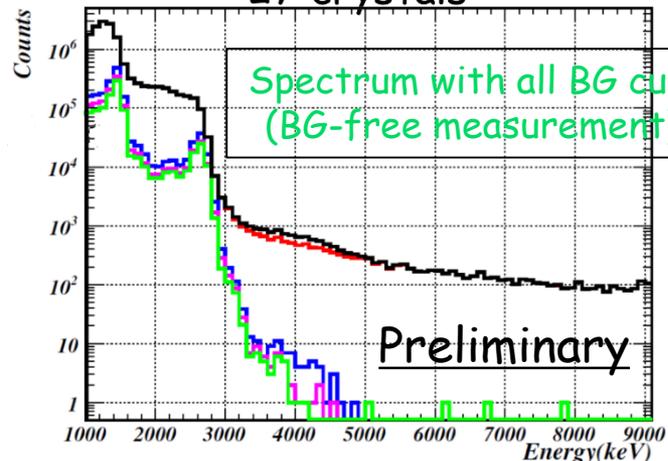
- Inverted階層 → Normal階層領域の探索
 - 2つの改善が必須
 - 高濃縮⁴⁸Caの実現による、トンスケール検出器の実現
 - Energy Resolutionの改善 (2νββ事象によるBGの低減)
- 現在のEnergy測定原理ではEnergy Resolutionの大幅な改善は不可能
 - ➔ ボロメータ開発への挑戦



- 熱量に加え、蛍光量も同時に測定することで、蛍光のα線クエンチング効果を用いたα/β粒子識別を行う
- 主なBackgroundである²³⁸Uのα崩壊事象(Q値=4.27MeV=0νββ崩壊のQ値)を排除可能

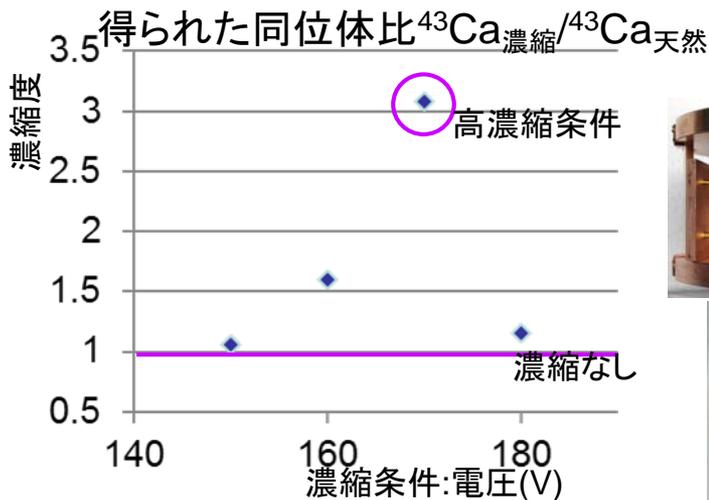
CANDLES将来計画

Physics run in 2016 ~
Energy spectrum (131 days)
27 crystals



高感度化に向けた
バックグラウンド調査
・2016年7月：低BG測定を開始
・BGフリー観測が実現！

^{48}Ca 濃縮



各種濃縮法の開発

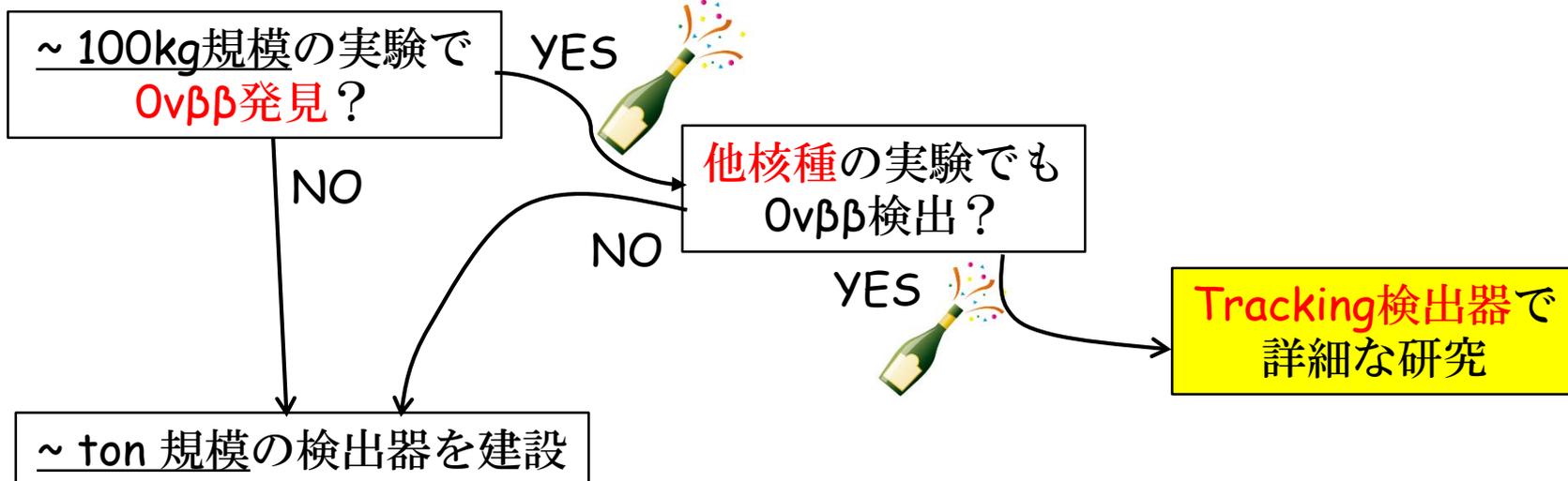
- ・電気泳動法では、
 $^{48}\text{Ca}_{\text{濃縮}} / ^{48}\text{Ca}_{\text{天然}} \sim 6$ 倍を達成
- ・安定運転、大型化に向けた開発

CaF_2 熱量蛍光検出器



- ・地上実験室で開発
- ・希釈冷凍機テスト開始
1Kまでの冷却成功

$0\nu\beta\beta$ 発見後の戦略



$$[T_{1/2}^{0\nu}(\nu)]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 (\langle m_\nu \rangle^2 + C_{\lambda\lambda} \langle \lambda \rangle^2 + C_{\eta\eta} \langle \eta \rangle^2 + C_{m\lambda} \langle m_\nu \rangle \langle \lambda \rangle + C_{\lambda\eta} \langle \lambda \rangle \langle \eta \rangle + C_{m\eta} \langle m_\nu \rangle \langle \eta \rangle)$$

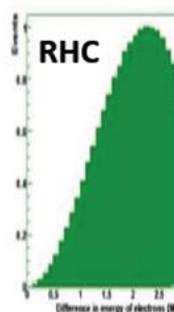
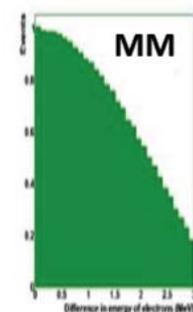
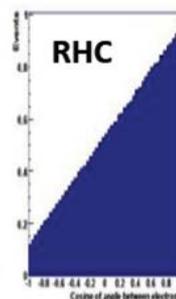
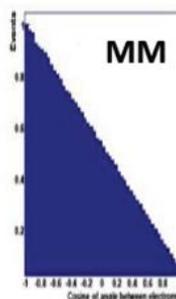
Tracking法の特徴

- 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説明

検出されるエネルギー・角度相関

Angular distribution

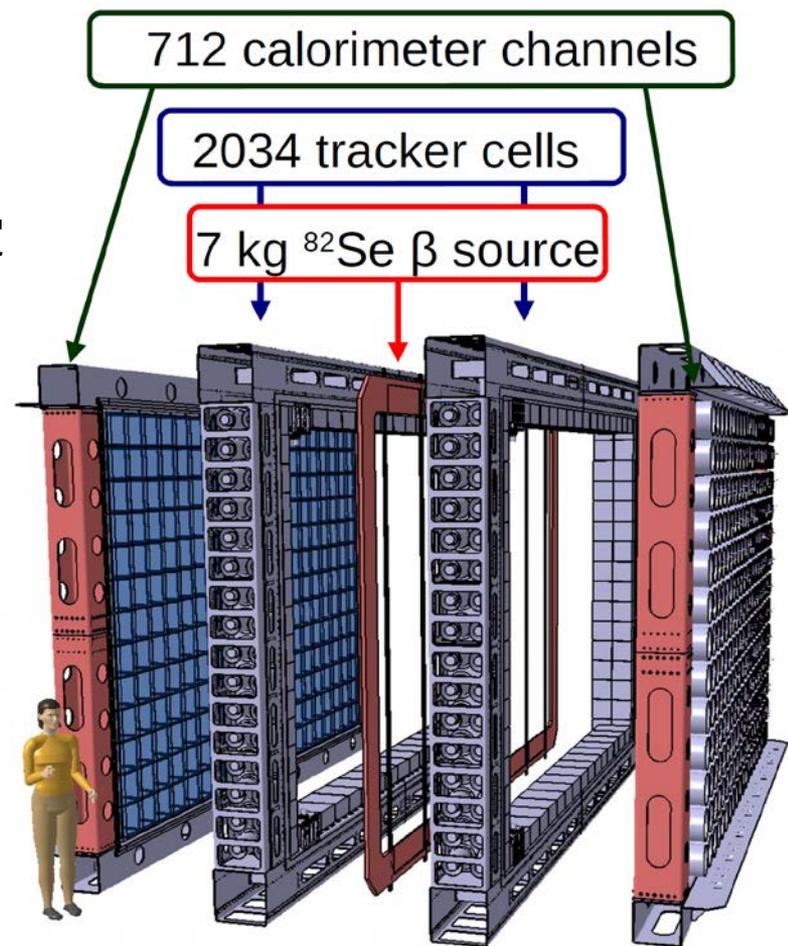
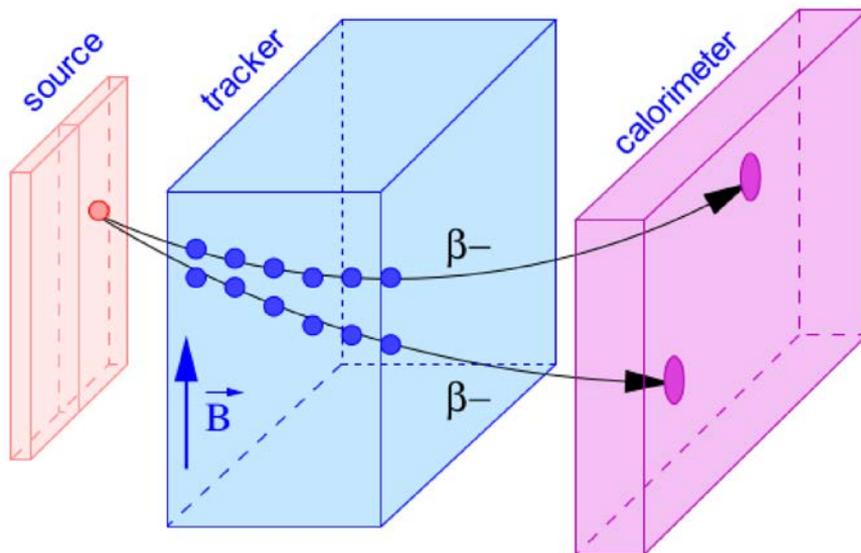
$E_{e_1} - E_{e_2}$ distribution



Super-NEMO実験

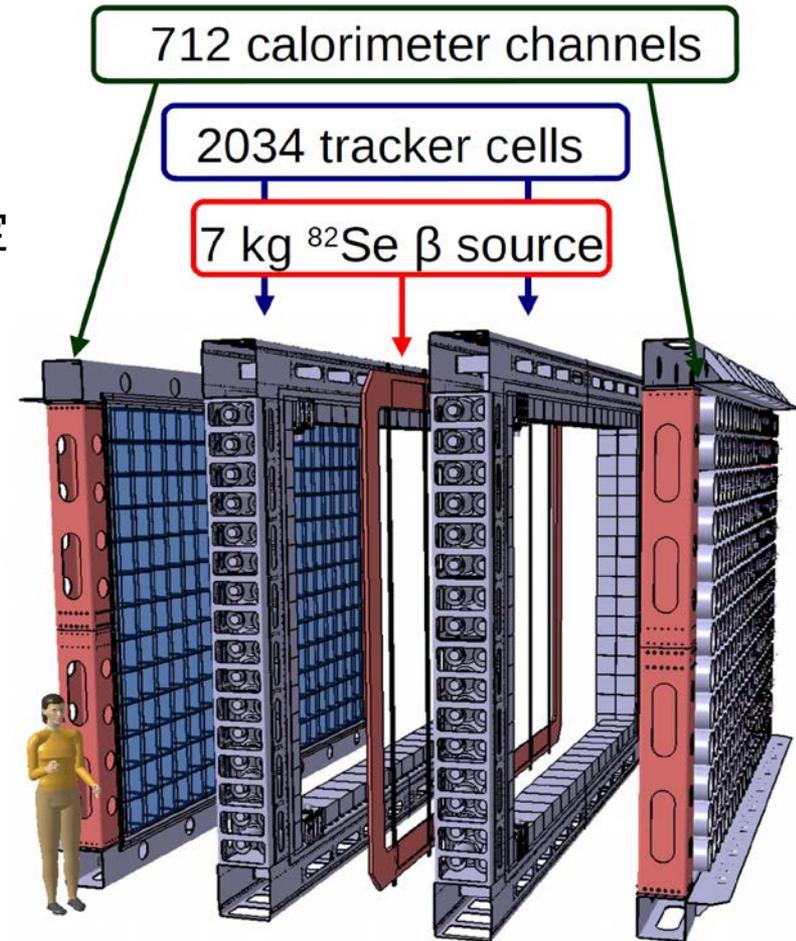
● Tacking detector

- Modane (フランス)
- NEMO-3実験が成功
- ^{82}Se , $\sim 7\text{kg}/\text{module}$ (Total 100kg)
- 2018年に **Demonstrator** が実験開始予定
 - エネルギー分解能: 8% FWHM @1MeV
 - 感度: $4.5 \times 10^{24} \text{ yr}$ (0.20 ~ 0.40 eV)
 - 17.5 kg \cdot yr initial exposure (2.5 yr)



Super-NEMO実験

- Tacking detector
 - Modane (フランス)
 - NEMO-3実験が成功
 - ^{82}Se , $\sim 7\text{kg}/\text{module}$ (Total 100kg)
 - 2018年に **Demonstrator** が実験開始予定
 - エネルギー分解能: 8% FWHM @1MeV
 - 感度: $4.5 \times 10^{24} \text{ yr}$ (0.20 ~ 0.40 eV)
 - 17.5 kg·yr initial exposure (2.5 yr)
 - Super-NEMO
 - 目標到達感度: 10^{26} y ($m_{\beta\beta}$: 50 - 100 meV)



まとめ

- 世界中で測定、R&Dが活発に進行中